

**AVALIAÇÃO DE UM VASO DE PRESSÃO GNV DE AÇO REFORÇADO  
POR EPÓXI E FIBRA DE VIDRO**

**RENATA DE AQUINO MIRANDA SALES**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**FEVEREIRO – 2016**

# **AVALIAÇÃO DE UM VASO DE PRESSÃO GNV DE AÇO REFORÇADO POR EPÓXI E FIBRA DE VIDRO**

**RENATA DE AQUINO MIRANDA SALES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Ph.D. Eduardo Atem de Carvalho

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO – 2016**

# AVALIAÇÃO DE UM VASO DE PRESSÃO GNV DE AÇO REFORÇADO POR EPÓXI E FIBRA DE VIDRO

**RENATA DE AQUINO MIRANDA SALES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Comissão Examinadora:

---

Prof. José Antônio Maciel Pereira (D.Sc., Engenharia e Ciências dos Materiais) - FEMASS

---

Prof. Herval Ramos Paes Junior (D.Sc., Engenharia e Ciências dos Materiais) – LAMAV- UENF

---

Prof. Polyana Borges Dias (D.Sc., Engenharia e Ciências dos Materiais) - IFF

---

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph. D., Engenharia Mecânica)- LAMAV-UENF  
(Orientador)

---

Dedico este trabalho a minha família e amigos que sempre me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força e saúde para vencer mais uma etapa em minha vida. Ao meu orientador Prof. Eduardo Atem de Carvalho, pela oportunidade, e confiança referente ao presente trabalho. Aos membros da comissão avaliadora. A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em especial o programa de Pós-Graduação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo financeiro.

Muito obrigada a todos.

## Sumário

|                                                                 |             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>                                  | <b>VIII</b> |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>                                  | <b>XII</b>  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>                                   | <b>XIII</b> |
| <b>RESUMO.....</b>                                              | <b>XV</b>   |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                            | <b>XVI</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>                             | <b>17</b>   |
| 1.1 Aspectos Gerais.....                                        | 17          |
| 1.2 Objetivos .....                                             | 19          |
| 1.3 Justificativas.....                                         | 19          |
| 1.3.1 Importância Científica .....                              | 19          |
| 1.3.2 Importância Tecnológica.....                              | 19          |
| 1.3.3 Importância Econômica.....                                | 20          |
| <b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                  | <b>21</b>   |
| 2.1 Tipos de Falhas .....                                       | 21          |
| 2.2 Tensões Mecânicas .....                                     | 23          |
| 2.3 Vaso de Pressão.....                                        | 23          |
| 2.3.1 Normas e Códigos .....                                    | 24          |
| 2.3.2 Projetos de vaso de pressão para GNV.....                 | 24          |
| 2.3.3 Tensões em Vasos de Pressão Cilíndrico .....              | 28          |
| 2.4 Vigas Compostas.....                                        | 30          |
| 2.5 Comportamento Tensão Deformação .....                       | 31          |
| 2.6 Mecânica da Fratura .....                                   | 35          |
| 2.6.1 Fratura em bi-material.....                               | 36          |
| 2.7 Efeito de relaxamento da resina epóxi .....                 | 36          |
| 2.8 Fadiga.....                                                 | 37          |
| 2.8.1 Fadiga em bi-material .....                               | 40          |
| 2.9 Concentrador de tensões.....                                | 40          |
| 2.9.1 Estado plano de tensões em problemas bidimensionais ..... | 42          |
| 2.10 Elementos Finitos .....                                    | 43          |
| 2.10.1 Formato dos Elementos.....                               | 43          |
| 2.11 Compósitos .....                                           | 44          |
| 2.11.1 Comportamento Mecânico dos Compósitos .....              | 45          |
| 2.11.2 Análise de Falhas em Materiais Compósitos .....          | 47          |

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.11.3 Matriz polimérica.....                                              | 48        |
| 2.11.4 Resina de Epóxi.....                                                | 49        |
| 2.11.5 Reforço .....                                                       | 50        |
| 2.11.6 Fibra de Vidro .....                                                | 51        |
| 2.11.7 Compósitos Tipo Laminado .....                                      | 53        |
| 2.11.8 Compósitos Estruturais Tipo Painéis- Sanduíche .....                | 53        |
| 2.12 Propriedades do Aço 4130.....                                         | 54        |
| <b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                              | <b>56</b> |
| 3.1 Software Utilizado .....                                               | 56        |
| 3.2 Geometria do Componente / Modelo de Análise para o MEF .....           | 56        |
| 3.3 Características do cilindro/ Propriedades do material .....            | 57        |
| 3.4 Definição do Elemento / Estado de Tensão .....                         | 59        |
| 3.5 Condições de Contorno .....                                            | 60        |
| 3.6 Critério de Convergência .....                                         | 60        |
| 3.7 Casos Estudados .....                                                  | 60        |
| <b>CÁPITULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                             | <b>61</b> |
| 4.1 Avaliação do Modelo.....                                               | 61        |
| 4.1.1 Estudo das Tensões na Parede do Semicírculo Íntegro .....            | 61        |
| 4.1.2 Estudo das Tensões na Parede do Semicírculo com Descontinuidade..... | 64        |
| 4.1.2.1 Tensão Tangencial .....                                            | 61        |
| 4.1.2.2 Tensões Radial .....                                               | 70        |
| <b>CAPÍTULO 5- CONCLUSÕES.....</b>                                         | <b>75</b> |
| <b>CAPÍTULO 6- SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>                     | <b>77</b> |
| <b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                       | <b>78</b> |
| <b>APÊNDICE.....</b>                                                       | <b>83</b> |
| Apêndice I .....                                                           | 83        |
| Apêndice II .....                                                          | 83        |
| Apêndice III .....                                                         | 84        |
| Apêndice IV.....                                                           | 172       |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1:</b> Modos de abertura de trincas. Modo I (abertura mais comum), Modo II (deslizamento ou cisalhamento), Modo III (rascamento) (Tada et al,2000). ....                                                                                       | 17 |
| <b>Figura 1.2:</b> Imagem representativa da realização do reparo em ambiente aquático (Costa, 2010).....                                                                                                                                                   | 18 |
| <b>Figura 1.3:</b> Exemplo de dano e reparo em um duto (Costa,2010).....                                                                                                                                                                                   | 18 |
| <b>Figura 1.4:</b> Vaso de Pressão de GNV (a) constituído de aço;(b) constituído de aço com reforço anular.....                                                                                                                                            | 19 |
| <b>Figura 2.1:</b> Modelo esquematizado do cilindro tipo 1. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (Villena,2004). ....                                                                                                                                  | 26 |
| <b>Figura 2.2:</b> Modelo esquematizado do cilindro tipo 2. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (villena,2004). ....                                                                                                                                  | 27 |
| <b>Figura 2.3:</b> Modelo esquematizado do cilindro tipo 3. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (Villena,2004). ....                                                                                                                                  | 27 |
| <b>Figura 2.4:</b> Modelo esquematizado do cilindro tipo 4. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (Villena,2004). ....                                                                                                                                  | 28 |
| <b>Figura 2.5:</b> Representação da seções do cilindro e distribuição de tensões: (a)Seção Transversal do cilindro submetido a tensões internas e externas; (b) Distribuição da tensão tangencial;(c) Distribuição da tensão radial (Shigley, 2008).. .... | 28 |
| <b>Figura 2.6:</b> Esquema de pressões exercidas no aço.....                                                                                                                                                                                               | 29 |
| <b>Figura 2.7:</b> Diagrama esquemático tensão-deformação correspondente à deformação elástica para ciclos de carga e descarga (Callister,2012). ....                                                                                                      | 33 |
| <b>Figura 2.8:</b> Comparação do comportamento elástico de um aço e do alumínio (Adaptada de Askeland e Phulé,2003).....                                                                                                                                   | 34 |
| <b>Figura 2.9:</b> Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando um comportamento elástico não-linear (Callister, 2012). ....                                                                                                                           | 34 |
| <b>Figura 2.10:</b> Cilindros com entalhe interno (a) cilindro de aço, (b) cilindro de alumínio com reforço de compósito (Su e Bhuyan, 1999). ....                                                                                                         | 36 |
| <b>Figura 2.11:</b> Comportamento gráfico das cargas aplicadas para os diferentes tipos de materiais (a) epóxi e (b) fibra de vidro. ....                                                                                                                  | 37 |
| <b>Figura 2.12:</b> Sequência das fases distintas da vida à fadiga e seus fatores relevantes (Schijve, 2001).....                                                                                                                                          | 38 |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.13:</b> Efeito da concentração de tensões devido à mudança na seção transversal (Hibbeler,2010).                                                                               | 41 |
| <b>Figura 2.14:</b> Modelo de elemento 2D e quantidade de nós (a) geometria linear, (b) isoparamétricos.                                                                                   | 43 |
| <b>Figura 2.15:</b> Malha com elementos de geometria diferente.                                                                                                                            | 44 |
| <b>Figura 2.16:</b> (a) volume representativo equivalente a um material homogêneo; (b) Estrutura final substituído por um material equivalente (Adaptado de Barbero, 1999).                | 46 |
| <b>Figura 2.17:</b> Diferentes níveis de análise em materiais compósitos (Adaptado de Daniel e Ishai, 2006).                                                                               | 47 |
| <b>Figura 2.18:</b> Tipos de rupturas ocorrentes em uma estrutura laminar em sandwich (adaptado de Gay, Hoa e Tsai ,2003).                                                                 | 48 |
| <b>Figura 2.19:</b> Exemplo do grupo epoxídico (Mallick,2007).                                                                                                                             | 50 |
| <b>Figura 2.20:</b> Esquema de classificação do reforço.                                                                                                                                   | 51 |
| <b>Figura 2.21:</b> Empilhamento das camadas (DNV,2003).                                                                                                                                   | 53 |
| <b>Figura 2.22:</b> Exemplo de Painel Sanduíche ( DNV,2003).                                                                                                                               | 54 |
| <b>Figura 3.1:</b> Esquema do Funcionamento do Método de Elementos Finito (Rao,1999).                                                                                                      | 56 |
| <b>Figura 3.2:</b> Geometria e as divisões nas malhas dos vasos de tipo 1 (a) e tipo 2 (b) .                                                                                               | 57 |
| <b>Figura 4.1:</b> Imagem representativa de um cilindro íntegro de bi-material (parede fina). A escala mostra a análise de tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ),retirado do software.     | 61 |
| <b>Figura 4.2:</b> Imagem representativa de um cilindro íntegro de bi-material (parede espessa). A escala mostra a análise de tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ) ,retirado do software. | 62 |
| <b>Figura 4.3:</b> Representação gráfica de tensão tangencial ao longo da espessura do cilindro de parede fina de bi-material                                                              | 62 |
| <b>Figura 4.4:</b> Representação gráfica de tensão radial ao longo da espessura do cilindro de parede fina de bi-material.                                                                 | 63 |
| <b>Figura 4.5:</b> Representação gráfica de tensão tangencial ao longo da espessura do cilindro de parede espessa de bi-material.                                                          | 63 |
| <b>Figura 4.6:</b> Representação gráfica de tensão radial ao longo da espessura do cilindro de parede espessa de bi-material.                                                              | 63 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 4.7:</b> Semicirculo de parede fina de aço. Imagem ampliada da tensão na região do entalhe com profundidade de 4,42. ....                                                                                                                                                                                                                                      | 65 |
| <b>Figura 4.8:</b> Representação das diferentes profundidades para tensão sigma $\theta$ do MEF feita no cilindro de bi-material com parede fina. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93.....     | 65 |
| <b>Figura 4.9:</b> Representação das diferentes profundidades para tensão sigma $\theta$ do MEF feita no cilindro de aço com parede fina. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93.....             | 66 |
| <b>Figura 4.10:</b> Representação das diferentes profundidades para tensão sigma $\theta$ do MEF feita no cilindro de bi-material com parede espessa. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93..... | 66 |
| <b>Figura 4.11:</b> Representação das diferentes profundidades para tensão sigma $\theta$ do MEF feita no cilindro de aço com parede espessa. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93.....         | 67 |
| <b>Figura 4.12:</b> Representação gráfica para as diferentes distribuição de tensão tangencial ao longo da espessura da parede das geometrias em estudo com suas diferentes descontinuidades diferentes descontinuidades. Gráfico (a) cilindro de aço de parede fina; (b) cilindro de aço de parede espessa.....                                                         | 69 |
| <b>Figura 4.13:</b> Representação gráfica para as diferentes distribuição de tensão tangencial ao longo da espessura da parede das geometrias em estudo com suas diferentes descontinuidades diferentes descontinuidades. Gráfico (a) cilindro de bi-material parede fina; (b) cilindro de bi-material parede espessa.....                                               | 69 |
| <b>Figura 4.14:</b> Distribuição gráfica da tensão radial ao longo da espessurada da parede fina do cilindro de aço, com profundidade do entalhe de (a) 4,42 e (b) 6,93.                                                                                                                                                                                                 | 71 |
| <b>Figura 4.15:</b> Distribuição de tensão radial ao longo da espessurada da parede espessa do cilindro de aço, com profundidade do entalhe de (a)4,42 e (b) 6,93. ....                                                                                                                                                                                                  | 72 |

**Figura 4.16:** Distribuição de tensão radial ao longo da espessurada da parede fina do cilindro de bi-material, com profundidade do entalhe de (a) 4,42 e (b) 6,93.....73

**Figura 4.17:** Distribuição de tensão radial ao longo da espessurada da parede espessa do cilindro de bi-material, com profundidade do entalhe de (a) 4,42 e (b) 6,93. ....74

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 2.1:</b> Módulo de elasticidade de alguns metais à temperatura ambiente (Callister, 2012)..... | 32 |
| <b>Tabela 3.1:</b> Característica do cilindro Tipo 2, parede fina.....                                   | 58 |
| <b>Tabela 3.2:</b> Característica do cilindro Tipo 2, parede espessa. ....                               | 58 |
| <b>Tabela 3.3:</b> Propriedades do reforço de compósito, e do aço.....                                   | 58 |
| <b>Tabela 3.4:</b> Característica do cilindro Tipo 1, parede fina.....                                   | 59 |
| <b>Tabela 3.5:</b> Característica do cilindro Tipo 1, parede espessa. ....                               | 59 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |                                                                                                |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                                       |
| ASME            | <i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos) |
| $b_{aço}$       | largura do aço                                                                                 |
| $b_{compósito}$ | largura do compósito                                                                           |
| $d$             | profundidade do entalhe                                                                        |
| $E$             | módulo de elasticidade ou de Young                                                             |
| $\varepsilon$   | deformação                                                                                     |
| $E_{aço}$       | módulo de elasticidade ou de Young do aço                                                      |
| $E_{compósito}$ | módulo de elasticidade ou de Young do compósito                                                |
| $I$             | momento de inércia                                                                             |
| FIT             | Fatores de Intensidade de Tensão                                                               |
| GNV             | Gás Natural veicular                                                                           |
| $K$             | fator de intensidade de tensões                                                                |
| $KIC$           | tenacidade à fratura                                                                           |
| $KT$            | concentrador de tensão                                                                         |
| $L$             | direção longitudinal do cilindro                                                               |
| $M$             | momento interno dos componentes                                                                |
| MEF             | Método de Elementos Finitos                                                                    |
| $n$             | fator de transformação                                                                         |
| $p_{atm}$       | pressão atmosférica                                                                            |
| $p_i$           | pressão interna                                                                                |
| $p_o$           | pressão externa                                                                                |
| $p$             | pressão externa do aço                                                                         |
| $\rho$          | raio do entalhe                                                                                |
| $r$             | raio em um dado ponto do cilindro                                                              |
| RAM             | <i>Random Access Memory</i>                                                                    |
| $r_i$           | raio interno                                                                                   |
| $r_o$           | raio externo                                                                                   |
| RVE             | <i>Representative Volume Element</i>                                                           |
| $\sigma$        | tensão normal                                                                                  |

$\sigma'$  tensão normal do elemento “transformado”

$\sigma_{m\acute{a}x}$  tensão máxima

$\sigma_n$  tensão nominal

$\sigma_r$  tensão radial

$\sigma_\theta$  tensão tangencial

$\gamma$  componente de deformação

$w$  espessura da tubulação perfeita

$y$  distância do eixo neutro

## RESUMO

Sales, R.A.M. **Avaliação de um Vaso de Pressão GNV de Aço Reforçado por Epóxi e Fibra de Vidro.** Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

Os vasos de pressão são reservatórios de fluidos que devem ser projetados adequadamente para suportar as tensões, evitando o aparecimento de trincas que podem levar a danos severos. Esse estudo tem por objetivo simular as descontinuidades nos vasos tipo 1 (aço) e tipo 2 (aço recoberto com fibra de vidro na região anular) de GNV. Através de um software comercial, o estudo pode ser realizado em seção, os modelos sem descontinuidades presentes foram analisados comparando-os com os modelos teóricos com o propósito de validar o método. Já para os modelos com entalhe não são encontrados em literatura para comparação, logo, a distribuição de tensão pode ser verificada para saber se há possibilidade do equipamento continuar operante. Primeiramente, foram determinados a taxa de energia de deformação e o fator de concentração de tensão, sendo os valores obtidos comparados com os encontrados em literatura. O modelo utilizado foi o 2D, por causa da limitação dos computadores disponíveis, e a malha adotada com no máximo 9 nós por elemento. Os resultados obtidos das tensões tangenciais e radiais com a presença de diferentes profundidades de entalhe puderam ser analisados. Descobriu-se que a partir dos valores das tensões que o reforço pode atuar na diminuição do peso dos cilindros parede fina e como curativo para os cilindros de parede espessa.

**Palavras Chaves:** bi-material, concentrador de tensão, métodos de elementos finitos.

## ABSTRACT

Sales, R.A.M. **Avaliação de um Vaso de Pressão GNV de Aço Reforçado por Epóxi e Fibra de Vidro.** Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

The pressure vessels are fluid tanks that should be suitably designed to support the strains, preventing the appearance of cracks that can lead to severe damage. This study aims to simulate the discontinuities in the vessels type 1 (steel) and type 2 (steel coated with glass fiber in the annular region) GNV. Through a commercial software the study can be performed in section, the models without discontinuities present will be analyzed comparing them with the theoretical models in attempt to validate the method. And for the models with slot, they are not found in the literature for comparison, so the tension distribution must be checked to see if it is possible to continue operating the equipment. First it was determined the strain rate and the stress concentration factor, and the obtained values were compared with those found in the literature. The 2D model was used because of the limitation of available computers, and the mesh with a maximum of 9 knots per element. The results obtained from the tangential and radial stresses in the presence of different slot depths could be analyzed. It has been found that from the values of tension that the reinforcement can act to lower the weight of the thin-walled cylinders and as a dressing for thick wall cylinders.

**Key words:** bi material, strain concentrador, finite element methods.

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

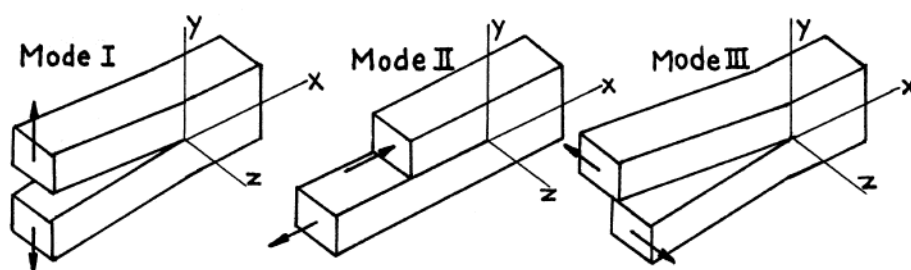
### 1.1 Aspectos Gerais

As indústrias vêm investindo cada vez mais afim de evitar danos devido aos possíveis tipos de falhas por trincamento. Por esse motivo o estudo das Teorias da Mecânica da Fratura tem sido utilizado como uma forma de prevenir estruturas carregadas contendo trincas, se as mesmas representam algum risco eminente (Carvalho, 1992).

Trincas resultam de defeitos, podendo ser tanto da fabricação quanto por carregamentos cíclicos, tendo início em entalhes ou concentradores de tensão, normalmente encontrados em componentes mecânicos (Budynas, 2011).

Uma peça trincada pode ser carregada por um modo, dois, ou pela combinação dos modos de abertura de trinca (Figura 1.1).

Modo I é conhecido como modo de abertura ou modo de tração, com deslocamentos das superfícies ao sentido de propagação da trinca (Pereira, 2014). O modo II, é conhecido como modo de deslizamento, é quando ocorre carregamento cisalhante, com deslocamentos das superfícies da trinca no mesmo plano (Pereira, 2014). Modo III, quando há o rasgamento, ou seja, ocorre deslocamento das superfícies das trincas no plano da mesma, levando ao empenamento entre as duas partes divididas por ela. Os fatores de intensidade de tensão (FIT)  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$  estão associados aos modos I, II e III (Pereira, 2014).



**Figura 1.1:** Modos de abertura de trincas. Modo I (abertura mais comum), Modo II (deslizamento ou cisalhamento), Modo III (rasgamento) (Tada et al, 2000).

No caso da abertura de trinca estar relacionada à geometria do corpo, a seu carregamento e suas condições de operação, observa-se trincamento sobre pressão ou corrosão, em um vaso de pressão (Lu, 2003; Boniatti, 2003). Normalmente as

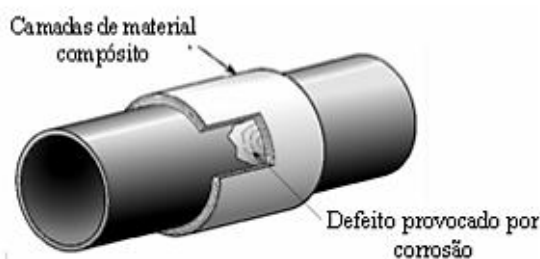
rachaduras ocorrem superficialmente e se localizam nas áreas de concentração de tensão, podendo afetar o produto e a segurança (Lu, 2003; Megyesy, 2001).

Para o processo de reparo a danos em um vaso de pressão convencional constituído por aço é normalmente realizado, através dos reparos com soldas para recomposição de áreas danificadas. Mas também existe o reparo com material compósito (fibra de vidro, ou, fibra de carbono com resina de epóxi) como representado na Figura 1.3. O emprego de compósitos como reparo vem crescendo nas indústrias devido ser considerado um método definitivo, para casos de até 80% de perda de espessura por defeitos de corrosão externa (Gomes, 1984).

Tendo como principais vantagens: possuir fácil aplicação, ou seja, pode ser realizado em operação; baixo custo e possibilidade de aplicação em ambientes aquáticos como mostra a Figura 1.2 (Costa, 2010).



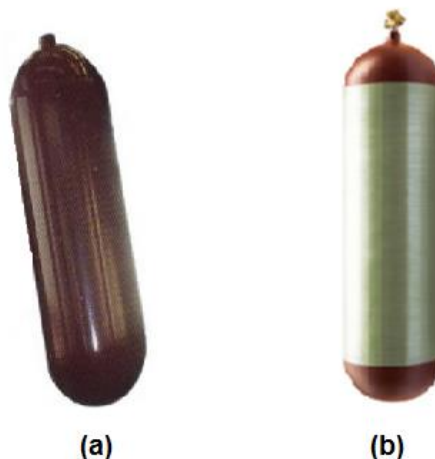
**Figura 1.2:** Imagem representativa da realização do reparo em ambiente aquático (Costa, 2010).



**Figura 1.3:** Exemplo de dano e reparo em um duto (Costa,2010).

Como tem-se o caso do equipamento de bi-material, os reparos nas fibras de vidro com pequenas fendas ou fraturas podem ser reparados com resina catalisada e fios de fibras de vidro picados (Cheremisinoff, 1995).

A Figura 1.4 mostra os tipos de equipamentos em estudo. Este vaso de pressão armazena Gás Natural Veicular (GNV).



**Figura 1.4:** Vaso de Pressão de GNV (a) constituído de aço;(b) constituído de aço com reforço anular.

## 1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é simular os vasos tipo 1 (aço) e tipo 2 (aço recoberto com fibra de vidro na região anular) de GNV segundo a ISO 11439:2000. Avaliando o comportamento das tensões com uma descontinuidade presente.

## 1.3 Justificativas

### 1.3.1 Importância Científica

Compreender os efeitos dos campos de tensões atuantes em relação ao entalhe, e se há risco de surgimentos de trincas quando o equipamento é submetido a pressões elevadas.

### 1.3.2 Importância Tecnológica

Para esses tipos de vasos de pressão quando apresentam algum tipo de dano é descartado. Por isso se faz necessário desenvolver nova técnica para estipular o tempo que este vaso de pressão pode continuar operando com segurança.

### **1.3.3 Importância Econômica**

Logo com o desenvolvimento de um novo método de avaliação do campo de tensão, pode se prever a vida útil do equipamento sem que ocorra o descarte prematuro, reduzindo assim o custo.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tipos de Falhas

As falhas mecânicas são causadas primeiramente pelas tensões induzidas pelas cargas atuantes na peça. Defina-se como falha a perda de alguma parte ou de todo a capacidade de funcionamento do equipamento durante a vida útil. O mecanismo de dano pode ser definido como qualquer meio que possa colaborar para falha, podendo ser dividido em quatro grupos:

1. Quebra, é considerada como evento terminal de mecanismo de dano por (Castro, 2009):
  - Fadiga: quando o equipamento está sujeito a carregamento dinâmico;
  - Fluência: deformação permanente sendo dependente de tempo e temperatura;
  - Corrosão sob tensão: ocorrem em conjunto as tensões mecânicas com o meio corrosivo;
  - Escoamento: é quando o material sofre deformação plástica, ou seja quando sua resistência elástica é ultrapassada.
2. Distorção excessiva, mecanismo de dano como (Castro,2009):
  - Escoamento;
  - Flambagem: está associada à instabilidade estrutural devido a tensões compressivas, são dominantes em estruturas esbeltas;
  - Colapso plástico: carga limite suportada antes que ocorra a ruptura;
  - Corrosão e/ou fluência e eventuais sobrecargas.
3. Desgaste excessivo, os mecanismos de dano podem ser por:
  - Abrasão: ocorre quando partículas duras comprimidas deslizam umas sobre as outras ou sobre as superfícies;
  - Erosão: é definida como perda de material através da coalisão de partícula com a superfície do equipamento, o desgaste está relacionado à energia que a partícula se choca (Castro, 2009);
  - Tração: ocorre quando uma força é aplicada a um corpo em uma direção perpendicular a superfície. Por causa das forças de tração perpendiculares impostas, as trincas podem se propagar (Suski, 2004);
  - Fadiga Superficial: se dá através do contato da superfície com rolamento; surgem tensões de contato, produzindo as tensões de cisalhamento, cujo

valor máximo ocorre logo abaixo da superfície. Devido ao movimento de rolamento, a região de contato desloca-se, de maneira que a tensão de cisalhamento varia de zero a um valor máximo e retorna a zero, causando tensões cíclicas (Cunha, 2005);

- Corrosão: interação da superfície deslizante com o ambiente que a envolve, faz com que o produto dessa reação seja removido de sua superfície.

#### 4. Obsolescência ou a perda de funcionalidade competitiva (Castro, 2009).

A Engenharia Estrutural tem como função principal de assegurar funcionalidade operacional e controlar a consequência das falhas. No caso de distorção e quebra, estas podem ser evitadas pelo dimensionamento e operação apropriada, porém o desgaste e obsolescência não, só podendo ser retardadas por manutenção. Segundo Castro (2009), as falhas também podem ser divididas pelas suas causas elementares:

- Mecânicas: pelas tensões induzidas pelas cargas podendo ser combinadas ou não com sobrecarga eventuais;
- Materiais: defeitos devido à fabricação, montagem e manutenção da matéria-prima;
- Econômicas: perda de competitividade, juros elevados, encarecimento;
- Humanas: prováveis defeitos na especificação (uso de material inadequado, falta de informação de algum mecanismo importante), projeto (dimensionamento incorreto do produto), fabricação (distorção das peças, fabricar peças com folgas ou muito justa), manutenção inadequada (acúmulo de sujeira, falta de lubrificação);

É de suma importância que o engenheiro estrutural saiba identificar os mecanismos de danos (fratura, fadiga, escoamento, deflexão excessiva, desgaste, flambagem, fluência) que levam à posterior falha, fazendo isto por meio da análise de tensões, podendo ser calculado as componentes das tensões. Para realizar esse tipo de cálculo faz-se uso dos fundamentos da resistência dos materiais ou fatores de concentração de tensão (Castro, 2009). Quando se define o estado de tensão, as regiões críticas serão determinadas (Hibbeler, 2010).

Os problemas acarretados pelas falhas podem ter efeitos catastróficos, por isso a importância do estudo das falhas e do comportamento do material (Castro, 2009). Como no caso do material dúctil em certas situações vir a falhar como frágil, podendo ser devido ao processo de fabricação ou modelagem, ambiente

químico, temperatura e a taxa de carregamento. Isto se torna um assunto complexo requerendo bom conhecimento teórico de seus princípios fundamentais para que possa modelar as equações seguindo os seus princípios físicos (Hibbeler, 2010).

## **2.2 Tensões Mecânicas**

As tensões residuais são as principais formas de falhas em equipamentos. Estas podem ser divididas em tensões elásticas, sendo aquelas que após a retirada da solicitação somem como é o caso do carregamento e da temperatura. Podem ser também por tensões residuais, porém para este caso as tensões não desaparecem, devido ao processo de fabricação, ou tratamento térmico, montagem. Esses fatores são importantes, mas muitas das vezes não são levados em consideração (Shigley, 2008).

A forma de se relacionar tensão com carga aplicada é denominada como critério de falha, e é o que descreve o comportamento do material quando alguma solicitação se faz presente.

## **2.3 Vaso de Pressão**

Vasos de pressão são reservatórios ou tanques de armazenamento, que contêm fluidos, podendo ser líquidos (normalmente é armazenado nesta forma devido ocupar menor volume) ou gasosos (armazenamento de gás é considerado antieconômico por causa de seu baixo peso específico), normalmente submetidos à pressão atmosférica ou acima desta (Telles, 1996). As dimensões para os vasos podem variar desde poucos centímetros e chegar até aproximadamente 50 metros de diâmetro, colocando esse equipamento como um dos mais importantes, caros e pesados em uma indústria de processo, podendo representar em média 60% do custo de materiais e equipamentos em unidades de processo (Chattopadhyay, 2005). Estes equipamentos podem ser itens de maior ou menor importância, em outras indústrias (Telles, 1996). Eles são projetados para suportar tanto a pressão interna quanto a externa. Quanto a respeito da fabricação e inspeção devem ser seguidas as normas técnicas (Pacheco, 2013).

Para todos os vasos de pressão existe um invólucro denominado “parede de pressão” do vaso. Dependendo das dimensões e finalidades do equipamento podem ser de parede simples ou múltipla, podendo assumir vários formatos. Na maioria das vezes os mais utilizados no armazenamento de pequena quantidade são os cilíndricos, e esféricos quando requer capacidade superior (Telles, 1996).

A aplicabilidade do vaso de pressão nas indústrias como caldeiras ou reservatórios, constitui-se um conjunto muito importante de equipamentos, para os diversos tipos de aplicações (Pacheco, 2013). Eles podem ser de parede fina ou de parede espessa (Pacheco, 2013).

### 2.3.1 Normas e Códigos

A importância da existência de normas e códigos é devida estes estabelecerem regras de segurança para projetos e fabricação para vaso de pressão, nos quais são especificados e detalhados em projeto, testes e inspeções de uso (Taniguchi, 2008). Frequentemente os códigos são submetidos a novas revisões e com isso surgem novas edições para que outros tópicos possam ser incorporados (Falcão, 2002).

O código mais empregado no Brasil é o ASME (American Society of Mechanical Engineers). A seção VIII do código ASME é a que trata dos vasos de pressão, possuindo as seguintes divisões:

**ASME Code Section VIII Division 1:** projeto convencional, onde pressão interna ( $p_i$ ):  $1,02 \text{ Kgf/cm}^2 \leq p_i < 211,0 \text{ Kgf/cm}^2$ ; e o diâmetro interno ( $d_i$ ):  $d_i \geq 6"$  (ASME, 2007).

**ASME Code Section VIII Division 2:** projeto alternativo, em que não existe limite para pressão do projeto do vaso (ASME, 2007). Nessa divisão as regras são mais rigorosas para a escolha do material e do método de cálculo para análise de tensões (ASME, 2007).

**ASME Code Section VIII Division 3:** equipamento voltado a pressões superiores  $703 \text{ Kgf/cm}^2$ . Sendo essa divisão muito similar a *division 2*, entretanto para esta existe maior rigor na análise e classificação das tensões e avaliação da fadiga (ASME, 2007).

Já para as normas, uma das mais utilizadas é a ISO "*International Organization for Standardization*", a ISO 11439:2000: para cilindros de gás – cilindros de alta pressão para armazenamento de gás natural como combustível veicular (Guamá, 2012). E também ABNT NBR 12790:1995, norma na qual classifica os cilindros sem costuras para armazenamento e transporte de gás a pressões elevadas. Existem três classes de serviço, são elas (Guamá, 2012):

- Classe 1- são todos aqueles cilindros que possuem pressão de serviço mínima de 3,2 MPa e a capacidade menor ou igual a 450 L;

- Classe 2- são todos aqueles cilindros que possuem pressão de serviço mínima de 3,5 MPa e a capacidade maior ou igual a 450 L;
- Classe 3- são aqueles destinados ao armazenamento de gás metano (GMV), onde o gás pode ser usado como combustível veicular, ou veículos próprios para comportar o gás, como é o caso feito em abastecimentos de postos de recarga.

Norma ISO 11439:2000, e também MDI-IMETRO PORTARIA nº 74 (2001), admitem 4 tipos de cilindros para GNV, são eles (Guamá, 2012):

- Tipo 1- cilindros de metal podendo ser alumínio ou aço;
- Tipo 2- cilindros de metal com reforço de fibra na região anular;
- Tipo 3- cilindros de metal com reforço de fibra em toda a extensão do material;
- Tipo 4- cilindros de compósitos recobertos com fibra por toda a extensão.

A norma ISO tem por objetivo estabelecer um guia de parâmetros para os vasos de pressão tanto para transporte e armazenamento do GNV (Guamá, 2012).

No caso do cilindro para armazenamento de GNV eles devem ser leves e duráveis (Guamá, 2012). A norma ISO 11439:200 tem por finalidade especificar o tempo de vida útil em um vaso de pressão ao tempo usual do veículo (Guamá, 2012).

Existe outro conceito para esta norma que é o desenvolvimento de requisitos de desempenho (Guamá, 2012). Ou seja, os cilindros de GNV são utilizados somente em automóveis, sendo assim os testes de desempenho podem ser direcionados para a condição de serviço (Guamá, 2012).

Um dos fatores importantes para esse tipo de equipamento é a vida a fadiga, devido aos ciclos de pressões que sofrem durante o processo de enchimento. Esses ciclos de pressões podem levar o aparecimento de trincas. Portanto foi definido o tempo de vida em 20 anos para 20 000 ciclos (Guamá, 2012).

Para evitar as possíveis falhas prematuras, a norma ISO 11439:200 recomenda a inspeção não destrutiva por ultrassom em 100% dos cilindros pressurizados (Guamá, 2012).

No Brasil o principal órgão de normalização e especificações de cilindros GNV é o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia).

Conforme Inmetro a regulamentação técnica é da seguinte forma (Guamá, 2012):

- ISO 4705 – cilindro de aço-liga sem costura;
- ISO 11439 - cilindro de aço-liga e material composto;

Quando se trata de norma e códigos para aplicação, manuseio e operação dos vasos de pressão constituído de material compósito, usa-se somente a ASME seção X.

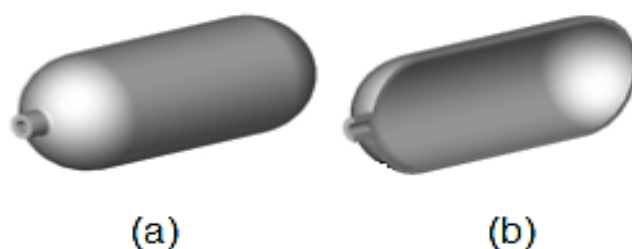
### 2.3.2 Projeto de Vaso de Pressão para GNV

O vaso de pressão é um equipamento quase que construído por encomenda, para que possa atender cada caso e condições. Dentre as informações que devem estar determinadas no projeto são: formato do vaso; dimensões gerais; tipo de tampo; posição de instalação; pressão e temperatura; diâmetro nominal de todos os bocais; formatos e detalhes de peças internas; se necessário elevação do vaso; indicação dos bocais para todos os instrumentos que possam se conectar ao equipamento; quando necessária indicação de isolamento térmico ou refratário; não contaminação do fluido armazenado; especificações dos materiais utilizados; e algumas exigências especiais como transporte, local de montagem, inspeção ou remoção de peças (Guamá, 2012).

Existem quatro tipos de projeto de cilindro de GNV conforme a ISO 11439:2000, são eles:

- Cilindro Tipo 1

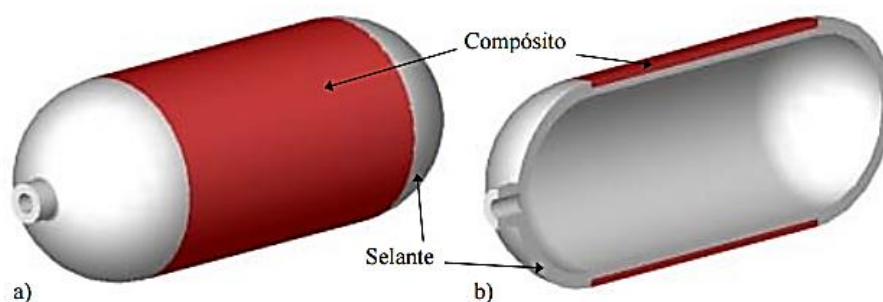
Este cilindro é totalmente metálico, podendo ser fabricado tanto em aço quanto em alumínio, Figura 2.1 (Moreira, 2001).



**Figura 2.1:** Modelo esquematizado do cilindro tipo 1. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (Villena, 2004).

- Cilindro tipo 2

Para esses cilindros de GNV são fabricados com selante de metal, podendo ser aço ou alumínio e reforçados com compósito anular em sua seção cilíndrica, como representado na Figura 2.2 (Holroyd *et al.*, 1999).

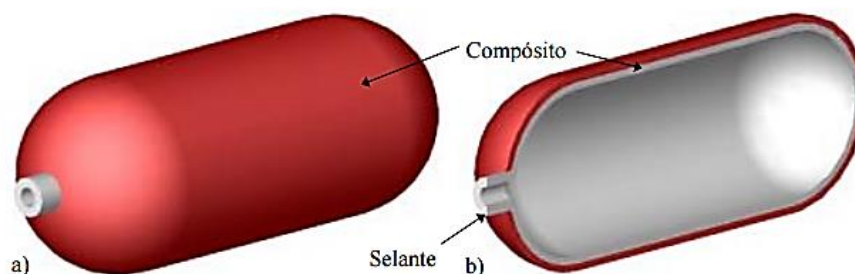


**Figura 2.2:** Modelo esquematizado do cilindro tipo 2. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (Villena, 2004).

Neste caso para a teoria de redução do material metálico seria de aproximadamente 50% e agregando o peso no reforço. No entanto por alguns problemas na construção a redução encontrada está em torno de 25 a 30%, com o equivalente metálico em aço (Moreira, 2001).

- Cilindro tipo 3

São fabricados por selante de metal, podendo ser aço ou alumínio. Neste caso, o cilindro de metal é sem costura de parede fina, e revestida por toda sua superfície de material compósito (Holroyd *et al.*, 1999) Figura 2.3.

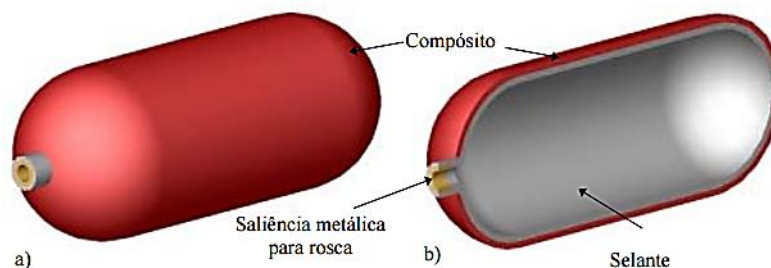


**Figura 2.3:** Modelo esquematizado do cilindro tipo 3. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (Villena, 2004).

Segundo Moreira (2001), para este caso a redução de peso aqui obtida chega a 50% ou mais quando comparados aos cilindros de aço.

- Cilindro tipo 4

Este cilindro possui um material selante de polímero cuja função é tornar o cilindro final impermeável ao gás (normalmente é utilizado como material o polietileno de alta densidade), com uma saliência metálica para rosca, Figura 2.4 (Holroyd, *et al.*; 1999).



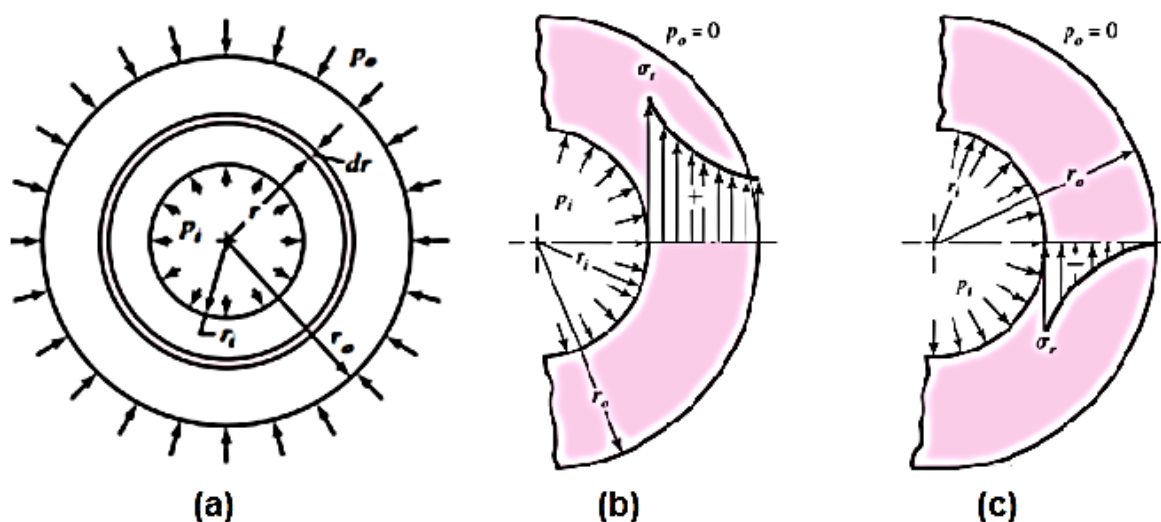
**Figura 2.4:** Modelo esquematizado do cilindro tipo 4. (a) Vista isométrica. (b) Vista em corte (Villena, 2004).

A redução de peso é entre 60 e 80% quando comparados aos cilindros de aço (Moreira, 2001).

### 2.3.3 Tensões em Vasos de Pressão Cilíndrico

Os vasos de pressão cilíndricos levam fluidos a altas pressões desenvolverem dois tipos de tensões, radial e tangencial, que dependem do raio da estrutura em estudo. Para se determinar as tensões faz-se uso da hipótese em que uma seção reta do cilindro irá permanecer plana após ser tensionada (Budynas, 2011).

A Figura 2.5 (a), representa o raio interno do cilindro ( $r_i$ ), raio externo ( $r_o$ ), a pressão interna ( $p_i$ ), pressão externa ( $p_o$ ). Já para (b) e (c) demonstra a distribuição de tensões em um cilindro, quando submetido à pressão interna.



**Figura 2.5:** Representação das seções do cilindro e distribuição de tensões: (a) Seção Transversal do cilindro submetido a tensões internas e externas; (b) Distribuição da tensão tangencial; (c) Distribuição da tensão radial (Shigley, 2008).

Tal modelo que expressa a tensão radial e a tangencial das tensões observadas no modelo da Figura 2.5.

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o - \left(\frac{r_i r_o}{r}\right)^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2 - p_o r_o + \left(\frac{r_i r_o}{r}\right)^2 (p_o - p_i)}{r_o^2 - r_i^2} \quad (2)$$

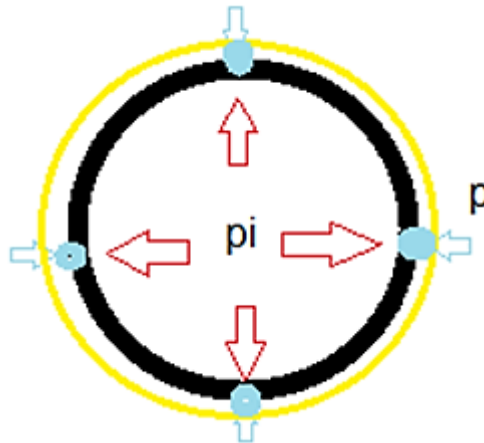
Para  $p_o = 0$ , tem-se a fórmula das tensões reduzidas:

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

Comumente, os valores obtidos que indicam tração são positivos, e negativos para compressão.

No caso em questão do reforço de compósito, o aço sofrerá tanto pressão interna ( $p_i$ ) quanto a externa exercida pelo compósito na parede do aço ( $p$ ), como pode-se observar na Figura 2.6. Devido a esse fato a  $p$  será diferente de zero.



**Figura 2.6:** Esquema de pressões exercidas no aço.

Sabe-se que as equações 1 e 2, são aplicadas para vasos de pressão cilíndrico de parede espessa, aplicando-se apenas as seções selecionadas estando a uma certa distância das extremidades e afastada o suficiente de qualquer área que possua concentração de tensão (Budynas, 2011).

Para a engenharia existem duas divisões para vasos de pressão cilíndricos: os de parede espessa e os de parede fina. Pode se dizer que os vasos de pressão

de parede fina são considerados aqueles em que um determinado limite de tensão tangencial esta relacionado com a sua espessura (Vicente, 2009). No caso deste tipo de vasos, quando são submetidos a pressões internas  $p_i$ , a tensão tangencial é onde  $r$  é o raio do vaso e  $w$  a sua espessura, ou seja, a razão entre o raio interno e a espessura da parede deve ser maior ou igual a 10 ( $r_i/w \geq 10$ ) (Telles, 1996).

Para este vaso de pressão de parede fina a distribuição de tensão em sua espessura sofre pouca variação, entretanto para vasos de pressão de parede espessa isso não ocorre (Hibbeler, 2010).

## 2.4 Vigas Compostas

São conhecidas como vigas compostas todas as vigas construídas por mais de um material diferente (Hibbeler, 2010). Portanto para esse tipo de situação, as fórmulas tanto das tensões radiais quanto tangenciais só podem ser aplicada para material homogêneo, logo, deve-se “transformar” os componentes em um só material.

Isso é possível quando têm-se dois materiais, por exemplo, um mais rígido como o aço e outro menos rígido como o compósito de fibra de vidro.

Para se transformar o mais rígido em equivalente, pode ser obtida através das fórmulas 5 e 6 ,logo necessita-se de menor quantidade do material mais rígido para suportar uma carga equivalente (Hibbeler,2010).

$$b_{aço} = n \times b_{compósito} \quad (5)$$

Em que,

$$n = \frac{E_{compósito}}{E_{aço}} \quad (6)$$

O mesmo pode ser feito para transformar o material menos rígido em um material equivalente, porém para  $n$  tem-se as fórmulas 7 e 8, logo necessita-se de maior quantidade do material menos rígido para suportar a carga aplicada (Hibbeler, 2010).

$$b_{compósito} = n \times b_{aço} \quad (7)$$

Em que,

$$n = \frac{E_{aço}}{E_{compósito}} \quad (8)$$

Entretanto, a tensão obtida através do material transformado terá que ser multiplicada pelo fator de transformação  $n$  (Hibbeler, 2010). Logo:

$$\sigma = n \cdot \sigma' \quad (9)$$

## 2.5 Comportamento Tensão Deformação

A tensão pode ser compreendida como a resistência interna devido a uma força executada externamente, por unidade de área. Quanto à deformação pode ser dita como qualquer variação dimensional de um corpo, quando submetido a uma força.

Sendo a carga aplicada estática, ou se altera pouco em relação ao tempo, quando esta se encontra aplicada de maneira uniforme sobre a superfície de um componente, o seu comportamento mecânico pode ser determinado mediante ensaios de tensão-deformação (Pacheco, 2013).

A grande maioria das estruturas metálicas submetidas a uma tensão de tração em níveis mais baixos se alongam ou deformam de acordo com a magnitude da mesma (Pacheco, 2013). Segue abaixo a demonstração da equação,  $\sigma$  e a deformação  $\varepsilon$  são consideradas proporcionais, por causa da analogia feita com a equação da elasticidade da mola:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (10)$$

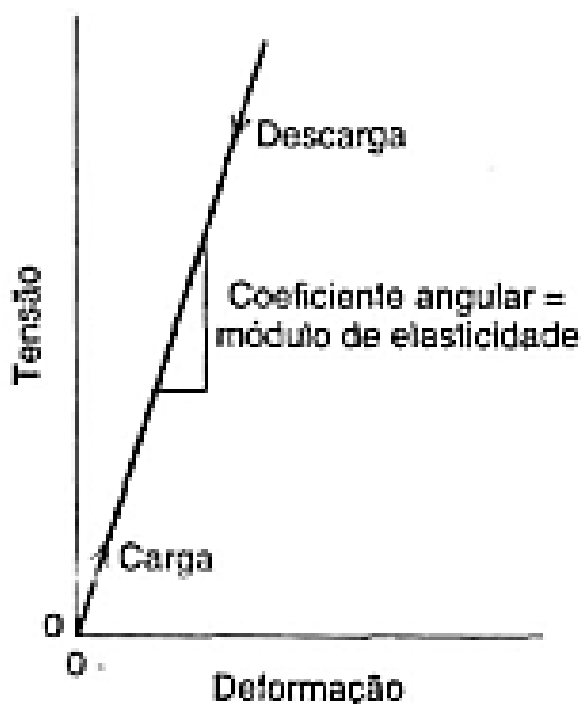
Esta equação é uma simplificação da lei de Hooke, em que  $E$  é o módulo de elasticidade ou *módulo de Young*, a resistência à deformação elástica do material. Para a maior parte dos materiais metálicos a magnitude desse módulo pode se encontrar variando de 45 GPa ( $6,5 \times 10^6$  psi), no caso do manganês, e o tungstênio 407 GPa ( $59 \times 10^6$  psi) (Callister, 2012). No entanto os valores obtidos para o módulo de elasticidade de materiais cerâmicos são relativamente altos, e para os polímeros são menores quando comparados como os metais, podendo variar entre 0,007 a 4 GPa (Castro, 2009). A Tabela 2.1 refere-se ao módulo de elasticidade de alguns metais à temperatura ambiente.

**Tabela 2.1:** Módulo de elasticidade de alguns metais à temperatura ambiente (Callister, 2012).

| Material                       | Temperatura de fusão<br>(°C) | E   |                     |
|--------------------------------|------------------------------|-----|---------------------|
|                                |                              | Gpa | 10 <sup>6</sup> psi |
| Chumbo (Pb)                    | 327                          | 14  | 2                   |
| Magnésio (Mg)                  | 650                          | 45  | 6,5                 |
| Alumínio (Al)                  | 660                          | 69  | 10                  |
| Prata (Ag)                     | 962                          | 72  | 10,4                |
| Ouro (Au)                      | 1064                         | 79  | 11,5                |
| Latão (Liga)                   | -                            | 97  | 14                  |
| Titânio (Ti)                   | 1660                         | 107 | 15,5                |
| Cobre (Cu)                     | 1085                         | 110 | 16                  |
| Níquel (Ni)                    | 1453                         | 207 | 30                  |
| Aço (Liga)                     | -                            | 207 | 30                  |
| Ferro (Fe)                     | 1538                         | 210 | 30,5                |
| Molibdênio (Mo)                | 2610                         | 304 | 44,1                |
| Tungstênio (W)                 | 3410                         | 407 | 59                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2020                         | 379 | 55                  |

Quando se fala em módulo de elasticidade para diferentes tipos de materiais como metais, polímeros e cerâmicos, a principal diferença está no tipo de ligação atômica existente (Callister, 2012). Também com o aumento de temperatura o módulo de elasticidade normalmente tende diminuir (Callister, 2012).

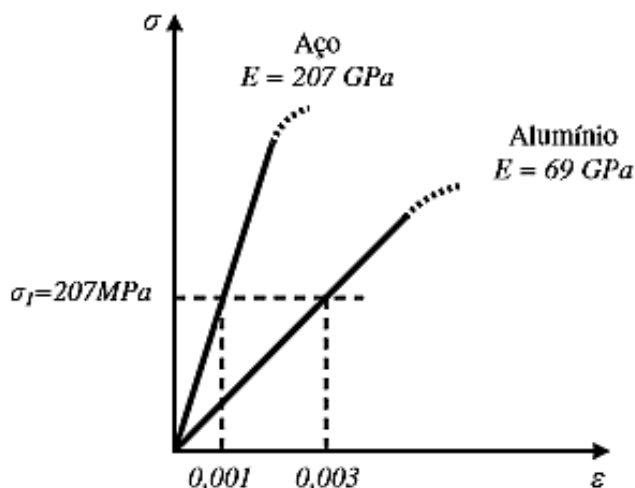
A deformação elástica consiste no processo no qual a deformação e a tensão são proporcionais. Para este caso, a tensão e a deformação tem como resultado gráfico uma relação linear, como apresentada na Figura 2.7. Como pode ser observado o coeficiente angular do segmento linear no gráfico de tensão – deformação é igual ao módulo de elasticidade ( $E$ ), podendo ser considerado como uma medida de rigidez ou da resistência do material a deformação elástica, portanto, quanto maior for este módulo, menor será a deformação, logo maior será a rigidez (Callister, 2012).



**Figura 2.7:** Diagrama esquemático tensão-deformação correspondente à deformação elástica para ciclos de carga e descarga (Callister, 2012).

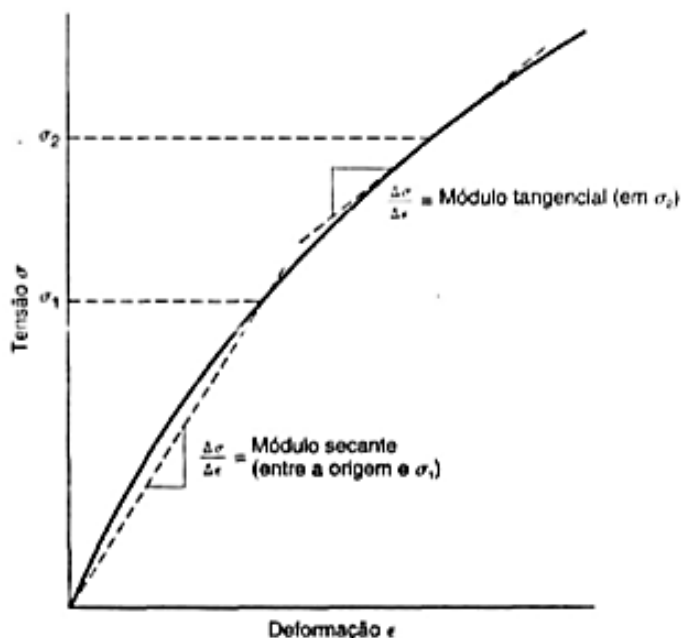
Segundo o gráfico da Figura 2.8 apresentado a seguir, tanto o aço quanto o alumínio a uma temperatura de 20 °C, em uma determinada tensão, o alumínio é capaz de se deformar até três vezes mais do que o aço (Askeland, 2003).

A deformação elástica é pequena e não permanente, pois nesse caso os átomos se afastam das posições originais quando submetidos à carga, mas não ocupam novas posições. Assim, quando cessada a carga aplicada a um material metálico deformado elasticamente, os átomos voltam às posições originais e o material tem as suas dimensões originais restabelecidas (Callister, 2012).



**Figura 2. 8:** Comparação do comportamento elástico de um aço e do alumínio (Adaptada de Askeland e Phulé, 2003).

Para alguns materiais a região da curva tensão- deformação não é linear, tais como: ferro fundido cinzento, o concreto e vários polímeros. Sendo assim, não é possível determinar o módulo de elasticidade como visto antes e, portanto, utiliza-se geralmente o módulo tangencial (inclinação da curva tensão-deformação em um nível de tensão) ou módulo secante (inclinação de um secante traçado da origem até o ponto específico da curva), como ilustrado na Figura 2.9 abaixo (Callister, 2012).



**Figura 2.9:** Diagrama esquemático tensão-deformação mostrando um comportamento elástico não-linear (Callister, 2012).

Grande parte dos equipamentos são projetados para não sofrer a deformação plástica, quando a presença de tensão atuante, uma vez que a deformação plástica traz mudanças permanentes na estrutura, e assim, compromete o correto funcionamento. Daí a importância do conhecimento do início da deformação plástica, ou onde irá ocorrer o escoamento, com o objetivo de assegurar a segurança do componente. Para o alumínio de baixa resistência o limite de escoamento pode variar desde 35 MPa (5.000 psi), para aços de alta resistência de 1.400 MPa (200.000 psi) (Castro, 2009; Hibbeler, 2010).

## **2.6 Mecânica da Fratura**

O constante desenvolvimento dos estudos sobre a Mecânica da Fratura teve início quando os processos convencionais de cálculo estrutural eram escassos para explicar as falhas de estruturas decorrentes de solicitações a níveis de tensões bem inferiores aos consideráveis admissíveis. Para as ciências de materiais a mecânica da fratura é uma ferramenta de extrema importância devido à obtenção de melhor desempenho mecânico de materiais e componentes (Rosa, 2002).

O modo de falha comum para esses casos era a propagação incerta da trinca, sem que ocorram grandes deformações plásticas. Portanto, a energia absorvida para o processo de fratura pode ser considerado como pequena (Rosa, 2002).

Devido a essa última teoria pode se definir o fator de intensidade de tensões ( $K$ ), como sendo um dos parâmetros que permitem a avaliação de tensões nos arredores da trinca (Pacheco, 2013). Para esse fator tem-se como limite o parâmetro do material, é conhecida como tenacidade a fratura ou podendo ser chamado de fator de intensidade de tensão ( $K_{IC}$ ), sendo este fator importante, pois através dele pode se determinar quando a trinca tem condições de se propagar de forma instável (Budynas, 2011). Já o fator de intensidade de tensões ( $K$ ), está relacionado à geometria do componente, forma e sua magnitude através de carga aplicada, da orientação e também do tamanho da trinca (Boniatti, 2003).

Em relação aos fatores que objetivam a Mecânica da Fratura já mencionada anteriormente, tem como aspecto de extrema importância para o caso de peças com elevado custo de fabricação, que estão sujeitos a defeitos (exemplo: rotores fundidos ou soldados, reservatórios soldados e oleodutos) (Rosa, 2002). Quando o controle de qualidade detecta um defeito, cujo tamanho seja significativo, ocorre a decisão de rejeitar ou não o equipamento, devido ao custo do mesmo

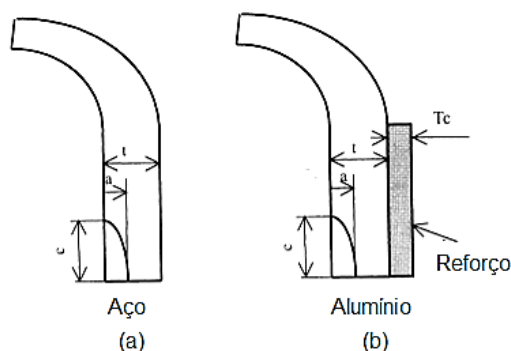
(Rosa,2002).Por outro lado, se não é detectado nenhum defeito, não quer dizer que o equipamento esteja isento de defeitos, pois estes podem passar despercebidos (Rosa, 2002).

A inspeção e a manutenção são importantes na decisão de retirada de peças antes que se atinja o tamanho crítico (Budynas, 2011). A fratura de um modo geral consiste na separação ou fragmentação de um corpo sólido (Rosa, 2002).

### 2.6.1 Fratura em bi-material

Pode-se dizer que o aspecto em que difere o material metálico do compósito está relacionado à sua microestrutura, onde o material metálico pode ser considerado homogêneo, e os compósitos estando situados em fases, podendo conter alguma camada com alto grau de anisotropia (Lopes, 2012). Os materiais compósitos podem exibir múltiplas fraturas antes mesmo do seu rompimento (Salerno,2013). A mecânica da fratura pode ser empregada no estudo da delaminação do material compósito laminado, podendo ser decorrente do processo de fabricação ou em serviço (Cândido *et al*, 2012).

Abaixo na Figura 2.6 são ilustrados dois cilindros, o primeiro (a) é feito de aço enquanto o segundo (b) é de alumínio reforçado por compósito (resina de epóxi e fibra de vidro). Ambos com entalhes, os diferentes comportamentos dos cilindros são obtidos através dos valores da intensidade de tensão ( $K$ ). Estando sob as mesmas condições os cilindros de aço representam melhor comportamento à fratura do que o de alumínio, no entanto o compósito desempenha muito bem o papel de fortalecimento da estrutura (Su e Bhuyan, 1999).

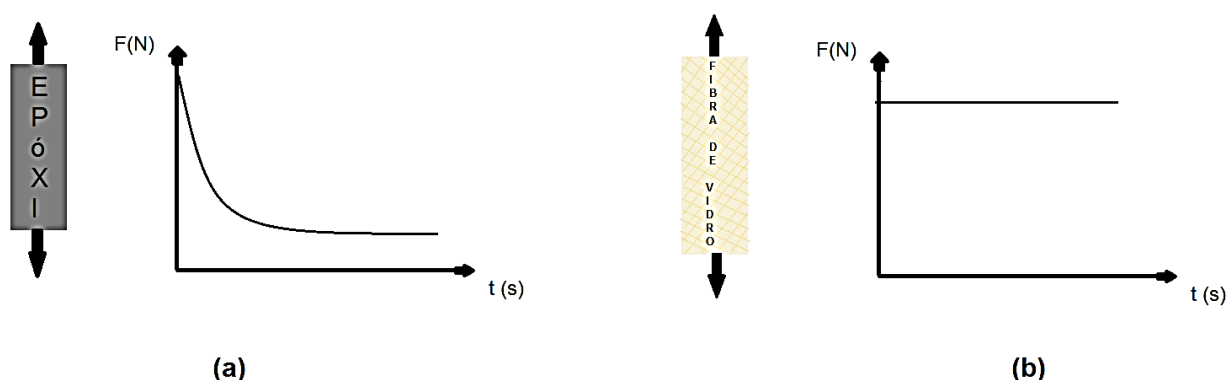


**Figura 2.10:** Cilindros com entalhe interno (a) cilindro de aço, (b) cilindro de alumínio com reforço de compósito (Su e Bhuyan, 1999).

### 2.7 Efeito do relaxamento da resina epóxi

A matriz polimérica tem como função: unir as fibras, proteger a sua superfície contra danos e diminuir os efeitos adversos das condições ambientais.

Devem apresentar boa adesão com as fibras de maneira que quando disposta ao carregamento mecânico a matriz possa se deformar e transferir a carga entre as fibras do compósito na qual se mantêm estável (Cunha *et al*, 2006). Como mostra a Figura 2.11 (a) quando o epóxi é submetido a uma força qualquer o material relaxa, quando a carga é interrompida o material não retorna ao seu estado inicial. Diferente do que ocorre para a fibra de vidro (b), onde a força aplicada se mantém estável com o decorrer do tempo.

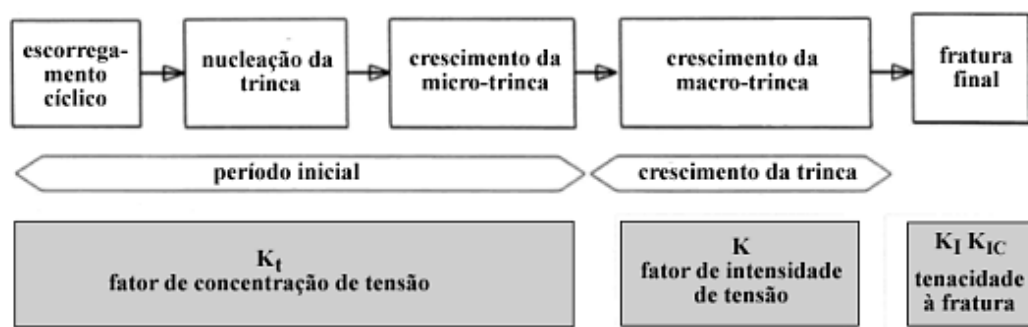


**Figura 2.11:** Comportamento gráfico das cargas aplicadas para os diferentes tipos de materiais (a) epóxi e (b) fibra de vidro.

## 2.8 Fadiga

Em relação aos tipos de falhas em componentes mecânicos, a mais comum é por fadiga, sendo de aproximadamente 50% a 90%, estas ocorrem de forma brusca e repentina, sendo potencialmente perigosa (Rosa, 2002). Logo, o controle deve ser feito através de inspeções e de avaliações de integridade estrutural.

Fadiga pode ser entendida como a redução gradual da capacidade de carregamento, devido à ruptura lenta do material, tendo como consequência a formação de fissura localizada, progressiva e cumulativa no interior do componente (Rosa, 2002; Castro, 2009). A Figura 2.12 esquematiza de forma sucinta as diferentes fases da vida à fadiga, sendo representada a primeira parte modelada pelas análises de tensões e a segunda por conceitos de mecânicas da fratura.



**Figura 2.12:** Sequência das fases distintas da vida à fadiga e seus fatores relevante (Schijve, 2001).

Geralmente, não é necessário calcular todo o campo de tensões da peça, basta saber onde está o ponto crítico (é a região da peça onde o dano está restrito), e obter o histórico das tensões atuantes, para que possa modelar todo o dano associado a falhas locais (Castro, 2009).

Na modelagem de geometrias complexas é indicada a análise de tensões através da técnica de elementos finitos. Nas falhas locais normalmente são modeláveis pela análise de tensões que solicitam o ponto mais crítico do equipamento, não sendo necessário o estudo de todo o campo de tensão da peça (Pacheco, 2013).

A fratura por fadiga se divide em duas regiões (Boniatti, 2003):

- Região de fratura por fadiga caracteriza-se por uma superfície lisa, brilhante e sedosa, por consequência da ação do contato da superfície da trinca durante a propagação da mesma;
- Região com a superfície cristalina ou com aspecto fibroso corresponde à fratura final instantânea, considerada como falha estática.

A ocorrência da fratura por fadiga se inicia em pequenas fissuras (para que fissuras surjam é preciso que os esforços locais sejam superiores a resistência de coesão do material) que irá se propagar até que aconteça uma fratura que possua característica plástica ou frágil, por causa da concentração de tensões (Pacheco, 2013).

Geralmente, a fratura se inicia na superfície por causa da liberdade de deformação e também devido a irregularidades, além disso, a exposição existente da corrosão atmosférica (Boniatti, 2003).

Existem algumas teorias de estudo à fadiga:

- Teoria dos Esforços Secundários: esta teoria admite que todos os corpos possuem elevados números de defeitos em sua superfície, criando assim concentradores de tensões (Pacheco, 2013);

Tendo como consequência da heterogeneidade (física, química e estrutural), os metais podem se encontrar submetidos a esforços secundários (= pontos de tensões), que quando combinados a esforços externos se sobrepõem localmente aos esforços de coesão das partículas dando origem à fissuras (Cimini, 2001);

- Teoria das Bandas de Escorregamento: para a escala microscópica, a característica do processo mais importante de fadiga é a nucleação de uma ou mais trinca, por causa das solicitações decorrentes do escorregamento entre bandas, ou nos contornos dos grãos do material (Pacheco, 2013). Esses carregamentos podem ser tanto estáticos quando dinâmicos, no entanto para os dinâmicos são mais acentuados (Cimini, 2001). Primeiramente as tensões de cisalhamento são controladas, quanto maior for amplitude ou números de ciclos, o escorregamento será maior (Cimini, 2001). Logo pode-se dizer que na fase inicial do desenvolvimento da trinca ocorre nas bandas de escorregamento, e para essas trincas se desenvolvem no planos onde a tensão de cisalhamento é máxima, para materiais dúcteis é de aproximadamente 45°. Com o decorrer dos ciclos a trinca tende a crescer nos planos de máxima tensão a tração (Cimini, 2001).

As teorias apresentadas acima se complementam na tentativa de conseguir explicar o processo de fadiga.

A falha por fadiga ocorre dentro de uma ampla quantidade de ciclos de carga, desde valores da ordem de 10 ciclos até superiores a  $10^7$ ,  $10^8$  de ciclos (Rosa, 2002). Enquanto alguns materiais tem o limite à fadiga bem definido, outros, como por exemplo o alumínio, não possui essa característica (Boniatti, 2003).

Para a lógica que o número de ciclos que um componente irá resistir depende do nível da solicitação, pois quanto maior for a carga dinâmica tem-se uma vida considerada baixa, quando comparada com solicitações cíclicas em níveis menores, tenderá a maior vida (Rosa, 2002).

Existem casos de trinca que não passam pelo período de nucleação, devido já possuir defeitos existente, podendo ser, pelo processo de fabricação, ou uso do equipamento (Rosa, 2002).

### 2.8.1 Fadiga em bi-material

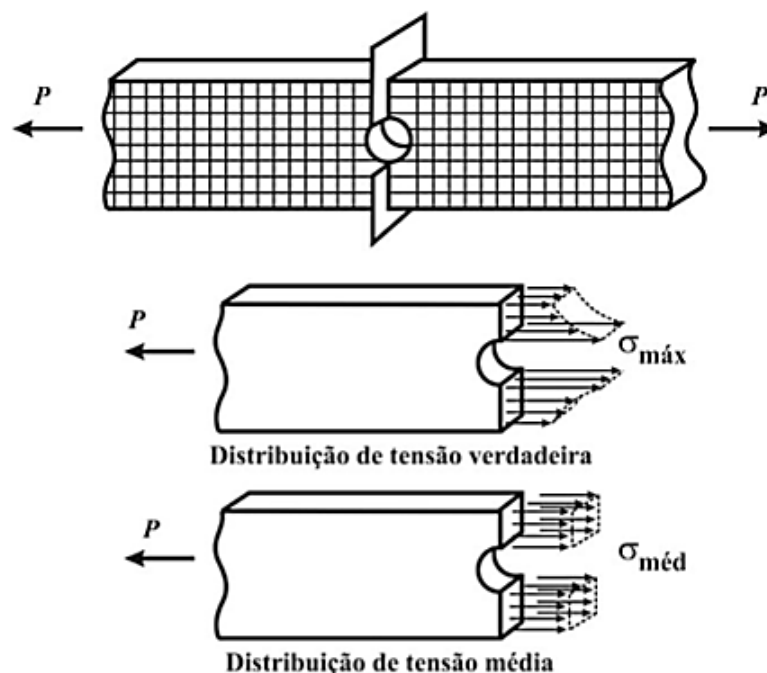
Em casos de uma fissura de fadiga na parede de um equipamento sobre atuação de pressão máxima em serviço é considerado como aspecto crítico da segurança (Su e Bhuyan, 1999). E seus efeitos devem ser avaliados e qualificados através de análise de tensões (Guidelines, 1988).

Quanto à formação e propagação de danos à fadiga para compostos laminados ocorrerão inicialmente fissuras na matriz onde o sentido da carga é transversal ao da fibra (Freire, 2001). Porém, outros modelos têm aparecido na literatura, como o de Gamstedt *et al.* (1999) no qual o modelo desenvolvido possuem fibras transversais em reação ao sentido da carga; para estes autores a interface entre fibra e matriz é a região de maior suscetibilidade ao aparecimento de danos ocorrendo de maneira diferente para a tração e na compressão, porém quando ocorre a combinação dessas duas forças os autores perceberam que ocorria uma desaderência entre fibra e a matriz diminuindo a resistência do laminado (Freire, 2001).

## 2.9 Concentrador de tensões

Conforme o princípio de Saint-Venant, as equações elementares agregadas tanto na Resistência dos Materiais como no Projeto de Elementos de Máquinas e Estruturas, só são apropriadas para regiões das peças que não contém mudanças bruscas de geometria e dos pontos de aplicação das cargas concentradas (Castro, 2009).

Como exemplo tem-se a equação que é utilizada para calcular as tensões linear elástica ( $\sigma = (M \times y)/I$ ), esta equação só será válida nos trechos onde a seção reta continue uniforme ou podendo variar suavemente; portanto, as equações clássicas só serão válidas para calcular as tensões normais  $\sigma_n$ , desprezando mudança brusca de geometria (Castro, 2009). No entanto, na prática, muitas vezes ocorrem da forma apresentada na Figura 2.13.



**Figura 2.13:** Efeito da concentração de tensões devido à mudança na seção transversal (Hibbeler, 2010).

Todavia, a maior parte das peças reais possui entalhes, ou mudanças localizadas em sua geometria tais como: furos, rasgos, ombros ou outros detalhes similares (Budynas, 2011).

Os entalhes são indispensáveis, porém concentram aumentando localmente as tensões nominais que agiriam na peça se ela fosse isenta deles (Boniatti, 2003). Alguma descontinuidade em uma peça de máquina altera a distribuição de tensão ao redor da descontinuidade, de maneira que as equações elementares de tensão não são capazes de descrever o estado de tensão na peça nessas regiões (Budynas, 2011). Essas descontinuidades recebem o nome de concentradores de tensão, e as regiões de sua ocorrência são denominadas áreas de concentração de tensões.

Para a prática da engenharia, a distribuição de tensão verdadeira não necessita ser definida. Precisa que a tensão máxima seja conhecida, logo o elemento será projetado para suportar a tensão da força axial  $P$  quando aplicada (Barrios *et al*, 2005).

Nos casos em que a área da seção transversal é transformada, valores específicos da tensão normal máxima na seção crítica podem ser através de métodos experimentais ou técnicas matemáticas avançadas que utilizam a teoria da elasticidade (Barrios *et al*, 2005). Os resultados dessas investigações são fornecidos

em forma gráfica por meio do fator de concentração de tensão  $KT$  (Barrios *et al*, 2005). O fator de concentração de tensões  $KT$  pode ser definido pela razão entre a máxima tensão que atua numa dada seção entalhada  $\sigma_{\theta max}$  e a tensão nominal. Logo,

$$K_T = \frac{\sigma_{\theta max}}{\sigma_n} \quad (11)$$

A maioria dos fatores de concentração de tensão é determinada por meio de técnicas experimentais, podendo ser utilizado o Método de Elementos Finitos, pois através dele podem-se visualizar os campos de tensões devido aos concentradores de tensões (Barrios *et al*, 2005).

Deve-se ter cuidado à presença do efeito de concentração de tensão quando ocorrer em mudanças bruscas de geometria, provocando picos de tensões nessa região. Esta alteração de tensões deve ser avaliada na hora de dimensionar, escolher o tipo de material e também na geometria da peça a ser projetada, visto que, no caso de carregamento cíclico, pelo fato de não considerar este efeito pode ocorrer a falha inesperada do componente.

### 2.9.1 Estado plano de tensões em problemas bidimensionais

Quando se considera o elemento tendo força aplicada em sua fronteira no plano ' $x, y$ ', pode-se dizer que neste caso os componentes da tensão  $\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  podem ser considerados como sendo iguais zero. Para este estado de tensão pode ser chamado de estado plano de tensões e seus componentes  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  estão em função de  $x$  e de  $y$  (Pilkey, 1977).

No entanto quando as dimensões na direção ' $z$ ' do corpo cilíndrico são muito maiores em relação às dimensões no plano ' $x, y$ ', e as forças que estão aplicadas são perpendiculares à sua direção longitudinal, ou seja, na direção  $Z$ . Pode-se dizer que as seções de deformação  $\varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yx}$ , na direção ' $z$ ' são iguais a zero. Este estado é conhecido como estado plano de deformação (Pilkey, 1977).

Para problemas que se tratam de força constante no corpo, a distribuição de tensões será em função da geometria do corpo e do seu carregamento. Nesse caso independe do material (Pilkey, 1977). Com isso os fatores de concentração de tensão podem ser encontrados através de métodos utilizando problemas planos.

## 2.10 Elementos Finitos

O uso de software de elementos finitos tem por objetivo simplificar as soluções para problemas complexos com geometrias arbitrárias constituídas por múltiplos materiais sujeitos a qualquer tipo de carregamento. O que antes não era possível, pois problemas utilizavam comumente a série de Fourier, sendo este aplicado somente para geometrias simples e em meios contínuos, agora com o desenvolvimento dos computadores podem ser realizados diversos tipos de análise que se aproxima mais da realidade. A importância desse método é ampliar a visão de desempenho nos projetos, obtendo produtos mais seguros e econômicos. Além disso, ajuda a entender melhor os fenômenos decorrentes em sua estrutura.

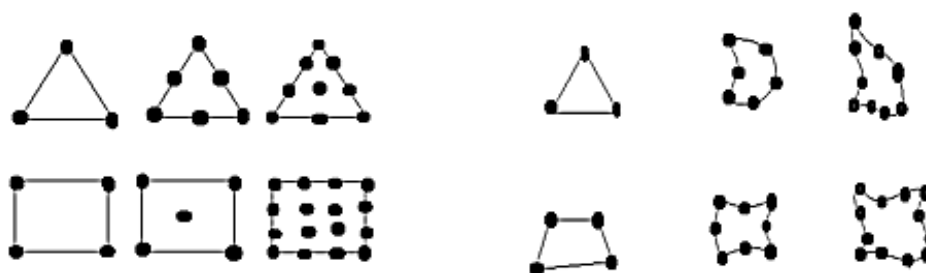
O objeto a ser estudado deve ser dividido em sub-regiões sendo este conhecido como elementos finitos (Alves Filho, 2000).

A divisão deve ser elaborada de acordo com a geometria do material. Este processo é conhecido como discretização, formando segmentos que serão unidos pelos nós, surgindo uma malha de elementos finitos que agora passa reproduzir o comportamento da estrutura a ser analisada (Tenek e Argyris, 1998).

Obteve-se assim um produto unificado, podendo trabalhar com estruturas, transferência de calor, fluidos, eletromagnetismo entre outros. Atualmente pode ser empregado nas seguintes áreas: empresas da indústria aeroespacial, automobilísticas, nuclear, petróleo e gás e em universidades. O MEF pode ser tanto unidimensional, quanto 2D como 3D.

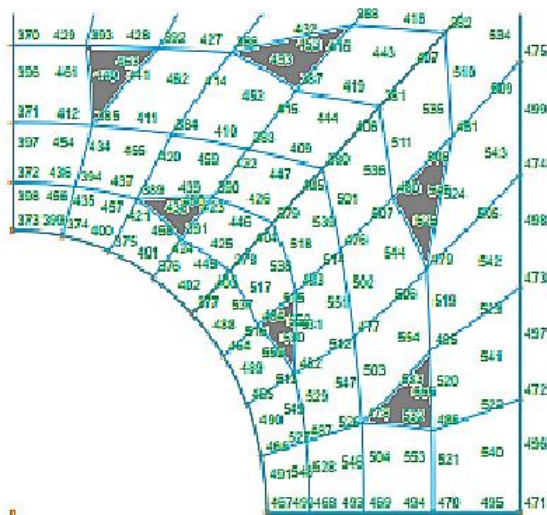
### 2.10.1 Formato dos Elementos

No modelo 2D (Figura 2.14) é comum usar elementos triangulares ou quadrangulares, sendo que cada aresta deve ter um nó. Já nos de alta ordem tem mais de um nó adicionado em cada aresta. No modelo 3D é preferível o formato hexagonal.



**Figura 2.14:** Modelo de elemento 2D e quantidade de nós (a) geometria linear, (b) isoparamétricos.

As geometrias mais simples e regulares são mais favoráveis, por melhorar a discretização e o refinamento de malha. No entanto para modelar as malhas mais complexas exigirá formação de diferentes formas como mostrada na Figura 2.15, as partes em branco são as quadrangulares e as em cinza triangulares.



**Figura 2.15:** Malha com elementos de geometria diferente.

## 2.11 Compósitos

O avanço tecnológico e a busca de diferentes propriedades não encontradas nos materiais “convencionais” tais como ligas metálicas, cerâmicos e polímeros os tornam incapazes de suprimir todos os objetivos que as indústrias e mercado requerem. Surgindo assim uma nova forma de combinar os materiais, conhecida como compósitos.

Logo pode ser dito que os compósitos são combinações que constituem dois ou mais materiais de classes diferentes ou não (Gassan, 1996).

Este novo conceito de combinar materiais foi adotado para que fosse possível obter melhores propriedades mecânicas sendo elas: rigidez, maior resistência em condições de serviço, boa resistência ao impacto, compressão e fadiga a altas temperaturas e tenacidade (Callister, 2012). Além disso podem ser projetados equipamentos mais leves, com maior resistência a corrosão e fadiga, e bom isolamento térmico (Sousa *et al*, 2007).

Essas propriedade tem ganho destaque em diversas áreas, tanto na automobilística, médica, aeroespacial, esportiva, militar, petróleo e gás, construção civil, podendo ser empregadas também em tubos, vaso de pressão, dutos terrestres, armazenamento de água.

Porém apresenta algumas restrições operacionais, apresentando baixa tenacidade quando comparados a outros materiais tradicionais. Os materiais que fazem uso de fibra de vidro geralmente se limitam a trabalharem com temperaturas a cerca de 200 °C, e seu reaproveitamento sendo limitado (Starr e Trevor, 2000).

A maioria dos materiais compósitos são constituídos por duas fases, no entanto estas fases não se dissolvem nem reagem entre si, a não ser pela sua camada limite entre a matriz e o reforço conhecida como interface.

- Matriz - é considerada uma fase contínua , apresenta-se normalmente em maior quantidade, é responsável por transferir as tensões e envolve a outra fase, conhecida como fase dispersa (Callister, 2012);
- Fase dispersa - encontra-se distribuída na matriz, sendo está descontínua, esta fase é mais rígida e resistente (Callister, 2012);

Tanto a matriz quanto a fase dispersa pode ser constituída por metal, cerâmica, e polímeros (Mi *et al*, 1998).

Portanto, as propriedades dos compósitos é em função das fases constituintes, quantidades relativas, geometria da fase dispersa (forma, tamanho, distribuição e orientação) e também o grau de adesão (Callister, 2012). Todas as variáveis relacionadas acima devem ser controladas para potencializar a estrutura do material adequando com a situação de uso (Gibson, 1994).

### **2.11.1 Comportamento Mecânico dos Compósitos**

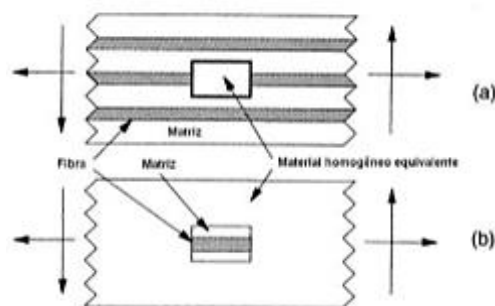
Para os materiais compósitos existem três níveis de escala, podendo ser estudados de acordo com suas características e comportamento (Daniel e Ishai, 2006). Essas escalas podem ser:

- Micromecânica

A micromecânica é o estudo do comportamento mecânico da união entre fibra e a matriz a nível microscópico (Taniguchi, 2008).

A importância desse estudo está relacionada às propriedades dos materiais como tenacidade à fratura, resistência e também a vida a fadiga (Taniguchi, 2008; Guamá, 2012).

Portanto o modelo da micromecânica tem por objetivo determinar as propriedades de um material composto. Isso é possível quando se faz uso do conceito de elemento de volume representativo (RVE) (Taniguchi, 2008). O RVE é a menor porção representativa do material, Figura 2.16 (Taniguchi, 2008).



**Figura 2.16:** (a) volume representativo equivalente a um material homogêneo; (b) Estrutura final substituído por um material equivalente (Adaptado de Barbero, 1999).

Para que a análise do RVE possa ser realizada devem ser adotados alguns critérios como a homogeneidade do material de reforço e o material da matriz; isotropia de propriedades tanto para matriz quanto para o reforço com a matriz; as fibras devem estar alinhadas perfeitamente e possuir aderência perfeita entre fibra e matriz (Costa, 2010). Existem alguns parâmetros relevantes na análise como fração volumétrica do reforço; geometria do reforço; distribuição espacial do reforço; definição de eixos de coordenadas; distribuição do comprimento do reforço na matriz (ASME, 1998).

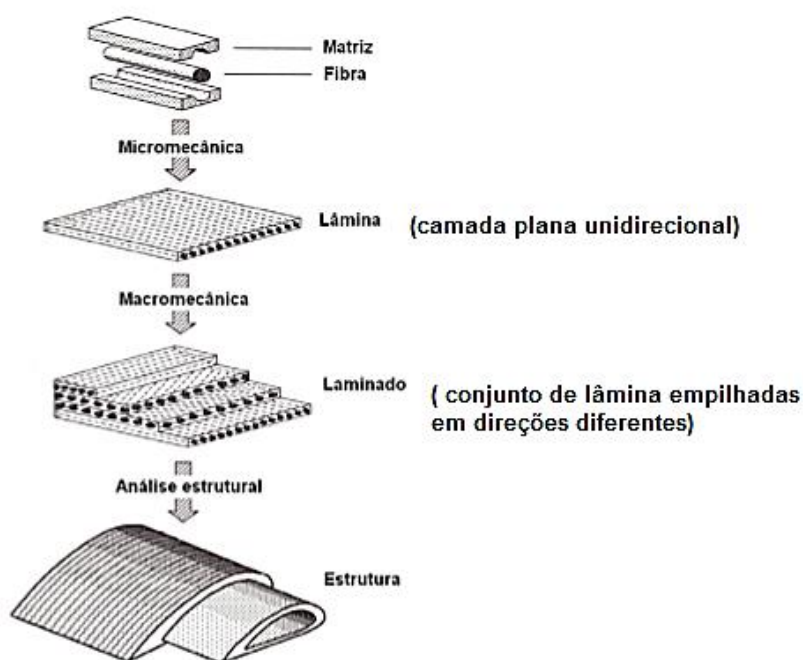
- **Macromecânica**

Na macromecânica a lâmina é vista como um material homogêneo (possui as mesmas propriedades em toda a extensão) e anisotrópico (possuem diferentes propriedades de rigidez; resistência e os critérios de falhas são considerados por valores médios) (Taniguchi, 2008; Pinheiro, 2010). No laminado, é utilizada a teoria da laminação que trata do comportamento de forma geral como em função das propriedades da lâmina e sua sequência de empilhamento (Taniguchi, 2008).

- **Nível Estrutural**

É o conjunto de teorias que prevê o comportamento de toda a estrutura (Guamá, 2012).

Na Figura 2.17 pode-se observar os diferentes níveis de análise visto resumidamente acima.

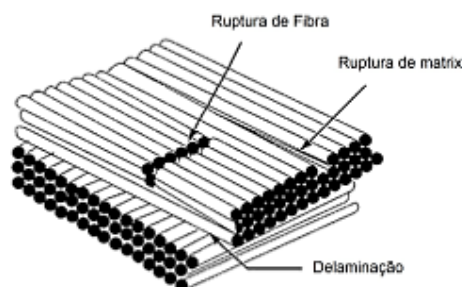


**Figura 2.17:** Diferentes níveis de análise em materiais compósitos (Adaptado de Daniel e Ishai, 2006).

### 2.11.2 Análise de Falhas em Materiais Compósitos

O conhecimento da distribuição de tensão é importante para que possa haver o controle da propagação da falha. Segundo Barbero (1999), os danos na estrutura do compósito podem ocorrer da seguinte forma, Figura 2.18:

- Ruptura da fibra : ocorre sob tensão de tração;
- Ruptura da matriz : podem ocorrer por micro-fissuras, quando há carregamento mecânico, tensões residuais de cura induzida, tensões térmicas, envelhecimento. E também por fissuras, ocorre sob os mesmos efeitos da micro-fissuras, a única diferença é que nesse caso as dimensões das fissuras são maiores podendo ultrapassar o diâmetro da fibra;
- Delaminação: ocorre quando há separação entre as camadas laminadas.



**Figura 2.18:** Tipos de rupturas ocorrentes em uma estrutura laminar em sandwich (adaptado de Gay, Hoa e Tsai, 2003).

As falhas no Laminado podem ser causadas por falha intra-laminar e falha inter-laminar (Guamá, 2012). Com isso a falha do laminado pode ser definida como inicial ou final conforme o grau de conservadorismo adotado no projeto (Daniel e Ishai, 2006).

- Falha Inicial: é quando ocorre a falha na primeira camada do laminado. Isto é determinado ao se avaliar as tensões em camada individual, de acordo com o critério de falha adotado (Guamá, 2012);
- Falha Final: ocorre quando o nível máximo de carregamento é atingido, ou seja ocorre a falha em todas as camadas. Para esse tipo de falha requer mais precisão das condições de carregamento e distribuição de tensão, sendo utilizado como fator de segurança maior;
- Falha inter-laminar: ocorre a separação de camadas permanecendo estas intactas. Normalmente este tipo de falha ocorre nas bordas livres ou em regiões de descontinuidade geométrica ou sob carregamento.

### 2.11.3 Matriz polimérica

Polímero pode ser definido como uma macromolécula organizada por uma ou mais unidades de repetição, conhecidas como mero, que se encontram unidas por ligações covalentes (Mallick, 2007).

Características dos polímeros:

- Baixa condutividade térmica e elétrica, devido ao tipo de ligação ser covalente (Chawla, 1987);
- Quando comparados aos metais apresentam boa resistência a corrosão (Canevaloro, 2002).

Classificação dos polímeros (Lucas *et al*, 2001):

- Ocorrência: natural ou sintética;

- Forma de sua estrutura: linear, ramificada, reticular;
- Modo de preparação: polímeros de condensação e adição.

Em meio a todas essas classificações formam duas classes maiores referentes a fusibilidade, os termorrígidos e termoplásticos (Chawla, 1987).

Os polímeros termoplásticos, possuem ligações secundárias, que podem ser quebradas facilmente com o aumento de temperatura. São materiais relativamente macios, possuem estrutura ramificada e longos filmes lineares(Callister, 2012).

Vantagens: apresenta baixo custo, possuem boa processabilidade, alta resistência química, podem ser remoldados, fácil reciclagem (possibilidade de ser fundido várias vezes), alta resistência química, podem ser remoldados (Castro, 2009).

Desvantagens: baixo ponto de fusão, resistência a tração reduzida, fácil permeabilidade de gases, baixa resistência a oxidação (Castro, 2009).

Os polímeros termofixos têm estrutura em forma de rede,devido a presença de ligações cruzadas covalentes, portanto os materiais não amolecem a elevadas temperaturas (Callister, 2012).

Vantagens: mais duros e resistentes, maior estabilidade dimensional, não se deforma a altas temperaturas.

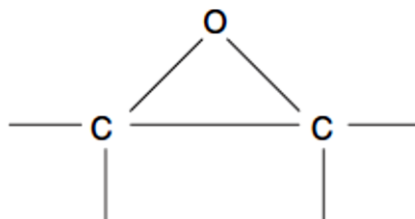
Desvantagens: comportamento frágil, não é possível ser reciclado.

As resinas termorrígidas têm sido utilizadas como matriz de alto desempenho como o epóxi, e resinas de poliéster (Hull e Clyne, 1996).

#### **2.11.4 Resina de Epóxi**

A ampla variedade de resinas proporciona um aumento de diferentes propriedades para os polímeros. O epóxi é mais caro, porém apresenta melhores propriedades mecânicas e tem maior resistência do que quando comparado com as resinas de poliéster e vinílicas (Callister, 2012).

As resinas epoxídicas são consideradas como polímeros termorrígidos, dotado de alto desempenho. Em seu estado inicial se encontram no estado líquido possuindo baixo peso molecular, contendo no mínimo dois grupos epóxis terminais, são compostos por dois átomos de carbono ligados a um de oxigênio, como demonstra a Figura 2.19 (Mallick, 2007).



**Figura 2.19:** Exemplo do grupo epoxídico (Mallick, 2007).

Resina epoxídica curada: propriedades dependentes das liagações cruzadas, controladas pelo número de grupos epóxi e também pelas moléculas, e a distância entre cada grupo (Lima, 2009).

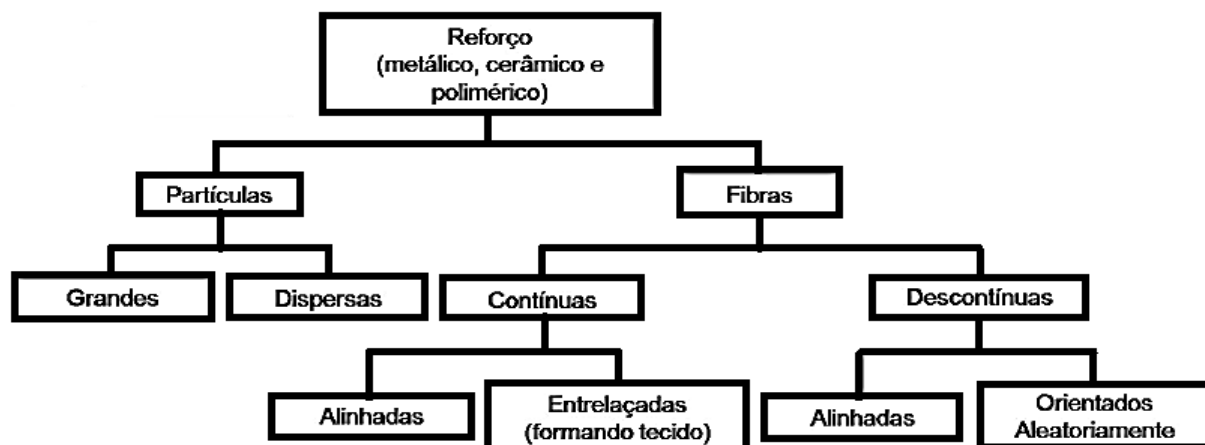
Vantagens das matrizes epoxídica como resinas: boa adesão, excelente resistência a solventes, ausência de material volátil, grande variedade de fibras (Mallick, 2007).

Contudo, a resina epóxi possui elevado custo quando comparada com outras (Lee e Neville, 1957).

A aplicabilidade do epóxi como resina vem ganhando importância significativa em diversas áreas, como a de materiais estruturais, devido à presença de características desejáveis como a alta resistência a tração, corrosão, boa adesão a diferentes substratos (Lee e Neville, 1957). Logo é um sistema que pode ser usado para várias finalidades, por exemplo, em revestimentos (May, 1988; Goodman, 1988).

#### **2.11.5 Reforço**

O reforço para materiais compósitos pode ser metálico, cerâmico e polimérico. A seguir a Figura 2.20 demonstra os tipos de reforços e suas divisões.



**Figura 2.20:** Esquema de classificação do reforço.

Como pode ser notado na figura acima os reforços podem ser de dois tipos, por partículas ou por fibras. Entretanto, o reforço mais utilizado são as fibras, devido ao bom emprego nas áreas tecnológicas (Gonçalves, 2012).

O comportamento das fibras em relação as tensões aplicadas na secção transversal o material apresenta pouca resistência, já em relação as tensão é aplicada na longitudinal, pode ser notado que a resistência é muito maior, devido a o alinhamento das fibras (Hull, 1981; Callister, 2012).

Os tipos de fibras mais usadas em compósitos poliméricos são as fibras de vidro, de carbono e de aramida. Sendo que existem algumas variáveis que influenciam de maneira direta na característica dos compósitos, como, massa específica, resistência à fadiga, custo, e condutividade tanto elétrica quanto térmica (Mallick, 2007; Hull e Clyne, 1996).

#### **2.11.6 Fibra de Vidro**

A fibra de vidro é mais comumente utilizada para uma matriz polimérica, podendo ser apresentada de duas formas: contínuas ou descontínuas (Pardini, 2006; Callister, 2012).

A base para composição do vidro é sílica (geralmente é a que ocupa maior teor dentre os outros elementos), boro, sódio, ferro e alumínio. Assim essas fibras podem ser produzidas em diferentes variedades de composições químicas, direcionando as propriedades desejadas quanto à sua aplicação, estas propriedades podem ser classificadas em três tipos principais, são designadas pelas letras E, vidro do tipo-E, sendo um bom isolante elétrico; letra C, vidro do tipo-C, possuem propriedades

anticorrosivas; letra S, vidro do tipo- S, elevada resistência mecânica. O vidro tipo-E é o tipo mais produzido, devido a sua boa flexibilidade e resistência, baixo custo, inércia química e também baixo peso específico. Já no vidro do tipo- S o custo é mais elevado que os outros tipos, porém possui maior resistência (Hull, 1981; Chawla, 1987).

O enfraquecimento da camada da superfície da fibra de vidro ocorre quando entra em contato com meio ambiente. Esse enfraquecimento pode vir a prejudicar a interação com a matriz. Geralmente as fibras quando são estiradas são revestidas no processo de acabamento para evitar danos. Essa cobertura pode ser removida e substituída por acabamento produzindo uma ligação química entre as fibras e matriz (Callister, 2012).

Vantagens da utilização da fibra de vidro como reforço (Callister, 2012):

- Fibras estiradas com facilidade devido a uma elevada resistência;
- Fácil de ser encontrado esse tipo de material, mais econômico e possui grande variedade de técnicas de fabricação;
- Tem boa resistência, quando combinado a uma matriz de plástico apresenta uma resistência ótima;
- A associação com outros plásticos tornam os compósitos utilizáveis em vários ambientes químicos;
- Podem possuir vida útil até quatro vezes mais do que outros materiais;
- Não necessitam de manutenção constante;
- São mais leves quando comparados a outros materiais que podem ser encontrados no mercado , facilitando o transporte do mesmo.

Desvantagem (Callister, 2012):

- Baixa rigidez.
- Limite de temperatura de serviço até 200 °C, pode ser melhorado com uso de sílica fundida, podendo chegar até 300 °C.

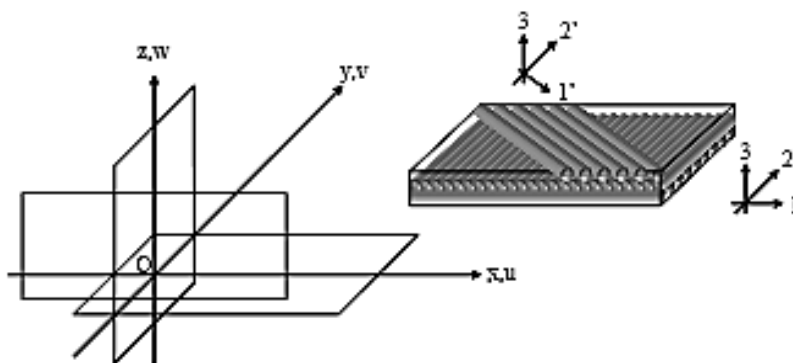
Aplicação:

Podem ser aplicadas em tubulações de plástico; usado para reduzir peso dos veículos; vaso de pressão; risers fabricados de compósitos são mais leves e mais resistente a corrosão; usado airbus A380, material mais leve, mais resistente ao impacto e menos sensível a fadiga Glare ( material de alumínio reforçado por fibra de vidro).

Porém o reforço mais usado atualmente é a fibra de vidro, devido as suas qualidades, como, custo consideravelmente baixo, facilidade de ser processado, baixo coeficiente de dilatação térmica, e quando se faz uso de diferentes tipos de resinas, torna-se possível a sua aplicação para diversos ambientes corrosivos (Goodman, 1988).

### 2.11.7 Compósitos Tipo Laminado

Os materiais compósitos laminados são aqueles que geralmente podem ser constituídos por fibras com alto módulo de elasticidade e resistência mecânica envolvido em uma matriz. Possuem interfaces distintas, garantindo que suas propriedades químicas e físicas da matriz e da fibra sejam conservadas. É composto por painéis bidimensionis ou lâminas como pode ser observada na Figura 2.21 (Matthews e Rawlings, 1994; Chawla, 1998; Callister, 2012).

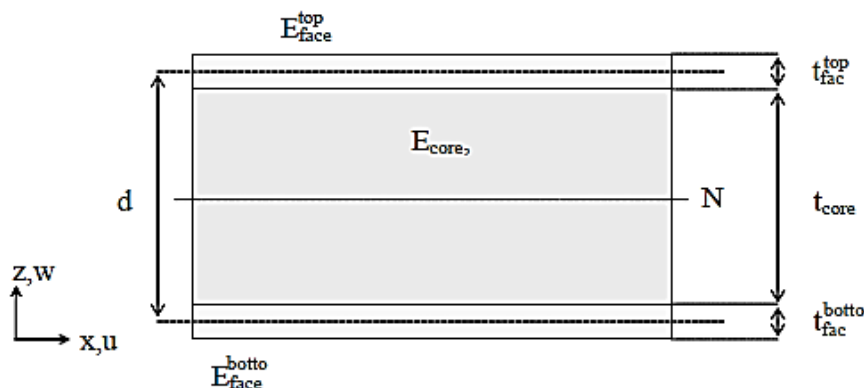


**Figura 2.21:** Empilhamento das camadas (DNV, 2003)

### 2.11.8 Compósitos Estruturais Tipo Painéis- Sanduíche

Painéis em sanduíche , consistem basicamente de duas folhas externas mais existentes, separadas por um material menos denso (menor rigidez e resistência), como apresentada na Figura 2.22 (Callister, 2012). As faces suportam maior parte da carga para dentro do plano e também em tensões transversais. Tipos de materiais encontrados na face : ligas de alumínio, plásticos reforçados por fibras de vidro, titânio, aço, e madeira compensada (Callister, 2012).

Função do recheio: separam as faces e resistente a deformações perpendiculares ao plano da face; proporcionam um certo grau de rigidez contra o cisalhamento sendo perpendiculares às faces (Callister, 2012).



**Figura 2.22:** Exemplo de Painel Sanduíche ( DNV, 2003).

### Homogeneização de Propriedades:

Pode se dizer que a Homogeneização de Propriedades é uma maneira de poder estimar propriedades elásticas de uma estrutura ortotrópica ou isotrópica para que possa possuir similaridade de comportamento para uma estrutura anisotrópica (Pinheiro, 2010). Sendo assim seu principal objetivo é de conseguir obter alguma relação de equivalência entre uma única lâmina ortotrópica igual ao do laminado (Pinheiro, 2010).

Para isso existem dois métodos de homogeneização:

- Método da Rigidez do Material, no qual consiste em ignorar todas as conexões que o material possua (Pinheiro, 2010);
- Método complementar ou da Rigidez, é usado para laminados ortotrópicos ou não simétrico (Pinheiro, 2010).

### **2.12 Propriedades do Aço 4130**

Segundo a norma ABNT NBR 12790:1995 esse tipo de aço pode ser utilizado como material estrutural de cilindro de GNV.

Este aço é considerado de baixo teor de carbono, pois possui 0.30 % de carbono, acima deste valor possui difícil soldabilidade.

Segue abaixo alguma das particularidades que compõem os elementos de liga deste material (ASM Metals Handbook, 1990):

- **Carbono 0.28 – 0.33 %**

O carbono proporciona um aumento na resistência e aumenta a temperabilidade em temperatura ambiente; por outro lado reduz a soldabilidade e a tenacidade.

- **Manganês 0.40 – 0.60 %**

O manganês é utilizado para reforçar o papel do nitrogênio em aumentar a sua resistência sob altas temperaturas. É também utilizado para aumentar a temperabilidade do aço por meio da dispersão de sulfetos de manganês, prevenindo a fragilização a quente.

- **Nióbio até 0.25 % e Vanádio até 0.06 %**

São adicionados para melhorar as propriedades de resistência, mas também pode ser usado para melhorar o ataque ao nitrogênio.

- **Molibidénio 0.15 – 0.25 %**

Aumenta à resistência a deformação em temperaturas elevadas.

- **Cromo 0.80 – 1.10%**

O cromo ajuda a aumentar a resistência à corrosão dos aços.

- **Fosforo até 0.0080% e Enxofre até 0.0080%**

São adicionados para melhorar as propriedades de resistência, e também para melhorar a resistência ao ataque do hidrogênio.

Usados como aço em aeronaves, fuselagens de tubos soldados, bielas de automóveis, aletas de suporte de motores, cilindros de gás, eixos e componentes de fuselagem.

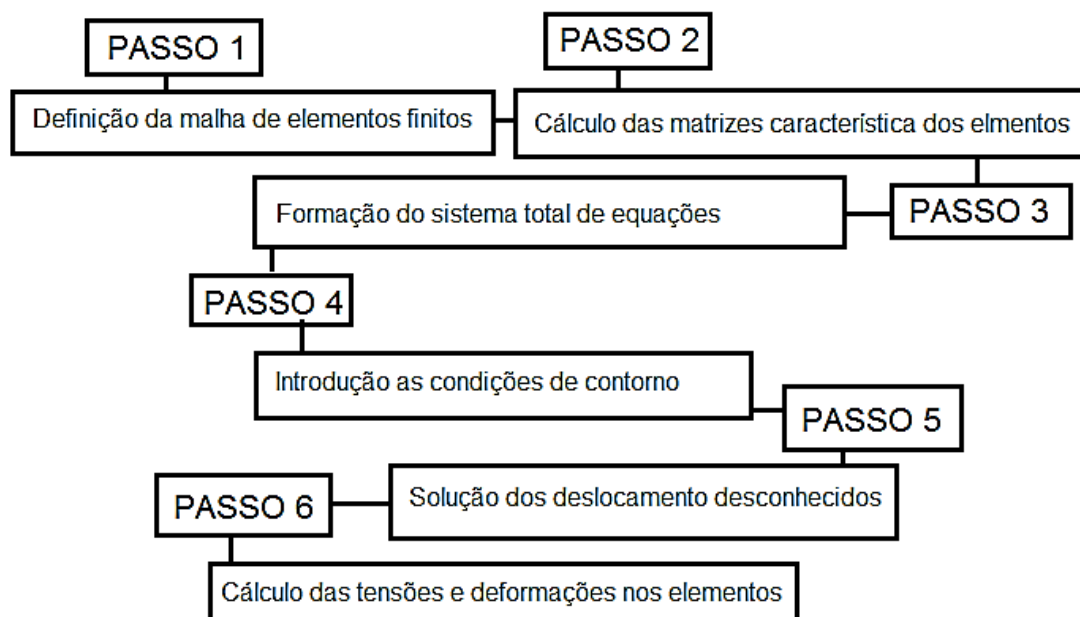
## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se o Método de Elementos Finitos implantado com a intenção de avaliar o concentrador de tensão no cilindro devido à aplicação de pressão interna no componente e a presença de reforço. Por meio da obtenção das tensões nominais através das equações (3) e (4). Os valores da tensão determinados pela transformação de seção da área do material podem ser calculados pela equação (9).

### 3.1 Software Utilizado

O programa que foi usado neste trabalho utiliza um software comercial, sendo este capaz de gerar malhas automaticamente como também fornecer resultados gráficos.

Segundo Rao (1999), a solução de um problema estático de engenharia estrutural, quando empregando o Método de Elementos Finitos (MEF), pode ser obtida através dos passos seguidos neste fluxograma.



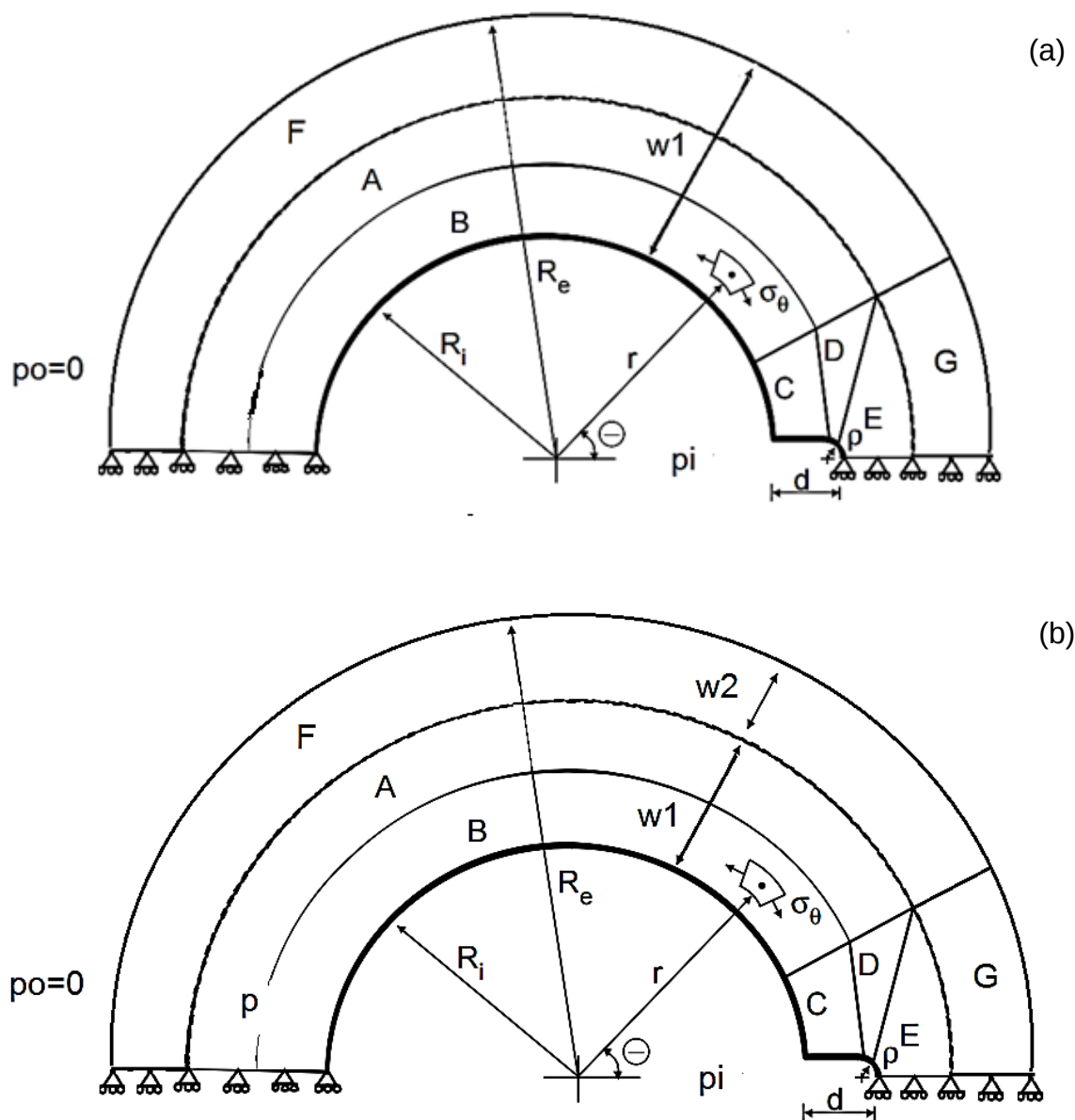
**Figura 3.1:** Esquema do Funcionamento do Método de Elementos Finitos (Rao,1999).

### 3.2 Geometria do Componente / Modelo de Análise para o MEF

O estudo feito em um cilindro somente de aço e o outro feito com bi-material (aço reforçado por resina de epóxi e fibra de vidro), estes sendo tanto de parede espessa quanto de parede fina. Para todos os casos sendo uma seção semi-circular. Sendo o raio externo  $R_o$ , e o raio interno  $R_i$ ,  $w_1$  espessura da parede do aço,  $w_2$

espessura da parede do reforço,  $r$  é o raio determinado. Já para as pressões tem-se  $p_o$  (pressão externa),  $p_i$  (pressão interna) e  $p$  (pressão que o reforço exerce sobre o aço). Os dados para esse projeto foram dimensionados considerando que os cilindros possuam uma única geometria interna.

Os desenhos foram divididos em 7 partes, A, B, F e G são as regiões mais “grosseiras”, C, D e E são as regiões mais “refinadas”, devido a existência do entalhe, conforme apresentado na Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Geometria e as divisões nas malhas dos vasos de tipo 1 (a) e tipo 2 (b).

### 3.3 Características do cilindro/ Propriedades do material

O cilindro tipo 2 adotado, utiliza-se de aço reforçado com fibra de vidro. O reforço de compósito é feito na região anular do vaso de pressão. Este modelo de

cilindro tipo 2 segundo Guamá (2012), possui as dimensões gerais de um modelo comercial (tabela 3.1).

**Tabela 3.1:** Característica do cilindro Tipo 2, parede fina

| <b>Características</b>           |  | <b>Dados</b>                       |
|----------------------------------|--|------------------------------------|
| Raio Interno                     |  | 170,00 mm                          |
| Espessura da Parede do Aço       |  | 7,30 mm                            |
| Espessura da Parede do Compósito |  | 5,30 mm                            |
| Material                         |  | Aço 30 CrMo; Fibra de Vidro/ Epóxi |
| Condição de Serviço              |  | 20,00 N/mm <sup>2</sup>            |

Já para o cilindro de parede espessa adota-se a espessura da parede tanto do aço quanto do compósito de maneira arbitrária (Figura 3.2).

**Tabela 3.2:** Característica do cilindro Tipo 2, parede espessa.

| <b>Características</b>           |  | <b>Dados</b>                        |
|----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Raio Interno                     |  | 170,00 mm                           |
| Espessura da Parede do Aço       |  | 20,00 mm                            |
| Espessura da Parede do Compósito |  | 14,00 mm                            |
| Material                         |  | Aço 30 CrMo; Fibra de vidro / Epóxi |
| Condição de Serviço              |  | 20,00 N/mm <sup>2</sup>             |

Para ambos os casos o cilindro de bi-material foram adotadas as propriedades da tabela 3.3.

**Tabela 3.3:** Propriedades do reforço de compósito, e do aço.

| <b>Propriedades do reforço</b>           |             |
|------------------------------------------|-------------|
| Característica Típica do Material        | Ortotrópico |
| <b>Propriedades mecânicas do reforço</b> |             |
| Módulo de Elasticidade Longitudinal      | 41 GPa      |
| Coeficiente de Poisson                   | 0,28 e 0,06 |
| <b>Propriedades do aço</b>               |             |
| Característica Típica do Material        | Isotrópico  |
| <b>Propriedades mecânicas do aço</b>     |             |
| Módulo de Elasticidade Longitudinal      | 200 GPa     |
| Coeficiente de Poisson                   | 0,32        |

Foram utilizados os seguintes materiais: aço 30 CrMo, tipo da fibra E- vidro e resina epóxi.

O aço 30 CrMo pode ser adotado como o aço equivalente o 4130, que é comum de ser encontrado como material estrutural de GNV. Para a sua liga o cromo molibdênio tem como função tolerar temperaturas elevadas, e também são bons para serviços com presença de hidrogênio e corrosivos (Jesus, 2012).

Em relação à fibra de vidro tipo E possui alta resistência à água e resiste alta temperatura. Essas fibras são normalmente utilizadas como reforço para termoplásticos devido ao baixo custo (OTA *et al*, 2004).

Podem ser empregados na fabricação de aviões, barcos, e em diversos equipamentos da indústria.

A resina epóxi caracteriza-se por sua elevada resistência a água, e agentes químicos (Bilurbina e Liesa,1990). Tem como principais aplicações revestimentos superficial, e como matriz em compósitos.

Quando a fibra de vidro é adicionada à resina epóxi torna o produto um elemento de elevada resistência à tração, flexão e ao impacto. Permite ampla flexibilidade em projetos, sendo facilmente modelável em peças complexas.

Já para o caso do cilindro tipo 1, tem-se somente o aço como material estrutural. Com a dimensão do aço somada com a espessura do compósito convertida para aço, através da fórmula 5 (item 2.4) .

Na tabela 3.4 têm-se as dimensões do cilindro tipo 1 parede fina. E na tabela 3.5 encontram-se as dimensões do cilindro de aço de parede espessa.

**Tabela 3.4:** Característica do cilindro Tipo 1, parede fina.

| <b>Características</b>     | <b>Dados</b>            |
|----------------------------|-------------------------|
| Raio Interno               | 170,0 mm                |
| Espessura da Parede do Aço | 8,40 mm                 |
| Material                   | Aço 30 CrMo             |
| Condição de Serviço        | 20,00 N/mm <sup>2</sup> |

**Tabela 3.5:** Característica do cilindro Tipo 1, parede espessa.

| <b>Características</b>     | <b>Dados</b>            |
|----------------------------|-------------------------|
| Raio Interno               | 170,00 mm               |
| Espessura da Parede do Aço | 22,90 mm                |
| Material                   | Aço 30 CrMo             |
| Condição de Serviço        | 20,00 N/mm <sup>2</sup> |

### 3.4 Definição do Elemento / Estado de Tensão

Modelo utilizado foi o 2D devido a memória RAM dos computadores convencionais serem limitadas para utilização do modelo 3D.

Foi utilizado um modelo 2D. A quantidade de nós na malha vai variar de acordo com as necessidades da análise da geometria do componente em estudo. No entanto para os modelos bidimensionais a quantidade máxima de nós é de nove por elemento.

Para o modelo de elementos finitos, foi adotado o modelo cilíndrico na qual as forças se encontram distribuídas perpendicularmente à direção longitudinal. Pode considerar que há estado plano de deformações, devido ao meio do cilindro assumir as deformações iguais à zero.

### **3.5 Condições de Contorno**

Para este trabalho, a análise de MEF foi feita através de um corte simétrico semi-circular no componente (Figura 3.2), como consequência teve-se redução do tempo de processamento, e a diminuição de nós da malha (Sinmec, 2013).

### **3.6 Critério de Convergência**

Para este trabalho, a análise do MEF foi realizada fazendo-se um corte simétrico no componente como demonstrado na Figura 3.2, levando em consideração a questão do tempo de processamento da análise através deste método, é aconselhável que a avaliação seja feita em uma seção mínima representativa (Sinmec, 2013). Portanto, para este caso foi considerado apenas a metade do componente, favorecendo o estudo e viabilizando o uso da memória RAM, devido à redução do número de nós da malha.

O critério de convergência foi adotado para uma variação menor que 5%, como sendo valor aceitável para um estudo preliminar.

### **3.7 Casos Estudados**

O modelo proposto inclui pressão que atua sobre as faces do entalhe. Um modelo sem pressão já foi executado e os resultados indicaram claramente que a pressão interna é extremamente relevante no que se diz respeito ao favorecimento de abertura de trincas no corpo (Carvalho, 2005).

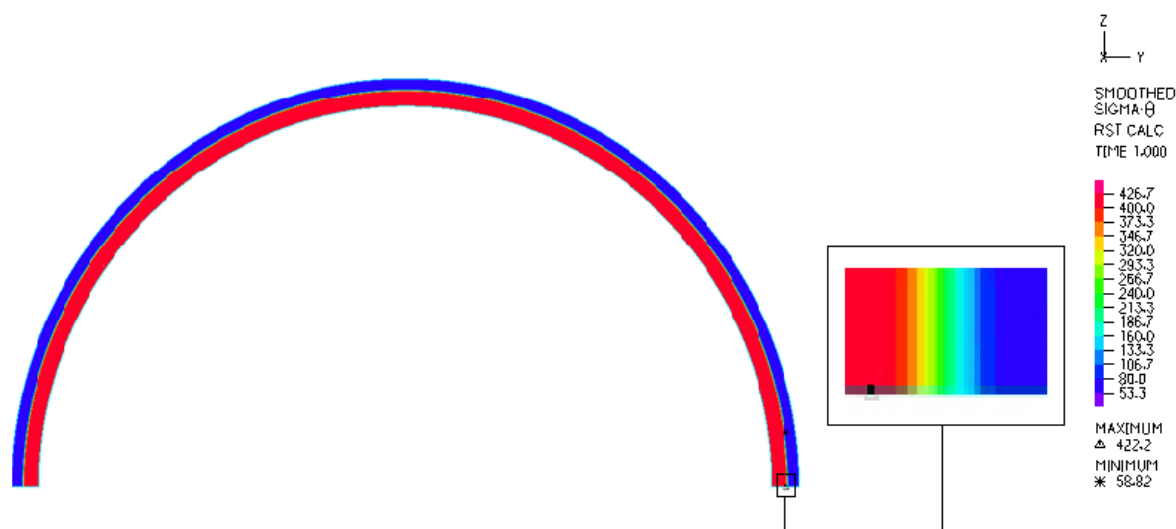
## CÁPITULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho foi elaborado através de uma modelagem geométrica 2D de um semicírculo. Os cilindros estudados neste trabalho não se encontram disponíveis em catálogos dos fabricantes para que possa ser comparados ou validados com os modelos industriais. Para todos os cilindros elaborados foram considerada uma única dimensão fixa interna, ou seja, o mesmo valor do raio interno. Assim os modelos analisados são unicamente para estudos preliminares de viabilidade estrutural.

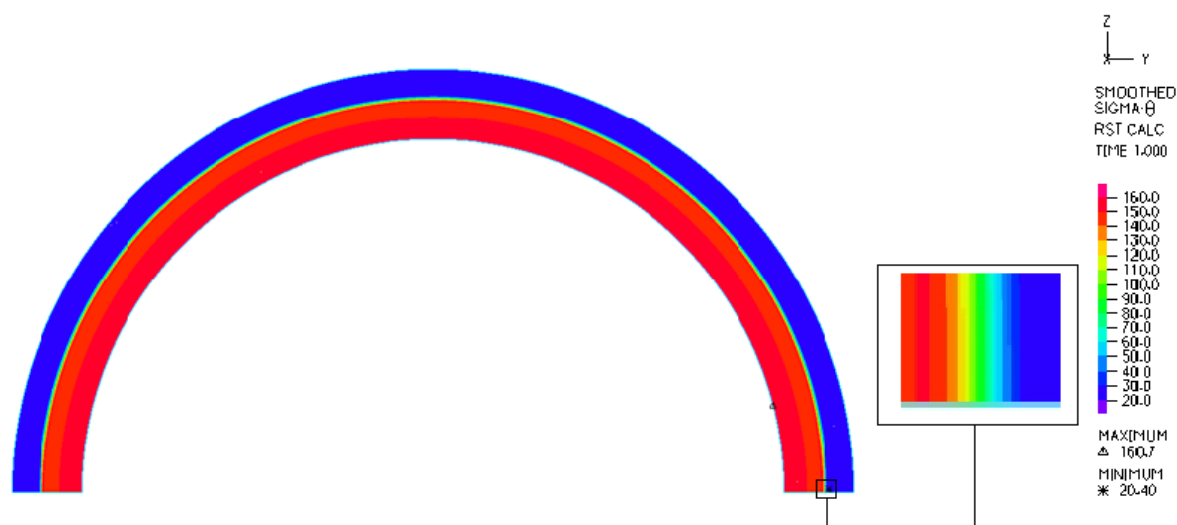
### 4.1 Avaliação do Modelo

#### 4.1.1 Estudo das Tensões na Parede do Semicírculo Íntegro

Neste primeiro caso foi feito um cilindro íntegro de parede fina (Figura 4.1), e outro de parede espessa (Figura 4.2) de bi-material (aço reforçado na região anular por compósito de fibra de vidro E com matriz epóxi). A pressão de serviço de  $20\text{N/mm}^2$  foi adotada segundo a norma ISO 11439.



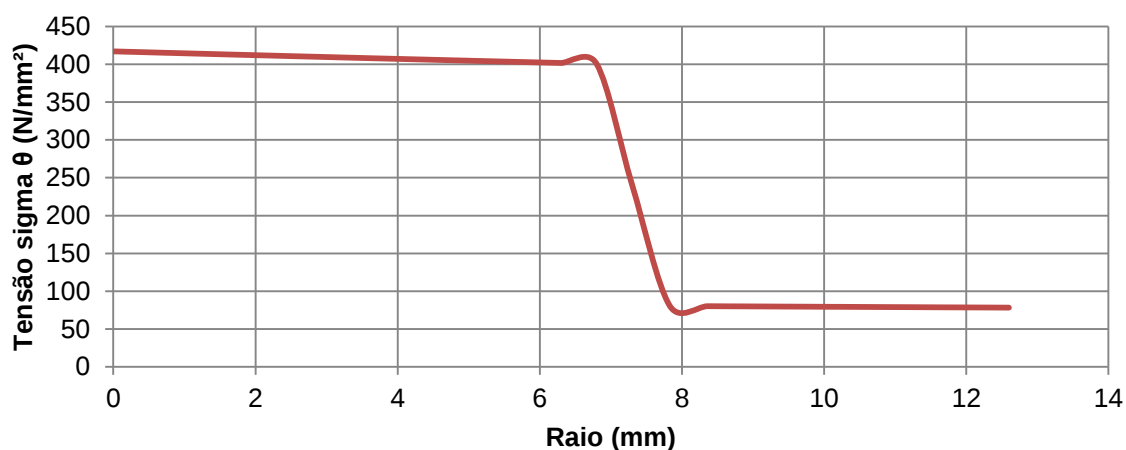
**Figura 4.1:** Imagem representativa de um cilindro perfeito de bi-material (parede fina). A escala mostra a análise de tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ), retirado do software.



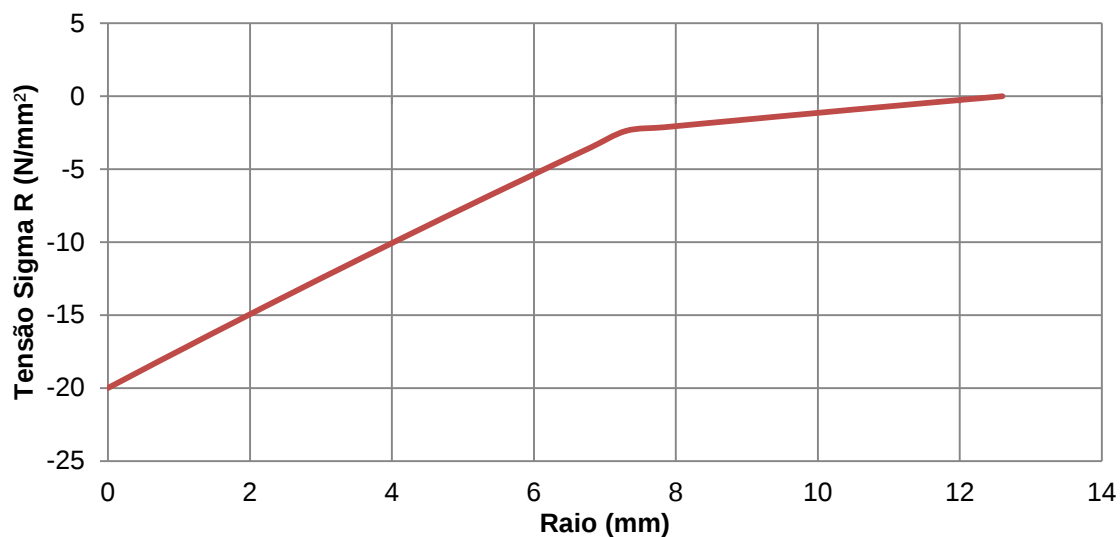
**Figura 4.2:** Imagem representativa de um cilindro perfeito de bi-material (parede espessa). A escala mostra a análise de tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ), retirado do software.

Neste primeiro caso foi estudada a tensão tangencial e a radial através de dados obtidos pelo programa de MEF e comparados com as equações clássicas. Sendo assim possível representar a distribuição de tensão nos diferentes tipos de materiais (Figura 4.3; 4.4; 4.5; 4.6).

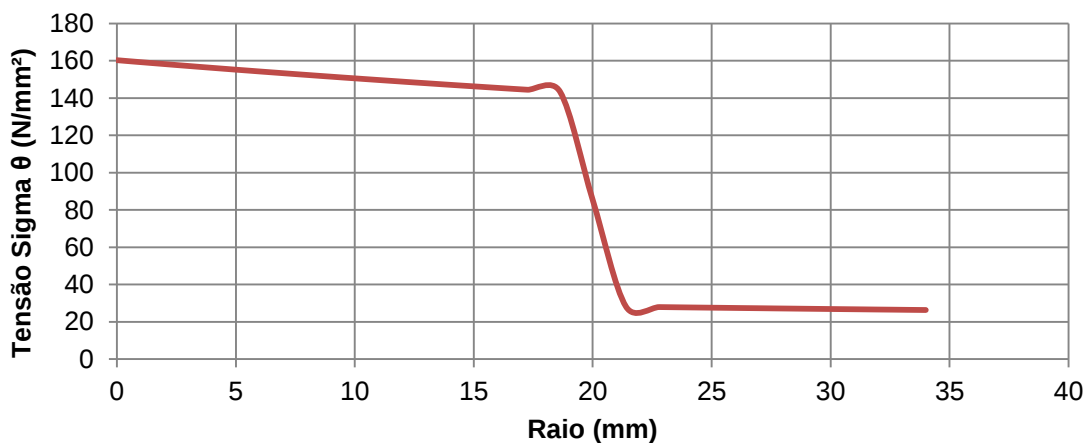
Nas Figuras 4.3 e 4.5, o reforço, de compósito os ressaltos presentes na linha se devem provavelmente ao necessário maior refinamento da malha.



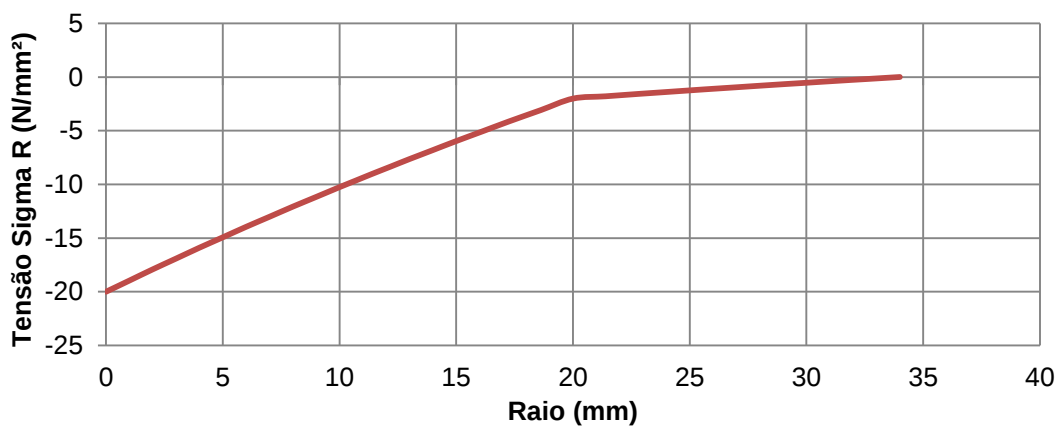
**Figura 4.3:** Representação gráfica de tensão tangencial ao longo da espessura do cilindro de parede fina de bi-material.



**Figura 4.4:** Representação gráfica de tensão radial ao longo da espessura do cilindro de parede fina de bi-material.



**Figura 4.5:** Representação gráfica de tensão tangencial ao longo da espessura do cilindro de parede espessa de bi-material.



**Figura 4.6:** Representação gráfica de tensão radial ao longo da espessura do cilindro de parede espessa de bi-material.

A importância desse primeiro estudo é de avaliar se o modelo adotado e os dados obtidos estão se aproximando com as fórmulas encontradas na literatura para tensão tangencial e radial, as quais já são conhecidas para cilindro sem entalhe. Para esse cálculo considerou-se a pressão externa  $p$  sendo igual a zero (item 2.3.3), logo as fórmulas adotadas para ambos os casos de vasos tipo 1 e tipo 2 fora, a (3) e (4). Para a região onde se inicia o reforço foi adotada a metodologia semelhante ao cálculo de vigas compostas (item 2.4, fórmula (9)), onde esse valor pode ser inserido nas fórmulas (1) e (2) somando-se ao raio externo, determinar os valores das tensões nominais e radiais. Com isso pode ser comparado e validado com o modelo adotado para o cilindro de parede perfeita.

Os cálculos das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 podem ser verificados nos apêndices I e II.

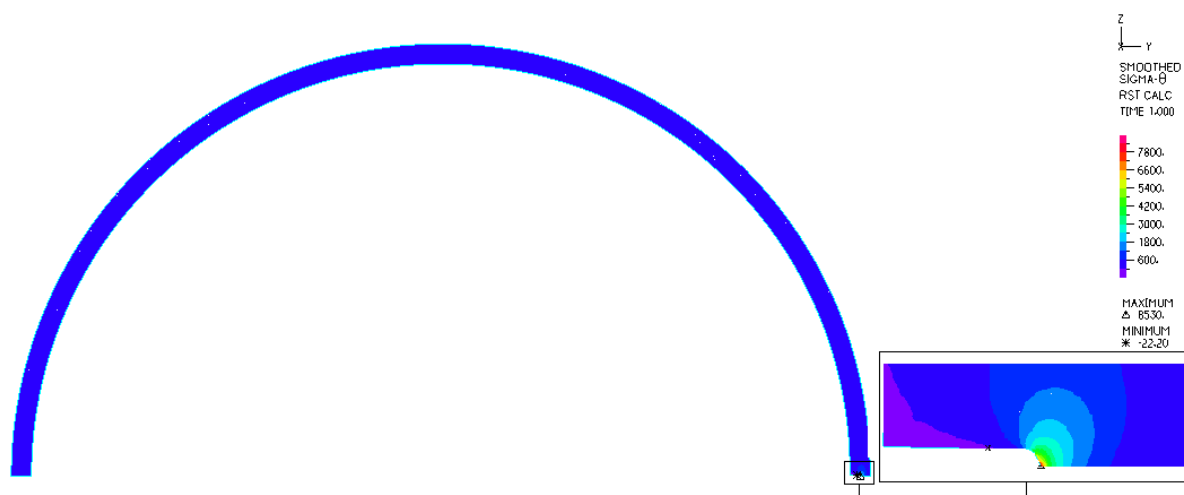
#### **4.1.2 Estudo das Tensões na Parede do Semicírculo com Descontinuidade**

##### **4.1.2.1 Tensão Tangencial**

Os vasos em estudo foram: parede fina e espessa de bi-material (aço reforçado por compósito) e outro somente de aço, sendo ambos com as mesmas dimensões.

Neste trabalho foram avaliadas 5 descontinuidades no cilindro  $\rho/w$ : 4,42; 5,04; 5,67; 6,30; 6,93 (Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10). Sendo,  $\rho$  representada pelo raio do entalhe,  $d$  profundidade do entalhe e  $w$  correspondente à espessura nominal do cilindro.

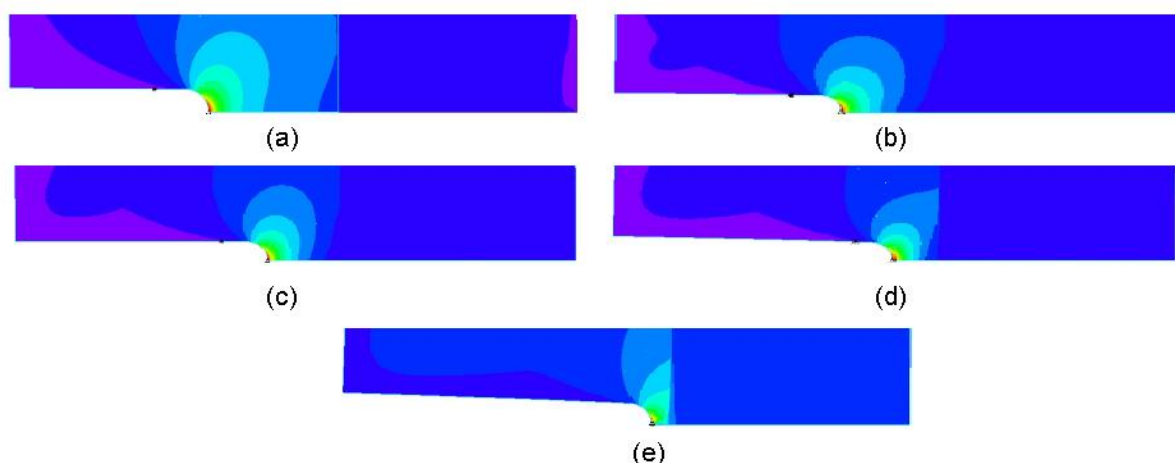
Na figura 4.7, é apresentado o cilindro em forma de  $U$  de aço parede fina retirado do software. Sendo representada a ampliação das imagens nas Figuras 4.8; 4.9; 4.10 e 4.11. Para todas essas imagens tanto a profundidade quanto o raio do entalhe foram os mesmos, mudando apenas a espessura da parede e o material, podendo este ser de aço ou bi-material.



**Figura 4.7:** Semicirculo de parede fina de aço. Imagem ampliada da tensão na região do entalhe com profundidade de 4,42.

Com a variação para as diferentes profundidades do entalhe no cilindro  $U$  em estudo, pode-se notar que as tensões sofreram aumento de acordo com os as figuras 4.12 e 4.13. Porém nas Figuras 4.8; 4.9; 4.10 e 4.11 as franjas de tensão reduzem aparentemente.

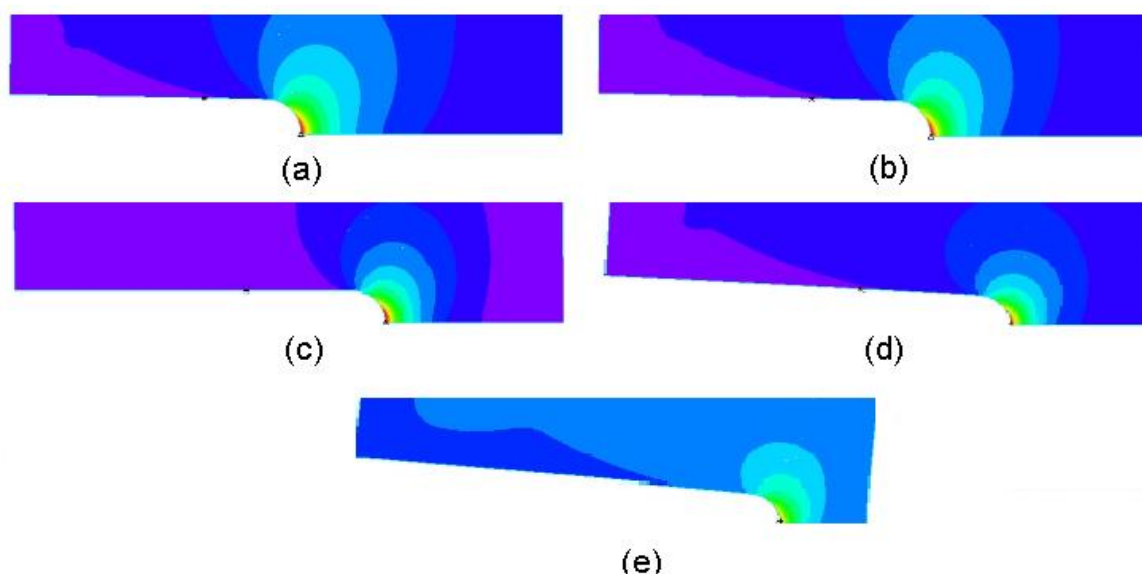
Na Figura 4.8 está representada a região de entalhe do bi-material de parede fina. Pode-se observar que com o aumento da profundidade ao entalhe as franjas começam a se estreitar e se alongar na medida em que vai se aproximando da interface do reforço de compósito.



**Figura 4.8:** Representação das diferentes profundidades para tensão sigma  $\theta$  do MEF feita no cilindro de bi-material com parede fina. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93.

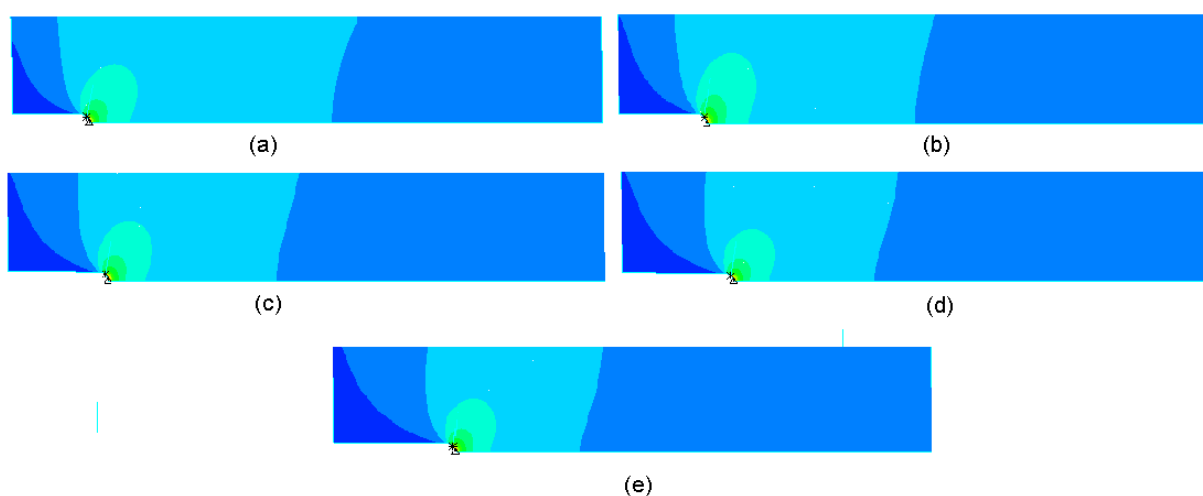
No caso do aço de parede fina Figura 4.9, a espessura foi reduzida em relação à Figura 4.8, devido à “transformação” do compósito em um material

equivalente ao aço, isto é possível com uso da fórmula (5). Com isso o aumento da profundidade ao entalhe fez com que a malha do programa se deformasse fazendo com que a geometria do entalhe ficasse levemente inclinada.



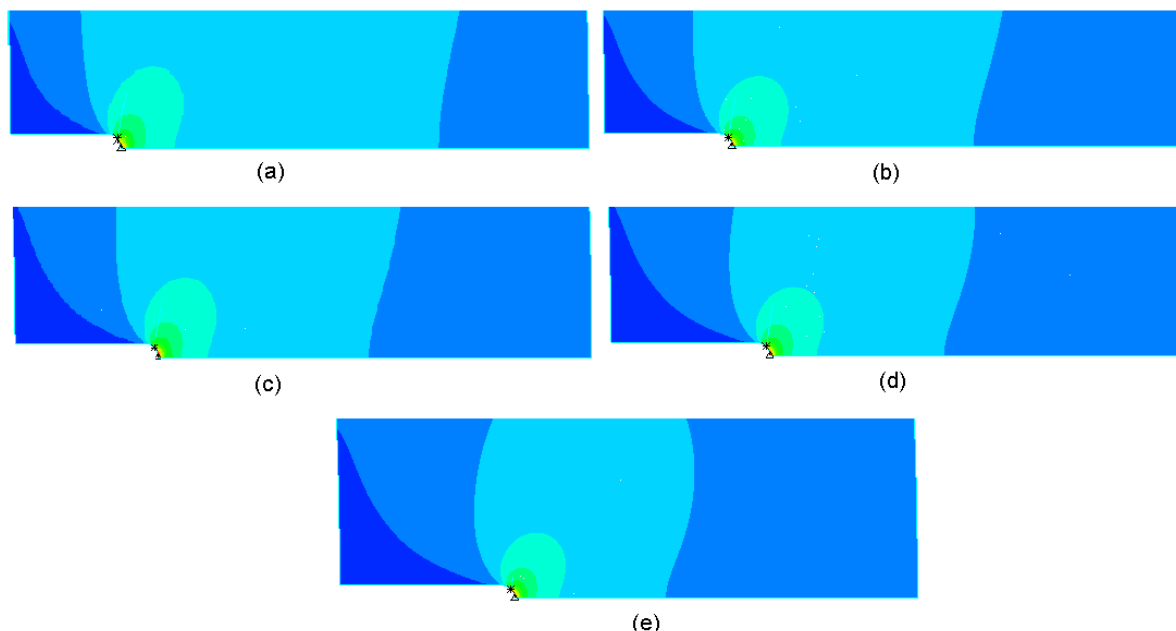
**Figura 4.9:** Representação das diferentes profundidades para tensão sigma  $\theta$  do MEF feita no cilindro de aço com parede fina. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93.

Com a mudança de estudo para o cilindro  $U$  de parede espessa de bi-material a figura 4.10, quando comparada com a Figura 4.8 não ocorreu o estiramento da franja para o ultimo caso com a profundidade do defeito de 6,93; pois se trata agora de um vaso de parede de grande espessura, logo o entalhe fica muito distante da parede do reforço.



**Figura 4.10:** Representação das diferentes profundidades para tensão sigma  $\theta$  do MEF feita no cilindro de bi-material com parede espessa. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93.

Para o cilindro de aço de parede espessa Figura 4.11, a espessura da parede sofreu redução, devido à “transformação” do compósito em material equivalente ao aço (fórmula 5). Porém por se tratar da simulação de um semicírculo de parede espessa não ocorreu o “erro” de inclinação do entalhe (Figura 4.9; d, e).

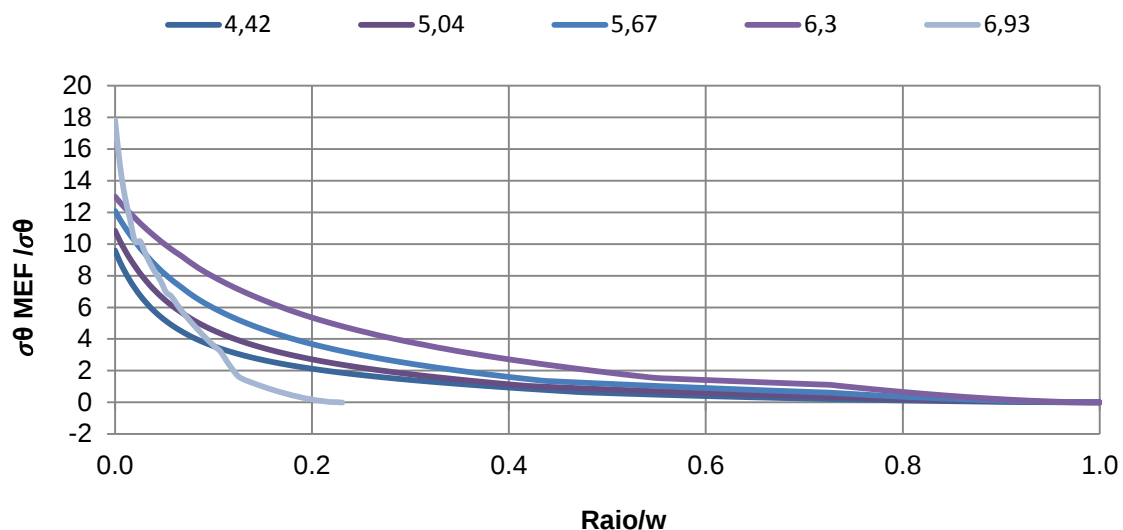


**Figura 4.11:** Representação das diferentes profundidades para tensão sigma  $\theta$  do MEF feita no cilindro de aço com parede espessa. A imagem (a) representa a profundidade ao entalhe de 4,42; (b) profundidade ao entalhe de 5,04; (c) profundidade ao entalhe de 5,67; (d) profundidade ao entalhe de 6,30; (e) profundidade ao entalhe de 6,93.

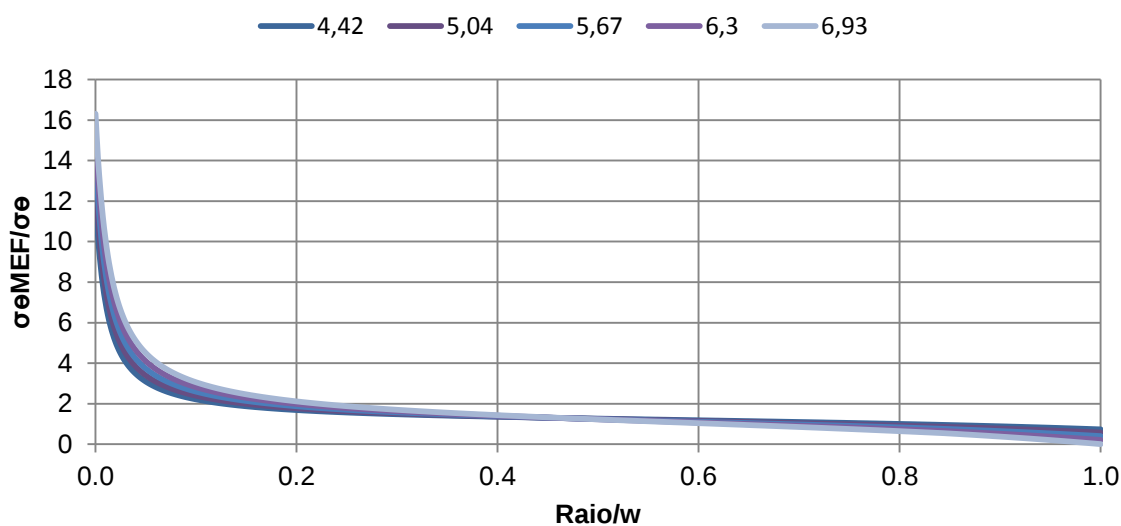
Nas Figuras 4.12 e 4.13 estão representadas as distribuições das tensões tangenciais ao longo do raio da tubulação para cada profundidade de entalhe.

Na figura 4.12, o gráfico (a) representa o cilindro de aço de parede fina e o (b) de parede espessa. Para ambos os gráficos, na medida em que se aprofunda o entalhe a razão da  $\sigma_{\theta MEF} / \sigma_{\theta}$  aumenta quando o material é o aço, e cai após a zona de transição para o reforço.

A curva da distribuição de tensão para o material homogêneo se comporta como esperado, como representado no item 2.3.3 Figura 2.5 (b) e (c).



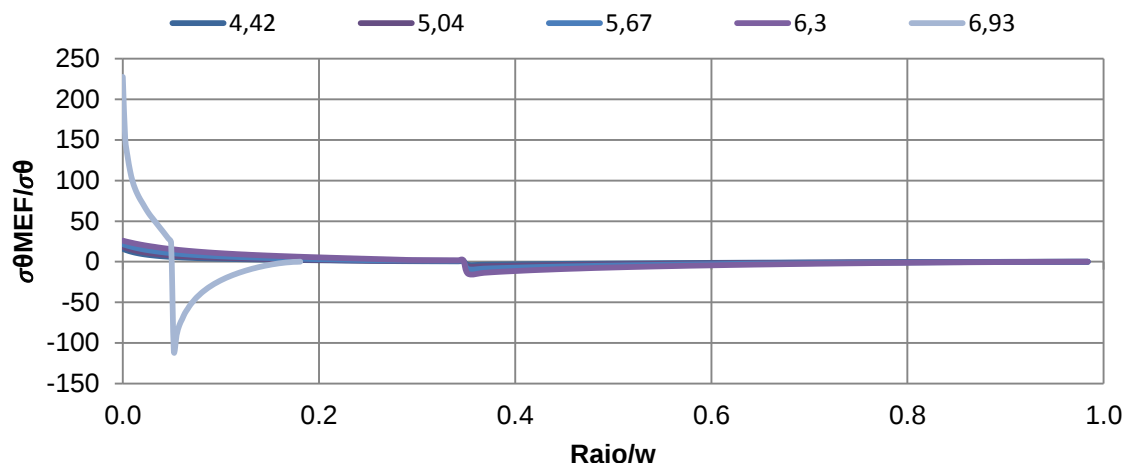
(a)



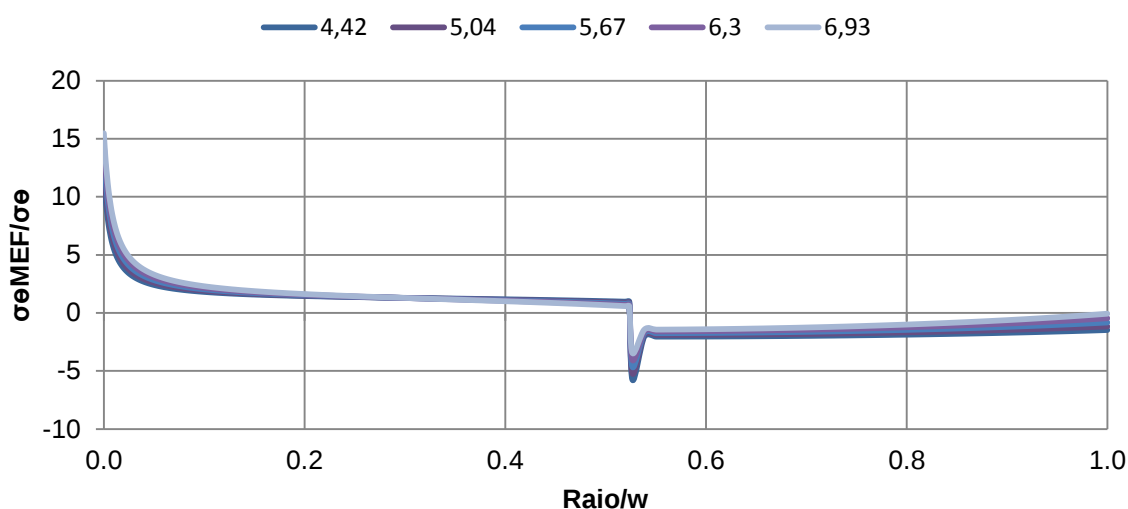
(b)

**Figura 4.12:** Representação gráfica para as diferentes distribuições de tensão tangencial ao longo da espessura da parede das geometrias em estudo com suas diferentes descontinuidades no cilindro de aço de parede fina (a) e no cilindro de aço de parede espessa (b).

Na figura 4.13 os gráficos (a) e (b) se diferem da Figura 4.12 por se tratar de bi-material, logo a distribuição de tensão não poderia ser a mesma. Observa-se um declínio brusco da tensão nos gráficos, sendo esta a região de mudança de material, ou seja, do aço para o compósito (reforço).



(a)



(b)

**Figura 4.13:** Representação gráfica para as diferentes distribuições de tensão tangencial ao longo da espessura da parede das geometrias em estudo com suas diferentes descontinuidades no cilindro de bi-material de parede fina (a) e no cilindro de bi-material de parede espessa (b).

Os gráficos das Figuras 4.12 e 4.13 representam cada uma das cinco descontinuidades avaliadas à distribuição de tensão tangencial, com o intuito de adimensionalizar por meio da razão entre a tensão tangencial com uso do MEF e a tensão tangencial da parede do cilindro calculada ( $\sigma_{MEF}/\sigma$ ) em relação à razão entre o raio (distância obtida pelo software) e a espessura da parede do cilindro, ou seja, considerando a espessura do tubo íntegro. Portanto o valor mínimo da abscissa é 1. Essa adimensionalização tem por objetivo a comparação das curvas de cada caso estudado. Os gráficos (a) da Figura 4.12 e (a) da Figura 4.13

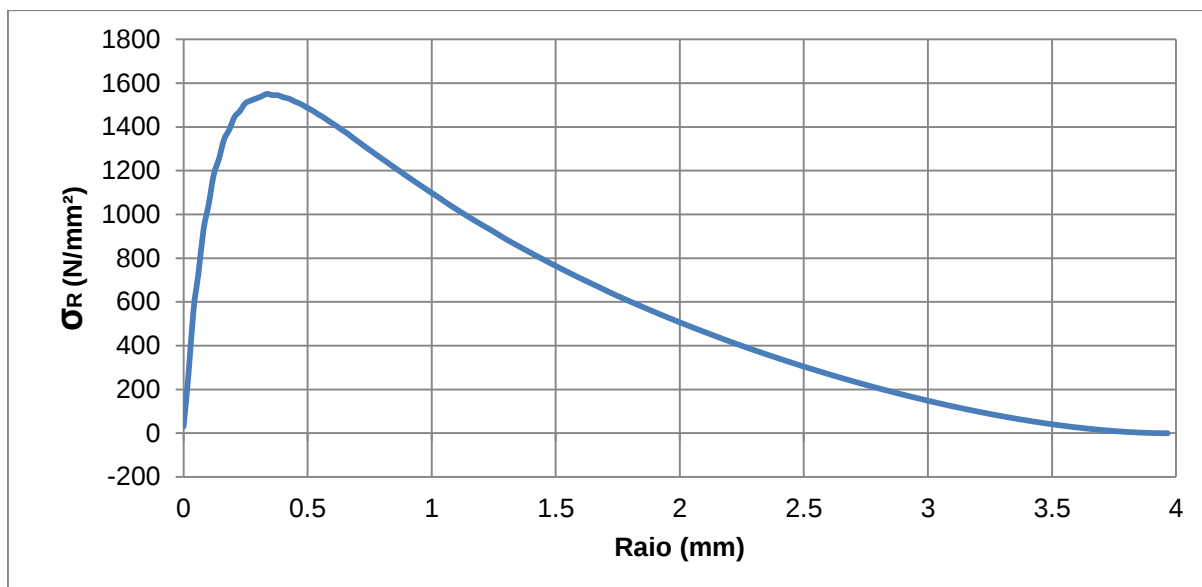
representam o cilindro de parede fina, para este estudo a profundidade do entalhe de 6,93 não pode ser refinada em relação às demais profundidades, pois a divisão da geometria adotada não permitiu que o refinamento da malha fosse feita, devido ao aumento da profundidade do defeito estar se aproximando com a espessura da parede, além disso, a geometria do defeito ser extremamente pequena o que dificultou ainda mais a geração de malhas com formato regulares. Já os gráficos (b) da Figura 4.12 e (b) da Figura 4.13 se comportaram de maneira mais uniforme, por se tratar de um cilindro de parede espessa.

Os cálculos das figuras 4.12 e 4.13 podem ser verificados no apêndice III.

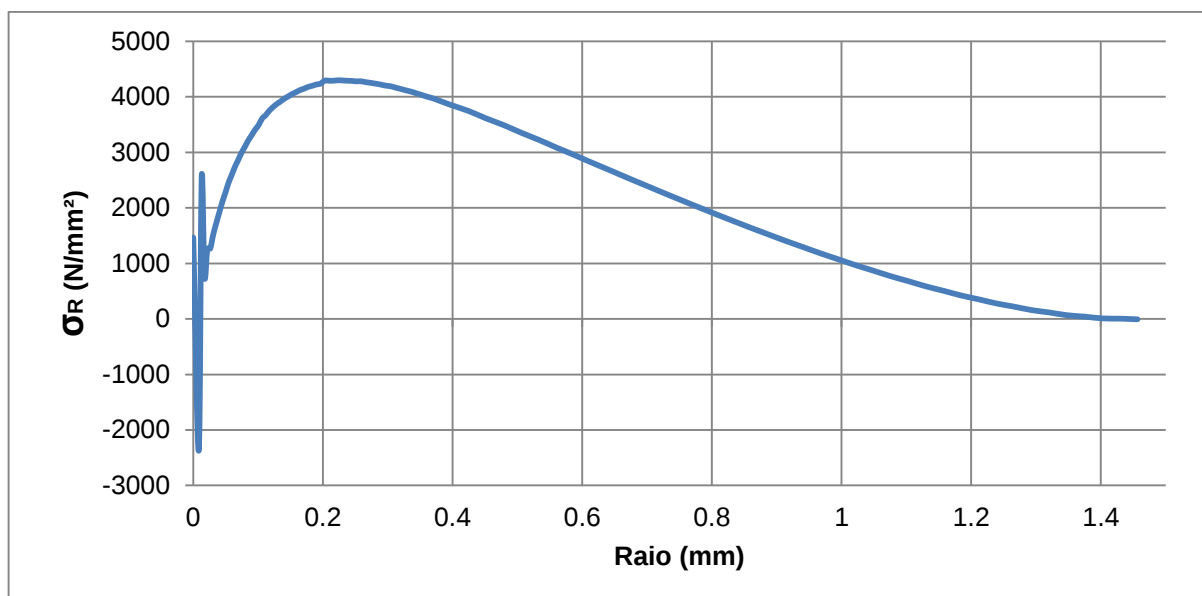
#### **4.1.2.2 Tensão Radial**

As Figuras 4.14 até 4.17 demonstram em módulo a distribuição da tensão radial ao longo da espessura da parede, considerando as duas profundidades de entalhe: 4,42 e 6,93. Isto significa que foram considerados apenas o menor e o maior defeito estudado.

Na Figura 4.14 no gráfico (b), verificaram-se vários picos de tensões, e isto não era o resultado aguardado. Este fato pode ter ocorrido devido ao baixo refinamento da malha nas regiões E e G (Figura 3.2, geometria a), e também devido a espessura da parede ser muito fina e a profundidade do entalhe ser maior de 6,93, portanto, tornou-se uma área com a malha possuindo geometrias irregulares. Este fato não ocorre para o gráfico (a), a tensão radial comportou-se de forma esperada.



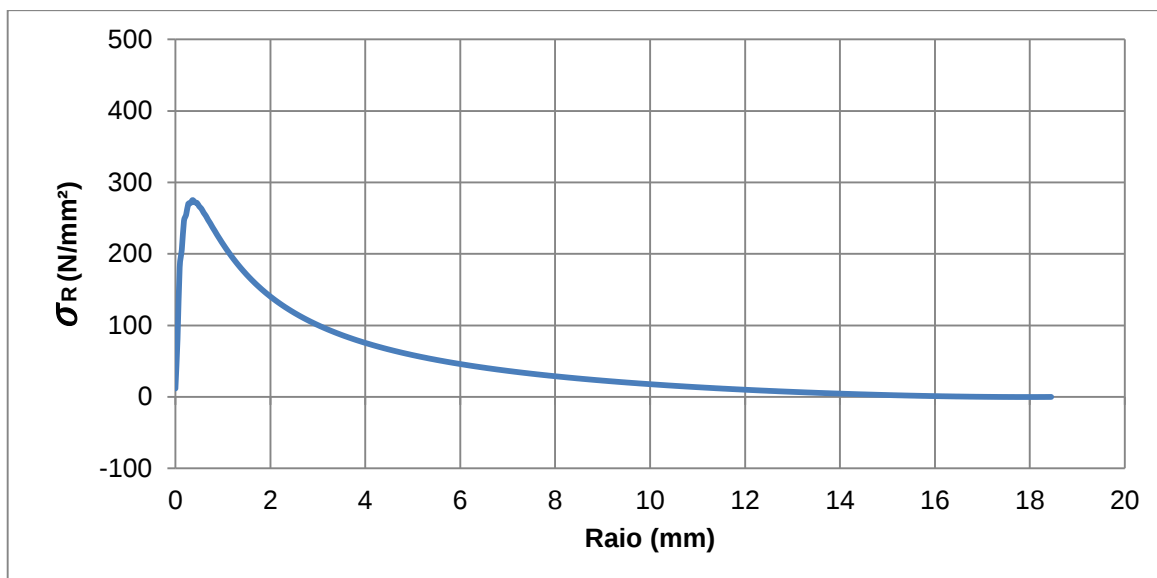
(a)



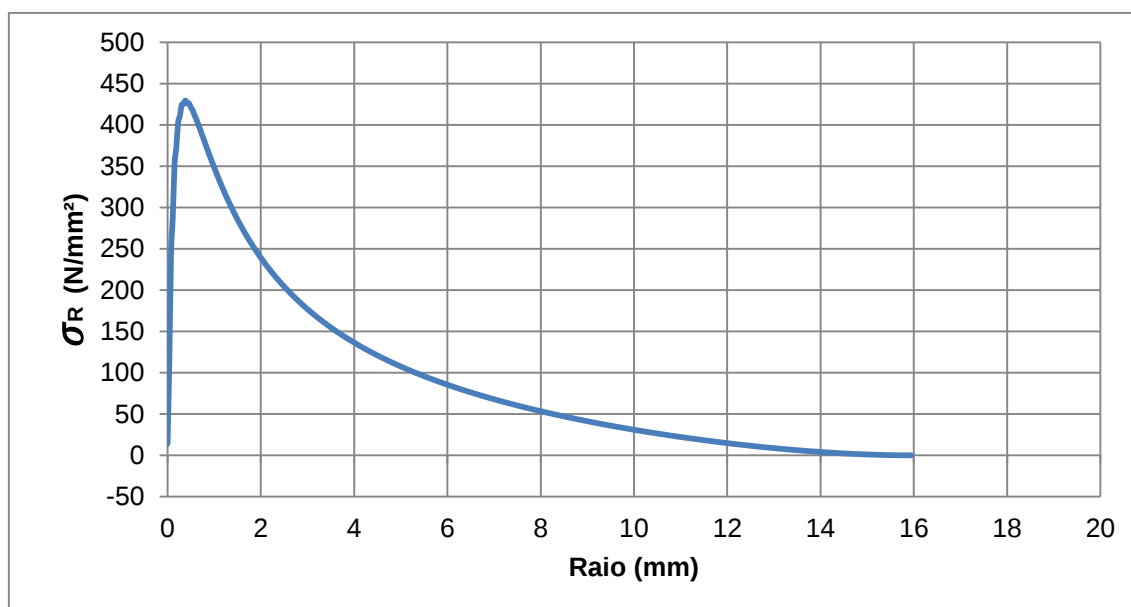
(b)

**Figura 4.14:** Distribuição gráfica da tensão radial ao longo da espessura da parede fina do cilindro de aço, com profundidade do entalhe de (a) 4,42 e (b) 6,93.

Quando comparadas as Figuras 4.14 e 4.15, nota-se que com o aumento da espessura da parede a tensão radial decresce bruscamente. Além disso, os erros de pico para a parede espessa não ocorreram.



(a)



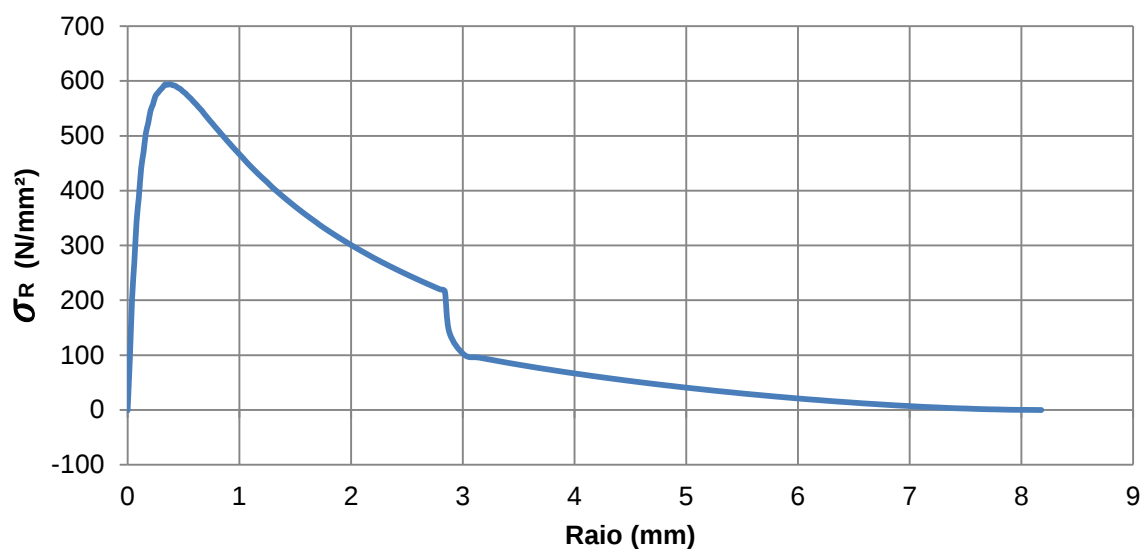
(b)

**Figura 4.15:** Distribuição de tensão radial ao longo da espessura da parede espessa do cilindro de aço, com profundidade do entalhe de (a) 4,42 e (b) 6,93.

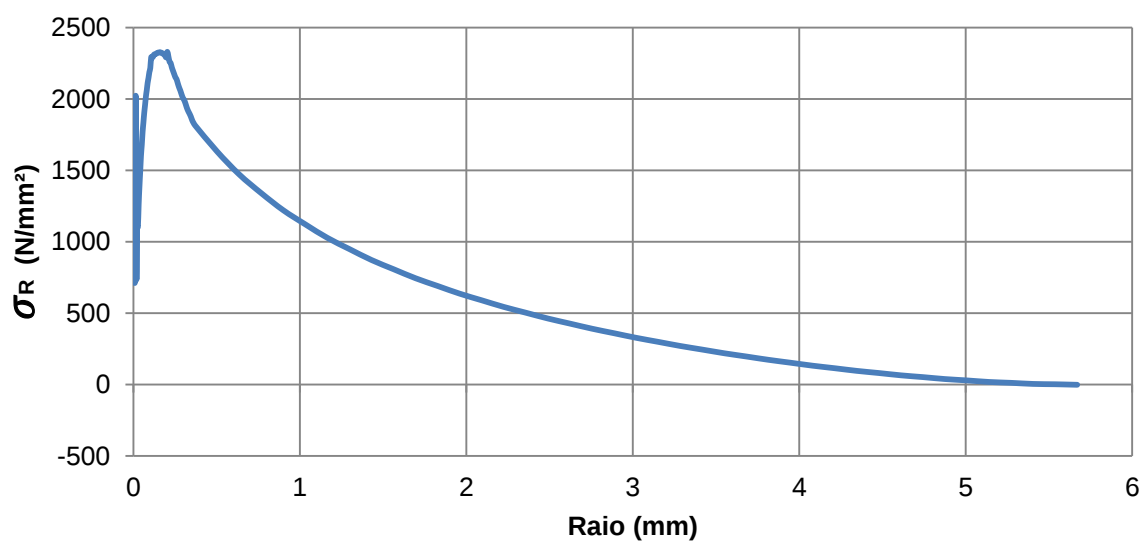
Na Figura 4.16, gráfico (b) o pico de tensão se fez presente, porém em menor quantidade, quando comparado com a Figura 4.14, gráfico (b). Acredita-se que isto foi possível devido a parede ser um pouco mais espessa do que o aço de parede fina, possibilitando a malha ter ficado com geometria mais regular .

Outra observação importante é a comparação da figura 4.14 com a figura 4.16, pois o aço apresentou as tensões radiais mais elevadas do que a de bi-

material. Isto pode ser observado também no estudo de cilindro GNV por Guáma, 2012.



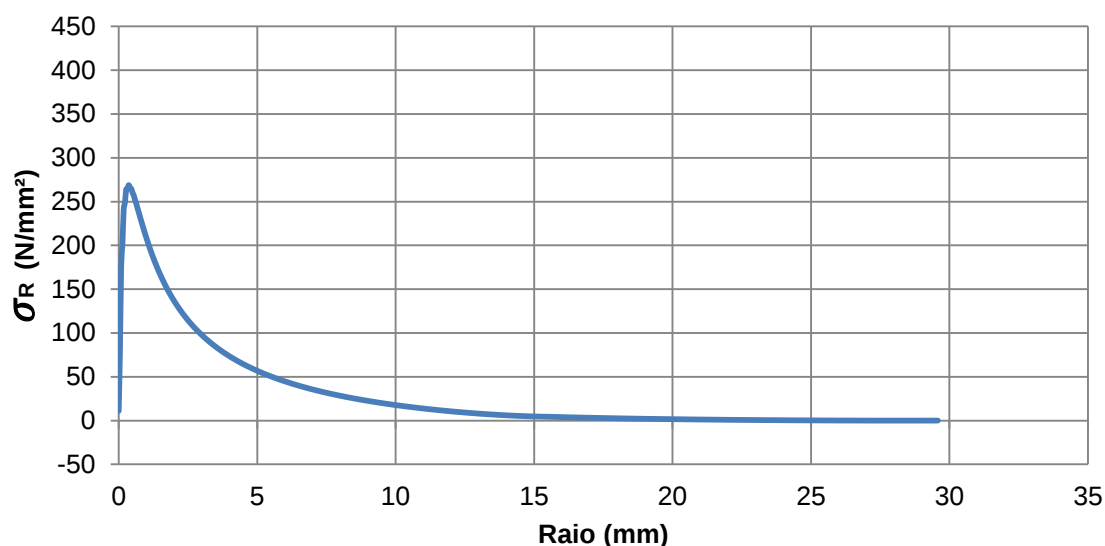
(a)



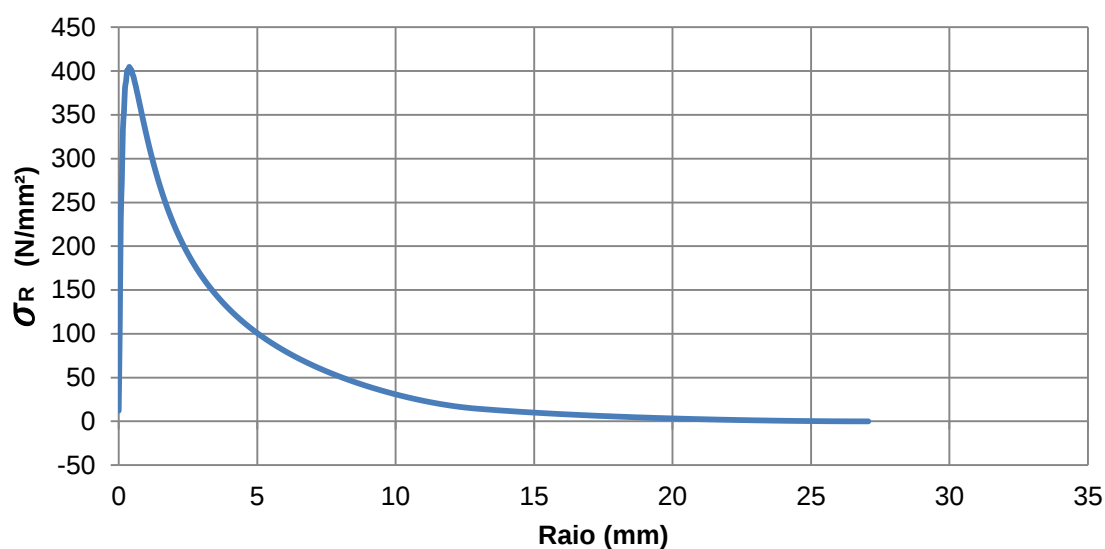
(b)

**Figura 4.16:** Distribuição de tensão radial ao longo da espessura da parede fina do cilindro de bi-material, com profundidade do entalhe de (a) 4,42 e (b) 6,93.

Já para a parede espessa de bi-material Figura 4.17 essa diferença de tensão em relação ao aço não foi observada. Podendo o modelo ter apresentado algum erro na malha ou a espessura do compósito não foi o suficiente para apresentar alguma diferença significativa.



(a)



(b)

**Figura 4.17:** Distribuição de tensão radial ao longo da espessura da parede espessa do cilindro de bi-material, com profundidade do entalhe de (a) 4,42 e (b) 6,93.

É importante resaltar que para a análise numérica das tensões tangenciais foram significativas para os semicírculos de parede fina, contudo, para análise de tensões radiais será fundamental o aprofundamento do estudo.

O estudo para elaborar a geometria e o refinamento de malha demandou de muito tempo e estudo, mais erros do que acertos para que fosse possível chegar aos resultados desejados. Porém, existem ainda casos que requerem estudos mais aprofundados como a tensão radial para parede fina, e também a análise de tensão

tangencial e radial para parede espessa comportou-se de forma não esperada para este estudo.

Os cálculos realizados para a elaboração das Figuras 4.14; 4.15; 4.16; 4.17 podem ser encontrados no apêndice IV.

Segue a seguir a Tabela 4.1 comparando os valores das tensões tangenciais e radiais obtidos pelo software, como representa os gráficos das Figuras 4.12 até 4.17.

**Tabela 4.1:** Valores máximos das tensões tangenciais e radiais para cada profundidade de entalhe.

| <b>Tensão Tangencial Adimensionalizada</b> |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                            | Cilindro de aço<br>parede fina                  | Cilindro de aço<br>parede espessa               | Cilindro de bi-<br>material parede<br>fina      | Cilindro de bi-<br>material parede<br>espessa   |
| $d$                                        | $\sigma_{\theta \text{ MEF}} / \sigma_{\theta}$ | $\sigma_{\theta \text{ MEF}} / \sigma_{\theta}$ | $\sigma_{\theta \text{ MEF}} / \sigma_{\theta}$ | $\sigma_{\theta \text{ MEF}} / \sigma_{\theta}$ |
| 4,42                                       | 9,59                                            | 12,17                                           | 15,94                                           | 11,91                                           |
| 5,04                                       | 10,84                                           | 13,16                                           | 18,50                                           | 12,79                                           |
| 5,67                                       | 12,09                                           | 14,18                                           | 21,64                                           | 13,68                                           |
| 6,30                                       | 13,00                                           | 15,23                                           | 25,97                                           | 14,57                                           |
| 6,93                                       | 17,83                                           | 16,31                                           | *                                               | 15,47                                           |
| <b>Tensão Radial</b>                       |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |
|                                            | Cilindro de aço<br>parede fina                  | Cilindro de aço<br>parede espessa               | Cilindro de bi-<br>material parede<br>fina      | Cilindro de bi-<br>material parede<br>espessa   |
| $d$                                        | $\sigma_R$                                      | $\sigma_R$                                      | $\sigma_R$                                      | $\sigma_R$                                      |
| 4,42                                       | 1551,14                                         | 275,40                                          | 594,3                                           | 241,52                                          |
| 6,93                                       | 4298,52                                         | 429,51                                          | 2331,29                                         | 404,79                                          |

\*Para este estudo a profundidade do entalhe não pode ser refinada em relação aos demais. Devido a isto obteve-se valor mto acima dos demais.

Nas tensões tangenciais adimensionalizadas obtem-se valores máximos proximos, para os diferentes tipos de profundidade de entalha, nos diferentes tipos de cilindros visto na tabela 4.1. Já para as tensões radiais os valores das tensões máximas nos cilindros de aço tiveram valores significativamente maiores comparados aos de bi-material (tabela 4.1).

## CAPÍTULO 5- CONCLUSÕES

O presente trabalho pode ser resumido primeiramente em simular por meio do método de MEF os vasos tipo 1 (aço) e tipo 2 (aço reforçado com fibra de vidro na região anular), avaliando o comportamento das tensões com uma descontinuidade presente. Após isso foi desenvolvida uma metodologia analítica e o estudo do vaso de pressão em sua menor parte representativa, o que permitiu o conhecimento das tensões radiais e tangenciais para cada tipo de vaso e defeito estudado. Por fim os resultados detalhados na tabela 4.1 pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Os valores obtidos nas tensões tangenciais adimensionalizada foram valores próximos uns dos outros, possibilitando o uso do reforço para os vasos de pressão danificados, além disso, obter a diminuição do peso para os vasos de pressão de parede fina. Já para os vasos de parede espessa o uso do reforço pode ser usado como função de curativo.
- Para as tensões radiais as variações foram elevadas no caso dos cilindros de aço quando comparados ao de bi-material. Esta tensão mais alta no cilindro tipo 1 já era esperado, pois o reforço atuou como uma cinta no alívio de tensão.

## **CAPÍTULO 6- SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

Aumentar o número de subdivisões na região próxima ao entalhe, para a geometria utilizada do semicírculo de parede fina.

A modelagem analítica apresentada só avalia o vaso de pressão carregado internamente. Porém outros carregamentos existem como a pressão exercida pelo compósito na parede do aço.

Recomenda-se que os resultados obtidos sejam comparados com resultados experimentais.

## Referência Bibliográfica

Alves Filho, Avelino, (2000).Elementos Finitos : A Base da Tecnologia CAE, São Paulo: Ética.

Askeland, Donald R.; Phulé, Pradeep P.(2003) The science and engineering of materials. 4.ed. California: Brooks/Cole-Thomson Learning.

ASM 1990, Properties and Selection: Irons, Steels, and high performance alloys, Metals Handbook, VI, Metals Park, Ohio.

American Society of Mechanical Engineers. 2007. Boiler and Vessel Code: ASME Section VIII, divisions 1, 2 and 3. New York.

Barbero,E.J. (1999).Introduction to Composite Materials Design. New York:Taylor & Francis Group.

Barrios,Benítez;Angelo,Etevado;Pappalardo JR.,Afonso(2005).Demosn-tração do efeito da concentração de tensões empregando o método dos elementos finitos no processo de ensino na Engenharia mecânica.Disponível em:< <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2005/artigos/sp-9-21458881873-1117721395779.pdf>> Acesso em 16 de dezembro 2014.

Bilurbina,L., Liesa, F. (1990) Materiales no Metálicos Resistentes a la corrosión, Barcelona , Productica.

Boniatti, D. L., Iturrioz, I. (2003) Análise do Comportamento de Fadiga para Estruturas Submetidas a Temperaturas Elevadas Aliadas a Esforços Cíclicos. Brasil: UFRGS.

Budynas, Richard G., Nisbett, J. Keith. (2011) Elementos de Máquinas de Shigley.McGraw-Hill.

Callister JR, W. D. (2012) Ciência a Engenharia dos Materiais: Uma introdução, 8ª ed., Rio de Janeiro, LTC.

Cândido, G.M;Rezende,M.C;Donadon,M.V;Amelida, S.F.M.(2012) Fractografia de compósito estrutural aeronáutico submetido à caracterização de tenacidade à fratura interlaminar em modo I. Disponível em < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282012000100009](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282012000100009)> Acesso em : 03 de março de 2015.

Canevaloro JR., S. V.(2002) *Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. Artliber Editora: São Paulo.

Carvalho, E. A. (1992) Determinação de Fatores de Intensificação e Concentração de Tensões para Entalhes do Tipo "V". Dissertação, Brasil: PUC-RJ.

Carvalho, E.A. (2005) Stress concentration factors for an internally pressurized circular vessel containing a radial U-notch. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 82v, 517–521p.

Castro, J.T.P., Meggaiolaro, M.A. (2009) Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. Vol. I e II.

Chattopadhyay, S. (2005) Pressure vessels: design and practice. CRC Press.

Chawla, K. K., (1987) *Composite Materials: Science and Engineering*. 1st ed. Springer-Verlag: New York.

Cimini JR., Carlos A. (2001) Conceitos de Análise Estrutural em Aeronaves. Brasil: UFMG.

Costa, L.B. (2010) Avaliação do Envelhecimento Estrutural de Reparos Estruturais Contituídos de Materiais Compósitos. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecânica). Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Cunha, R.C. (2005) Análise do Estado de Conservação de um Redutor de Velocidade Através da Técnica de Partículas de Desgaste no Óleo Lubrificante Auxiliada pela Análise de Vibrações. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

Cunha, J.A.P.; Costa, M.L.; Rezende, M.C. (2006) Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência à tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada. Disponível em < [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282006000300008&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282006000300008&script=sci_arttext) > Acessado em: 03 de março de 2015.

Daniel, I.M.; Ishai, O. (2003) Engineering Mechanics of Composite Materials. 2.ed. New York: Orford University Press.

De Mattos, G.B.; Lopes, L.C.R.; Villani, A.P.G.; Silva, T.C.; Gouvêia, J.P.; Moreira, L.P.; De Senne, A. (2008) Modelamento Numérico de um Cilindro do Tipo 2 para Armazenamento de GNV. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762008000100017&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762008000100017&script=sci_arttext)> Acessado em: 10 de junho de 2015.

Det Norske Veritas, (2003) Offshore standard DNV-OS-C501. 161p, 2003.

Falcão, C. (2002) Vasos de Pressão e Trocadores de Calor Casco e Tubos. Projeto Mecânico. Apostila.

Ferraz, H. (2003). O Aço na Construção Civil. Disponível em: < [http://www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art\\_22/aco.html](http://www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art_22/aco.html) > Acesso em : 02 de junho de 2015.

Freire JR. (2001) Estudo da Prevenção de Falha por Fadiga em Laminados de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W. (2003), *Composite Materials – Design and Applications*, CRC Press, 2003.

Gamstedt, E. K.; Sjögren, B. A. (1999): "Micromechanisms in Tension-Compression Fatigue of Composite Laminates Containing Transverse Plies", *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 167-178, 1999.

Gassan, J., Reihamane, S., Bledzki, A.K.(1996) Properties and Modification Methodos for Vegetable Fibers For Natural Fiber Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, v.59, p. 1329-1336.

Guamá, F.F.M.C; (2012) Análise Estrutural de Cilindros Revestidos de Compósitos Para Armazenamento de GNV. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Cheremisinoff, N. P.:(1995) *Fiberglass reinforced plastics*. Noyes Publications, New Jersey. 1995.

Gibson, R. F.:(1994) *Principles of Composite Material Mechanics*. 1st ed. Mc Graw Hill, 1994.

Gomes, L.F.M – O Mercado Potencial para o Transporte por Dutos no Brasil, PUC-Rio,1984.

Gonçalves,V.P. (2012) Avaliação do Comportamento Mecânico de Tubos e Compósitos Fabricados por Enrolamento Filamentar Submetidos à Pressão Interna. Dissertação (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Goodman,S.H.:(1988),*Handbook of Thermoset Plastics*. Noyes Publications: Westwood, New Jersey.

H. Tada, P.C, Paris, G.R. Irwin. (2000) *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. 3 ed., ASME, New York.

Hibbler, R.C. (2010) *Resistência dos Materiais*. 7 ed., Pearson, São Paulo.

Holroyd, N.J.H.; Ellis, M.B.D.;Canigan, J., Gorr,J.P.; Davis, W.F.; Davis, J.W. (1999) *Customized Gas Storage Fuel Systems for Natural Gas Vehicles*. Society for Advanced of Material and Process Engineering. Inc. Ohio. USA.

Hull, D. (1981)*An Introduction to Composite Materials*. Cambridge.

Hull, D., Clyne, T. W.:(1996) *An Introduction to Composite Materials*. 2nd ed. *Cambridge solid state science series*, Cambridge University Press: New York, NY.

Jesus, E.R.B.:(2012)*Materiais para Fabricação de Equipamentos de Processo*. Disponível em :< [http://www.cefetsp.br/edu/sertaozinho/revista/volumes\\_anteriores/volume1numero9/Artigos%20Numero%209/01.pdf](http://www.cefetsp.br/edu/sertaozinho/revista/volumes_anteriores/volume1numero9/Artigos%20Numero%209/01.pdf)> Acesso em : 26 de outubro de 2015.

Lee,K.,Neville,K.:(1957)*Epoxy Resins in their Application and Technology*. McGraw-Hill: New York, NY.

Lima Sobrinho, L. (2009), Desenvolvimento de Tubos Compósitos Visando Aplicação como Risers. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Lu, Y.L., Zhang, S.J., Huang, X.P., Huang, J. (2003) Determination of Histories of SIF Distributions for Axial Semi-Elliptical Surface Cracks in Hollow. Cylinders Subjected to Thermal Shock. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 80v, 167-178p.

Lucas, E. F., Soares, B. G., Monteiro, E., Caracterização de Polímeros– Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. E-papers: Rio de Janeiro, RJ - Brasil, 2001.

Lopes, A.G. (2012) Comportamento Mecânico da Fratura de Material Compósito Empregado na Aviação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia.

Mallick, P. K., (2007), Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design. 3 ed. Michigan, LLC.

May, C. A., (1988), *Epoxy Resins – Chemistry and Technology*. 2nd ed. Marcel Dekker: New York, NY.

Matthews, F. L.; Rawlings, R. D. (1994) Composite materials: engineering and science, Great Britain, Chapman & Hall, 470 p, 1994.

Megyesy, E.F. (2001) Pressure Vessel Handbook. Pressure Vessel Handbook Pub., 12 ed.

Mi, Y., Guo, Q., Chen, X. (1998) Bamboo Fiber-reinforced Polypropylene composites: A Study of the Mechanical Properties. Journal of Applied Polymer Science, 1998, V.69, p. 1891-18899.

Moreira, G.P. (2001), Cilindros Leves: uso para GLP e GNV. Disponível em: < [www.gasbrasil.com.br](http://www.gasbrasil.com.br) > Acesso em: 6 de junho de 2015.

OTA, W. N. (2004) Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia). Paraná, Universidade Federal do Paraná.

Pacheco, A.S (2013) Avaliação do Fator de Concentração de Tensão Presente em um Reparador de Tubulação de Aço AISI 316L. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual Do Norte Fluminense.

Pereira, D.G.L. (2014), Implementação e Análise da Técnica de Back Face Strain Compliance e Avaliação da Taxa de Propagação de Trinca em Corpos de Prova não Padronizados. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica). Brasília, Universidade de Brasília.

Pilkey W.D. (1977) Peterson's Stress Concentration Factors. 2 ed., Wiley Interscience.

Pinheiro,D.J.G (2010), Análise Estática e Dinâmica de Painéis Carrugados Construídos em Materiais Compósitos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Lisboa, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Rao, S.S.(1999)The Finite Element Method in Engineering. Butterworth Heinemann, 1999.

Rosa,E.(2002)Análise de resistência mecânica.1.ed.Santa Catarina:GRANTE,2002.

Salerno, G. (2013) Análise Numérica de Delaminação em Materiais Compósitos Carbono-Epóxi. Disponível em < <http://tecnologiainmm.com.br/files/v10n2/v10n2a08.pdf>> Acesso em 03 de março de 2015.

Shigley, J.E. (2008) Projeto de Engenharia Mecânica. 8 ed., Bookman, Porto Alegre.

SINMEC EMC-UFSC. (2013) Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor.Disponível em: <<http://www.sinmec.ufsc.br/sinmec/publicacoes/artigos/index.html>>. Acesso em 23 de novembro de 2014.

Sousa, S.R.M., Pina Filho, A.C., Dutra, M.S., (2007), “Estudo de Falhas em Risers Fabricados em Material Compósito”. 4 ° PDPETRO. Campinas.

Su, B.;Bhuyan, G.S. (1999) Fracture analyses on the all-metal cylindrs and the metal-lined hoop- wrapped cylinders with axial cracks. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 76v, 677–684p.

Suski, C.A (2004) Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimentos Superficiais na Vida de Ferramentas de Conformação Mecânica à Frio. Dissertação ( Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais). Florianópolis, Universidade Federal da Santa Catarina.

Taniguchi, H. (2008) Contribuição Estrutural de Cilindros em Compósitos para Armazenamento de Oxigênio sob Alta Pressão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). São Paulo, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos.

Telles, P.C.S.(1996) Vaso de Pressão. 2 ed.,LTC, Rio de Janeiro.

Tenek, L.T.; Argyris,J.(1998),Finite Element Analysis for Composite Structure .Kluwer Academic Publishers, London.

Vicente, W.M.(2009) Análise de Tensões em Placas Circulares Utilizando Elementos Finitos Axissimétricos. Brasil: UNIFE

Villena, J.E.N. (2004) Simulação de Reservatório não Convencionais para Armazenamento de Gás Natural Veicular. Dissertação( Mestrado em Engenharia Mecânica). Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

## APÊNDICE

### Apêndice I

Estudo da tensão tangencial e radial segundo o software, para um semicírculo perfeito de bi-material de parede fina.

| r1(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF (N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r2 (mm) | $\sigma_{r}$ MEF (N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{r}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--------|--------------------------------------------|----------------------------------------|---------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 0      | 417,07                                     | 415,65                                 | 0       | -20                                   | -20                               |
| 0,37   | 416,13                                     | 414,72                                 | 0,37    | -19,07                                | -19,07                            |
| 0,73   | 415,21                                     | 413,8                                  | 0,73    | -18,13                                | -18,14                            |
| 1,1    | 414,28                                     | 412,87                                 | 1,1     | -17,21                                | -17,22                            |
| 1,46   | 413,36                                     | 411,96                                 | 1,46    | -16,29                                | -16,31                            |
| 1,83   | 412,45                                     | 411,05                                 | 1,83    | -15,38                                | -15,4                             |
| 2,19   | 411,55                                     | 410,15                                 | 2,19    | -14,47                                | -14,49                            |
| 2,56   | 410,65                                     | 409,25                                 | 2,56    | -13,58                                | -13,6                             |
| 2,92   | 409,75                                     | 408,36                                 | 2,92    | -12,68                                | -12,71                            |
| 3,29   | 408,86                                     | 407,47                                 | 3,29    | -11,79                                | -11,82                            |
| 3,65   | 407,98                                     | 406,59                                 | 3,65    | -10,91                                | -10,94                            |
| 3,9    | 407,38                                     | 405,99                                 | 3,9     | -10,31                                | -10,34                            |
| 4,15   | 406,78                                     | 405,39                                 | 4,15    | -9,71                                 | -9,74                             |
| 4,45   | 406,07                                     | 404,69                                 | 4,45    | -9                                    | -9,03                             |
| 4,75   | 405,36                                     | 403,98                                 | 4,75    | -8,29                                 | -8,33                             |
| 5,1    | 404,52                                     | 403,15                                 | 5,1     | -7,45                                 | -7,49                             |
| 5,46   | 403,69                                     | 402,32                                 | 5,46    | -6,62                                 | -6,66                             |
| 5,88   | 402,71                                     | 401,34                                 | 5,88    | -5,64                                 | -5,69                             |
| 6,3    | 401,74                                     | 400,37                                 | 6,3     | -4,66                                 | -4,71                             |
| 6,8    | 400,58                                     | 399,22                                 | 6,8     | -3,52                                 | -3,57                             |
| 7,3    | 240,05                                     | 398,09                                 | 7,3     | -2,37                                 | -2,43                             |
| 7,83   | 80,41                                      | 396,89                                 | 7,83    | -2,13                                 | -1,24                             |
| 8,36   | 80,16                                      | 81,12                                  | 8,36    | -1,88                                 | -0,01                             |
| 8,89   | 79,92                                      | 80,88                                  | 8,89    | -1,64                                 | 0,23                              |
| 9,42   | 79,68                                      | 80,64                                  | 9,42    | -1,4                                  | 0,47                              |
| 9,95   | 79,44                                      | 80,41                                  | 9,95    | -1,16                                 | 0,7                               |
| 10,48  | 79,2                                       | 80,17                                  | 10,48   | -0,92                                 | 0,94                              |
| 11,01  | 78,97                                      | 79,94                                  | 11,01   | -0,69                                 | 1,17                              |
| 11,54  | 78,74                                      | 79,71                                  | 11,54   | -0,46                                 | 1,4                               |
| 12,07  | 78,51                                      | 79,48                                  | 12,07   | -0,23                                 | 1,62                              |
| 12,6   | 78,28                                      | 79,26                                  | 12,6    | 0                                     | 1,85                              |

### Apêndice II

Estudo da tensão tangencial e radial segundo o software, para um semicírculo perfeito de bi-material de parede espessa.

| r 1(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r2(mm) | rMEF (N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{r}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------|---------------------------|-----------------------------------|
| 0       | 160,35                                    | 159,3                                  | 0      | -19,99                    | -20                               |
| 1       | 159,3                                     | 158,25                                 | 1      | -18,95                    | -18,95                            |
| 2       | 158,27                                    | 157,22                                 | 2      | -17,91                    | -17,93                            |
| 3       | 157,25                                    | 156,21                                 | 3      | -16,9                     | -16,92                            |

|       |        |        |       |        |        |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 4     | 156,25 | 155,22 | 4     | -15,89 | -15,93 |
| 5     | 155,27 | 154,25 | 5     | -14,93 | -14,95 |
| 6     | 154,31 | 153,29 | 6     | -13,95 | -13,99 |
| 7     | 153,36 | 152,35 | 7     | -13,01 | -13,05 |
| 8     | 152,43 | 151,42 | 8     | -12,07 | -12,12 |
| 9     | 151,51 | 150,51 | 9     | -11,16 | -11,21 |
| 10    | 150,61 | 149,61 | 10    | -10,25 | -10,32 |
| 10,69 | 150    | 149,01 | 10,69 | -9,65  | -9,71  |
| 11,37 | 149,4  | 148,41 | 11,37 | -9,04  | -9,11  |
| 12,19 | 148,69 | 147,7  | 12,19 | -8,34  | -8,41  |
| 13,01 | 147,99 | 147,01 | 13,01 | -7,63  | -7,71  |
| 13,98 | 147,17 | 146,19 | 13,98 | -6,82  | -6,9   |
| 14,95 | 146,37 | 145,39 | 14,95 | -6,01  | -6,1   |
| 16,1  | 145,42 | 144,45 | 16,1  | -5,08  | -5,16  |
| 17,25 | 144,5  | 143,54 | 17,25 | -4,14  | -4,24  |
| 18,63 | 143,42 | 142,46 | 18,63 | -3,08  | -3,17  |
| 20    | 85,38  | 141,42 | 20    | -2,01  | -2,12  |
| 21,4  | 28,17  | 140,37 | 21,4  | -1,79  | -1,07  |
| 22,8  | 27,95  | 28,57  | 22,8  | -1,57  | -0,01  |
| 24,2  | 27,74  | 28,36  | 24,2  | -1,37  | 0,19   |
| 25,6  | 27,53  | 28,16  | 25,6  | -1,15  | 0,4    |
| 27    | 27,33  | 27,96  | 27    | -0,95  | 0,59   |
| 28,4  | 27,13  | 27,77  | 28,4  | -0,75  | 0,78   |
| 29,8  | 26,93  | 27,58  | 29,8  | -0,56  | 0,97   |
| 31,2  | 26,74  | 27,4   | 31,2  | -0,37  | 1,16   |
| 32,6  | 26,56  | 27,22  | 32,6  | -0,18  | 1,34   |
| 34    | 26,37  | 27,04  | 34    | 0      | 1,52   |

### Apêndice III

Estudo da tensão tangencial segundo o software, para um semicírculo com entalhe ( $p/w=4,42$ ; 5,04 ;5,67 ; 6,30 ; 6,93 ) de bi-material e aço de parede fina e espessa.

#### Semicírculo de aço parede fina com profundidade de entalhe de 4,42

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/w  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 8529,92                                   | 174,42 | 889,58                                 | 0,00 | 9,59                                     |
| 0,02  | 7877,69                                   | 174,44 | 889,47                                 | 0,01 | 8,86                                     |
| 0,04  | 7331,76                                   | 174,46 | 889,37                                 | 0,01 | 8,24                                     |
| 0,06  | 6832,28                                   | 174,48 | 889,26                                 | 0,02 | 7,68                                     |
| 0,08  | 6401,8                                    | 174,50 | 889,16                                 | 0,02 | 7,20                                     |
| 0,10  | 6002,66                                   | 174,52 | 889,05                                 | 0,03 | 6,75                                     |
| 0,12  | 5658,74                                   | 174,54 | 888,95                                 | 0,03 | 6,37                                     |
| 0,14  | 5335,2                                    | 174,56 | 888,84                                 | 0,04 | 6,00                                     |
| 0,16  | 5054,51                                   | 174,58 | 888,73                                 | 0,04 | 5,69                                     |
| 0,18  | 4794,17                                   | 174,60 | 888,62                                 | 0,05 | 5,40                                     |
| 0,21  | 4561,75                                   | 174,63 | 888,51                                 | 0,05 | 5,13                                     |
| 0,23  | 4345,34                                   | 174,65 | 888,40                                 | 0,06 | 4,89                                     |
| 0,25  | 4151,2                                    | 174,67 | 888,29                                 | 0,06 | 4,67                                     |

|      |         |        |        |      |      |
|------|---------|--------|--------|------|------|
| 0,27 | 3969,99 | 174,69 | 888,17 | 0,07 | 4,47 |
| 0,29 | 3798,79 | 174,71 | 888,06 | 0,07 | 4,28 |
| 0,31 | 3640,32 | 174,73 | 887,95 | 0,08 | 4,10 |
| 0,34 | 3496,8  | 174,76 | 887,83 | 0,08 | 3,94 |
| 0,36 | 3362,15 | 174,78 | 887,72 | 0,09 | 3,79 |
| 0,38 | 3237,83 | 174,80 | 887,60 | 0,10 | 3,65 |
| 0,40 | 3119,91 | 174,82 | 887,48 | 0,10 | 3,52 |
| 0,43 | 3010,21 | 174,85 | 887,37 | 0,11 | 3,39 |
| 0,45 | 2905,97 | 174,87 | 887,25 | 0,11 | 3,28 |
| 0,47 | 2808,47 | 174,89 | 887,13 | 0,12 | 3,17 |
| 0,49 | 2715,58 | 174,91 | 887,01 | 0,12 | 3,06 |
| 0,52 | 2628,25 | 174,94 | 886,89 | 0,13 | 2,96 |
| 0,54 | 2544,78 | 174,96 | 886,77 | 0,14 | 2,87 |
| 0,57 | 2465,92 | 174,99 | 886,64 | 0,14 | 2,78 |
| 0,59 | 2390,38 | 175,01 | 886,52 | 0,15 | 2,70 |
| 0,61 | 2318,74 | 175,03 | 886,40 | 0,15 | 2,62 |
| 0,64 | 2249,99 | 175,06 | 886,27 | 0,16 | 2,54 |
| 0,66 | 2185,05 | 175,08 | 886,15 | 0,17 | 2,47 |
| 0,69 | 2122,1  | 175,11 | 886,02 | 0,17 | 2,40 |
| 0,71 | 2061,99 | 175,13 | 885,89 | 0,18 | 2,33 |
| 0,74 | 2004,12 | 175,16 | 885,76 | 0,19 | 2,26 |
| 0,76 | 1948,13 | 175,18 | 885,63 | 0,19 | 2,20 |
| 0,79 | 1894,07 | 175,21 | 885,50 | 0,20 | 2,14 |
| 0,81 | 1842,06 | 175,23 | 885,37 | 0,20 | 2,08 |
| 0,84 | 1791,62 | 175,26 | 885,24 | 0,21 | 2,02 |
| 0,86 | 1742,97 | 175,28 | 885,11 | 0,22 | 1,97 |
| 0,89 | 1695,69 | 175,31 | 884,97 | 0,22 | 1,92 |
| 0,92 | 1649,95 | 175,34 | 884,84 | 0,23 | 1,86 |
| 0,94 | 1605,43 | 175,36 | 884,70 | 0,24 | 1,81 |
| 0,97 | 1562,27 | 175,39 | 884,57 | 0,24 | 1,77 |
| 1,00 | 1520,22 | 175,42 | 884,43 | 0,25 | 1,72 |
| 1,02 | 1479,67 | 175,44 | 884,29 | 0,26 | 1,67 |
| 1,05 | 1439,9  | 175,47 | 884,15 | 0,26 | 1,63 |
| 1,08 | 1401,21 | 175,50 | 884,01 | 0,27 | 1,59 |
| 1,10 | 1363,32 | 175,52 | 883,87 | 0,28 | 1,54 |
| 1,13 | 1325,9  | 175,55 | 883,73 | 0,29 | 1,50 |
| 1,16 | 1289,26 | 175,58 | 883,59 | 0,29 | 1,46 |
| 1,19 | 1253,45 | 175,61 | 883,45 | 0,30 | 1,42 |
| 1,22 | 1218,21 | 175,64 | 883,30 | 0,31 | 1,38 |
| 1,24 | 1184,04 | 175,66 | 883,16 | 0,31 | 1,34 |
| 1,27 | 1150,54 | 175,69 | 883,01 | 0,32 | 1,30 |
| 1,30 | 1117,54 | 175,72 | 882,86 | 0,33 | 1,27 |
| 1,33 | 1085,1  | 175,75 | 882,71 | 0,34 | 1,23 |
| 1,36 | 1052,61 | 175,78 | 882,56 | 0,34 | 1,19 |
| 1,39 | 1020,58 | 175,81 | 882,41 | 0,35 | 1,16 |
| 1,42 | 989,121 | 175,84 | 882,26 | 0,36 | 1,12 |
| 1,45 | 957,99  | 175,87 | 882,11 | 0,37 | 1,09 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,48 | 927,32 | 175,90 | 881,96 | 0,37 | 1,05 |
| 1,51 | 896,92 | 175,93 | 881,80 | 0,38 | 1,02 |
| 1,54 | 866,91 | 175,96 | 881,65 | 0,39 | 0,98 |
| 1,57 | 837,12 | 175,99 | 881,49 | 0,40 | 0,95 |
| 1,60 | 807,68 | 176,02 | 881,33 | 0,40 | 0,92 |
| 1,63 | 778,44 | 176,05 | 881,17 | 0,41 | 0,88 |
| 1,67 | 749,68 | 176,09 | 881,01 | 0,42 | 0,85 |
| 1,70 | 721,16 | 176,12 | 880,85 | 0,43 | 0,82 |
| 1,73 | 692,83 | 176,15 | 880,69 | 0,44 | 0,79 |
| 1,76 | 664,49 | 176,18 | 880,53 | 0,44 | 0,75 |
| 1,79 | 636,11 | 176,21 | 880,36 | 0,45 | 0,72 |
| 1,83 | 607,76 | 176,25 | 880,20 | 0,46 | 0,69 |
| 1,86 | 579,59 | 176,28 | 880,03 | 0,47 | 0,66 |
| 1,89 | 556,9  | 176,31 | 879,87 | 0,48 | 0,63 |
| 1,93 | 541,05 | 176,35 | 879,70 | 0,49 | 0,62 |
| 1,96 | 525,44 | 176,38 | 879,53 | 0,49 | 0,60 |
| 1,99 | 509,87 | 176,41 | 879,36 | 0,50 | 0,58 |
| 2,03 | 494,57 | 176,45 | 879,19 | 0,51 | 0,56 |
| 2,06 | 479,30 | 176,48 | 879,02 | 0,52 | 0,55 |
| 2,10 | 464,33 | 176,52 | 878,84 | 0,53 | 0,53 |
| 2,13 | 449,43 | 176,55 | 878,67 | 0,54 | 0,51 |
| 2,17 | 434,37 | 176,59 | 878,49 | 0,55 | 0,49 |
| 2,20 | 419,37 | 176,62 | 878,31 | 0,55 | 0,48 |
| 2,24 | 404,99 | 176,66 | 878,13 | 0,56 | 0,46 |
| 2,27 | 390,57 | 176,69 | 877,96 | 0,57 | 0,44 |
| 2,31 | 376,47 | 176,73 | 877,77 | 0,58 | 0,43 |
| 2,34 | 362,32 | 176,76 | 877,59 | 0,59 | 0,41 |
| 2,38 | 348,50 | 176,80 | 877,41 | 0,60 | 0,40 |
| 2,42 | 334,65 | 176,84 | 877,23 | 0,61 | 0,38 |
| 2,45 | 321,02 | 176,87 | 877,04 | 0,62 | 0,37 |
| 2,49 | 307,35 | 176,91 | 876,86 | 0,63 | 0,35 |
| 2,53 | 294,17 | 176,95 | 876,67 | 0,64 | 0,34 |
| 2,57 | 280,93 | 176,99 | 876,48 | 0,65 | 0,32 |
| 2,61 | 267,99 | 177,03 | 876,29 | 0,66 | 0,31 |
| 2,64 | 254,97 | 177,06 | 876,10 | 0,67 | 0,29 |
| 2,68 | 242,48 | 177,10 | 875,90 | 0,68 | 0,28 |
| 2,72 | 229,89 | 177,14 | 875,71 | 0,69 | 0,26 |
| 2,76 | 217,70 | 177,18 | 875,52 | 0,70 | 0,25 |
| 2,80 | 205,38 | 177,22 | 875,32 | 0,71 | 0,23 |
| 2,84 | 193,66 | 177,26 | 875,12 | 0,72 | 0,22 |
| 2,88 | 181,83 | 177,30 | 874,92 | 0,73 | 0,21 |
| 2,91 | 174,19 | 177,33 | 874,79 | 0,73 | 0,20 |
| 2,93 | 166,43 | 177,35 | 874,65 | 0,74 | 0,19 |
| 2,96 | 159,03 | 177,38 | 874,52 | 0,75 | 0,18 |
| 2,99 | 151,55 | 177,41 | 874,38 | 0,75 | 0,17 |
| 3,02 | 144,43 | 177,44 | 874,25 | 0,76 | 0,17 |
| 3,04 | 137,22 | 177,46 | 874,12 | 0,77 | 0,16 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 3,07 | 130,39 | 177,49 | 873,98 | 0,77 | 0,15 |
| 3,10 | 123,46 | 177,52 | 873,85 | 0,78 | 0,14 |
| 3,12 | 116,93 | 177,54 | 873,71 | 0,79 | 0,13 |
| 3,15 | 110,29 | 177,57 | 873,58 | 0,79 | 0,13 |
| 3,18 | 104,05 | 177,60 | 873,44 | 0,80 | 0,12 |
| 3,21 | 97,71  | 177,63 | 873,31 | 0,81 | 0,11 |
| 3,23 | 91,79  | 177,65 | 873,18 | 0,82 | 0,11 |
| 3,26 | 85,75  | 177,68 | 873,04 | 0,82 | 0,10 |
| 3,29 | 80,15  | 177,71 | 872,91 | 0,83 | 0,09 |
| 3,31 | 74,42  | 177,73 | 872,77 | 0,84 | 0,09 |
| 3,34 | 69,15  | 177,76 | 872,64 | 0,84 | 0,08 |
| 3,37 | 63,75  | 177,79 | 872,51 | 0,85 | 0,07 |
| 3,40 | 58,83  | 177,82 | 872,37 | 0,86 | 0,07 |
| 3,42 | 53,76  | 177,84 | 872,24 | 0,86 | 0,06 |
| 3,45 | 49,20  | 177,87 | 872,10 | 0,87 | 0,06 |
| 3,48 | 44,49  | 177,90 | 871,97 | 0,88 | 0,05 |
| 3,50 | 40,30  | 177,92 | 871,84 | 0,88 | 0,05 |
| 3,53 | 35,95  | 177,95 | 871,70 | 0,89 | 0,04 |
| 3,56 | 32,16  | 177,98 | 871,57 | 0,90 | 0,04 |
| 3,59 | 28,19  | 178,01 | 871,44 | 0,90 | 0,03 |
| 3,61 | 24,82  | 178,03 | 871,30 | 0,91 | 0,03 |
| 3,64 | 21,25  | 178,06 | 871,17 | 0,92 | 0,02 |
| 3,67 | 18,31  | 178,09 | 871,04 | 0,92 | 0,02 |
| 3,69 | 15,16  | 178,11 | 870,91 | 0,93 | 0,02 |
| 3,72 | 12,68  | 178,14 | 870,77 | 0,94 | 0,01 |
| 3,75 | 9,98   | 178,17 | 870,64 | 0,95 | 0,01 |
| 3,78 | 7,98   | 178,20 | 870,51 | 0,95 | 0,01 |
| 3,80 | 5,75   | 178,22 | 870,37 | 0,96 | 0,01 |
| 3,83 | 4,27   | 178,25 | 870,24 | 0,97 | 0,00 |
| 3,86 | 2,56   | 178,28 | 870,11 | 0,97 | 0,00 |
| 3,89 | 1,66   | 178,31 | 869,98 | 0,98 | 0,00 |
| 3,91 | 0,51   | 178,33 | 869,84 | 0,99 | 0,00 |
| 3,94 | 0,27   | 178,36 | 869,71 | 0,99 | 0,00 |
| 3,97 | -0,21  | 178,39 | 869,58 | 1,00 | 0,00 |

**Semicírculo de aço parede fina com profundidade de entalhe de 5,04.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta MEF}(N/mm^2)$ | ri+r   | $\sigma_{\theta}(N/mm^2)$ | r/W  | $\sigma_{\theta MEF}/\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------|--------|---------------------------|------|---------------------------------------|
| 0,00  | 11449,8                       | 175,04 | 1056,20                   | 0,00 | 10,84                                 |
| 0,02  | 10750,7                       | 175,06 | 1056,11                   | 0,00 | 10,18                                 |
| 0,03  | 10143                         | 175,07 | 1056,01                   | 0,01 | 9,61                                  |
| 0,05  | 9578,18                       | 175,09 | 1055,91                   | 0,01 | 9,07                                  |
| 0,06  | 9074,73                       | 175,10 | 1055,82                   | 0,02 | 8,59                                  |
| 0,08  | 8594,59                       | 175,12 | 1055,72                   | 0,02 | 8,14                                  |
| 0,10  | 8173,56                       | 175,14 | 1055,62                   | 0,03 | 7,74                                  |
| 0,11  | 7768,59                       | 175,15 | 1055,52                   | 0,03 | 7,36                                  |
| 0,13  | 7409,02                       | 175,17 | 1055,42                   | 0,04 | 7,02                                  |
| 0,14  | 7070,70                       | 175,18 | 1055,32                   | 0,04 | 6,70                                  |

|      |         |        |         |      |      |
|------|---------|--------|---------|------|------|
| 0,16 | 6763,86 | 175,20 | 1055,21 | 0,05 | 6,41 |
| 0,18 | 6474,22 | 175,22 | 1055,11 | 0,05 | 6,14 |
| 0,19 | 6211,59 | 175,23 | 1055,01 | 0,06 | 5,89 |
| 0,21 | 5964,15 | 175,25 | 1054,90 | 0,06 | 5,65 |
| 0,23 | 5723,09 | 175,27 | 1054,80 | 0,07 | 5,43 |
| 0,25 | 5495,41 | 175,29 | 1054,69 | 0,07 | 5,21 |
| 0,26 | 5289,51 | 175,30 | 1054,59 | 0,08 | 5,02 |
| 0,28 | 5095,81 | 175,32 | 1054,48 | 0,08 | 4,83 |
| 0,30 | 4916,39 | 175,34 | 1054,37 | 0,09 | 4,66 |
| 0,32 | 4744,15 | 175,36 | 1054,26 | 0,09 | 4,50 |
| 0,33 | 4583,01 | 175,37 | 1054,16 | 0,10 | 4,35 |
| 0,35 | 4428,51 | 175,39 | 1054,05 | 0,11 | 4,20 |
| 0,37 | 4283,37 | 175,41 | 1053,94 | 0,11 | 4,06 |
| 0,39 | 4143,98 | 175,43 | 1053,82 | 0,12 | 3,93 |
| 0,41 | 4012,53 | 175,45 | 1053,71 | 0,12 | 3,81 |
| 0,43 | 3885,98 | 175,47 | 1053,60 | 0,13 | 3,69 |
| 0,44 | 3766,11 | 175,48 | 1053,49 | 0,13 | 3,57 |
| 0,46 | 3650,55 | 175,50 | 1053,37 | 0,14 | 3,47 |
| 0,48 | 3540,78 | 175,52 | 1053,26 | 0,14 | 3,36 |
| 0,50 | 3434,82 | 175,54 | 1053,14 | 0,15 | 3,26 |
| 0,52 | 3334,69 | 175,56 | 1053,02 | 0,16 | 3,17 |
| 0,54 | 3235,99 | 175,58 | 1052,91 | 0,16 | 3,07 |
| 0,56 | 3142,18 | 175,60 | 1052,79 | 0,17 | 2,98 |
| 0,58 | 3052,03 | 175,62 | 1052,67 | 0,17 | 2,90 |
| 0,60 | 2964,62 | 175,64 | 1052,55 | 0,18 | 2,82 |
| 0,62 | 2880,00 | 175,66 | 1052,43 | 0,18 | 2,74 |
| 0,64 | 2798,62 | 175,68 | 1052,31 | 0,19 | 2,66 |
| 0,66 | 2719,44 | 175,70 | 1052,18 | 0,20 | 2,58 |
| 0,68 | 2643,13 | 175,72 | 1052,06 | 0,20 | 2,51 |
| 0,70 | 2568,72 | 175,74 | 1051,94 | 0,21 | 2,44 |
| 0,72 | 2496,81 | 175,76 | 1051,81 | 0,21 | 2,37 |
| 0,74 | 2426,62 | 175,78 | 1051,69 | 0,22 | 2,31 |
| 0,76 | 2358,66 | 175,80 | 1051,56 | 0,23 | 2,24 |
| 0,78 | 2292,29 | 175,82 | 1051,43 | 0,23 | 2,18 |
| 0,80 | 2228,52 | 175,84 | 1051,30 | 0,24 | 2,12 |
| 0,82 | 2165,21 | 175,86 | 1051,17 | 0,25 | 2,06 |
| 0,84 | 2103,89 | 175,88 | 1051,04 | 0,25 | 2,00 |
| 0,87 | 2044,22 | 175,91 | 1050,91 | 0,26 | 1,95 |
| 0,89 | 1985,10 | 175,93 | 1050,78 | 0,27 | 1,89 |
| 0,91 | 1927,18 | 175,95 | 1050,65 | 0,27 | 1,83 |
| 0,93 | 1870,79 | 175,97 | 1050,52 | 0,28 | 1,78 |
| 0,95 | 1815,22 | 175,99 | 1050,38 | 0,29 | 1,73 |
| 0,98 | 1761,69 | 176,02 | 1050,25 | 0,29 | 1,68 |
| 1,00 | 1708,47 | 176,04 | 1050,11 | 0,30 | 1,63 |
| 1,02 | 1656,22 | 176,06 | 1049,97 | 0,31 | 1,58 |
| 1,04 | 1605,42 | 176,08 | 1049,83 | 0,31 | 1,53 |
| 1,07 | 1554,23 | 176,11 | 1049,70 | 0,32 | 1,48 |

|      |         |        |         |      |      |
|------|---------|--------|---------|------|------|
| 1,09 | 1503,72 | 176,13 | 1049,56 | 0,33 | 1,43 |
| 1,11 | 1454,25 | 176,15 | 1049,42 | 0,33 | 1,39 |
| 1,14 | 1405,27 | 176,18 | 1049,27 | 0,34 | 1,34 |
| 1,16 | 1357,13 | 176,20 | 1049,13 | 0,35 | 1,29 |
| 1,19 | 1309,43 | 176,23 | 1048,99 | 0,35 | 1,25 |
| 1,21 | 1262,46 | 176,25 | 1048,84 | 0,36 | 1,20 |
| 1,23 | 1215,87 | 176,27 | 1048,70 | 0,37 | 1,16 |
| 1,26 | 1169,95 | 176,30 | 1048,55 | 0,38 | 1,12 |
| 1,28 | 1124,42 | 176,32 | 1048,40 | 0,38 | 1,07 |
| 1,31 | 1086,22 | 176,35 | 1048,25 | 0,39 | 1,04 |
| 1,33 | 1060,82 | 176,37 | 1048,10 | 0,40 | 1,01 |
| 1,36 | 1036,14 | 176,40 | 1047,95 | 0,41 | 0,99 |
| 1,38 | 1012,87 | 176,42 | 1047,80 | 0,41 | 0,97 |
| 1,41 | 989,54  | 176,45 | 1047,65 | 0,42 | 0,94 |
| 1,43 | 966,70  | 176,47 | 1047,50 | 0,43 | 0,92 |
| 1,46 | 943,89  | 176,50 | 1047,34 | 0,44 | 0,90 |
| 1,49 | 921,14  | 176,53 | 1047,19 | 0,44 | 0,88 |
| 1,51 | 898,52  | 176,55 | 1047,03 | 0,45 | 0,86 |
| 1,54 | 876,06  | 176,58 | 1046,87 | 0,46 | 0,84 |
| 1,56 | 853,71  | 176,60 | 1046,71 | 0,47 | 0,82 |
| 1,59 | 831,58  | 176,63 | 1046,55 | 0,48 | 0,79 |
| 1,62 | 809,58  | 176,66 | 1046,39 | 0,48 | 0,77 |
| 1,64 | 787,80  | 176,68 | 1046,23 | 0,49 | 0,75 |
| 1,67 | 766,30  | 176,71 | 1046,07 | 0,50 | 0,73 |
| 1,70 | 743,92  | 176,74 | 1045,90 | 0,51 | 0,71 |
| 1,73 | 721,79  | 176,77 | 1045,74 | 0,52 | 0,69 |
| 1,76 | 700,66  | 176,80 | 1045,57 | 0,52 | 0,67 |
| 1,78 | 679,44  | 176,82 | 1045,40 | 0,53 | 0,65 |
| 1,81 | 658,68  | 176,85 | 1045,24 | 0,54 | 0,63 |
| 1,84 | 637,88  | 176,88 | 1045,07 | 0,55 | 0,61 |
| 1,87 | 617,36  | 176,91 | 1044,90 | 0,56 | 0,59 |
| 1,90 | 596,87  | 176,94 | 1044,72 | 0,57 | 0,57 |
| 1,93 | 576,40  | 176,97 | 1044,55 | 0,58 | 0,55 |
| 1,96 | 555,96  | 177,00 | 1044,38 | 0,58 | 0,53 |
| 1,99 | 536,17  | 177,03 | 1044,20 | 0,59 | 0,51 |
| 2,01 | 516,32  | 177,05 | 1044,03 | 0,60 | 0,49 |
| 2,04 | 496,67  | 177,08 | 1043,85 | 0,61 | 0,48 |
| 2,07 | 476,97  | 177,11 | 1043,67 | 0,62 | 0,46 |
| 2,11 | 457,93  | 177,15 | 1043,49 | 0,63 | 0,44 |
| 2,14 | 438,80  | 177,18 | 1043,31 | 0,64 | 0,42 |
| 2,17 | 419,98  | 177,21 | 1043,13 | 0,65 | 0,40 |
| 2,20 | 401,07  | 177,24 | 1042,94 | 0,66 | 0,38 |
| 2,23 | 382,86  | 177,27 | 1042,76 | 0,67 | 0,37 |
| 2,26 | 364,52  | 177,30 | 1042,57 | 0,68 | 0,35 |
| 2,29 | 349,27  | 177,33 | 1042,41 | 0,68 | 0,34 |
| 2,31 | 333,86  | 177,35 | 1042,25 | 0,69 | 0,32 |
| 2,34 | 319,13  | 177,38 | 1042,09 | 0,70 | 0,31 |

|      |        |        |         |      |      |
|------|--------|--------|---------|------|------|
| 2,37 | 304,26 | 177,41 | 1041,93 | 0,71 | 0,29 |
| 2,40 | 290,07 | 177,44 | 1041,77 | 0,72 | 0,28 |
| 2,42 | 275,74 | 177,46 | 1041,61 | 0,72 | 0,26 |
| 2,45 | 262,12 | 177,49 | 1041,45 | 0,73 | 0,25 |
| 2,48 | 248,34 | 177,52 | 1041,29 | 0,74 | 0,24 |
| 2,50 | 235,30 | 177,54 | 1041,13 | 0,75 | 0,23 |
| 2,53 | 222,07 | 177,57 | 1040,97 | 0,76 | 0,21 |
| 2,56 | 209,62 | 177,60 | 1040,81 | 0,76 | 0,20 |
| 2,59 | 196,96 | 177,63 | 1040,65 | 0,77 | 0,19 |
| 2,61 | 185,11 | 177,65 | 1040,49 | 0,78 | 0,18 |
| 2,64 | 173,05 | 177,68 | 1040,33 | 0,79 | 0,17 |
| 2,67 | 161,83 | 177,71 | 1040,17 | 0,80 | 0,16 |
| 2,69 | 150,37 | 177,73 | 1040,01 | 0,81 | 0,14 |
| 2,72 | 139,79 | 177,76 | 1039,85 | 0,81 | 0,13 |
| 2,75 | 128,97 | 177,79 | 1039,69 | 0,82 | 0,12 |
| 2,78 | 119,07 | 177,82 | 1039,53 | 0,83 | 0,11 |
| 2,80 | 108,90 | 177,84 | 1039,37 | 0,84 | 0,10 |
| 2,83 | 99,70  | 177,87 | 1039,21 | 0,85 | 0,10 |
| 2,86 | 90,21  | 177,90 | 1039,05 | 0,85 | 0,09 |
| 2,88 | 81,76  | 177,92 | 1038,90 | 0,86 | 0,08 |
| 2,91 | 72,98  | 177,95 | 1038,74 | 0,87 | 0,07 |
| 2,94 | 65,30  | 177,98 | 1038,58 | 0,88 | 0,06 |
| 2,97 | 57,28  | 178,01 | 1038,42 | 0,89 | 0,06 |
| 2,99 | 50,42  | 178,03 | 1038,26 | 0,89 | 0,05 |
| 3,02 | 43,20  | 178,06 | 1038,10 | 0,90 | 0,04 |
| 3,05 | 37,20  | 178,09 | 1037,94 | 0,91 | 0,04 |
| 3,07 | 30,82  | 178,11 | 1037,78 | 0,92 | 0,03 |
| 3,10 | 25,75  | 178,14 | 1037,63 | 0,93 | 0,02 |
| 3,13 | 20,25  | 178,17 | 1037,47 | 0,94 | 0,02 |
| 3,16 | 16,17  | 178,20 | 1037,31 | 0,94 | 0,02 |
| 3,18 | 11,63  | 178,22 | 1037,15 | 0,95 | 0,01 |
| 3,21 | 8,61   | 178,25 | 1036,99 | 0,96 | 0,01 |
| 3,24 | 5,11   | 178,28 | 1036,83 | 0,97 | 0,00 |
| 3,27 | 3,30   | 178,31 | 1036,68 | 0,98 | 0,00 |
| 3,29 | 0,96   | 178,33 | 1036,52 | 0,98 | 0,00 |
| 3,32 | 0,52   | 178,36 | 1036,36 | 0,99 | 0,00 |
| 3,35 | -0,44  | 178,39 | 1036,20 | 1,00 | 0,00 |

**Semicírculo de aço parede fina com profundidade de entalhe de 5,67.**

| r(mm) | $\sigma\theta$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma\theta$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma\theta$ MEF/ $\sigma\theta$ |
|-------|----------------------------------------|--------|-------------------------------------|------|------------------------------------|
| 0,00  | 15758,3                                | 175,67 | 1303,43                             | 0,00 | 12,09                              |
| 0,01  | 15044,3                                | 175,68 | 1303,35                             | 0,00 | 11,54                              |
| 0,02  | 14408,8                                | 175,69 | 1303,26                             | 0,01 | 11,06                              |
| 0,03  | 13804,3                                | 175,70 | 1303,18                             | 0,01 | 10,59                              |
| 0,05  | 13251,4                                | 175,72 | 1303,09                             | 0,02 | 10,17                              |
| 0,06  | 12699                                  | 175,73 | 1303,00                             | 0,02 | 9,75                               |
| 0,07  | 12210,8                                | 175,74 | 1302,91                             | 0,03 | 9,37                               |

|      |         |        |         |      |      |
|------|---------|--------|---------|------|------|
| 0,08 | 11725,5 | 175,75 | 1302,83 | 0,03 | 9,00 |
| 0,09 | 11285,9 | 175,76 | 1302,74 | 0,03 | 8,66 |
| 0,10 | 10861,8 | 175,77 | 1302,65 | 0,04 | 8,34 |
| 0,12 | 10473   | 175,79 | 1302,56 | 0,04 | 8,04 |
| 0,13 | 10097,4 | 175,80 | 1302,47 | 0,05 | 7,75 |
| 0,14 | 9755,17 | 175,81 | 1302,38 | 0,05 | 7,49 |
| 0,15 | 9426,62 | 175,82 | 1302,28 | 0,06 | 7,24 |
| 0,16 | 9087,54 | 175,83 | 1302,19 | 0,06 | 6,98 |
| 0,18 | 8766,55 | 175,85 | 1302,10 | 0,07 | 6,73 |
| 0,19 | 8473,67 | 175,86 | 1302,00 | 0,07 | 6,51 |
| 0,20 | 8196,08 | 175,87 | 1301,91 | 0,07 | 6,30 |
| 0,22 | 7940,91 | 175,89 | 1301,81 | 0,08 | 6,10 |
| 0,23 | 7690,27 | 175,90 | 1301,72 | 0,08 | 5,91 |
| 0,24 | 7455,3  | 175,91 | 1301,62 | 0,09 | 5,73 |
| 0,25 | 7226,27 | 175,92 | 1301,52 | 0,09 | 5,55 |
| 0,27 | 7010,57 | 175,94 | 1301,43 | 0,10 | 5,39 |
| 0,28 | 6800,34 | 175,95 | 1301,33 | 0,10 | 5,23 |
| 0,29 | 6601,82 | 175,96 | 1301,23 | 0,11 | 5,07 |
| 0,31 | 6408,08 | 175,98 | 1301,13 | 0,11 | 4,93 |
| 0,32 | 6224,37 | 175,99 | 1301,03 | 0,12 | 4,78 |
| 0,33 | 6044,99 | 176,00 | 1300,93 | 0,12 | 4,65 |
| 0,35 | 5874,58 | 176,02 | 1300,82 | 0,13 | 4,52 |
| 0,36 | 5708,04 | 176,03 | 1300,72 | 0,13 | 4,39 |
| 0,37 | 5551,18 | 176,04 | 1300,62 | 0,14 | 4,27 |
| 0,39 | 5391,11 | 176,06 | 1300,51 | 0,14 | 4,15 |
| 0,40 | 5241,17 | 176,07 | 1300,41 | 0,15 | 4,03 |
| 0,42 | 5097,45 | 176,09 | 1300,30 | 0,15 | 3,92 |
| 0,43 | 4957,56 | 176,10 | 1300,20 | 0,16 | 3,81 |
| 0,45 | 4821,44 | 176,12 | 1300,09 | 0,16 | 3,71 |
| 0,46 | 4690,83 | 176,13 | 1299,98 | 0,17 | 3,61 |
| 0,47 | 4562,9  | 176,14 | 1299,87 | 0,17 | 3,51 |
| 0,49 | 4439,97 | 176,16 | 1299,77 | 0,18 | 3,42 |
| 0,50 | 4319,27 | 176,17 | 1299,66 | 0,19 | 3,32 |
| 0,52 | 4202,98 | 176,19 | 1299,55 | 0,19 | 3,23 |
| 0,53 | 4088,73 | 176,20 | 1299,43 | 0,20 | 3,15 |
| 0,55 | 3978,5  | 176,22 | 1299,32 | 0,20 | 3,06 |
| 0,56 | 3870,2  | 176,23 | 1299,21 | 0,21 | 2,98 |
| 0,58 | 3767,44 | 176,25 | 1299,09 | 0,21 | 2,90 |
| 0,59 | 3661,56 | 176,26 | 1298,98 | 0,22 | 2,82 |
| 0,61 | 3560,33 | 176,28 | 1298,86 | 0,22 | 2,74 |
| 0,63 | 3463,79 | 176,30 | 1298,75 | 0,23 | 2,67 |
| 0,64 | 3367,22 | 176,31 | 1298,63 | 0,24 | 2,59 |
| 0,66 | 3272,63 | 176,33 | 1298,51 | 0,24 | 2,52 |
| 0,67 | 3181,38 | 176,34 | 1298,40 | 0,25 | 2,45 |
| 0,69 | 3090,73 | 176,36 | 1298,28 | 0,25 | 2,38 |
| 0,70 | 3005,25 | 176,37 | 1298,16 | 0,26 | 2,32 |
| 0,72 | 2916,31 | 176,39 | 1298,03 | 0,27 | 2,25 |

|      |         |        |         |      |      |
|------|---------|--------|---------|------|------|
| 0,74 | 2829,95 | 176,41 | 1297,91 | 0,27 | 2,18 |
| 0,75 | 2748,51 | 176,42 | 1297,79 | 0,28 | 2,12 |
| 0,77 | 2664,74 | 176,44 | 1297,67 | 0,28 | 2,05 |
| 0,79 | 2582,27 | 176,46 | 1297,54 | 0,29 | 1,99 |
| 0,80 | 2501,94 | 176,47 | 1297,42 | 0,30 | 1,93 |
| 0,82 | 2422,25 | 176,49 | 1297,29 | 0,30 | 1,87 |
| 0,84 | 2344,3  | 176,51 | 1297,17 | 0,31 | 1,81 |
| 0,86 | 2267    | 176,53 | 1297,04 | 0,31 | 1,75 |
| 0,87 | 2191,26 | 176,54 | 1296,91 | 0,32 | 1,69 |
| 0,89 | 2116,14 | 176,56 | 1296,78 | 0,33 | 1,63 |
| 0,91 | 2042,51 | 176,58 | 1296,65 | 0,33 | 1,58 |
| 0,93 | 1969,51 | 176,60 | 1296,52 | 0,34 | 1,52 |
| 0,94 | 1899,65 | 176,61 | 1296,39 | 0,35 | 1,47 |
| 0,96 | 1827,28 | 176,63 | 1296,25 | 0,35 | 1,41 |
| 0,98 | 1759,81 | 176,65 | 1296,12 | 0,36 | 1,36 |
| 1,00 | 1726,67 | 176,67 | 1295,98 | 0,37 | 1,33 |
| 1,02 | 1694,15 | 176,69 | 1295,85 | 0,37 | 1,31 |
| 1,03 | 1663,09 | 176,70 | 1295,71 | 0,38 | 1,28 |
| 1,05 | 1632,05 | 176,72 | 1295,57 | 0,39 | 1,26 |
| 1,07 | 1600,72 | 176,74 | 1295,44 | 0,39 | 1,24 |
| 1,09 | 1569,77 | 176,76 | 1295,30 | 0,40 | 1,21 |
| 1,11 | 1538,58 | 176,78 | 1295,16 | 0,41 | 1,19 |
| 1,13 | 1507,72 | 176,80 | 1295,01 | 0,42 | 1,16 |
| 1,15 | 1476,75 | 176,82 | 1294,87 | 0,42 | 1,14 |
| 1,17 | 1446,16 | 176,84 | 1294,73 | 0,43 | 1,12 |
| 1,19 | 1415,3  | 176,86 | 1294,58 | 0,44 | 1,09 |
| 1,21 | 1385,76 | 176,88 | 1294,44 | 0,44 | 1,07 |
| 1,23 | 1352,28 | 176,90 | 1294,29 | 0,45 | 1,04 |
| 1,25 | 1319,7  | 176,92 | 1294,15 | 0,46 | 1,02 |
| 1,27 | 1289,52 | 176,94 | 1294,00 | 0,47 | 1,00 |
| 1,29 | 1258,72 | 176,96 | 1293,85 | 0,47 | 0,97 |
| 1,31 | 1228,9  | 176,98 | 1293,70 | 0,48 | 0,95 |
| 1,33 | 1199,03 | 177,00 | 1293,55 | 0,49 | 0,93 |
| 1,35 | 1169,17 | 177,02 | 1293,40 | 0,50 | 0,90 |
| 1,37 | 1139,57 | 177,04 | 1293,24 | 0,50 | 0,88 |
| 1,39 | 1109,04 | 177,06 | 1293,09 | 0,51 | 0,86 |
| 1,41 | 1078,82 | 177,08 | 1292,93 | 0,52 | 0,83 |
| 1,43 | 1049,57 | 177,10 | 1292,78 | 0,53 | 0,81 |
| 1,45 | 1020,25 | 177,12 | 1292,62 | 0,53 | 0,79 |
| 1,47 | 990,58  | 177,14 | 1292,46 | 0,54 | 0,77 |
| 1,50 | 961,05  | 177,17 | 1292,30 | 0,55 | 0,74 |
| 1,52 | 932,42  | 177,19 | 1292,14 | 0,56 | 0,72 |
| 1,54 | 903,69  | 177,21 | 1291,98 | 0,57 | 0,70 |
| 1,56 | 874,78  | 177,23 | 1291,82 | 0,58 | 0,68 |
| 1,58 | 845,93  | 177,25 | 1291,65 | 0,58 | 0,65 |
| 1,61 | 817,98  | 177,28 | 1291,49 | 0,59 | 0,63 |
| 1,63 | 789,8   | 177,30 | 1291,32 | 0,60 | 0,61 |

|      |        |        |         |      |      |
|------|--------|--------|---------|------|------|
| 1,66 | 756,97 | 177,33 | 1291,12 | 0,61 | 0,59 |
| 1,68 | 723,99 | 177,35 | 1290,92 | 0,62 | 0,56 |
| 1,71 | 692,31 | 177,38 | 1290,72 | 0,63 | 0,54 |
| 1,74 | 660,43 | 177,41 | 1290,53 | 0,64 | 0,51 |
| 1,77 | 629,94 | 177,44 | 1290,33 | 0,65 | 0,49 |
| 1,79 | 599,18 | 177,46 | 1290,13 | 0,66 | 0,46 |
| 1,82 | 569,89 | 177,49 | 1289,93 | 0,67 | 0,44 |
| 1,85 | 540,28 | 177,52 | 1289,73 | 0,68 | 0,42 |
| 1,87 | 512,20 | 177,54 | 1289,53 | 0,69 | 0,40 |
| 1,90 | 483,74 | 177,57 | 1289,34 | 0,70 | 0,38 |
| 1,93 | 456,90 | 177,60 | 1289,14 | 0,71 | 0,35 |
| 1,96 | 429,62 | 177,63 | 1288,94 | 0,72 | 0,33 |
| 1,98 | 404,05 | 177,65 | 1288,74 | 0,73 | 0,31 |
| 2,01 | 377,99 | 177,68 | 1288,54 | 0,74 | 0,29 |
| 2,04 | 353,72 | 177,71 | 1288,35 | 0,75 | 0,27 |
| 2,06 | 328,91 | 177,73 | 1288,15 | 0,76 | 0,26 |
| 2,09 | 306,01 | 177,76 | 1287,95 | 0,77 | 0,24 |
| 2,12 | 282,49 | 177,79 | 1287,75 | 0,78 | 0,22 |
| 2,15 | 261,00 | 177,82 | 1287,56 | 0,79 | 0,20 |
| 2,17 | 238,85 | 177,84 | 1287,36 | 0,80 | 0,19 |
| 2,20 | 218,84 | 177,87 | 1287,16 | 0,81 | 0,17 |
| 2,23 | 198,10 | 177,90 | 1286,96 | 0,82 | 0,15 |
| 2,25 | 179,65 | 177,92 | 1286,77 | 0,83 | 0,14 |
| 2,28 | 160,4  | 177,95 | 1286,57 | 0,84 | 0,12 |
| 2,31 | 143,61 | 177,98 | 1286,37 | 0,85 | 0,11 |
| 2,34 | 125,93 | 178,01 | 1286,18 | 0,86 | 0,10 |
| 2,36 | 110,90 | 178,03 | 1285,98 | 0,87 | 0,09 |
| 2,39 | 94,89  | 178,06 | 1285,78 | 0,88 | 0,07 |
| 2,42 | 81,74  | 178,09 | 1285,59 | 0,89 | 0,06 |
| 2,44 | 67,52  | 178,11 | 1285,39 | 0,90 | 0,05 |
| 2,47 | 56,38  | 178,14 | 1285,19 | 0,91 | 0,04 |
| 2,50 | 44,08  | 178,17 | 1285,00 | 0,92 | 0,03 |
| 2,53 | 35,13  | 178,20 | 1284,80 | 0,93 | 0,03 |
| 2,55 | 24,92  | 178,22 | 1284,61 | 0,94 | 0,02 |
| 2,58 | 18,39  | 178,25 | 1284,41 | 0,95 | 0,01 |
| 2,61 | 10,48  | 178,28 | 1284,21 | 0,96 | 0,01 |
| 2,64 | 6,70   | 178,31 | 1284,02 | 0,97 | 0,01 |
| 2,66 | 1,47   | 178,33 | 1283,82 | 0,98 | 0,00 |
| 2,69 | 0,90   | 178,36 | 1283,63 | 0,99 | 0,00 |
| 2,72 | -1,15  | 178,39 | 1283,43 | 1,00 | 0,00 |

**Semicírculo de aço parede fina com profundidade de entalhe de 6,30.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 22103,8                                   | 176,30 | 1699,97                                | 0,00 | 13,00                                    |
| 0,01  | 21463,5                                   | 176,31 | 1699,90                                | 0,00 | 12,63                                    |
| 0,01  | 20878,2                                   | 176,31 | 1699,84                                | 0,01 | 12,28                                    |
| 0,02  | 20319,6                                   | 176,32 | 1699,77                                | 0,01 | 11,95                                    |

|      |         |        |         |      |       |
|------|---------|--------|---------|------|-------|
| 0,03 | 19784,7 | 176,33 | 1699,70 | 0,01 | 11,64 |
| 0,04 | 19228,8 | 176,34 | 1699,63 | 0,02 | 11,31 |
| 0,04 | 18725,5 | 176,34 | 1699,56 | 0,02 | 11,02 |
| 0,05 | 18229,2 | 176,35 | 1699,49 | 0,02 | 10,73 |
| 0,06 | 17759   | 176,36 | 1699,42 | 0,03 | 10,45 |
| 0,06 | 17298,5 | 176,36 | 1699,35 | 0,03 | 10,18 |
| 0,07 | 16862,9 | 176,37 | 1699,28 | 0,03 | 9,92  |
| 0,08 | 16438,7 | 176,38 | 1699,20 | 0,04 | 9,67  |
| 0,09 | 16042,8 | 176,39 | 1699,13 | 0,04 | 9,44  |
| 0,09 | 15659,3 | 176,39 | 1699,06 | 0,04 | 9,22  |
| 0,10 | 15226   | 176,40 | 1698,98 | 0,05 | 8,96  |
| 0,11 | 14819,2 | 176,41 | 1698,91 | 0,05 | 8,72  |
| 0,12 | 14423,5 | 176,42 | 1698,83 | 0,06 | 8,49  |
| 0,12 | 14054,3 | 176,42 | 1698,76 | 0,06 | 8,27  |
| 0,13 | 13716,2 | 176,43 | 1698,68 | 0,06 | 8,07  |
| 0,14 | 13379,4 | 176,44 | 1698,61 | 0,07 | 7,88  |
| 0,15 | 13059,5 | 176,45 | 1698,53 | 0,07 | 7,69  |
| 0,16 | 12745   | 176,46 | 1698,45 | 0,07 | 7,50  |
| 0,16 | 12443,7 | 176,46 | 1698,38 | 0,08 | 7,33  |
| 0,17 | 12147,5 | 176,47 | 1698,30 | 0,08 | 7,15  |
| 0,18 | 11863,1 | 176,48 | 1698,22 | 0,09 | 6,99  |
| 0,19 | 11583,4 | 176,49 | 1698,14 | 0,09 | 6,82  |
| 0,20 | 11313,9 | 176,50 | 1698,06 | 0,09 | 6,66  |
| 0,20 | 11048,6 | 176,50 | 1697,98 | 0,10 | 6,51  |
| 0,21 | 10792,7 | 176,51 | 1697,90 | 0,10 | 6,36  |
| 0,22 | 10540,6 | 176,52 | 1697,81 | 0,11 | 6,21  |
| 0,23 | 10299,5 | 176,53 | 1697,73 | 0,11 | 6,07  |
| 0,24 | 10044,4 | 176,54 | 1697,65 | 0,11 | 5,92  |
| 0,25 | 9807,18 | 176,55 | 1697,57 | 0,12 | 5,78  |
| 0,26 | 9581,44 | 176,56 | 1697,48 | 0,12 | 5,64  |
| 0,26 | 9360,02 | 176,56 | 1697,40 | 0,13 | 5,51  |
| 0,27 | 9143,88 | 176,57 | 1697,31 | 0,13 | 5,39  |
| 0,28 | 8935,42 | 176,58 | 1697,23 | 0,14 | 5,26  |
| 0,29 | 8730,8  | 176,59 | 1697,14 | 0,14 | 5,14  |
| 0,30 | 8533,09 | 176,60 | 1697,05 | 0,14 | 5,03  |
| 0,31 | 8338,27 | 176,61 | 1696,96 | 0,15 | 4,91  |
| 0,32 | 8149,54 | 176,62 | 1696,88 | 0,15 | 4,80  |
| 0,33 | 7963,38 | 176,63 | 1696,79 | 0,16 | 4,69  |
| 0,34 | 7782,82 | 176,64 | 1696,70 | 0,16 | 4,59  |
| 0,35 | 7604,69 | 176,65 | 1696,61 | 0,17 | 4,48  |
| 0,35 | 7436,87 | 176,65 | 1696,52 | 0,17 | 4,38  |
| 0,36 | 7254,65 | 176,66 | 1696,43 | 0,17 | 4,28  |
| 0,37 | 7082,76 | 176,67 | 1696,33 | 0,18 | 4,18  |
| 0,38 | 6923,58 | 176,68 | 1696,24 | 0,18 | 4,08  |
| 0,39 | 6762,6  | 176,69 | 1696,15 | 0,19 | 3,99  |
| 0,40 | 6604,84 | 176,70 | 1696,05 | 0,19 | 3,89  |
| 0,41 | 6453,38 | 176,71 | 1695,96 | 0,20 | 3,81  |

|      |         |        |         |      |      |
|------|---------|--------|---------|------|------|
| 0,42 | 6301,5  | 176,72 | 1695,86 | 0,20 | 3,72 |
| 0,43 | 6162,68 | 176,73 | 1695,77 | 0,21 | 3,63 |
| 0,44 | 6006,92 | 176,74 | 1695,67 | 0,21 | 3,54 |
| 0,45 | 5857,53 | 176,75 | 1695,58 | 0,22 | 3,45 |
| 0,46 | 5721,54 | 176,76 | 1695,48 | 0,22 | 3,37 |
| 0,47 | 5579,49 | 176,77 | 1695,38 | 0,23 | 3,29 |
| 0,48 | 5440,41 | 176,78 | 1695,28 | 0,23 | 3,21 |
| 0,49 | 5305,67 | 176,79 | 1695,18 | 0,24 | 3,13 |
| 0,50 | 5171,91 | 176,80 | 1695,08 | 0,24 | 3,05 |
| 0,51 | 5041,21 | 176,81 | 1694,98 | 0,25 | 2,97 |
| 0,52 | 4911,65 | 176,82 | 1694,88 | 0,25 | 2,90 |
| 0,54 | 4785,05 | 176,84 | 1694,77 | 0,26 | 2,82 |
| 0,55 | 4659,62 | 176,85 | 1694,67 | 0,26 | 2,75 |
| 0,56 | 4537,14 | 176,86 | 1694,57 | 0,27 | 2,68 |
| 0,57 | 4415,89 | 176,87 | 1694,46 | 0,27 | 2,61 |
| 0,58 | 4303,55 | 176,88 | 1694,35 | 0,28 | 2,54 |
| 0,59 | 4178,06 | 176,89 | 1694,25 | 0,28 | 2,47 |
| 0,60 | 4057,98 | 176,90 | 1694,14 | 0,29 | 2,40 |
| 0,61 | 3946,97 | 176,91 | 1694,03 | 0,29 | 2,33 |
| 0,62 | 3832,01 | 176,92 | 1693,93 | 0,30 | 2,26 |
| 0,63 | 3717,76 | 176,93 | 1693,82 | 0,30 | 2,19 |
| 0,65 | 3604,83 | 176,95 | 1693,71 | 0,31 | 2,13 |
| 0,66 | 3492,61 | 176,96 | 1693,59 | 0,31 | 2,06 |
| 0,67 | 3382,21 | 176,97 | 1693,48 | 0,32 | 2,00 |
| 0,68 | 3272,32 | 176,98 | 1693,37 | 0,33 | 1,93 |
| 0,69 | 3164,13 | 176,99 | 1693,26 | 0,33 | 1,87 |
| 0,70 | 3056,46 | 177,00 | 1693,14 | 0,34 | 1,81 |
| 0,72 | 2950,55 | 177,02 | 1693,03 | 0,34 | 1,74 |
| 0,73 | 2845,2  | 177,03 | 1692,91 | 0,35 | 1,68 |
| 0,74 | 2744,67 | 177,04 | 1692,80 | 0,35 | 1,62 |
| 0,75 | 2640,04 | 177,05 | 1692,68 | 0,36 | 1,56 |
| 0,76 | 2575,23 | 177,06 | 1692,56 | 0,37 | 1,52 |
| 0,78 | 2538,39 | 177,08 | 1692,44 | 0,37 | 1,50 |
| 0,79 | 2497,94 | 177,09 | 1692,32 | 0,38 | 1,48 |
| 0,80 | 2459,79 | 177,10 | 1692,20 | 0,38 | 1,45 |
| 0,81 | 2421,74 | 177,11 | 1692,08 | 0,39 | 1,43 |
| 0,83 | 2383,4  | 177,13 | 1691,96 | 0,40 | 1,41 |
| 0,84 | 2346,12 | 177,14 | 1691,84 | 0,40 | 1,39 |
| 0,85 | 2304,72 | 177,15 | 1691,71 | 0,41 | 1,36 |
| 0,87 | 2264,74 | 177,17 | 1691,59 | 0,41 | 1,34 |
| 0,88 | 2226,42 | 177,18 | 1691,46 | 0,42 | 1,32 |
| 0,89 | 2187,53 | 177,19 | 1691,34 | 0,43 | 1,29 |
| 0,90 | 2146,34 | 177,20 | 1691,21 | 0,43 | 1,27 |
| 0,92 | 2106,4  | 177,22 | 1691,08 | 0,44 | 1,25 |
| 0,93 | 2067,79 | 177,23 | 1690,95 | 0,45 | 1,22 |
| 0,94 | 2028,61 | 177,24 | 1690,82 | 0,45 | 1,20 |
| 0,96 | 1987,53 | 177,26 | 1690,69 | 0,46 | 1,18 |

|      |         |        |         |      |      |
|------|---------|--------|---------|------|------|
| 0,97 | 1947,57 | 177,27 | 1690,56 | 0,47 | 1,15 |
| 0,99 | 1908,81 | 177,29 | 1690,43 | 0,47 | 1,13 |
| 1,00 | 1869,3  | 177,30 | 1690,30 | 0,48 | 1,11 |
| 1,03 | 1793,12 | 177,33 | 1690,04 | 0,49 | 1,06 |
| 1,05 | 1717,6  | 177,35 | 1689,78 | 0,51 | 1,02 |
| 1,08 | 1643,74 | 177,38 | 1689,52 | 0,52 | 0,97 |
| 1,11 | 1570,32 | 177,41 | 1689,26 | 0,53 | 0,93 |
| 1,14 | 1499,02 | 177,44 | 1689,00 | 0,54 | 0,89 |
| 1,16 | 1427,93 | 177,46 | 1688,74 | 0,56 | 0,85 |
| 1,19 | 1359,24 | 177,49 | 1688,48 | 0,57 | 0,81 |
| 1,22 | 1290,56 | 177,52 | 1688,22 | 0,58 | 0,76 |
| 1,24 | 1224,53 | 177,54 | 1687,96 | 0,60 | 0,73 |
| 1,27 | 1158,34 | 177,57 | 1687,70 | 0,61 | 0,69 |
| 1,30 | 1095,04 | 177,60 | 1687,44 | 0,62 | 0,65 |
| 1,33 | 1031,41 | 177,63 | 1687,18 | 0,64 | 0,61 |
| 1,35 | 970,91  | 177,65 | 1686,92 | 0,65 | 0,58 |
| 1,38 | 909,92  | 177,68 | 1686,66 | 0,66 | 0,54 |
| 1,41 | 852,32  | 177,71 | 1686,40 | 0,67 | 0,51 |
| 1,43 | 794,07  | 177,73 | 1686,14 | 0,69 | 0,47 |
| 1,46 | 739,48  | 177,76 | 1685,88 | 0,70 | 0,44 |
| 1,49 | 684,09  | 177,79 | 1685,63 | 0,71 | 0,41 |
| 1,52 | 632,65  | 177,82 | 1685,37 | 0,73 | 0,38 |
| 1,54 | 580,24  | 177,84 | 1685,11 | 0,74 | 0,34 |
| 1,57 | 532,12  | 177,87 | 1684,85 | 0,75 | 0,32 |
| 1,60 | 482,87  | 177,90 | 1684,59 | 0,77 | 0,29 |
| 1,62 | 438,27  | 177,92 | 1684,34 | 0,78 | 0,26 |
| 1,65 | 392,36  | 177,95 | 1684,08 | 0,79 | 0,23 |
| 1,68 | 351,51  | 177,98 | 1683,82 | 0,80 | 0,21 |
| 1,71 | 309,17  | 178,01 | 1683,56 | 0,82 | 0,18 |
| 1,73 | 272,35  | 178,03 | 1683,31 | 0,83 | 0,16 |
| 1,76 | 233,85  | 178,06 | 1683,05 | 0,84 | 0,14 |
| 1,79 | 201,39  | 178,09 | 1682,79 | 0,86 | 0,12 |
| 1,81 | 167,03  | 178,11 | 1682,53 | 0,87 | 0,10 |
| 1,84 | 139,33  | 178,14 | 1682,28 | 0,88 | 0,08 |
| 1,87 | 109,50  | 178,17 | 1682,02 | 0,90 | 0,07 |
| 1,90 | 87,04   | 178,20 | 1681,76 | 0,91 | 0,05 |
| 1,92 | 62,19   | 178,22 | 1681,51 | 0,92 | 0,04 |
| 1,95 | 45,61   | 178,25 | 1681,25 | 0,93 | 0,03 |
| 1,98 | 26,35   | 178,28 | 1680,99 | 0,95 | 0,02 |
| 2,01 | 16,59   | 178,31 | 1680,74 | 0,96 | 0,01 |
| 2,03 | 3,97    | 178,33 | 1680,48 | 0,97 | 0,00 |
| 2,06 | 2,12    | 178,36 | 1680,23 | 0,99 | 0,00 |
| 2,09 | -2,66   | 178,39 | 1679,97 | 1,00 | 0,00 |

**Semicírculo de aço parede fina com profundidade de entalhe de 6,93.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 43488,60                                  | 176,93 | 2439,56                                | 0,00 | 17,83                                    |
| 0,01  | 36477,90                                  | 176,94 | 2439,39                                | 0,01 | 14,95                                    |
| 0,03  | 31609,80                                  | 176,96 | 2439,21                                | 0,02 | 12,96                                    |
| 0,04  | 28211,90                                  | 176,97 | 2439,02                                | 0,03 | 11,57                                    |
| 0,05  | 24739,40                                  | 176,98 | 2438,83                                | 0,04 | 10,14                                    |
| 0,07  | 24821,30                                  | 177,00 | 2438,62                                | 0,05 | 10,18                                    |
| 0,08  | 22993,10                                  | 177,01 | 2438,41                                | 0,06 | 9,43                                     |
| 0,10  | 21311,20                                  | 177,03 | 2438,19                                | 0,07 | 8,74                                     |
| 0,12  | 19944,20                                  | 177,05 | 2437,97                                | 0,08 | 8,18                                     |
| 0,13  | 18671,10                                  | 177,06 | 2437,72                                | 0,09 | 7,66                                     |
| 0,15  | 16971,10                                  | 177,08 | 2437,48                                | 0,10 | 6,96                                     |
| 0,17  | 16320,20                                  | 177,10 | 2437,22                                | 0,12 | 6,70                                     |
| 0,19  | 15140,40                                  | 177,12 | 2436,96                                | 0,13 | 6,21                                     |
| 0,21  | 14007,40                                  | 177,14 | 2436,68                                | 0,14 | 5,75                                     |
| 0,23  | 13004,00                                  | 177,16 | 2436,40                                | 0,16 | 5,34                                     |
| 0,25  | 12022,60                                  | 177,18 | 2436,10                                | 0,17 | 4,94                                     |
| 0,27  | 11118,80                                  | 177,20 | 2435,80                                | 0,19 | 4,56                                     |
| 0,30  | 10184,60                                  | 177,23 | 2435,47                                | 0,20 | 4,18                                     |
| 0,32  | 9359,29                                   | 177,25 | 2435,14                                | 0,22 | 3,84                                     |
| 0,34  | 8535,75                                   | 177,27 | 2434,79                                | 0,24 | 3,51                                     |
| 0,37  | 7779,61                                   | 177,30 | 2434,44                                | 0,25 | 3,20                                     |
| 0,42  | 6404,67                                   | 177,35 | 2433,69                                | 0,29 | 2,63                                     |
| 0,48  | 5149,15                                   | 177,41 | 2432,94                                | 0,33 | 2,12                                     |
| 0,53  | 4045,41                                   | 177,46 | 2432,19                                | 0,37 | 1,66                                     |
| 0,59  | 3514,08                                   | 177,52 | 2431,44                                | 0,40 | 1,45                                     |
| 0,64  | 3159,69                                   | 177,57 | 2430,69                                | 0,44 | 1,30                                     |
| 0,70  | 2821,01                                   | 177,63 | 2429,95                                | 0,48 | 1,16                                     |
| 0,75  | 2500,10                                   | 177,68 | 2429,20                                | 0,52 | 1,03                                     |
| 0,80  | 2185,22                                   | 177,73 | 2428,45                                | 0,55 | 0,90                                     |
| 0,86  | 1897,52                                   | 177,79 | 2427,71                                | 0,59 | 0,78                                     |
| 0,91  | 1608,71                                   | 177,84 | 2426,97                                | 0,63 | 0,66                                     |
| 0,97  | 1356,13                                   | 177,90 | 2426,22                                | 0,66 | 0,56                                     |
| 1,02  | 1096,35                                   | 177,95 | 2425,48                                | 0,70 | 0,45                                     |
| 1,08  | 883,09                                    | 178,01 | 2424,74                                | 0,74 | 0,36                                     |
| 1,13  | 656,59                                    | 178,06 | 2424,00                                | 0,78 | 0,27                                     |
| 1,18  | 489,93                                    | 178,11 | 2423,26                                | 0,81 | 0,20                                     |
| 1,24  | 303,19                                    | 178,17 | 2422,52                                | 0,85 | 0,13                                     |
| 1,29  | 195,19                                    | 178,22 | 2421,78                                | 0,89 | 0,08                                     |
| 1,35  | 58,96                                     | 178,28 | 2421,04                                | 0,93 | 0,02                                     |
| 1,40  | 31,84                                     | 178,33 | 2420,30                                | 0,96 | 0,01                                     |
| 1,46  | -27,81                                    | 178,39 | 2419,56                                | 1,00 | -0,01                                    |

**Semicírculo de aço parede espessa com profundidade de entalhe de 4,42.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 1566,03                                   | 174,42 | 128,71                                 | 0,00 | 12,17                                    |
| 0,04  | 1320,47                                   | 174,46 | 128,67                                 | 0,00 | 10,26                                    |
| 0,09  | 1147,77                                   | 174,51 | 128,64                                 | 0,00 | 8,92                                     |
| 0,14  | 1008,63                                   | 174,56 | 128,60                                 | 0,01 | 7,84                                     |
| 0,18  | 906,59                                    | 174,60 | 128,56                                 | 0,01 | 7,05                                     |
| 0,23  | 821,27                                    | 174,65 | 128,52                                 | 0,01 | 6,39                                     |
| 0,27  | 754,67                                    | 174,69 | 128,48                                 | 0,01 | 5,87                                     |
| 0,32  | 698,77                                    | 174,74 | 128,44                                 | 0,02 | 5,44                                     |
| 0,36  | 652,00                                    | 174,78 | 128,40                                 | 0,02 | 5,08                                     |
| 0,41  | 612,60                                    | 174,83 | 128,37                                 | 0,02 | 4,77                                     |
| 0,46  | 578,80                                    | 174,88 | 128,33                                 | 0,02 | 4,51                                     |
| 0,50  | 549,42                                    | 174,92 | 128,29                                 | 0,03 | 4,28                                     |
| 0,55  | 523,75                                    | 174,97 | 128,25                                 | 0,03 | 4,08                                     |
| 0,59  | 501,15                                    | 175,01 | 128,21                                 | 0,03 | 3,91                                     |
| 0,64  | 481,02                                    | 175,06 | 128,17                                 | 0,03 | 3,75                                     |
| 0,69  | 463,08                                    | 175,11 | 128,13                                 | 0,04 | 3,61                                     |
| 0,73  | 446,87                                    | 175,15 | 128,09                                 | 0,04 | 3,49                                     |
| 0,78  | 432,29                                    | 175,20 | 128,05                                 | 0,04 | 3,38                                     |
| 0,83  | 418,95                                    | 175,25 | 128,01                                 | 0,04 | 3,27                                     |
| 0,88  | 406,86                                    | 175,30 | 127,97                                 | 0,05 | 3,18                                     |
| 0,92  | 395,68                                    | 175,34 | 127,93                                 | 0,05 | 3,09                                     |
| 0,97  | 385,48                                    | 175,39 | 127,89                                 | 0,05 | 3,01                                     |
| 1,02  | 375,97                                    | 175,44 | 127,85                                 | 0,06 | 2,94                                     |
| 1,07  | 367,24                                    | 175,49 | 127,81                                 | 0,06 | 2,87                                     |
| 1,11  | 359,05                                    | 175,53 | 127,77                                 | 0,06 | 2,81                                     |
| 1,16  | 351,49                                    | 175,58 | 127,73                                 | 0,06 | 2,75                                     |
| 1,21  | 344,35                                    | 175,63 | 127,69                                 | 0,07 | 2,70                                     |
| 1,26  | 337,72                                    | 175,68 | 127,65                                 | 0,07 | 2,65                                     |
| 1,31  | 331,44                                    | 175,73 | 127,61                                 | 0,07 | 2,60                                     |
| 1,36  | 325,58                                    | 175,78 | 127,57                                 | 0,07 | 2,55                                     |
| 1,41  | 320,01                                    | 175,83 | 127,53                                 | 0,08 | 2,51                                     |
| 1,46  | 314,79                                    | 175,88 | 127,49                                 | 0,08 | 2,47                                     |
| 1,50  | 309,80                                    | 175,92 | 127,45                                 | 0,08 | 2,43                                     |
| 1,55  | 305,12                                    | 175,97 | 127,41                                 | 0,08 | 2,39                                     |
| 1,60  | 300,63                                    | 176,02 | 127,36                                 | 0,09 | 2,36                                     |
| 1,65  | 296,40                                    | 176,07 | 127,32                                 | 0,09 | 2,33                                     |
| 1,70  | 292,33                                    | 176,12 | 127,28                                 | 0,09 | 2,30                                     |
| 1,75  | 288,50                                    | 176,17 | 127,24                                 | 0,09 | 2,27                                     |
| 1,80  | 284,80                                    | 176,22 | 127,20                                 | 0,10 | 2,24                                     |
| 1,85  | 281,30                                    | 176,27 | 127,16                                 | 0,10 | 2,21                                     |
| 1,90  | 277,91                                    | 176,32 | 127,12                                 | 0,10 | 2,19                                     |
| 1,95  | 274,69                                    | 176,37 | 127,07                                 | 0,11 | 2,16                                     |
| 2,00  | 271,58                                    | 176,42 | 127,03                                 | 0,11 | 2,14                                     |
| 2,05  | 268,62                                    | 176,47 | 126,99                                 | 0,11 | 2,12                                     |
| 2,11  | 265,75                                    | 176,53 | 126,95                                 | 0,11 | 2,09                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 2,16 | 263,01 | 176,58 | 126,91 | 0,12 | 2,07 |
| 2,21 | 260,35 | 176,63 | 126,87 | 0,12 | 2,05 |
| 2,26 | 257,81 | 176,68 | 126,82 | 0,12 | 2,03 |
| 2,31 | 255,34 | 176,73 | 126,78 | 0,13 | 2,01 |
| 2,36 | 252,97 | 176,78 | 126,74 | 0,13 | 2,00 |
| 2,41 | 250,67 | 176,83 | 126,70 | 0,13 | 1,98 |
| 2,47 | 248,46 | 176,89 | 126,65 | 0,13 | 1,96 |
| 2,52 | 246,31 | 176,94 | 126,61 | 0,14 | 1,95 |
| 2,57 | 244,25 | 176,99 | 126,57 | 0,14 | 1,93 |
| 2,62 | 242,23 | 177,04 | 126,53 | 0,14 | 1,91 |
| 2,68 | 240,29 | 177,10 | 126,48 | 0,15 | 1,90 |
| 2,73 | 238,39 | 177,15 | 126,44 | 0,15 | 1,89 |
| 2,78 | 236,57 | 177,20 | 126,40 | 0,15 | 1,87 |
| 2,83 | 234,78 | 177,25 | 126,35 | 0,15 | 1,86 |
| 2,89 | 233,06 | 177,31 | 126,31 | 0,16 | 1,85 |
| 2,94 | 231,37 | 177,36 | 126,27 | 0,16 | 1,83 |
| 2,99 | 229,74 | 177,41 | 126,22 | 0,16 | 1,82 |
| 3,05 | 228,15 | 177,47 | 126,18 | 0,17 | 1,81 |
| 3,10 | 226,60 | 177,52 | 126,14 | 0,17 | 1,80 |
| 3,16 | 225,09 | 177,58 | 126,09 | 0,17 | 1,79 |
| 3,21 | 223,63 | 177,63 | 126,05 | 0,17 | 1,77 |
| 3,26 | 222,19 | 177,68 | 126,01 | 0,18 | 1,76 |
| 3,32 | 220,81 | 177,74 | 125,96 | 0,18 | 1,75 |
| 3,37 | 219,44 | 177,79 | 125,92 | 0,18 | 1,74 |
| 3,43 | 218,12 | 177,85 | 125,87 | 0,19 | 1,73 |
| 3,48 | 216,81 | 177,90 | 125,83 | 0,19 | 1,72 |
| 3,54 | 215,55 | 177,96 | 125,79 | 0,19 | 1,71 |
| 3,59 | 214,31 | 178,01 | 125,74 | 0,19 | 1,70 |
| 3,65 | 213,10 | 178,07 | 125,70 | 0,20 | 1,70 |
| 3,70 | 211,91 | 178,12 | 125,65 | 0,20 | 1,69 |
| 3,76 | 210,76 | 178,18 | 125,61 | 0,20 | 1,68 |
| 3,82 | 209,62 | 178,24 | 125,56 | 0,21 | 1,67 |
| 3,87 | 208,51 | 178,29 | 125,52 | 0,21 | 1,66 |
| 3,93 | 207,42 | 178,35 | 125,47 | 0,21 | 1,65 |
| 3,98 | 206,36 | 178,40 | 125,43 | 0,22 | 1,65 |
| 4,04 | 205,31 | 178,46 | 125,38 | 0,22 | 1,64 |
| 4,10 | 204,29 | 178,52 | 125,34 | 0,22 | 1,63 |
| 4,15 | 203,28 | 178,57 | 125,29 | 0,23 | 1,62 |
| 4,21 | 202,30 | 178,63 | 125,25 | 0,23 | 1,62 |
| 4,27 | 201,33 | 178,69 | 125,20 | 0,23 | 1,61 |
| 4,33 | 200,39 | 178,75 | 125,16 | 0,23 | 1,60 |
| 4,38 | 199,45 | 178,80 | 125,11 | 0,24 | 1,59 |
| 4,44 | 198,54 | 178,86 | 125,07 | 0,24 | 1,59 |
| 4,50 | 197,64 | 178,92 | 125,02 | 0,24 | 1,58 |
| 4,56 | 196,75 | 178,98 | 124,97 | 0,25 | 1,57 |
| 4,62 | 195,88 | 179,04 | 124,93 | 0,25 | 1,57 |
| 4,67 | 195,03 | 179,09 | 124,88 | 0,25 | 1,56 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 4,73 | 194,19 | 179,15 | 124,84 | 0,26 | 1,56 |
| 4,79 | 193,36 | 179,21 | 124,79 | 0,26 | 1,55 |
| 4,85 | 192,54 | 179,27 | 124,74 | 0,26 | 1,54 |
| 4,91 | 191,74 | 179,33 | 124,70 | 0,27 | 1,54 |
| 4,97 | 190,95 | 179,39 | 124,65 | 0,27 | 1,53 |
| 5,03 | 190,18 | 179,45 | 124,60 | 0,27 | 1,53 |
| 5,09 | 189,41 | 179,51 | 124,56 | 0,28 | 1,52 |
| 5,15 | 188,66 | 179,57 | 124,51 | 0,28 | 1,52 |
| 5,21 | 187,91 | 179,63 | 124,46 | 0,28 | 1,51 |
| 5,27 | 187,18 | 179,69 | 124,42 | 0,29 | 1,50 |
| 5,33 | 186,45 | 179,75 | 124,37 | 0,29 | 1,50 |
| 5,39 | 185,74 | 179,81 | 124,32 | 0,29 | 1,49 |
| 5,45 | 185,03 | 179,87 | 124,28 | 0,30 | 1,49 |
| 5,51 | 184,34 | 179,93 | 124,23 | 0,30 | 1,48 |
| 5,57 | 183,65 | 179,99 | 124,18 | 0,30 | 1,48 |
| 5,63 | 182,97 | 180,05 | 124,13 | 0,31 | 1,47 |
| 5,69 | 182,30 | 180,11 | 124,09 | 0,31 | 1,47 |
| 5,75 | 181,64 | 180,17 | 124,04 | 0,31 | 1,46 |
| 5,82 | 180,99 | 180,24 | 123,99 | 0,32 | 1,46 |
| 5,88 | 180,34 | 180,30 | 123,94 | 0,32 | 1,46 |
| 5,94 | 179,70 | 180,36 | 123,90 | 0,32 | 1,45 |
| 6,00 | 179,07 | 180,42 | 123,85 | 0,33 | 1,45 |
| 6,06 | 178,44 | 180,48 | 123,80 | 0,33 | 1,44 |
| 6,13 | 177,83 | 180,55 | 123,75 | 0,33 | 1,44 |
| 6,19 | 177,21 | 180,61 | 123,70 | 0,34 | 1,43 |
| 6,25 | 176,61 | 180,67 | 123,66 | 0,34 | 1,43 |
| 6,32 | 176,01 | 180,74 | 123,61 | 0,34 | 1,42 |
| 6,38 | 175,41 | 180,80 | 123,56 | 0,35 | 1,42 |
| 6,44 | 174,82 | 180,86 | 123,51 | 0,35 | 1,42 |
| 6,51 | 174,24 | 180,93 | 123,46 | 0,35 | 1,41 |
| 6,57 | 173,66 | 180,99 | 123,41 | 0,36 | 1,41 |
| 6,63 | 173,09 | 181,05 | 123,36 | 0,36 | 1,40 |
| 6,70 | 172,52 | 181,12 | 123,31 | 0,36 | 1,40 |
| 6,76 | 171,96 | 181,18 | 123,27 | 0,37 | 1,40 |
| 6,83 | 171,40 | 181,25 | 123,22 | 0,37 | 1,39 |
| 6,89 | 170,85 | 181,31 | 123,17 | 0,37 | 1,39 |
| 6,96 | 170,30 | 181,38 | 123,12 | 0,38 | 1,38 |
| 7,02 | 169,76 | 181,44 | 123,07 | 0,38 | 1,38 |
| 7,09 | 169,21 | 181,51 | 123,02 | 0,38 | 1,38 |
| 7,15 | 168,68 | 181,57 | 122,97 | 0,39 | 1,37 |
| 7,22 | 168,14 | 181,64 | 122,92 | 0,39 | 1,37 |
| 7,29 | 167,62 | 181,71 | 122,87 | 0,39 | 1,36 |
| 7,35 | 167,09 | 181,77 | 122,82 | 0,40 | 1,36 |
| 7,42 | 166,57 | 181,84 | 122,77 | 0,40 | 1,36 |
| 7,48 | 166,05 | 181,90 | 122,72 | 0,41 | 1,35 |
| 7,55 | 165,54 | 181,97 | 122,67 | 0,41 | 1,35 |
| 7,62 | 165,02 | 182,04 | 122,62 | 0,41 | 1,35 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 7,69  | 164,51 | 182,11 | 122,57 | 0,42 | 1,34 |
| 7,75  | 164,01 | 182,17 | 122,52 | 0,42 | 1,34 |
| 7,82  | 163,50 | 182,24 | 122,47 | 0,42 | 1,34 |
| 7,89  | 163,00 | 182,31 | 122,42 | 0,43 | 1,33 |
| 7,96  | 162,50 | 182,38 | 122,37 | 0,43 | 1,33 |
| 8,02  | 162,00 | 182,44 | 122,32 | 0,43 | 1,32 |
| 8,09  | 161,51 | 182,51 | 122,27 | 0,44 | 1,32 |
| 8,16  | 161,02 | 182,58 | 122,21 | 0,44 | 1,32 |
| 8,23  | 160,53 | 182,65 | 122,16 | 0,45 | 1,31 |
| 8,30  | 160,04 | 182,72 | 122,11 | 0,45 | 1,31 |
| 8,37  | 159,55 | 182,79 | 122,06 | 0,45 | 1,31 |
| 8,44  | 159,07 | 182,86 | 122,01 | 0,46 | 1,30 |
| 8,51  | 158,59 | 182,93 | 121,96 | 0,46 | 1,30 |
| 8,58  | 158,10 | 183,00 | 121,91 | 0,46 | 1,30 |
| 8,65  | 157,63 | 183,07 | 121,86 | 0,47 | 1,29 |
| 8,72  | 157,15 | 183,14 | 121,80 | 0,47 | 1,29 |
| 8,79  | 156,67 | 183,21 | 121,75 | 0,48 | 1,29 |
| 8,86  | 156,19 | 183,28 | 121,70 | 0,48 | 1,28 |
| 8,93  | 155,72 | 183,35 | 121,65 | 0,48 | 1,28 |
| 9,00  | 155,25 | 183,42 | 121,60 | 0,49 | 1,28 |
| 9,07  | 154,77 | 183,49 | 121,54 | 0,49 | 1,27 |
| 9,14  | 154,30 | 183,56 | 121,49 | 0,50 | 1,27 |
| 9,21  | 153,83 | 183,63 | 121,44 | 0,50 | 1,27 |
| 9,28  | 153,36 | 183,70 | 121,39 | 0,50 | 1,26 |
| 9,36  | 152,89 | 183,78 | 121,33 | 0,51 | 1,26 |
| 9,43  | 152,43 | 183,85 | 121,28 | 0,51 | 1,26 |
| 9,50  | 151,96 | 183,92 | 121,23 | 0,51 | 1,25 |
| 9,57  | 151,49 | 183,99 | 121,18 | 0,52 | 1,25 |
| 9,65  | 151,02 | 184,07 | 121,12 | 0,52 | 1,25 |
| 9,72  | 150,56 | 184,14 | 121,07 | 0,53 | 1,24 |
| 9,79  | 150,09 | 184,21 | 121,02 | 0,53 | 1,24 |
| 9,87  | 149,62 | 184,29 | 120,96 | 0,53 | 1,24 |
| 9,94  | 149,15 | 184,36 | 120,91 | 0,54 | 1,23 |
| 10,01 | 148,69 | 184,43 | 120,86 | 0,54 | 1,23 |
| 10,09 | 148,22 | 184,51 | 120,80 | 0,55 | 1,23 |
| 10,16 | 147,75 | 184,58 | 120,75 | 0,55 | 1,22 |
| 10,24 | 147,28 | 184,66 | 120,70 | 0,55 | 1,22 |
| 10,31 | 146,81 | 184,73 | 120,64 | 0,56 | 1,22 |
| 10,39 | 146,35 | 184,81 | 120,59 | 0,56 | 1,21 |
| 10,46 | 145,88 | 184,88 | 120,54 | 0,57 | 1,21 |
| 10,54 | 145,41 | 184,96 | 120,48 | 0,57 | 1,21 |
| 10,61 | 144,93 | 185,03 | 120,43 | 0,58 | 1,20 |
| 10,69 | 144,46 | 185,11 | 120,37 | 0,58 | 1,20 |
| 10,77 | 143,99 | 185,19 | 120,32 | 0,58 | 1,20 |
| 10,84 | 143,52 | 185,26 | 120,26 | 0,59 | 1,19 |
| 10,92 | 143,04 | 185,34 | 120,21 | 0,59 | 1,19 |
| 10,99 | 142,57 | 185,41 | 120,16 | 0,60 | 1,19 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 11,07 | 142,09 | 185,49 | 120,10 | 0,60 | 1,18 |
| 11,15 | 141,61 | 185,57 | 120,05 | 0,60 | 1,18 |
| 11,23 | 141,13 | 185,65 | 119,99 | 0,61 | 1,18 |
| 11,30 | 140,65 | 185,72 | 119,94 | 0,61 | 1,17 |
| 11,38 | 140,17 | 185,80 | 119,88 | 0,62 | 1,17 |
| 11,46 | 139,68 | 185,88 | 119,83 | 0,62 | 1,17 |
| 11,54 | 139,20 | 185,96 | 119,77 | 0,63 | 1,16 |
| 11,62 | 138,71 | 186,04 | 119,72 | 0,63 | 1,16 |
| 11,70 | 138,22 | 186,12 | 119,66 | 0,63 | 1,16 |
| 11,77 | 137,72 | 186,19 | 119,61 | 0,64 | 1,15 |
| 11,85 | 137,23 | 186,27 | 119,55 | 0,64 | 1,15 |
| 11,93 | 136,73 | 186,35 | 119,49 | 0,65 | 1,14 |
| 12,01 | 136,23 | 186,43 | 119,44 | 0,65 | 1,14 |
| 12,09 | 135,73 | 186,51 | 119,38 | 0,66 | 1,14 |
| 12,17 | 135,23 | 186,59 | 119,33 | 0,66 | 1,13 |
| 12,25 | 134,72 | 186,67 | 119,27 | 0,66 | 1,13 |
| 12,33 | 134,21 | 186,75 | 119,22 | 0,67 | 1,13 |
| 12,42 | 133,70 | 186,84 | 119,16 | 0,67 | 1,12 |
| 12,50 | 133,19 | 186,92 | 119,10 | 0,68 | 1,12 |
| 12,58 | 132,67 | 187,00 | 119,05 | 0,68 | 1,11 |
| 12,66 | 132,15 | 187,08 | 118,99 | 0,69 | 1,11 |
| 12,74 | 131,62 | 187,16 | 118,93 | 0,69 | 1,11 |
| 12,82 | 131,10 | 187,24 | 118,88 | 0,70 | 1,10 |
| 12,91 | 130,57 | 187,33 | 118,82 | 0,70 | 1,10 |
| 12,99 | 130,03 | 187,41 | 118,76 | 0,70 | 1,09 |
| 13,07 | 129,49 | 187,49 | 118,71 | 0,71 | 1,09 |
| 13,15 | 128,95 | 187,57 | 118,65 | 0,71 | 1,09 |
| 13,24 | 128,41 | 187,66 | 118,59 | 0,72 | 1,08 |
| 13,32 | 127,86 | 187,74 | 118,54 | 0,72 | 1,08 |
| 13,40 | 127,30 | 187,82 | 118,48 | 0,73 | 1,07 |
| 13,49 | 126,74 | 187,91 | 118,42 | 0,73 | 1,07 |
| 13,57 | 126,18 | 187,99 | 118,36 | 0,74 | 1,07 |
| 13,66 | 125,61 | 188,08 | 118,31 | 0,74 | 1,06 |
| 13,74 | 125,04 | 188,16 | 118,25 | 0,74 | 1,06 |
| 13,83 | 124,47 | 188,25 | 118,19 | 0,75 | 1,05 |
| 13,91 | 123,88 | 188,33 | 118,13 | 0,75 | 1,05 |
| 14,00 | 123,30 | 188,42 | 118,08 | 0,76 | 1,04 |
| 14,08 | 122,70 | 188,50 | 118,02 | 0,76 | 1,04 |
| 14,17 | 122,11 | 188,59 | 117,96 | 0,77 | 1,04 |
| 14,26 | 121,50 | 188,68 | 117,90 | 0,77 | 1,03 |
| 14,34 | 120,89 | 188,76 | 117,84 | 0,78 | 1,03 |
| 14,43 | 120,28 | 188,85 | 117,78 | 0,78 | 1,02 |
| 14,52 | 119,66 | 188,94 | 117,73 | 0,79 | 1,02 |
| 14,60 | 119,03 | 189,02 | 117,67 | 0,79 | 1,01 |
| 14,69 | 118,40 | 189,11 | 117,61 | 0,80 | 1,01 |
| 14,78 | 117,76 | 189,20 | 117,55 | 0,80 | 1,00 |
| 14,87 | 117,11 | 189,29 | 117,49 | 0,81 | 1,00 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 14,95 | 116,46 | 189,37 | 117,43 | 0,81 | 0,99 |
| 15,04 | 115,80 | 189,46 | 117,37 | 0,82 | 0,99 |
| 15,13 | 115,13 | 189,55 | 117,31 | 0,82 | 0,98 |
| 15,22 | 114,45 | 189,64 | 117,26 | 0,82 | 0,98 |
| 15,31 | 113,77 | 189,73 | 117,20 | 0,83 | 0,97 |
| 15,40 | 113,08 | 189,82 | 117,14 | 0,83 | 0,97 |
| 15,49 | 112,38 | 189,91 | 117,08 | 0,84 | 0,96 |
| 15,58 | 111,67 | 190,00 | 117,02 | 0,84 | 0,95 |
| 15,65 | 111,10 | 190,07 | 116,97 | 0,85 | 0,95 |
| 15,72 | 110,53 | 190,14 | 116,92 | 0,85 | 0,95 |
| 15,80 | 109,95 | 190,22 | 116,88 | 0,86 | 0,94 |
| 15,87 | 109,37 | 190,29 | 116,83 | 0,86 | 0,94 |
| 15,94 | 108,78 | 190,36 | 116,78 | 0,86 | 0,93 |
| 16,01 | 108,19 | 190,43 | 116,74 | 0,87 | 0,93 |
| 16,08 | 107,59 | 190,50 | 116,69 | 0,87 | 0,92 |
| 16,15 | 106,99 | 190,57 | 116,64 | 0,88 | 0,92 |
| 16,23 | 106,39 | 190,65 | 116,59 | 0,88 | 0,91 |
| 16,30 | 105,78 | 190,72 | 116,55 | 0,88 | 0,91 |
| 16,37 | 105,16 | 190,79 | 116,50 | 0,89 | 0,90 |
| 16,44 | 104,54 | 190,86 | 116,45 | 0,89 | 0,90 |
| 16,51 | 103,92 | 190,93 | 116,41 | 0,90 | 0,89 |
| 16,58 | 103,28 | 191,00 | 116,36 | 0,90 | 0,89 |
| 16,66 | 102,65 | 191,08 | 116,31 | 0,90 | 0,88 |
| 16,73 | 102,00 | 191,15 | 116,27 | 0,91 | 0,88 |
| 16,80 | 101,36 | 191,22 | 116,22 | 0,91 | 0,87 |
| 16,87 | 100,70 | 191,29 | 116,17 | 0,91 | 0,87 |
| 16,94 | 100,04 | 191,36 | 116,13 | 0,92 | 0,86 |
| 17,02 | 99,37  | 191,44 | 116,08 | 0,92 | 0,86 |
| 17,09 | 98,70  | 191,51 | 116,04 | 0,93 | 0,85 |
| 17,16 | 98,02  | 191,58 | 115,99 | 0,93 | 0,85 |
| 17,23 | 97,34  | 191,65 | 115,94 | 0,93 | 0,84 |
| 17,30 | 96,65  | 191,72 | 115,90 | 0,94 | 0,83 |
| 17,37 | 95,95  | 191,79 | 115,85 | 0,94 | 0,83 |
| 17,45 | 95,24  | 191,87 | 115,81 | 0,95 | 0,82 |
| 17,52 | 94,53  | 191,94 | 115,76 | 0,95 | 0,82 |
| 17,59 | 93,81  | 192,01 | 115,71 | 0,95 | 0,81 |
| 17,66 | 93,08  | 192,08 | 115,67 | 0,96 | 0,80 |
| 17,73 | 92,35  | 192,15 | 115,62 | 0,96 | 0,80 |
| 17,80 | 91,61  | 192,22 | 115,58 | 0,97 | 0,79 |
| 17,88 | 90,86  | 192,30 | 115,53 | 0,97 | 0,79 |
| 17,95 | 90,10  | 192,37 | 115,49 | 0,97 | 0,78 |
| 18,02 | 89,34  | 192,44 | 115,44 | 0,98 | 0,77 |
| 18,09 | 88,56  | 192,51 | 115,39 | 0,98 | 0,77 |
| 18,16 | 87,78  | 192,58 | 115,35 | 0,98 | 0,76 |
| 18,23 | 86,99  | 192,65 | 115,30 | 0,99 | 0,75 |
| 18,31 | 86,19  | 192,73 | 115,26 | 0,99 | 0,75 |
| 18,38 | 85,39  | 192,80 | 115,21 | 1,00 | 0,74 |

18,45      84,57      192,87      115,17      1,00      0,73

**Semicírculo de aço parede espessa com profundidade de entalhe de 5,04.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 1732,00                                   | 175,04 | 131,65                                 | 0,00 | 13,16                                    |
| 0,04  | 1471,15                                   | 175,08 | 131,61                                 | 0,00 | 11,18                                    |
| 0,09  | 1285,06                                   | 175,13 | 131,57                                 | 0,00 | 9,77                                     |
| 0,13  | 1133,68                                   | 175,17 | 131,54                                 | 0,01 | 8,62                                     |
| 0,17  | 1021,57                                   | 175,21 | 131,50                                 | 0,01 | 7,77                                     |
| 0,22  | 927,08                                    | 175,26 | 131,46                                 | 0,01 | 7,05                                     |
| 0,26  | 852,93                                    | 175,30 | 131,42                                 | 0,01 | 6,49                                     |
| 0,30  | 790,28                                    | 175,34 | 131,38                                 | 0,02 | 6,02                                     |
| 0,35  | 737,72                                    | 175,39 | 131,35                                 | 0,02 | 5,62                                     |
| 0,39  | 693,17                                    | 175,43 | 131,31                                 | 0,02 | 5,28                                     |
| 0,44  | 654,90                                    | 175,48 | 131,27                                 | 0,02 | 4,99                                     |
| 0,48  | 621,48                                    | 175,52 | 131,23                                 | 0,03 | 4,74                                     |
| 0,53  | 592,23                                    | 175,57 | 131,19                                 | 0,03 | 4,51                                     |
| 0,57  | 566,40                                    | 175,61 | 131,16                                 | 0,03 | 4,32                                     |
| 0,62  | 543,36                                    | 175,66 | 131,12                                 | 0,03 | 4,14                                     |
| 0,66  | 522,76                                    | 175,70 | 131,08                                 | 0,04 | 3,99                                     |
| 0,71  | 504,14                                    | 175,75 | 131,04                                 | 0,04 | 3,85                                     |
| 0,75  | 487,34                                    | 175,79 | 131,00                                 | 0,04 | 3,72                                     |
| 0,80  | 471,97                                    | 175,84 | 130,96                                 | 0,04 | 3,60                                     |
| 0,84  | 457,99                                    | 175,88 | 130,92                                 | 0,05 | 3,50                                     |
| 0,89  | 445,07                                    | 175,93 | 130,89                                 | 0,05 | 3,40                                     |
| 0,93  | 433,24                                    | 175,97 | 130,85                                 | 0,05 | 3,31                                     |
| 0,98  | 422,22                                    | 176,02 | 130,81                                 | 0,05 | 3,23                                     |
| 1,02  | 412,07                                    | 176,06 | 130,77                                 | 0,06 | 3,15                                     |
| 1,07  | 402,55                                    | 176,11 | 130,73                                 | 0,06 | 3,08                                     |
| 1,12  | 393,75                                    | 176,16 | 130,69                                 | 0,06 | 3,01                                     |
| 1,16  | 385,43                                    | 176,20 | 130,65                                 | 0,07 | 2,95                                     |
| 1,21  | 377,70                                    | 176,25 | 130,61                                 | 0,07 | 2,89                                     |
| 1,26  | 370,36                                    | 176,30 | 130,57                                 | 0,07 | 2,84                                     |
| 1,30  | 363,51                                    | 176,34 | 130,53                                 | 0,07 | 2,78                                     |
| 1,35  | 356,98                                    | 176,39 | 130,49                                 | 0,08 | 2,74                                     |
| 1,40  | 350,86                                    | 176,44 | 130,45                                 | 0,08 | 2,69                                     |
| 1,44  | 345,01                                    | 176,48 | 130,41                                 | 0,08 | 2,65                                     |
| 1,49  | 339,51                                    | 176,53 | 130,37                                 | 0,08 | 2,60                                     |
| 1,54  | 334,23                                    | 176,58 | 130,33                                 | 0,09 | 2,56                                     |
| 1,59  | 329,25                                    | 176,63 | 130,29                                 | 0,09 | 2,53                                     |
| 1,63  | 324,46                                    | 176,67 | 130,25                                 | 0,09 | 2,49                                     |
| 1,68  | 319,94                                    | 176,72 | 130,21                                 | 0,09 | 2,46                                     |
| 1,73  | 315,57                                    | 176,77 | 130,17                                 | 0,10 | 2,42                                     |
| 1,78  | 311,43                                    | 176,82 | 130,13                                 | 0,10 | 2,39                                     |
| 1,83  | 307,42                                    | 176,87 | 130,09                                 | 0,10 | 2,36                                     |
| 1,88  | 303,61                                    | 176,92 | 130,05                                 | 0,11 | 2,33                                     |
| 1,92  | 299,92                                    | 176,96 | 130,01                                 | 0,11 | 2,31                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,97 | 296,41 | 177,01 | 129,97 | 0,11 | 2,28 |
| 2,02 | 293,00 | 177,06 | 129,93 | 0,11 | 2,26 |
| 2,07 | 289,74 | 177,11 | 129,89 | 0,12 | 2,23 |
| 2,12 | 286,58 | 177,16 | 129,84 | 0,12 | 2,21 |
| 2,17 | 283,55 | 177,21 | 129,80 | 0,12 | 2,18 |
| 2,22 | 280,60 | 177,26 | 129,76 | 0,12 | 2,16 |
| 2,27 | 277,78 | 177,31 | 129,72 | 0,13 | 2,14 |
| 2,32 | 275,03 | 177,36 | 129,68 | 0,13 | 2,12 |
| 2,37 | 272,39 | 177,41 | 129,64 | 0,13 | 2,10 |
| 2,42 | 269,81 | 177,46 | 129,60 | 0,14 | 2,08 |
| 2,47 | 267,33 | 177,51 | 129,55 | 0,14 | 2,06 |
| 2,52 | 264,92 | 177,56 | 129,51 | 0,14 | 2,05 |
| 2,57 | 262,59 | 177,61 | 129,47 | 0,14 | 2,03 |
| 2,62 | 260,31 | 177,66 | 129,43 | 0,15 | 2,01 |
| 2,67 | 258,11 | 177,71 | 129,39 | 0,15 | 1,99 |
| 2,72 | 255,96 | 177,76 | 129,34 | 0,15 | 1,98 |
| 2,77 | 253,88 | 177,81 | 129,30 | 0,16 | 1,96 |
| 2,82 | 251,85 | 177,86 | 129,26 | 0,16 | 1,95 |
| 2,87 | 249,88 | 177,91 | 129,22 | 0,16 | 1,93 |
| 2,93 | 247,96 | 177,97 | 129,17 | 0,16 | 1,92 |
| 2,98 | 246,09 | 178,02 | 129,13 | 0,17 | 1,91 |
| 3,03 | 244,26 | 178,07 | 129,09 | 0,17 | 1,89 |
| 3,08 | 242,49 | 178,12 | 129,05 | 0,17 | 1,88 |
| 3,13 | 240,75 | 178,17 | 129,00 | 0,18 | 1,87 |
| 3,19 | 239,06 | 178,23 | 128,96 | 0,18 | 1,85 |
| 3,24 | 237,41 | 178,28 | 128,92 | 0,18 | 1,84 |
| 3,29 | 235,80 | 178,33 | 128,88 | 0,18 | 1,83 |
| 3,34 | 234,21 | 178,38 | 128,83 | 0,19 | 1,82 |
| 3,40 | 232,67 | 178,44 | 128,79 | 0,19 | 1,81 |
| 3,45 | 231,16 | 178,49 | 128,75 | 0,19 | 1,80 |
| 3,50 | 229,69 | 178,54 | 128,70 | 0,20 | 1,78 |
| 3,56 | 228,24 | 178,60 | 128,66 | 0,20 | 1,77 |
| 3,61 | 226,83 | 178,65 | 128,61 | 0,20 | 1,76 |
| 3,66 | 225,43 | 178,70 | 128,57 | 0,21 | 1,75 |
| 3,72 | 224,08 | 178,76 | 128,53 | 0,21 | 1,74 |
| 3,77 | 222,74 | 178,81 | 128,48 | 0,21 | 1,73 |
| 3,83 | 221,44 | 178,87 | 128,44 | 0,21 | 1,72 |
| 3,88 | 220,16 | 178,92 | 128,40 | 0,22 | 1,71 |
| 3,93 | 218,91 | 178,97 | 128,35 | 0,22 | 1,71 |
| 3,99 | 217,67 | 179,03 | 128,31 | 0,22 | 1,70 |
| 4,04 | 216,46 | 179,08 | 128,26 | 0,23 | 1,69 |
| 4,10 | 215,27 | 179,14 | 128,22 | 0,23 | 1,68 |
| 4,15 | 214,11 | 179,19 | 128,17 | 0,23 | 1,67 |
| 4,21 | 212,96 | 179,25 | 128,13 | 0,24 | 1,66 |
| 4,26 | 211,83 | 179,30 | 128,08 | 0,24 | 1,65 |
| 4,32 | 210,72 | 179,36 | 128,04 | 0,24 | 1,65 |
| 4,38 | 209,64 | 179,42 | 127,99 | 0,25 | 1,64 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 4,43 | 208,56 | 179,47 | 127,95 | 0,25 | 1,63 |
| 4,49 | 207,51 | 179,53 | 127,90 | 0,25 | 1,62 |
| 4,54 | 206,46 | 179,58 | 127,86 | 0,25 | 1,61 |
| 4,60 | 205,44 | 179,64 | 127,81 | 0,26 | 1,61 |
| 4,66 | 204,43 | 179,70 | 127,77 | 0,26 | 1,60 |
| 4,71 | 203,44 | 179,75 | 127,72 | 0,26 | 1,59 |
| 4,77 | 202,46 | 179,81 | 127,68 | 0,27 | 1,59 |
| 4,83 | 201,50 | 179,87 | 127,63 | 0,27 | 1,58 |
| 4,88 | 200,55 | 179,92 | 127,59 | 0,27 | 1,57 |
| 4,94 | 199,62 | 179,98 | 127,54 | 0,28 | 1,57 |
| 5,00 | 198,69 | 180,04 | 127,50 | 0,28 | 1,56 |
| 5,06 | 197,78 | 180,10 | 127,45 | 0,28 | 1,55 |
| 5,11 | 196,88 | 180,15 | 127,40 | 0,29 | 1,55 |
| 5,17 | 196,00 | 180,21 | 127,36 | 0,29 | 1,54 |
| 5,23 | 195,12 | 180,27 | 127,31 | 0,29 | 1,53 |
| 5,29 | 194,25 | 180,33 | 127,26 | 0,30 | 1,53 |
| 5,35 | 193,40 | 180,39 | 127,22 | 0,30 | 1,52 |
| 5,41 | 192,55 | 180,45 | 127,17 | 0,30 | 1,51 |
| 5,47 | 191,72 | 180,51 | 127,13 | 0,31 | 1,51 |
| 5,52 | 190,90 | 180,56 | 127,08 | 0,31 | 1,50 |
| 5,58 | 190,08 | 180,62 | 127,03 | 0,31 | 1,50 |
| 5,64 | 189,27 | 180,68 | 126,99 | 0,32 | 1,49 |
| 5,70 | 188,47 | 180,74 | 126,94 | 0,32 | 1,48 |
| 5,76 | 187,69 | 180,80 | 126,89 | 0,32 | 1,48 |
| 5,82 | 186,91 | 180,86 | 126,84 | 0,33 | 1,47 |
| 5,88 | 186,14 | 180,92 | 126,80 | 0,33 | 1,47 |
| 5,94 | 185,37 | 180,98 | 126,75 | 0,33 | 1,46 |
| 6,00 | 184,61 | 181,04 | 126,70 | 0,34 | 1,46 |
| 6,06 | 183,86 | 181,10 | 126,66 | 0,34 | 1,45 |
| 6,13 | 183,12 | 181,17 | 126,61 | 0,34 | 1,45 |
| 6,19 | 182,38 | 181,23 | 126,56 | 0,35 | 1,44 |
| 6,25 | 181,66 | 181,29 | 126,51 | 0,35 | 1,44 |
| 6,31 | 180,93 | 181,35 | 126,46 | 0,35 | 1,43 |
| 6,37 | 180,22 | 181,41 | 126,42 | 0,36 | 1,43 |
| 6,43 | 179,51 | 181,47 | 126,37 | 0,36 | 1,42 |
| 6,49 | 178,80 | 181,53 | 126,32 | 0,36 | 1,42 |
| 6,56 | 178,10 | 181,60 | 126,27 | 0,37 | 1,41 |
| 6,62 | 177,41 | 181,66 | 126,22 | 0,37 | 1,41 |
| 6,68 | 176,72 | 181,72 | 126,18 | 0,37 | 1,40 |
| 6,74 | 176,04 | 181,78 | 126,13 | 0,38 | 1,40 |
| 6,81 | 175,36 | 181,85 | 126,08 | 0,38 | 1,39 |
| 6,87 | 174,69 | 181,91 | 126,03 | 0,39 | 1,39 |
| 6,93 | 174,02 | 181,97 | 125,98 | 0,39 | 1,38 |
| 7,00 | 173,36 | 182,04 | 125,93 | 0,39 | 1,38 |
| 7,06 | 172,70 | 182,10 | 125,88 | 0,40 | 1,37 |
| 7,12 | 172,05 | 182,16 | 125,83 | 0,40 | 1,37 |
| 7,19 | 171,40 | 182,23 | 125,79 | 0,40 | 1,36 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 7,25  | 170,75 | 182,29 | 125,74 | 0,41 | 1,36 |
| 7,31  | 170,11 | 182,35 | 125,69 | 0,41 | 1,35 |
| 7,38  | 169,47 | 182,42 | 125,64 | 0,41 | 1,35 |
| 7,44  | 168,83 | 182,48 | 125,59 | 0,42 | 1,34 |
| 7,51  | 168,20 | 182,55 | 125,54 | 0,42 | 1,34 |
| 7,57  | 167,57 | 182,61 | 125,49 | 0,42 | 1,34 |
| 7,64  | 166,94 | 182,68 | 125,44 | 0,43 | 1,33 |
| 7,70  | 166,32 | 182,74 | 125,39 | 0,43 | 1,33 |
| 7,77  | 165,70 | 182,81 | 125,34 | 0,44 | 1,32 |
| 7,84  | 165,08 | 182,88 | 125,29 | 0,44 | 1,32 |
| 7,90  | 164,46 | 182,94 | 125,24 | 0,44 | 1,31 |
| 7,97  | 163,85 | 183,01 | 125,19 | 0,45 | 1,31 |
| 8,03  | 163,24 | 183,07 | 125,14 | 0,45 | 1,30 |
| 8,10  | 162,63 | 183,14 | 125,09 | 0,45 | 1,30 |
| 8,17  | 162,03 | 183,21 | 125,04 | 0,46 | 1,30 |
| 8,23  | 161,42 | 183,27 | 124,99 | 0,46 | 1,29 |
| 8,30  | 160,82 | 183,34 | 124,94 | 0,47 | 1,29 |
| 8,37  | 160,22 | 183,41 | 124,89 | 0,47 | 1,28 |
| 8,44  | 159,62 | 183,48 | 124,84 | 0,47 | 1,28 |
| 8,50  | 159,02 | 183,54 | 124,78 | 0,48 | 1,27 |
| 8,57  | 158,43 | 183,61 | 124,73 | 0,48 | 1,27 |
| 8,64  | 157,83 | 183,68 | 124,68 | 0,48 | 1,27 |
| 8,71  | 157,24 | 183,75 | 124,63 | 0,49 | 1,26 |
| 8,78  | 156,65 | 183,82 | 124,58 | 0,49 | 1,26 |
| 8,85  | 156,06 | 183,89 | 124,53 | 0,50 | 1,25 |
| 8,92  | 155,47 | 183,96 | 124,48 | 0,50 | 1,25 |
| 8,98  | 154,88 | 184,02 | 124,43 | 0,50 | 1,24 |
| 9,05  | 154,29 | 184,09 | 124,37 | 0,51 | 1,24 |
| 9,12  | 153,70 | 184,16 | 124,32 | 0,51 | 1,24 |
| 9,19  | 153,11 | 184,23 | 124,27 | 0,52 | 1,23 |
| 9,26  | 152,53 | 184,30 | 124,22 | 0,52 | 1,23 |
| 9,33  | 151,94 | 184,37 | 124,17 | 0,52 | 1,22 |
| 9,40  | 151,35 | 184,44 | 124,11 | 0,53 | 1,22 |
| 9,47  | 150,77 | 184,51 | 124,06 | 0,53 | 1,22 |
| 9,54  | 150,18 | 184,58 | 124,01 | 0,54 | 1,21 |
| 9,62  | 149,59 | 184,66 | 123,96 | 0,54 | 1,21 |
| 9,69  | 149,01 | 184,73 | 123,90 | 0,54 | 1,20 |
| 9,76  | 148,42 | 184,80 | 123,85 | 0,55 | 1,20 |
| 9,83  | 147,83 | 184,87 | 123,80 | 0,55 | 1,19 |
| 9,90  | 147,25 | 184,94 | 123,75 | 0,56 | 1,19 |
| 9,97  | 146,66 | 185,01 | 123,69 | 0,56 | 1,19 |
| 10,05 | 146,07 | 185,09 | 123,64 | 0,56 | 1,18 |
| 10,12 | 145,48 | 185,16 | 123,59 | 0,57 | 1,18 |
| 10,19 | 144,89 | 185,23 | 123,53 | 0,57 | 1,17 |
| 10,26 | 144,30 | 185,30 | 123,48 | 0,58 | 1,17 |
| 10,34 | 143,70 | 185,38 | 123,43 | 0,58 | 1,16 |
| 10,41 | 143,11 | 185,45 | 123,37 | 0,58 | 1,16 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 10,48 | 142,51 | 185,52 | 123,32 | 0,59 | 1,16 |
| 10,56 | 141,92 | 185,60 | 123,27 | 0,59 | 1,15 |
| 10,63 | 141,32 | 185,67 | 123,21 | 0,60 | 1,15 |
| 10,71 | 140,72 | 185,75 | 123,16 | 0,60 | 1,14 |
| 10,78 | 140,12 | 185,82 | 123,11 | 0,60 | 1,14 |
| 10,85 | 139,51 | 185,89 | 123,05 | 0,61 | 1,13 |
| 10,93 | 138,91 | 185,97 | 123,00 | 0,61 | 1,13 |
| 11,00 | 138,30 | 186,04 | 122,94 | 0,62 | 1,12 |
| 11,08 | 137,69 | 186,12 | 122,89 | 0,62 | 1,12 |
| 11,15 | 137,08 | 186,19 | 122,84 | 0,63 | 1,12 |
| 11,23 | 136,47 | 186,27 | 122,78 | 0,63 | 1,11 |
| 11,31 | 135,85 | 186,35 | 122,73 | 0,63 | 1,11 |
| 11,38 | 135,23 | 186,42 | 122,67 | 0,64 | 1,10 |
| 11,46 | 134,61 | 186,50 | 122,62 | 0,64 | 1,10 |
| 11,54 | 133,98 | 186,58 | 122,56 | 0,65 | 1,09 |
| 11,61 | 133,36 | 186,65 | 122,51 | 0,65 | 1,09 |
| 11,69 | 132,73 | 186,73 | 122,45 | 0,66 | 1,08 |
| 11,77 | 132,09 | 186,81 | 122,40 | 0,66 | 1,08 |
| 11,84 | 131,46 | 186,88 | 122,34 | 0,66 | 1,07 |
| 11,92 | 130,82 | 186,96 | 122,29 | 0,67 | 1,07 |
| 12,00 | 130,17 | 187,04 | 122,23 | 0,67 | 1,06 |
| 12,08 | 129,53 | 187,12 | 122,18 | 0,68 | 1,06 |
| 12,16 | 128,87 | 187,20 | 122,12 | 0,68 | 1,06 |
| 12,23 | 128,22 | 187,27 | 122,06 | 0,69 | 1,05 |
| 12,31 | 127,56 | 187,35 | 122,01 | 0,69 | 1,05 |
| 12,39 | 126,90 | 187,43 | 121,95 | 0,70 | 1,04 |
| 12,47 | 126,23 | 187,51 | 121,90 | 0,70 | 1,04 |
| 12,55 | 125,56 | 187,59 | 121,84 | 0,70 | 1,03 |
| 12,63 | 124,88 | 187,67 | 121,79 | 0,71 | 1,03 |
| 12,71 | 124,20 | 187,75 | 121,73 | 0,71 | 1,02 |
| 12,79 | 123,51 | 187,83 | 121,67 | 0,72 | 1,02 |
| 12,87 | 122,82 | 187,91 | 121,62 | 0,72 | 1,01 |
| 12,95 | 122,12 | 187,99 | 121,56 | 0,73 | 1,00 |
| 13,03 | 121,42 | 188,07 | 121,50 | 0,73 | 1,00 |
| 13,11 | 120,71 | 188,15 | 121,45 | 0,74 | 0,99 |
| 13,20 | 120,00 | 188,24 | 121,39 | 0,74 | 0,99 |
| 13,28 | 119,28 | 188,32 | 121,33 | 0,74 | 0,98 |
| 13,36 | 118,55 | 188,40 | 121,28 | 0,75 | 0,98 |
| 13,44 | 117,82 | 188,48 | 121,22 | 0,75 | 0,97 |
| 13,52 | 117,08 | 188,56 | 121,16 | 0,76 | 0,97 |
| 13,61 | 116,34 | 188,65 | 121,11 | 0,76 | 0,96 |
| 13,69 | 115,59 | 188,73 | 121,05 | 0,77 | 0,95 |
| 13,77 | 114,83 | 188,81 | 120,99 | 0,77 | 0,95 |
| 13,85 | 114,06 | 188,89 | 120,93 | 0,78 | 0,94 |
| 13,94 | 113,29 | 188,98 | 120,88 | 0,78 | 0,94 |
| 14,02 | 112,51 | 189,06 | 120,82 | 0,79 | 0,93 |
| 14,11 | 111,72 | 189,15 | 120,76 | 0,79 | 0,93 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 14,19 | 110,93 | 189,23 | 120,70 | 0,80 | 0,92 |
| 14,27 | 110,12 | 189,31 | 120,64 | 0,80 | 0,91 |
| 14,36 | 109,31 | 189,40 | 120,59 | 0,81 | 0,91 |
| 14,44 | 108,49 | 189,48 | 120,53 | 0,81 | 0,90 |
| 14,53 | 107,66 | 189,57 | 120,47 | 0,81 | 0,89 |
| 14,62 | 106,82 | 189,66 | 120,41 | 0,82 | 0,89 |
| 14,70 | 105,97 | 189,74 | 120,35 | 0,82 | 0,88 |
| 14,79 | 105,11 | 189,83 | 120,30 | 0,83 | 0,87 |
| 14,87 | 104,24 | 189,91 | 120,24 | 0,83 | 0,87 |
| 14,96 | 103,36 | 190,00 | 120,18 | 0,84 | 0,86 |
| 15,03 | 102,63 | 190,07 | 120,13 | 0,84 | 0,85 |
| 15,10 | 101,89 | 190,14 | 120,08 | 0,85 | 0,85 |
| 15,18 | 101,14 | 190,22 | 120,03 | 0,85 | 0,84 |
| 15,25 | 100,39 | 190,29 | 119,98 | 0,86 | 0,84 |
| 15,32 | 99,63  | 190,36 | 119,94 | 0,86 | 0,83 |
| 15,39 | 98,87  | 190,43 | 119,89 | 0,86 | 0,82 |
| 15,46 | 98,10  | 190,50 | 119,84 | 0,87 | 0,82 |
| 15,53 | 97,32  | 190,57 | 119,79 | 0,87 | 0,81 |
| 15,61 | 96,54  | 190,65 | 119,74 | 0,88 | 0,81 |
| 15,68 | 95,75  | 190,72 | 119,69 | 0,88 | 0,80 |
| 15,75 | 94,95  | 190,79 | 119,65 | 0,88 | 0,79 |
| 15,82 | 94,15  | 190,86 | 119,60 | 0,89 | 0,79 |
| 15,89 | 93,34  | 190,93 | 119,55 | 0,89 | 0,78 |
| 15,96 | 92,52  | 191,00 | 119,50 | 0,90 | 0,77 |
| 16,04 | 91,70  | 191,08 | 119,45 | 0,90 | 0,77 |
| 16,11 | 90,86  | 191,15 | 119,41 | 0,90 | 0,76 |
| 16,18 | 90,03  | 191,22 | 119,36 | 0,91 | 0,75 |
| 16,25 | 89,18  | 191,29 | 119,31 | 0,91 | 0,75 |
| 16,32 | 88,32  | 191,36 | 119,26 | 0,92 | 0,74 |
| 16,40 | 87,46  | 191,44 | 119,22 | 0,92 | 0,73 |
| 16,47 | 86,59  | 191,51 | 119,17 | 0,92 | 0,73 |
| 16,54 | 85,71  | 191,58 | 119,12 | 0,93 | 0,72 |
| 16,61 | 84,82  | 191,65 | 119,07 | 0,93 | 0,71 |
| 16,68 | 83,93  | 191,72 | 119,03 | 0,94 | 0,71 |
| 16,75 | 83,02  | 191,79 | 118,98 | 0,94 | 0,70 |
| 16,83 | 82,11  | 191,87 | 118,93 | 0,94 | 0,69 |
| 16,90 | 81,18  | 191,94 | 118,89 | 0,95 | 0,68 |
| 16,97 | 80,25  | 192,01 | 118,84 | 0,95 | 0,68 |
| 17,04 | 79,31  | 192,08 | 118,79 | 0,96 | 0,67 |
| 17,11 | 78,36  | 192,15 | 118,74 | 0,96 | 0,66 |
| 17,18 | 77,39  | 192,22 | 118,70 | 0,96 | 0,65 |
| 17,26 | 76,42  | 192,30 | 118,65 | 0,97 | 0,64 |
| 17,33 | 75,44  | 192,37 | 118,60 | 0,97 | 0,64 |
| 17,40 | 74,45  | 192,44 | 118,56 | 0,98 | 0,63 |
| 17,47 | 73,44  | 192,51 | 118,51 | 0,98 | 0,62 |
| 17,54 | 72,43  | 192,58 | 118,46 | 0,98 | 0,61 |
| 17,61 | 71,40  | 192,65 | 118,42 | 0,99 | 0,60 |

|       |       |        |        |      |      |
|-------|-------|--------|--------|------|------|
| 17,69 | 70,36 | 192,73 | 118,37 | 0,99 | 0,59 |
| 17,76 | 69,32 | 192,80 | 118,32 | 1,00 | 0,59 |
| 17,83 | 68,26 | 192,87 | 118,28 | 1,00 | 0,58 |

**Semicírculo de aço parede espessa com profundidade de entalhe de 5,67.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 1910,87                                   | 175,67 | 134,76                                 | 0,00 | 14,18                                    |
| 0,04  | 1634,91                                   | 175,71 | 134,73                                 | 0,00 | 12,14                                    |
| 0,08  | 1435,25                                   | 175,75 | 134,69                                 | 0,00 | 10,66                                    |
| 0,12  | 1271,25                                   | 175,79 | 134,65                                 | 0,01 | 9,44                                     |
| 0,17  | 1148,61                                   | 175,84 | 134,62                                 | 0,01 | 8,53                                     |
| 0,21  | 1044,44                                   | 175,88 | 134,58                                 | 0,01 | 7,76                                     |
| 0,25  | 962,22                                    | 175,92 | 134,54                                 | 0,01 | 7,15                                     |
| 0,29  | 892,31                                    | 175,96 | 134,51                                 | 0,02 | 6,63                                     |
| 0,33  | 833,48                                    | 176,00 | 134,47                                 | 0,02 | 6,20                                     |
| 0,38  | 783,31                                    | 176,05 | 134,43                                 | 0,02 | 5,83                                     |
| 0,42  | 740,16                                    | 176,09 | 134,40                                 | 0,02 | 5,51                                     |
| 0,46  | 702,31                                    | 176,13 | 134,36                                 | 0,03 | 5,23                                     |
| 0,50  | 669,14                                    | 176,17 | 134,32                                 | 0,03 | 4,98                                     |
| 0,55  | 639,73                                    | 176,22 | 134,28                                 | 0,03 | 4,76                                     |
| 0,59  | 613,49                                    | 176,26 | 134,25                                 | 0,03 | 4,57                                     |
| 0,63  | 589,95                                    | 176,30 | 134,21                                 | 0,04 | 4,40                                     |
| 0,68  | 568,66                                    | 176,35 | 134,17                                 | 0,04 | 4,24                                     |
| 0,72  | 549,39                                    | 176,39 | 134,13                                 | 0,04 | 4,10                                     |
| 0,76  | 531,76                                    | 176,43 | 134,10                                 | 0,04 | 3,97                                     |
| 0,81  | 515,68                                    | 176,48 | 134,06                                 | 0,05 | 3,85                                     |
| 0,85  | 500,83                                    | 176,52 | 134,02                                 | 0,05 | 3,74                                     |
| 0,89  | 487,19                                    | 176,56 | 133,98                                 | 0,05 | 3,64                                     |
| 0,94  | 474,49                                    | 176,61 | 133,94                                 | 0,05 | 3,54                                     |
| 0,98  | 462,76                                    | 176,65 | 133,91                                 | 0,06 | 3,46                                     |
| 1,03  | 451,76                                    | 176,70 | 133,87                                 | 0,06 | 3,37                                     |
| 1,07  | 441,56                                    | 176,74 | 133,83                                 | 0,06 | 3,30                                     |
| 1,11  | 431,93                                    | 176,78 | 133,79                                 | 0,06 | 3,23                                     |
| 1,16  | 422,96                                    | 176,83 | 133,75                                 | 0,07 | 3,16                                     |
| 1,20  | 414,45                                    | 176,87 | 133,71                                 | 0,07 | 3,10                                     |
| 1,25  | 406,48                                    | 176,92 | 133,67                                 | 0,07 | 3,04                                     |
| 1,29  | 398,90                                    | 176,96 | 133,64                                 | 0,08 | 2,98                                     |
| 1,34  | 391,77                                    | 177,01 | 133,60                                 | 0,08 | 2,93                                     |
| 1,38  | 384,96                                    | 177,05 | 133,56                                 | 0,08 | 2,88                                     |
| 1,43  | 378,54                                    | 177,10 | 133,52                                 | 0,08 | 2,84                                     |
| 1,47  | 372,39                                    | 177,14 | 133,48                                 | 0,09 | 2,79                                     |
| 1,52  | 366,57                                    | 177,19 | 133,44                                 | 0,09 | 2,75                                     |
| 1,57  | 360,97                                    | 177,24 | 133,40                                 | 0,09 | 2,71                                     |
| 1,61  | 355,68                                    | 177,28 | 133,36                                 | 0,09 | 2,67                                     |
| 1,66  | 350,58                                    | 177,33 | 133,32                                 | 0,10 | 2,63                                     |
| 1,70  | 345,72                                    | 177,37 | 133,28                                 | 0,10 | 2,59                                     |
| 1,75  | 341,02                                    | 177,42 | 133,24                                 | 0,10 | 2,56                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,80 | 336,55 | 177,47 | 133,20 | 0,10 | 2,53 |
| 1,84 | 332,22 | 177,51 | 133,16 | 0,11 | 2,49 |
| 1,89 | 328,08 | 177,56 | 133,12 | 0,11 | 2,46 |
| 1,94 | 324,07 | 177,61 | 133,08 | 0,11 | 2,44 |
| 1,98 | 320,23 | 177,65 | 133,04 | 0,12 | 2,41 |
| 2,03 | 316,51 | 177,70 | 133,00 | 0,12 | 2,38 |
| 2,08 | 312,94 | 177,75 | 132,96 | 0,12 | 2,35 |
| 2,13 | 309,46 | 177,80 | 132,92 | 0,12 | 2,33 |
| 2,17 | 306,12 | 177,84 | 132,88 | 0,13 | 2,30 |
| 2,22 | 302,87 | 177,89 | 132,84 | 0,13 | 2,28 |
| 2,27 | 299,75 | 177,94 | 132,80 | 0,13 | 2,26 |
| 2,32 | 296,69 | 177,99 | 132,76 | 0,13 | 2,23 |
| 2,36 | 293,76 | 178,03 | 132,72 | 0,14 | 2,21 |
| 2,41 | 290,90 | 178,08 | 132,68 | 0,14 | 2,19 |
| 2,46 | 288,13 | 178,13 | 132,64 | 0,14 | 2,17 |
| 2,51 | 285,42 | 178,18 | 132,60 | 0,15 | 2,15 |
| 2,56 | 282,81 | 178,23 | 132,56 | 0,15 | 2,13 |
| 2,61 | 280,26 | 178,28 | 132,52 | 0,15 | 2,11 |
| 2,66 | 277,78 | 178,33 | 132,48 | 0,15 | 2,10 |
| 2,70 | 275,36 | 178,37 | 132,43 | 0,16 | 2,08 |
| 2,75 | 273,02 | 178,42 | 132,39 | 0,16 | 2,06 |
| 2,80 | 270,72 | 178,47 | 132,35 | 0,16 | 2,05 |
| 2,85 | 268,49 | 178,52 | 132,31 | 0,17 | 2,03 |
| 2,90 | 266,30 | 178,57 | 132,27 | 0,17 | 2,01 |
| 2,95 | 264,18 | 178,62 | 132,23 | 0,17 | 2,00 |
| 3,00 | 262,10 | 178,67 | 132,18 | 0,17 | 1,98 |
| 3,05 | 260,09 | 178,72 | 132,14 | 0,18 | 1,97 |
| 3,10 | 258,10 | 178,77 | 132,10 | 0,18 | 1,95 |
| 3,15 | 256,17 | 178,82 | 132,06 | 0,18 | 1,94 |
| 3,20 | 254,27 | 178,87 | 132,02 | 0,19 | 1,93 |
| 3,25 | 252,42 | 178,92 | 131,97 | 0,19 | 1,91 |
| 3,30 | 250,60 | 178,97 | 131,93 | 0,19 | 1,90 |
| 3,36 | 248,83 | 179,03 | 131,89 | 0,20 | 1,89 |
| 3,41 | 247,09 | 179,08 | 131,85 | 0,20 | 1,87 |
| 3,46 | 245,39 | 179,13 | 131,80 | 0,20 | 1,86 |
| 3,51 | 243,71 | 179,18 | 131,76 | 0,20 | 1,85 |
| 3,56 | 242,08 | 179,23 | 131,72 | 0,21 | 1,84 |
| 3,61 | 240,47 | 179,28 | 131,68 | 0,21 | 1,83 |
| 3,66 | 238,90 | 179,33 | 131,63 | 0,21 | 1,81 |
| 3,72 | 237,35 | 179,39 | 131,59 | 0,22 | 1,80 |
| 3,77 | 235,83 | 179,44 | 131,55 | 0,22 | 1,79 |
| 3,82 | 234,34 | 179,49 | 131,50 | 0,22 | 1,78 |
| 3,87 | 232,88 | 179,54 | 131,46 | 0,23 | 1,77 |
| 3,93 | 231,44 | 179,60 | 131,42 | 0,23 | 1,76 |
| 3,98 | 230,03 | 179,65 | 131,37 | 0,23 | 1,75 |
| 4,03 | 228,64 | 179,70 | 131,33 | 0,23 | 1,74 |
| 4,08 | 227,27 | 179,75 | 131,29 | 0,24 | 1,73 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 4,14 | 225,92 | 179,81 | 131,24 | 0,24 | 1,72 |
| 4,19 | 224,60 | 179,86 | 131,20 | 0,24 | 1,71 |
| 4,24 | 223,29 | 179,91 | 131,15 | 0,25 | 1,70 |
| 4,30 | 222,01 | 179,97 | 131,11 | 0,25 | 1,69 |
| 4,35 | 220,75 | 180,02 | 131,07 | 0,25 | 1,68 |
| 4,41 | 219,51 | 180,08 | 131,02 | 0,26 | 1,68 |
| 4,46 | 218,28 | 180,13 | 130,98 | 0,26 | 1,67 |
| 4,51 | 217,07 | 180,18 | 130,93 | 0,26 | 1,66 |
| 4,57 | 215,87 | 180,24 | 130,89 | 0,27 | 1,65 |
| 4,62 | 214,70 | 180,29 | 130,84 | 0,27 | 1,64 |
| 4,68 | 213,54 | 180,35 | 130,80 | 0,27 | 1,63 |
| 4,73 | 212,40 | 180,40 | 130,76 | 0,28 | 1,62 |
| 4,79 | 211,27 | 180,46 | 130,71 | 0,28 | 1,62 |
| 4,84 | 210,16 | 180,51 | 130,67 | 0,28 | 1,61 |
| 4,90 | 209,06 | 180,57 | 130,62 | 0,28 | 1,60 |
| 4,96 | 207,98 | 180,63 | 130,58 | 0,29 | 1,59 |
| 5,01 | 206,90 | 180,68 | 130,53 | 0,29 | 1,59 |
| 5,07 | 205,85 | 180,74 | 130,49 | 0,29 | 1,58 |
| 5,12 | 204,80 | 180,79 | 130,44 | 0,30 | 1,57 |
| 5,18 | 203,77 | 180,85 | 130,39 | 0,30 | 1,56 |
| 5,24 | 202,74 | 180,91 | 130,35 | 0,30 | 1,56 |
| 5,29 | 201,73 | 180,96 | 130,30 | 0,31 | 1,55 |
| 5,35 | 200,73 | 181,02 | 130,26 | 0,31 | 1,54 |
| 5,41 | 199,74 | 181,08 | 130,21 | 0,31 | 1,53 |
| 5,46 | 198,76 | 181,13 | 130,17 | 0,32 | 1,53 |
| 5,52 | 197,80 | 181,19 | 130,12 | 0,32 | 1,52 |
| 5,58 | 196,84 | 181,25 | 130,07 | 0,32 | 1,51 |
| 5,64 | 195,89 | 181,31 | 130,03 | 0,33 | 1,51 |
| 5,69 | 194,95 | 181,36 | 129,98 | 0,33 | 1,50 |
| 5,75 | 194,02 | 181,42 | 129,94 | 0,33 | 1,49 |
| 5,81 | 193,10 | 181,48 | 129,89 | 0,34 | 1,49 |
| 5,87 | 192,18 | 181,54 | 129,84 | 0,34 | 1,48 |
| 5,93 | 191,28 | 181,60 | 129,80 | 0,34 | 1,47 |
| 5,98 | 190,38 | 181,65 | 129,75 | 0,35 | 1,47 |
| 6,04 | 189,49 | 181,71 | 129,70 | 0,35 | 1,46 |
| 6,10 | 188,61 | 181,77 | 129,66 | 0,35 | 1,45 |
| 6,16 | 187,73 | 181,83 | 129,61 | 0,36 | 1,45 |
| 6,22 | 186,87 | 181,89 | 129,56 | 0,36 | 1,44 |
| 6,28 | 186,00 | 181,95 | 129,51 | 0,37 | 1,44 |
| 6,34 | 185,15 | 182,01 | 129,47 | 0,37 | 1,43 |
| 6,40 | 184,30 | 182,07 | 129,42 | 0,37 | 1,42 |
| 6,46 | 183,46 | 182,13 | 129,37 | 0,38 | 1,42 |
| 6,52 | 182,62 | 182,19 | 129,32 | 0,38 | 1,41 |
| 6,58 | 181,79 | 182,25 | 129,28 | 0,38 | 1,41 |
| 6,64 | 180,97 | 182,31 | 129,23 | 0,39 | 1,40 |
| 6,70 | 180,15 | 182,37 | 129,18 | 0,39 | 1,39 |
| 6,76 | 179,34 | 182,43 | 129,13 | 0,39 | 1,39 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 6,82 | 178,53 | 182,49 | 129,09 | 0,40 | 1,38 |
| 6,88 | 177,73 | 182,55 | 129,04 | 0,40 | 1,38 |
| 6,95 | 176,93 | 182,62 | 128,99 | 0,40 | 1,37 |
| 7,01 | 176,13 | 182,68 | 128,94 | 0,41 | 1,37 |
| 7,07 | 175,34 | 182,74 | 128,89 | 0,41 | 1,36 |
| 7,13 | 174,56 | 182,80 | 128,84 | 0,41 | 1,35 |
| 7,19 | 173,77 | 182,86 | 128,80 | 0,42 | 1,35 |
| 7,25 | 172,99 | 182,92 | 128,75 | 0,42 | 1,34 |
| 7,32 | 172,22 | 182,99 | 128,70 | 0,43 | 1,34 |
| 7,38 | 171,45 | 183,05 | 128,65 | 0,43 | 1,33 |
| 7,44 | 170,68 | 183,11 | 128,60 | 0,43 | 1,33 |
| 7,51 | 169,92 | 183,18 | 128,55 | 0,44 | 1,32 |
| 7,57 | 169,16 | 183,24 | 128,50 | 0,44 | 1,32 |
| 7,63 | 168,40 | 183,30 | 128,45 | 0,44 | 1,31 |
| 7,70 | 167,64 | 183,37 | 128,40 | 0,45 | 1,31 |
| 7,76 | 166,89 | 183,43 | 128,35 | 0,45 | 1,30 |
| 7,82 | 166,14 | 183,49 | 128,30 | 0,45 | 1,29 |
| 7,89 | 165,39 | 183,56 | 128,26 | 0,46 | 1,29 |
| 7,95 | 164,65 | 183,62 | 128,21 | 0,46 | 1,28 |
| 8,02 | 163,90 | 183,69 | 128,16 | 0,47 | 1,28 |
| 8,08 | 163,16 | 183,75 | 128,11 | 0,47 | 1,27 |
| 8,15 | 162,42 | 183,82 | 128,06 | 0,47 | 1,27 |
| 8,21 | 161,68 | 183,88 | 128,01 | 0,48 | 1,26 |
| 8,28 | 160,95 | 183,95 | 127,96 | 0,48 | 1,26 |
| 8,34 | 160,21 | 184,01 | 127,91 | 0,49 | 1,25 |
| 8,41 | 159,48 | 184,08 | 127,86 | 0,49 | 1,25 |
| 8,47 | 158,75 | 184,14 | 127,81 | 0,49 | 1,24 |
| 8,54 | 158,02 | 184,21 | 127,75 | 0,50 | 1,24 |
| 8,61 | 157,29 | 184,28 | 127,70 | 0,50 | 1,23 |
| 8,67 | 156,56 | 184,34 | 127,65 | 0,50 | 1,23 |
| 8,74 | 155,84 | 184,41 | 127,60 | 0,51 | 1,22 |
| 8,81 | 155,11 | 184,48 | 127,55 | 0,51 | 1,22 |
| 8,87 | 154,38 | 184,54 | 127,50 | 0,52 | 1,21 |
| 8,94 | 153,65 | 184,61 | 127,45 | 0,52 | 1,21 |
| 9,01 | 152,93 | 184,68 | 127,40 | 0,52 | 1,20 |
| 9,07 | 152,20 | 184,74 | 127,35 | 0,53 | 1,20 |
| 9,14 | 151,48 | 184,81 | 127,30 | 0,53 | 1,19 |
| 9,21 | 150,75 | 184,88 | 127,25 | 0,54 | 1,18 |
| 9,28 | 150,02 | 184,95 | 127,19 | 0,54 | 1,18 |
| 9,35 | 149,30 | 185,02 | 127,14 | 0,54 | 1,17 |
| 9,42 | 148,57 | 185,09 | 127,09 | 0,55 | 1,17 |
| 9,48 | 147,84 | 185,15 | 127,04 | 0,55 | 1,16 |
| 9,55 | 147,11 | 185,22 | 126,99 | 0,56 | 1,16 |
| 9,62 | 146,39 | 185,29 | 126,93 | 0,56 | 1,15 |
| 9,69 | 145,66 | 185,36 | 126,88 | 0,56 | 1,15 |
| 9,76 | 144,92 | 185,43 | 126,83 | 0,57 | 1,14 |
| 9,83 | 144,19 | 185,50 | 126,78 | 0,57 | 1,14 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 9,90  | 143,46 | 185,57 | 126,73 | 0,58 | 1,13 |
| 9,97  | 142,72 | 185,64 | 126,67 | 0,58 | 1,13 |
| 10,04 | 141,99 | 185,71 | 126,62 | 0,58 | 1,12 |
| 10,11 | 141,25 | 185,78 | 126,57 | 0,59 | 1,12 |
| 10,18 | 140,51 | 185,85 | 126,52 | 0,59 | 1,11 |
| 10,25 | 139,77 | 185,92 | 126,46 | 0,60 | 1,11 |
| 10,33 | 139,03 | 186,00 | 126,41 | 0,60 | 1,10 |
| 10,40 | 138,28 | 186,07 | 126,36 | 0,60 | 1,09 |
| 10,47 | 137,53 | 186,14 | 126,30 | 0,61 | 1,09 |
| 10,54 | 136,78 | 186,21 | 126,25 | 0,61 | 1,08 |
| 10,61 | 136,03 | 186,28 | 126,20 | 0,62 | 1,08 |
| 10,68 | 135,27 | 186,35 | 126,14 | 0,62 | 1,07 |
| 10,76 | 134,51 | 186,43 | 126,09 | 0,63 | 1,07 |
| 10,83 | 133,75 | 186,50 | 126,04 | 0,63 | 1,06 |
| 10,90 | 132,99 | 186,57 | 125,98 | 0,63 | 1,06 |
| 10,98 | 132,22 | 186,65 | 125,93 | 0,64 | 1,05 |
| 11,05 | 131,45 | 186,72 | 125,88 | 0,64 | 1,04 |
| 11,12 | 130,68 | 186,79 | 125,82 | 0,65 | 1,04 |
| 11,20 | 129,90 | 186,87 | 125,77 | 0,65 | 1,03 |
| 11,27 | 129,12 | 186,94 | 125,71 | 0,66 | 1,03 |
| 11,34 | 128,33 | 187,01 | 125,66 | 0,66 | 1,02 |
| 11,42 | 127,54 | 187,09 | 125,61 | 0,66 | 1,02 |
| 11,49 | 126,75 | 187,16 | 125,55 | 0,67 | 1,01 |
| 11,57 | 125,95 | 187,24 | 125,50 | 0,67 | 1,00 |
| 11,64 | 125,15 | 187,31 | 125,44 | 0,68 | 1,00 |
| 11,72 | 124,34 | 187,39 | 125,39 | 0,68 | 0,99 |
| 11,79 | 123,53 | 187,46 | 125,33 | 0,69 | 0,99 |
| 11,87 | 122,71 | 187,54 | 125,28 | 0,69 | 0,98 |
| 11,95 | 121,89 | 187,62 | 125,22 | 0,69 | 0,97 |
| 12,02 | 121,06 | 187,69 | 125,17 | 0,70 | 0,97 |
| 12,10 | 120,22 | 187,77 | 125,11 | 0,70 | 0,96 |
| 12,18 | 119,38 | 187,85 | 125,06 | 0,71 | 0,95 |
| 12,25 | 118,54 | 187,92 | 125,00 | 0,71 | 0,95 |
| 12,33 | 117,69 | 188,00 | 124,95 | 0,72 | 0,94 |
| 12,41 | 116,83 | 188,08 | 124,89 | 0,72 | 0,94 |
| 12,48 | 115,97 | 188,15 | 124,84 | 0,73 | 0,93 |
| 12,56 | 115,10 | 188,23 | 124,78 | 0,73 | 0,92 |
| 12,64 | 114,22 | 188,31 | 124,72 | 0,73 | 0,92 |
| 12,72 | 113,34 | 188,39 | 124,67 | 0,74 | 0,91 |
| 12,80 | 112,44 | 188,47 | 124,61 | 0,74 | 0,90 |
| 12,87 | 111,55 | 188,54 | 124,56 | 0,75 | 0,90 |
| 12,95 | 110,64 | 188,62 | 124,50 | 0,75 | 0,89 |
| 13,03 | 109,73 | 188,70 | 124,44 | 0,76 | 0,88 |
| 13,11 | 108,80 | 188,78 | 124,39 | 0,76 | 0,87 |
| 13,19 | 107,87 | 188,86 | 124,33 | 0,77 | 0,87 |
| 13,27 | 106,93 | 188,94 | 124,27 | 0,77 | 0,86 |
| 13,35 | 105,99 | 189,02 | 124,22 | 0,78 | 0,85 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 13,43 | 105,03 | 189,10 | 124,16 | 0,78 | 0,85 |
| 13,51 | 104,06 | 189,18 | 124,10 | 0,79 | 0,84 |
| 13,59 | 103,09 | 189,26 | 124,05 | 0,79 | 0,83 |
| 13,67 | 102,10 | 189,34 | 123,99 | 0,79 | 0,82 |
| 13,76 | 101,11 | 189,43 | 123,93 | 0,80 | 0,82 |
| 13,84 | 100,10 | 189,51 | 123,88 | 0,80 | 0,81 |
| 13,92 | 99,08  | 189,59 | 123,82 | 0,81 | 0,80 |
| 14,00 | 98,06  | 189,67 | 123,76 | 0,81 | 0,79 |
| 14,08 | 97,02  | 189,75 | 123,70 | 0,82 | 0,78 |
| 14,16 | 95,97  | 189,83 | 123,65 | 0,82 | 0,78 |
| 14,25 | 94,91  | 189,92 | 123,59 | 0,83 | 0,77 |
| 14,33 | 93,83  | 190,00 | 123,53 | 0,83 | 0,76 |
| 14,40 | 92,90  | 190,07 | 123,48 | 0,84 | 0,75 |
| 14,47 | 91,95  | 190,14 | 123,43 | 0,84 | 0,74 |
| 14,55 | 91,00  | 190,22 | 123,38 | 0,85 | 0,74 |
| 14,62 | 90,04  | 190,29 | 123,33 | 0,85 | 0,73 |
| 14,69 | 89,07  | 190,36 | 123,28 | 0,85 | 0,72 |
| 14,76 | 88,10  | 190,43 | 123,23 | 0,86 | 0,71 |
| 14,83 | 87,12  | 190,50 | 123,18 | 0,86 | 0,71 |
| 14,90 | 86,13  | 190,57 | 123,13 | 0,87 | 0,70 |
| 14,98 | 85,13  | 190,65 | 123,08 | 0,87 | 0,69 |
| 15,05 | 84,12  | 190,72 | 123,03 | 0,87 | 0,68 |
| 15,12 | 83,11  | 190,79 | 122,98 | 0,88 | 0,68 |
| 15,19 | 82,08  | 190,86 | 122,94 | 0,88 | 0,67 |
| 15,26 | 81,05  | 190,93 | 122,89 | 0,89 | 0,66 |
| 15,33 | 80,00  | 191,00 | 122,84 | 0,89 | 0,65 |
| 15,41 | 78,95  | 191,08 | 122,79 | 0,90 | 0,64 |
| 15,48 | 77,89  | 191,15 | 122,74 | 0,90 | 0,63 |
| 15,55 | 76,82  | 191,22 | 122,69 | 0,90 | 0,63 |
| 15,62 | 75,74  | 191,29 | 122,64 | 0,91 | 0,62 |
| 15,69 | 74,65  | 191,36 | 122,59 | 0,91 | 0,61 |
| 15,77 | 73,55  | 191,44 | 122,54 | 0,92 | 0,60 |
| 15,84 | 72,43  | 191,51 | 122,49 | 0,92 | 0,59 |
| 15,91 | 71,31  | 191,58 | 122,45 | 0,92 | 0,58 |
| 15,98 | 70,18  | 191,65 | 122,40 | 0,93 | 0,57 |
| 16,05 | 69,03  | 191,72 | 122,35 | 0,93 | 0,56 |
| 16,12 | 67,87  | 191,79 | 122,30 | 0,94 | 0,55 |
| 16,20 | 66,70  | 191,87 | 122,25 | 0,94 | 0,55 |
| 16,27 | 65,53  | 191,94 | 122,20 | 0,95 | 0,54 |
| 16,34 | 64,33  | 192,01 | 122,15 | 0,95 | 0,53 |
| 16,41 | 63,13  | 192,08 | 122,11 | 0,95 | 0,52 |
| 16,48 | 61,91  | 192,15 | 122,06 | 0,96 | 0,51 |
| 16,55 | 60,68  | 192,22 | 122,01 | 0,96 | 0,50 |
| 16,63 | 59,43  | 192,30 | 121,96 | 0,97 | 0,49 |
| 16,70 | 58,18  | 192,37 | 121,91 | 0,97 | 0,48 |
| 16,77 | 56,91  | 192,44 | 121,86 | 0,97 | 0,47 |
| 16,84 | 55,62  | 192,51 | 121,82 | 0,98 | 0,46 |

|       |       |        |        |      |      |
|-------|-------|--------|--------|------|------|
| 16,91 | 54,32 | 192,58 | 121,77 | 0,98 | 0,45 |
| 16,98 | 53,01 | 192,65 | 121,72 | 0,99 | 0,44 |
| 17,06 | 51,68 | 192,73 | 121,67 | 0,99 | 0,42 |
| 17,13 | 50,34 | 192,80 | 121,62 | 1,00 | 0,41 |
| 17,20 | 48,98 | 192,87 | 121,58 | 1,00 | 0,40 |

**Semicírculo de aço parede espessa com profundidade de entalhe de 6,30.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 2102,03                                   | 176,30 | 138,02                                 | 0,00 | 15,23                                    |
| 0,04  | 1811,31                                   | 176,34 | 137,99                                 | 0,00 | 13,13                                    |
| 0,08  | 1598,06                                   | 176,38 | 137,95                                 | 0,00 | 11,58                                    |
| 0,12  | 1421,24                                   | 176,42 | 137,91                                 | 0,01 | 10,31                                    |
| 0,16  | 1287,69                                   | 176,46 | 137,88                                 | 0,01 | 9,34                                     |
| 0,20  | 1173,40                                   | 176,50 | 137,84                                 | 0,01 | 8,51                                     |
| 0,24  | 1082,66                                   | 176,54 | 137,81                                 | 0,01 | 7,86                                     |
| 0,28  | 1005,01                                   | 176,58 | 137,77                                 | 0,02 | 7,29                                     |
| 0,32  | 939,48                                    | 176,62 | 137,74                                 | 0,02 | 6,82                                     |
| 0,36  | 883,26                                    | 176,66 | 137,70                                 | 0,02 | 6,41                                     |
| 0,40  | 834,82                                    | 176,70 | 137,66                                 | 0,02 | 6,06                                     |
| 0,44  | 792,17                                    | 176,74 | 137,63                                 | 0,03 | 5,76                                     |
| 0,48  | 754,72                                    | 176,78 | 137,59                                 | 0,03 | 5,49                                     |
| 0,52  | 721,41                                    | 176,82 | 137,55                                 | 0,03 | 5,24                                     |
| 0,56  | 691,65                                    | 176,86 | 137,52                                 | 0,03 | 5,03                                     |
| 0,60  | 664,88                                    | 176,90 | 137,48                                 | 0,04 | 4,84                                     |
| 0,65  | 640,66                                    | 176,95 | 137,44                                 | 0,04 | 4,66                                     |
| 0,69  | 618,67                                    | 176,99 | 137,41                                 | 0,04 | 4,50                                     |
| 0,73  | 598,55                                    | 177,03 | 137,37                                 | 0,04 | 4,36                                     |
| 0,77  | 580,16                                    | 177,07 | 137,33                                 | 0,05 | 4,22                                     |
| 0,81  | 563,16                                    | 177,11 | 137,30                                 | 0,05 | 4,10                                     |
| 0,85  | 547,52                                    | 177,15 | 137,26                                 | 0,05 | 3,99                                     |
| 0,90  | 532,96                                    | 177,20 | 137,22                                 | 0,05 | 3,88                                     |
| 0,94  | 519,48                                    | 177,24 | 137,19                                 | 0,06 | 3,79                                     |
| 0,98  | 506,84                                    | 177,28 | 137,15                                 | 0,06 | 3,70                                     |
| 1,02  | 495,10                                    | 177,32 | 137,11                                 | 0,06 | 3,61                                     |
| 1,07  | 484,02                                    | 177,37 | 137,07                                 | 0,06 | 3,53                                     |
| 1,11  | 473,67                                    | 177,41 | 137,04                                 | 0,07 | 3,46                                     |
| 1,15  | 463,86                                    | 177,45 | 137,00                                 | 0,07 | 3,39                                     |
| 1,19  | 454,66                                    | 177,49 | 136,96                                 | 0,07 | 3,32                                     |
| 1,24  | 445,90                                    | 177,54 | 136,92                                 | 0,07 | 3,26                                     |
| 1,28  | 437,66                                    | 177,58 | 136,89                                 | 0,08 | 3,20                                     |
| 1,32  | 429,78                                    | 177,62 | 136,85                                 | 0,08 | 3,14                                     |
| 1,37  | 422,35                                    | 177,67 | 136,81                                 | 0,08 | 3,09                                     |
| 1,41  | 415,22                                    | 177,71 | 136,77                                 | 0,09 | 3,04                                     |
| 1,45  | 408,47                                    | 177,75 | 136,73                                 | 0,09 | 2,99                                     |
| 1,50  | 401,98                                    | 177,80 | 136,70                                 | 0,09 | 2,94                                     |
| 1,54  | 395,84                                    | 177,84 | 136,66                                 | 0,09 | 2,90                                     |
| 1,58  | 389,91                                    | 177,88 | 136,62                                 | 0,10 | 2,85                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,63 | 384,26 | 177,93 | 136,58 | 0,10 | 2,81 |
| 1,67 | 378,80 | 177,97 | 136,54 | 0,10 | 2,77 |
| 1,72 | 373,59 | 178,02 | 136,50 | 0,10 | 2,74 |
| 1,76 | 368,54 | 178,06 | 136,46 | 0,11 | 2,70 |
| 1,81 | 363,72 | 178,11 | 136,43 | 0,11 | 2,67 |
| 1,85 | 359,04 | 178,15 | 136,39 | 0,11 | 2,63 |
| 1,90 | 354,57 | 178,20 | 136,35 | 0,11 | 2,60 |
| 1,94 | 350,21 | 178,24 | 136,31 | 0,12 | 2,57 |
| 1,99 | 346,04 | 178,29 | 136,27 | 0,12 | 2,54 |
| 2,03 | 341,97 | 178,33 | 136,23 | 0,12 | 2,51 |
| 2,08 | 338,07 | 178,38 | 136,19 | 0,13 | 2,48 |
| 2,12 | 334,26 | 178,42 | 136,15 | 0,13 | 2,46 |
| 2,17 | 330,60 | 178,47 | 136,11 | 0,13 | 2,43 |
| 2,21 | 327,03 | 178,51 | 136,07 | 0,13 | 2,40 |
| 2,26 | 323,59 | 178,56 | 136,03 | 0,14 | 2,38 |
| 2,31 | 320,22 | 178,61 | 135,99 | 0,14 | 2,35 |
| 2,35 | 316,97 | 178,65 | 135,95 | 0,14 | 2,33 |
| 2,40 | 313,79 | 178,70 | 135,91 | 0,14 | 2,31 |
| 2,45 | 310,72 | 178,75 | 135,87 | 0,15 | 2,29 |
| 2,49 | 307,71 | 178,79 | 135,83 | 0,15 | 2,27 |
| 2,54 | 304,80 | 178,84 | 135,79 | 0,15 | 2,24 |
| 2,59 | 301,95 | 178,89 | 135,75 | 0,16 | 2,22 |
| 2,63 | 299,19 | 178,93 | 135,71 | 0,16 | 2,20 |
| 2,68 | 296,47 | 178,98 | 135,67 | 0,16 | 2,19 |
| 2,73 | 293,84 | 179,03 | 135,63 | 0,16 | 2,17 |
| 2,77 | 291,26 | 179,07 | 135,59 | 0,17 | 2,15 |
| 2,82 | 288,76 | 179,12 | 135,55 | 0,17 | 2,13 |
| 2,87 | 286,29 | 179,17 | 135,51 | 0,17 | 2,11 |
| 2,92 | 283,91 | 179,22 | 135,47 | 0,18 | 2,10 |
| 2,97 | 281,56 | 179,27 | 135,43 | 0,18 | 2,08 |
| 3,01 | 279,28 | 179,31 | 135,39 | 0,18 | 2,06 |
| 3,06 | 277,02 | 179,36 | 135,35 | 0,18 | 2,05 |
| 3,11 | 274,83 | 179,41 | 135,30 | 0,19 | 2,03 |
| 3,16 | 272,67 | 179,46 | 135,26 | 0,19 | 2,02 |
| 3,21 | 270,57 | 179,51 | 135,22 | 0,19 | 2,00 |
| 3,26 | 268,50 | 179,56 | 135,18 | 0,20 | 1,99 |
| 3,31 | 266,48 | 179,61 | 135,14 | 0,20 | 1,97 |
| 3,35 | 264,49 | 179,65 | 135,10 | 0,20 | 1,96 |
| 3,40 | 262,54 | 179,70 | 135,06 | 0,21 | 1,94 |
| 3,45 | 260,63 | 179,75 | 135,01 | 0,21 | 1,93 |
| 3,50 | 258,75 | 179,80 | 134,97 | 0,21 | 1,92 |
| 3,55 | 256,91 | 179,85 | 134,93 | 0,21 | 1,90 |
| 3,60 | 255,10 | 179,90 | 134,89 | 0,22 | 1,89 |
| 3,65 | 253,32 | 179,95 | 134,85 | 0,22 | 1,88 |
| 3,70 | 251,57 | 180,00 | 134,80 | 0,22 | 1,87 |
| 3,75 | 249,85 | 180,05 | 134,76 | 0,23 | 1,85 |
| 3,80 | 248,17 | 180,10 | 134,72 | 0,23 | 1,84 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 3,85 | 246,50 | 180,15 | 134,68 | 0,23 | 1,83 |
| 3,91 | 244,87 | 180,21 | 134,63 | 0,24 | 1,82 |
| 3,96 | 243,26 | 180,26 | 134,59 | 0,24 | 1,81 |
| 4,01 | 241,68 | 180,31 | 134,55 | 0,24 | 1,80 |
| 4,06 | 240,11 | 180,36 | 134,51 | 0,24 | 1,79 |
| 4,11 | 238,58 | 180,41 | 134,46 | 0,25 | 1,77 |
| 4,16 | 237,06 | 180,46 | 134,42 | 0,25 | 1,76 |
| 4,21 | 235,57 | 180,51 | 134,38 | 0,25 | 1,75 |
| 4,26 | 234,09 | 180,56 | 134,33 | 0,26 | 1,74 |
| 4,32 | 232,64 | 180,62 | 134,29 | 0,26 | 1,73 |
| 4,37 | 231,21 | 180,67 | 134,25 | 0,26 | 1,72 |
| 4,42 | 229,80 | 180,72 | 134,20 | 0,27 | 1,71 |
| 4,47 | 228,40 | 180,77 | 134,16 | 0,27 | 1,70 |
| 4,53 | 227,03 | 180,83 | 134,12 | 0,27 | 1,69 |
| 4,58 | 225,68 | 180,88 | 134,07 | 0,28 | 1,68 |
| 4,63 | 224,34 | 180,93 | 134,03 | 0,28 | 1,67 |
| 4,68 | 223,01 | 180,98 | 133,98 | 0,28 | 1,66 |
| 4,74 | 221,71 | 181,04 | 133,94 | 0,29 | 1,66 |
| 4,79 | 220,41 | 181,09 | 133,90 | 0,29 | 1,65 |
| 4,84 | 219,14 | 181,14 | 133,85 | 0,29 | 1,64 |
| 4,90 | 217,87 | 181,20 | 133,81 | 0,30 | 1,63 |
| 4,95 | 216,63 | 181,25 | 133,76 | 0,30 | 1,62 |
| 5,01 | 215,39 | 181,31 | 133,72 | 0,30 | 1,61 |
| 5,06 | 214,17 | 181,36 | 133,67 | 0,31 | 1,60 |
| 5,11 | 212,96 | 181,41 | 133,63 | 0,31 | 1,59 |
| 5,17 | 211,77 | 181,47 | 133,58 | 0,31 | 1,59 |
| 5,22 | 210,58 | 181,52 | 133,54 | 0,32 | 1,58 |
| 5,28 | 209,41 | 181,58 | 133,49 | 0,32 | 1,57 |
| 5,33 | 208,25 | 181,63 | 133,45 | 0,32 | 1,56 |
| 5,39 | 207,11 | 181,69 | 133,40 | 0,33 | 1,55 |
| 5,44 | 205,97 | 181,74 | 133,36 | 0,33 | 1,54 |
| 5,50 | 204,84 | 181,80 | 133,31 | 0,33 | 1,54 |
| 5,55 | 203,73 | 181,85 | 133,27 | 0,34 | 1,53 |
| 5,61 | 202,62 | 181,91 | 133,22 | 0,34 | 1,52 |
| 5,67 | 201,52 | 181,97 | 133,18 | 0,34 | 1,51 |
| 5,72 | 200,44 | 182,02 | 133,13 | 0,35 | 1,51 |
| 5,78 | 199,35 | 182,08 | 133,09 | 0,35 | 1,50 |
| 5,83 | 198,29 | 182,13 | 133,04 | 0,35 | 1,49 |
| 5,89 | 197,22 | 182,19 | 132,99 | 0,36 | 1,48 |
| 5,95 | 196,17 | 182,25 | 132,95 | 0,36 | 1,48 |
| 6,00 | 195,13 | 182,30 | 132,90 | 0,36 | 1,47 |
| 6,06 | 194,09 | 182,36 | 132,86 | 0,37 | 1,46 |
| 6,12 | 193,06 | 182,42 | 132,81 | 0,37 | 1,45 |
| 6,18 | 192,04 | 182,48 | 132,76 | 0,37 | 1,45 |
| 6,23 | 191,02 | 182,53 | 132,72 | 0,38 | 1,44 |
| 6,29 | 190,01 | 182,59 | 132,67 | 0,38 | 1,43 |
| 6,35 | 189,01 | 182,65 | 132,62 | 0,38 | 1,43 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 6,41 | 188,02 | 182,71 | 132,58 | 0,39 | 1,42 |
| 6,46 | 187,03 | 182,76 | 132,53 | 0,39 | 1,41 |
| 6,52 | 186,05 | 182,82 | 132,48 | 0,39 | 1,40 |
| 6,58 | 185,07 | 182,88 | 132,44 | 0,40 | 1,40 |
| 6,64 | 184,09 | 182,94 | 132,39 | 0,40 | 1,39 |
| 6,70 | 183,13 | 183,00 | 132,34 | 0,40 | 1,38 |
| 6,76 | 182,17 | 183,06 | 132,29 | 0,41 | 1,38 |
| 6,82 | 181,21 | 183,12 | 132,25 | 0,41 | 1,37 |
| 6,88 | 180,26 | 183,18 | 132,20 | 0,41 | 1,36 |
| 6,94 | 179,31 | 183,24 | 132,15 | 0,42 | 1,36 |
| 7,00 | 178,36 | 183,30 | 132,10 | 0,42 | 1,35 |
| 7,06 | 177,42 | 183,36 | 132,06 | 0,43 | 1,34 |
| 7,12 | 176,49 | 183,42 | 132,01 | 0,43 | 1,34 |
| 7,18 | 175,56 | 183,48 | 131,96 | 0,43 | 1,33 |
| 7,24 | 174,63 | 183,54 | 131,91 | 0,44 | 1,32 |
| 7,30 | 173,71 | 183,60 | 131,87 | 0,44 | 1,32 |
| 7,36 | 172,79 | 183,66 | 131,82 | 0,44 | 1,31 |
| 7,42 | 171,87 | 183,72 | 131,77 | 0,45 | 1,30 |
| 7,48 | 170,96 | 183,78 | 131,72 | 0,45 | 1,30 |
| 7,54 | 170,04 | 183,84 | 131,67 | 0,46 | 1,29 |
| 7,60 | 169,13 | 183,90 | 131,62 | 0,46 | 1,28 |
| 7,66 | 168,23 | 183,96 | 131,57 | 0,46 | 1,28 |
| 7,73 | 167,32 | 184,03 | 131,53 | 0,47 | 1,27 |
| 7,79 | 166,42 | 184,09 | 131,48 | 0,47 | 1,27 |
| 7,85 | 165,52 | 184,15 | 131,43 | 0,47 | 1,26 |
| 7,91 | 164,63 | 184,21 | 131,38 | 0,48 | 1,25 |
| 7,98 | 163,73 | 184,28 | 131,33 | 0,48 | 1,25 |
| 8,04 | 162,84 | 184,34 | 131,28 | 0,49 | 1,24 |
| 8,10 | 161,94 | 184,40 | 131,23 | 0,49 | 1,23 |
| 8,16 | 161,05 | 184,46 | 131,18 | 0,49 | 1,23 |
| 8,23 | 160,17 | 184,53 | 131,13 | 0,50 | 1,22 |
| 8,29 | 159,28 | 184,59 | 131,08 | 0,50 | 1,22 |
| 8,35 | 158,39 | 184,65 | 131,03 | 0,50 | 1,21 |
| 8,42 | 157,50 | 184,72 | 130,98 | 0,51 | 1,20 |
| 8,48 | 156,62 | 184,78 | 130,93 | 0,51 | 1,20 |
| 8,55 | 155,73 | 184,85 | 130,88 | 0,52 | 1,19 |
| 8,61 | 154,85 | 184,91 | 130,83 | 0,52 | 1,18 |
| 8,68 | 153,96 | 184,98 | 130,78 | 0,52 | 1,18 |
| 8,74 | 153,07 | 185,04 | 130,73 | 0,53 | 1,17 |
| 8,81 | 152,19 | 185,11 | 130,68 | 0,53 | 1,16 |
| 8,87 | 151,30 | 185,17 | 130,63 | 0,54 | 1,16 |
| 8,94 | 150,42 | 185,24 | 130,58 | 0,54 | 1,15 |
| 9,00 | 149,53 | 185,30 | 130,53 | 0,54 | 1,15 |
| 9,07 | 148,64 | 185,37 | 130,48 | 0,55 | 1,14 |
| 9,13 | 147,76 | 185,43 | 130,43 | 0,55 | 1,13 |
| 9,20 | 146,87 | 185,50 | 130,38 | 0,56 | 1,13 |
| 9,27 | 145,98 | 185,57 | 130,33 | 0,56 | 1,12 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 9,33  | 145,09 | 185,63 | 130,28 | 0,56 | 1,11 |
| 9,40  | 144,19 | 185,70 | 130,22 | 0,57 | 1,11 |
| 9,47  | 143,30 | 185,77 | 130,17 | 0,57 | 1,10 |
| 9,53  | 142,40 | 185,83 | 130,12 | 0,58 | 1,09 |
| 9,60  | 141,51 | 185,90 | 130,07 | 0,58 | 1,09 |
| 9,67  | 140,61 | 185,97 | 130,02 | 0,58 | 1,08 |
| 9,74  | 139,71 | 186,04 | 129,97 | 0,59 | 1,07 |
| 9,80  | 138,80 | 186,10 | 129,92 | 0,59 | 1,07 |
| 9,87  | 137,90 | 186,17 | 129,86 | 0,60 | 1,06 |
| 9,94  | 136,99 | 186,24 | 129,81 | 0,60 | 1,06 |
| 10,01 | 136,08 | 186,31 | 129,76 | 0,60 | 1,05 |
| 10,08 | 135,17 | 186,38 | 129,71 | 0,61 | 1,04 |
| 10,15 | 134,25 | 186,45 | 129,66 | 0,61 | 1,04 |
| 10,22 | 133,33 | 186,52 | 129,60 | 0,62 | 1,03 |
| 10,28 | 132,41 | 186,58 | 129,55 | 0,62 | 1,02 |
| 10,35 | 131,48 | 186,65 | 129,50 | 0,62 | 1,02 |
| 10,42 | 130,55 | 186,72 | 129,45 | 0,63 | 1,01 |
| 10,49 | 129,61 | 186,79 | 129,39 | 0,63 | 1,00 |
| 10,56 | 128,68 | 186,86 | 129,34 | 0,64 | 0,99 |
| 10,63 | 127,73 | 186,93 | 129,29 | 0,64 | 0,99 |
| 10,70 | 126,79 | 187,00 | 129,23 | 0,65 | 0,98 |
| 10,78 | 125,84 | 187,08 | 129,18 | 0,65 | 0,97 |
| 10,85 | 124,88 | 187,15 | 129,13 | 0,65 | 0,97 |
| 10,92 | 123,92 | 187,22 | 129,07 | 0,66 | 0,96 |
| 10,99 | 122,96 | 187,29 | 129,02 | 0,66 | 0,95 |
| 11,06 | 121,99 | 187,36 | 128,97 | 0,67 | 0,95 |
| 11,13 | 121,01 | 187,43 | 128,91 | 0,67 | 0,94 |
| 11,20 | 120,03 | 187,50 | 128,86 | 0,68 | 0,93 |
| 11,28 | 119,05 | 187,58 | 128,81 | 0,68 | 0,92 |
| 11,35 | 118,05 | 187,65 | 128,75 | 0,68 | 0,92 |
| 11,42 | 117,06 | 187,72 | 128,70 | 0,69 | 0,91 |
| 11,49 | 116,05 | 187,79 | 128,65 | 0,69 | 0,90 |
| 11,57 | 115,04 | 187,87 | 128,59 | 0,70 | 0,89 |
| 11,64 | 114,02 | 187,94 | 128,54 | 0,70 | 0,89 |
| 11,71 | 113,00 | 188,01 | 128,48 | 0,71 | 0,88 |
| 11,79 | 111,97 | 188,09 | 128,43 | 0,71 | 0,87 |
| 11,86 | 110,93 | 188,16 | 128,37 | 0,72 | 0,86 |
| 11,94 | 109,88 | 188,24 | 128,32 | 0,72 | 0,86 |
| 12,01 | 108,83 | 188,31 | 128,26 | 0,72 | 0,85 |
| 12,08 | 107,77 | 188,38 | 128,21 | 0,73 | 0,84 |
| 12,16 | 106,70 | 188,46 | 128,15 | 0,73 | 0,83 |
| 12,23 | 105,62 | 188,53 | 128,10 | 0,74 | 0,82 |
| 12,31 | 104,53 | 188,61 | 128,04 | 0,74 | 0,82 |
| 12,38 | 103,43 | 188,68 | 127,99 | 0,75 | 0,81 |
| 12,46 | 102,33 | 188,76 | 127,93 | 0,75 | 0,80 |
| 12,54 | 101,21 | 188,84 | 127,88 | 0,76 | 0,79 |
| 12,61 | 100,09 | 188,91 | 127,82 | 0,76 | 0,78 |

|       |       |        |        |      |      |
|-------|-------|--------|--------|------|------|
| 12,69 | 98,95 | 188,99 | 127,77 | 0,77 | 0,77 |
| 12,76 | 97,81 | 189,06 | 127,71 | 0,77 | 0,77 |
| 12,84 | 96,65 | 189,14 | 127,66 | 0,77 | 0,76 |
| 12,92 | 95,49 | 189,22 | 127,60 | 0,78 | 0,75 |
| 13,00 | 94,31 | 189,30 | 127,54 | 0,78 | 0,74 |
| 13,07 | 93,12 | 189,37 | 127,49 | 0,79 | 0,73 |
| 13,15 | 91,92 | 189,45 | 127,43 | 0,79 | 0,72 |
| 13,23 | 90,71 | 189,53 | 127,38 | 0,80 | 0,71 |
| 13,31 | 89,49 | 189,61 | 127,32 | 0,80 | 0,70 |
| 13,38 | 88,25 | 189,68 | 127,26 | 0,81 | 0,69 |
| 13,46 | 87,00 | 189,76 | 127,21 | 0,81 | 0,68 |
| 13,54 | 85,73 | 189,84 | 127,15 | 0,82 | 0,67 |
| 13,62 | 84,46 | 189,92 | 127,09 | 0,82 | 0,66 |
| 13,70 | 83,17 | 190,00 | 127,04 | 0,83 | 0,65 |
| 13,77 | 81,99 | 190,07 | 126,99 | 0,83 | 0,65 |
| 13,84 | 80,80 | 190,14 | 126,93 | 0,84 | 0,64 |
| 13,92 | 79,60 | 190,22 | 126,88 | 0,84 | 0,63 |
| 13,99 | 78,40 | 190,29 | 126,83 | 0,84 | 0,62 |
| 14,06 | 77,18 | 190,36 | 126,78 | 0,85 | 0,61 |
| 14,13 | 75,95 | 190,43 | 126,73 | 0,85 | 0,60 |
| 14,20 | 74,72 | 190,50 | 126,68 | 0,86 | 0,59 |
| 14,27 | 73,47 | 190,57 | 126,63 | 0,86 | 0,58 |
| 14,35 | 72,22 | 190,65 | 126,58 | 0,87 | 0,57 |
| 14,42 | 70,95 | 190,72 | 126,53 | 0,87 | 0,56 |
| 14,49 | 69,67 | 190,79 | 126,48 | 0,87 | 0,55 |
| 14,56 | 68,38 | 190,86 | 126,43 | 0,88 | 0,54 |
| 14,63 | 67,08 | 190,93 | 126,37 | 0,88 | 0,53 |
| 14,70 | 65,77 | 191,00 | 126,32 | 0,89 | 0,52 |
| 14,78 | 64,45 | 191,08 | 126,27 | 0,89 | 0,51 |
| 14,85 | 63,11 | 191,15 | 126,22 | 0,90 | 0,50 |
| 14,92 | 61,76 | 191,22 | 126,17 | 0,90 | 0,49 |
| 14,99 | 60,40 | 191,29 | 126,12 | 0,90 | 0,48 |
| 15,06 | 59,03 | 191,36 | 126,07 | 0,91 | 0,47 |
| 15,14 | 57,64 | 191,44 | 126,02 | 0,91 | 0,46 |
| 15,21 | 56,24 | 191,51 | 125,97 | 0,92 | 0,45 |
| 15,28 | 54,82 | 191,58 | 125,92 | 0,92 | 0,44 |
| 15,35 | 53,40 | 191,65 | 125,87 | 0,93 | 0,42 |
| 15,42 | 51,95 | 191,72 | 125,82 | 0,93 | 0,41 |
| 15,49 | 50,49 | 191,79 | 125,77 | 0,94 | 0,40 |
| 15,57 | 49,02 | 191,87 | 125,72 | 0,94 | 0,39 |
| 15,64 | 47,53 | 191,94 | 125,67 | 0,94 | 0,38 |
| 15,71 | 46,03 | 192,01 | 125,62 | 0,95 | 0,37 |
| 15,78 | 44,51 | 192,08 | 125,57 | 0,95 | 0,35 |
| 15,85 | 42,97 | 192,15 | 125,52 | 0,96 | 0,34 |
| 15,92 | 41,42 | 192,22 | 125,47 | 0,96 | 0,33 |
| 16,00 | 39,85 | 192,30 | 125,42 | 0,97 | 0,32 |
| 16,07 | 38,27 | 192,37 | 125,37 | 0,97 | 0,31 |

|       |       |        |        |      |      |
|-------|-------|--------|--------|------|------|
| 16,14 | 36,66 | 192,44 | 125,32 | 0,97 | 0,29 |
| 16,21 | 35,04 | 192,51 | 125,27 | 0,98 | 0,28 |
| 16,28 | 33,40 | 192,58 | 125,22 | 0,98 | 0,27 |
| 16,35 | 31,74 | 192,65 | 125,18 | 0,99 | 0,25 |
| 16,43 | 30,06 | 192,73 | 125,13 | 0,99 | 0,24 |
| 16,50 | 28,37 | 192,80 | 125,08 | 1,00 | 0,23 |
| 16,57 | 26,65 | 192,87 | 125,03 | 1,00 | 0,21 |

**Semicírculo de aço parede espessa com profundidade de entalhe de 6,93.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 2307,42                                   | 176,93 | 141,43                                 | 0,00 | 16,31                                    |
| 0,04  | 2002,30                                   | 176,97 | 141,40                                 | 0,00 | 14,16                                    |
| 0,08  | 1775,43                                   | 177,01 | 141,36                                 | 0,00 | 12,56                                    |
| 0,11  | 1585,54                                   | 177,04 | 141,33                                 | 0,01 | 11,22                                    |
| 0,15  | 1440,68                                   | 177,08 | 141,29                                 | 0,01 | 10,20                                    |
| 0,19  | 1315,80                                   | 177,12 | 141,26                                 | 0,01 | 9,31                                     |
| 0,23  | 1216,04                                   | 177,16 | 141,22                                 | 0,01 | 8,61                                     |
| 0,27  | 1130,13                                   | 177,20 | 141,19                                 | 0,02 | 8,00                                     |
| 0,30  | 1057,40                                   | 177,23 | 141,15                                 | 0,02 | 7,49                                     |
| 0,34  | 994,64                                    | 177,27 | 141,12                                 | 0,02 | 7,05                                     |
| 0,38  | 940,46                                    | 177,31 | 141,08                                 | 0,02 | 6,67                                     |
| 0,42  | 892,55                                    | 177,35 | 141,05                                 | 0,03 | 6,33                                     |
| 0,46  | 850,43                                    | 177,39 | 141,01                                 | 0,03 | 6,03                                     |
| 0,50  | 812,83                                    | 177,43 | 140,98                                 | 0,03 | 5,77                                     |
| 0,54  | 779,20                                    | 177,47 | 140,94                                 | 0,03 | 5,53                                     |
| 0,58  | 748,87                                    | 177,51 | 140,91                                 | 0,04 | 5,31                                     |
| 0,62  | 721,41                                    | 177,55 | 140,87                                 | 0,04 | 5,12                                     |
| 0,66  | 696,41                                    | 177,59 | 140,84                                 | 0,04 | 4,94                                     |
| 0,70  | 673,53                                    | 177,63 | 140,80                                 | 0,04 | 4,78                                     |
| 0,74  | 652,56                                    | 177,67 | 140,76                                 | 0,05 | 4,64                                     |
| 0,77  | 633,19                                    | 177,70 | 140,73                                 | 0,05 | 4,50                                     |
| 0,81  | 615,32                                    | 177,74 | 140,69                                 | 0,05 | 4,37                                     |
| 0,85  | 598,68                                    | 177,78 | 140,66                                 | 0,05 | 4,26                                     |
| 0,90  | 583,25                                    | 177,83 | 140,62                                 | 0,06 | 4,15                                     |
| 0,94  | 568,79                                    | 177,87 | 140,58                                 | 0,06 | 4,05                                     |
| 0,98  | 555,33                                    | 177,91 | 140,55                                 | 0,06 | 3,95                                     |
| 1,02  | 542,63                                    | 177,95 | 140,51                                 | 0,06 | 3,86                                     |
| 1,06  | 530,74                                    | 177,99 | 140,48                                 | 0,07 | 3,78                                     |
| 1,10  | 519,48                                    | 178,03 | 140,44                                 | 0,07 | 3,70                                     |
| 1,14  | 508,90                                    | 178,07 | 140,40                                 | 0,07 | 3,62                                     |
| 1,18  | 498,83                                    | 178,11 | 140,37                                 | 0,07 | 3,55                                     |
| 1,22  | 489,34                                    | 178,15 | 140,33                                 | 0,08 | 3,49                                     |
| 1,26  | 480,28                                    | 178,19 | 140,29                                 | 0,08 | 3,42                                     |
| 1,30  | 471,71                                    | 178,23 | 140,25                                 | 0,08 | 3,36                                     |
| 1,34  | 463,49                                    | 178,27 | 140,22                                 | 0,08 | 3,31                                     |
| 1,39  | 455,70                                    | 178,32 | 140,18                                 | 0,09 | 3,25                                     |
| 1,43  | 448,21                                    | 178,36 | 140,14                                 | 0,09 | 3,20                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,47 | 441,11 | 178,40 | 140,11 | 0,09 | 3,15 |
| 1,51 | 434,26 | 178,44 | 140,07 | 0,09 | 3,10 |
| 1,55 | 427,73 | 178,48 | 140,03 | 0,10 | 3,05 |
| 1,60 | 421,41 | 178,53 | 139,99 | 0,10 | 3,01 |
| 1,64 | 415,38 | 178,57 | 139,96 | 0,10 | 2,97 |
| 1,68 | 409,54 | 178,61 | 139,92 | 0,11 | 2,93 |
| 1,72 | 403,95 | 178,65 | 139,88 | 0,11 | 2,89 |
| 1,77 | 398,53 | 178,70 | 139,84 | 0,11 | 2,85 |
| 1,81 | 393,33 | 178,74 | 139,81 | 0,11 | 2,81 |
| 1,85 | 388,28 | 178,78 | 139,77 | 0,12 | 2,78 |
| 1,90 | 383,43 | 178,83 | 139,73 | 0,12 | 2,74 |
| 1,94 | 378,71 | 178,87 | 139,69 | 0,12 | 2,71 |
| 1,98 | 374,17 | 178,91 | 139,65 | 0,12 | 2,68 |
| 2,03 | 369,74 | 178,96 | 139,61 | 0,13 | 2,65 |
| 2,07 | 365,48 | 179,00 | 139,58 | 0,13 | 2,62 |
| 2,11 | 361,32 | 179,04 | 139,54 | 0,13 | 2,59 |
| 2,16 | 357,31 | 179,09 | 139,50 | 0,14 | 2,56 |
| 2,20 | 353,39 | 179,13 | 139,46 | 0,14 | 2,53 |
| 2,24 | 349,60 | 179,17 | 139,42 | 0,14 | 2,51 |
| 2,29 | 345,89 | 179,22 | 139,38 | 0,14 | 2,48 |
| 2,33 | 342,31 | 179,26 | 139,34 | 0,15 | 2,46 |
| 2,38 | 338,80 | 179,31 | 139,30 | 0,15 | 2,43 |
| 2,42 | 335,40 | 179,35 | 139,27 | 0,15 | 2,41 |
| 2,47 | 332,06 | 179,40 | 139,23 | 0,15 | 2,39 |
| 2,51 | 328,83 | 179,44 | 139,19 | 0,16 | 2,36 |
| 2,56 | 325,65 | 179,49 | 139,15 | 0,16 | 2,34 |
| 2,60 | 322,58 | 179,53 | 139,11 | 0,16 | 2,32 |
| 2,65 | 319,55 | 179,58 | 139,07 | 0,17 | 2,30 |
| 2,69 | 316,61 | 179,62 | 139,03 | 0,17 | 2,28 |
| 2,74 | 313,73 | 179,67 | 138,99 | 0,17 | 2,26 |
| 2,78 | 310,93 | 179,71 | 138,95 | 0,17 | 2,24 |
| 2,83 | 308,18 | 179,76 | 138,91 | 0,18 | 2,22 |
| 2,88 | 305,49 | 179,81 | 138,87 | 0,18 | 2,20 |
| 2,92 | 302,85 | 179,85 | 138,83 | 0,18 | 2,18 |
| 2,97 | 300,27 | 179,90 | 138,79 | 0,19 | 2,16 |
| 3,01 | 297,73 | 179,94 | 138,75 | 0,19 | 2,15 |
| 3,06 | 295,26 | 179,99 | 138,71 | 0,19 | 2,13 |
| 3,11 | 292,82 | 180,04 | 138,67 | 0,19 | 2,11 |
| 3,15 | 290,44 | 180,08 | 138,63 | 0,20 | 2,10 |
| 3,20 | 288,09 | 180,13 | 138,59 | 0,20 | 2,08 |
| 3,25 | 285,80 | 180,18 | 138,55 | 0,20 | 2,06 |
| 3,29 | 283,54 | 180,22 | 138,51 | 0,21 | 2,05 |
| 3,34 | 281,34 | 180,27 | 138,47 | 0,21 | 2,03 |
| 3,39 | 279,15 | 180,32 | 138,42 | 0,21 | 2,02 |
| 3,44 | 277,02 | 180,37 | 138,38 | 0,22 | 2,00 |
| 3,48 | 274,92 | 180,41 | 138,34 | 0,22 | 1,99 |
| 3,53 | 272,86 | 180,46 | 138,30 | 0,22 | 1,97 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 3,58 | 270,82 | 180,51 | 138,26 | 0,22 | 1,96 |
| 3,63 | 268,83 | 180,56 | 138,22 | 0,23 | 1,94 |
| 3,68 | 266,86 | 180,61 | 138,18 | 0,23 | 1,93 |
| 3,73 | 264,93 | 180,66 | 138,14 | 0,23 | 1,92 |
| 3,77 | 263,02 | 180,70 | 138,09 | 0,24 | 1,90 |
| 3,82 | 261,14 | 180,75 | 138,05 | 0,24 | 1,89 |
| 3,87 | 259,29 | 180,80 | 138,01 | 0,24 | 1,88 |
| 3,92 | 257,47 | 180,85 | 137,97 | 0,25 | 1,87 |
| 3,97 | 255,67 | 180,90 | 137,93 | 0,25 | 1,85 |
| 4,02 | 253,90 | 180,95 | 137,89 | 0,25 | 1,84 |
| 4,07 | 252,14 | 181,00 | 137,84 | 0,26 | 1,83 |
| 4,12 | 250,42 | 181,05 | 137,80 | 0,26 | 1,82 |
| 4,17 | 248,72 | 181,10 | 137,76 | 0,26 | 1,81 |
| 4,22 | 247,04 | 181,15 | 137,72 | 0,26 | 1,79 |
| 4,27 | 245,38 | 181,20 | 137,67 | 0,27 | 1,78 |
| 4,32 | 243,76 | 181,25 | 137,63 | 0,27 | 1,77 |
| 4,37 | 242,14 | 181,30 | 137,59 | 0,27 | 1,76 |
| 4,42 | 240,55 | 181,35 | 137,55 | 0,28 | 1,75 |
| 4,47 | 238,97 | 181,40 | 137,50 | 0,28 | 1,74 |
| 4,52 | 237,41 | 181,45 | 137,46 | 0,28 | 1,73 |
| 4,57 | 235,87 | 181,50 | 137,42 | 0,29 | 1,72 |
| 4,62 | 234,35 | 181,55 | 137,37 | 0,29 | 1,71 |
| 4,67 | 232,84 | 181,60 | 137,33 | 0,29 | 1,70 |
| 4,72 | 231,36 | 181,65 | 137,29 | 0,30 | 1,69 |
| 4,78 | 229,88 | 181,71 | 137,24 | 0,30 | 1,67 |
| 4,83 | 228,43 | 181,76 | 137,20 | 0,30 | 1,66 |
| 4,88 | 226,98 | 181,81 | 137,16 | 0,31 | 1,65 |
| 4,93 | 225,56 | 181,86 | 137,11 | 0,31 | 1,65 |
| 4,98 | 224,14 | 181,91 | 137,07 | 0,31 | 1,64 |
| 5,03 | 222,75 | 181,96 | 137,03 | 0,32 | 1,63 |
| 5,09 | 221,36 | 182,02 | 136,98 | 0,32 | 1,62 |
| 5,14 | 219,99 | 182,07 | 136,94 | 0,32 | 1,61 |
| 5,19 | 218,63 | 182,12 | 136,89 | 0,33 | 1,60 |
| 5,25 | 217,28 | 182,18 | 136,85 | 0,33 | 1,59 |
| 5,30 | 215,94 | 182,23 | 136,81 | 0,33 | 1,58 |
| 5,35 | 214,62 | 182,28 | 136,76 | 0,34 | 1,57 |
| 5,40 | 213,30 | 182,33 | 136,72 | 0,34 | 1,56 |
| 5,46 | 212,00 | 182,39 | 136,67 | 0,34 | 1,55 |
| 5,51 | 210,71 | 182,44 | 136,63 | 0,35 | 1,54 |
| 5,57 | 209,43 | 182,50 | 136,58 | 0,35 | 1,53 |
| 5,62 | 208,15 | 182,55 | 136,54 | 0,35 | 1,52 |
| 5,67 | 206,89 | 182,60 | 136,49 | 0,36 | 1,52 |
| 5,73 | 205,64 | 182,66 | 136,45 | 0,36 | 1,51 |
| 5,78 | 204,39 | 182,71 | 136,40 | 0,36 | 1,50 |
| 5,84 | 203,16 | 182,77 | 136,36 | 0,37 | 1,49 |
| 5,89 | 201,93 | 182,82 | 136,31 | 0,37 | 1,48 |
| 5,95 | 200,71 | 182,88 | 136,27 | 0,37 | 1,47 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 6,00 | 199,50 | 182,93 | 136,22 | 0,38 | 1,46 |
| 6,06 | 198,30 | 182,99 | 136,18 | 0,38 | 1,46 |
| 6,11 | 197,10 | 183,04 | 136,13 | 0,38 | 1,45 |
| 6,17 | 195,92 | 183,10 | 136,09 | 0,39 | 1,44 |
| 6,22 | 194,74 | 183,15 | 136,04 | 0,39 | 1,43 |
| 6,28 | 193,56 | 183,21 | 135,99 | 0,39 | 1,42 |
| 6,33 | 192,39 | 183,26 | 135,95 | 0,40 | 1,42 |
| 6,39 | 191,23 | 183,32 | 135,90 | 0,40 | 1,41 |
| 6,45 | 190,07 | 183,38 | 135,86 | 0,40 | 1,40 |
| 6,50 | 188,92 | 183,43 | 135,81 | 0,41 | 1,39 |
| 6,56 | 187,78 | 183,49 | 135,76 | 0,41 | 1,38 |
| 6,62 | 186,64 | 183,55 | 135,72 | 0,42 | 1,38 |
| 6,67 | 185,50 | 183,60 | 135,67 | 0,42 | 1,37 |
| 6,73 | 184,37 | 183,66 | 135,62 | 0,42 | 1,36 |
| 6,79 | 183,25 | 183,72 | 135,58 | 0,43 | 1,35 |
| 6,85 | 182,13 | 183,78 | 135,53 | 0,43 | 1,34 |
| 6,90 | 181,01 | 183,83 | 135,48 | 0,43 | 1,34 |
| 6,96 | 179,90 | 183,89 | 135,44 | 0,44 | 1,33 |
| 7,02 | 178,79 | 183,95 | 135,39 | 0,44 | 1,32 |
| 7,08 | 177,69 | 184,01 | 135,34 | 0,44 | 1,31 |
| 7,14 | 176,58 | 184,07 | 135,29 | 0,45 | 1,31 |
| 7,19 | 175,49 | 184,12 | 135,25 | 0,45 | 1,30 |
| 7,25 | 174,39 | 184,18 | 135,20 | 0,46 | 1,29 |
| 7,31 | 173,30 | 184,24 | 135,15 | 0,46 | 1,28 |
| 7,37 | 172,21 | 184,30 | 135,10 | 0,46 | 1,27 |
| 7,43 | 171,13 | 184,36 | 135,06 | 0,47 | 1,27 |
| 7,49 | 170,04 | 184,42 | 135,01 | 0,47 | 1,26 |
| 7,55 | 168,96 | 184,48 | 134,96 | 0,47 | 1,25 |
| 7,61 | 167,88 | 184,54 | 134,91 | 0,48 | 1,24 |
| 7,67 | 166,81 | 184,60 | 134,86 | 0,48 | 1,24 |
| 7,73 | 165,73 | 184,66 | 134,82 | 0,48 | 1,23 |
| 7,79 | 164,66 | 184,72 | 134,77 | 0,49 | 1,22 |
| 7,85 | 163,59 | 184,78 | 134,72 | 0,49 | 1,21 |
| 7,91 | 162,52 | 184,84 | 134,67 | 0,50 | 1,21 |
| 7,97 | 161,45 | 184,90 | 134,62 | 0,50 | 1,20 |
| 8,03 | 160,38 | 184,96 | 134,57 | 0,50 | 1,19 |
| 8,09 | 159,32 | 185,02 | 134,52 | 0,51 | 1,18 |
| 8,15 | 158,25 | 185,08 | 134,48 | 0,51 | 1,18 |
| 8,22 | 157,18 | 185,15 | 134,43 | 0,52 | 1,17 |
| 8,28 | 156,11 | 185,21 | 134,38 | 0,52 | 1,16 |
| 8,34 | 155,05 | 185,27 | 134,33 | 0,52 | 1,15 |
| 8,40 | 153,98 | 185,33 | 134,28 | 0,53 | 1,15 |
| 8,46 | 152,91 | 185,39 | 134,23 | 0,53 | 1,14 |
| 8,53 | 151,85 | 185,46 | 134,18 | 0,53 | 1,13 |
| 8,59 | 150,78 | 185,52 | 134,13 | 0,54 | 1,12 |
| 8,65 | 149,71 | 185,58 | 134,08 | 0,54 | 1,12 |
| 8,71 | 148,64 | 185,64 | 134,03 | 0,55 | 1,11 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 8,78  | 147,57 | 185,71 | 133,98 | 0,55 | 1,10 |
| 8,84  | 146,50 | 185,77 | 133,93 | 0,55 | 1,09 |
| 8,90  | 145,43 | 185,83 | 133,88 | 0,56 | 1,09 |
| 8,97  | 144,35 | 185,90 | 133,83 | 0,56 | 1,08 |
| 9,03  | 143,28 | 185,96 | 133,78 | 0,57 | 1,07 |
| 9,09  | 142,20 | 186,02 | 133,73 | 0,57 | 1,06 |
| 9,16  | 141,12 | 186,09 | 133,68 | 0,57 | 1,06 |
| 9,22  | 140,03 | 186,15 | 133,63 | 0,58 | 1,05 |
| 9,29  | 138,95 | 186,22 | 133,58 | 0,58 | 1,04 |
| 9,35  | 137,86 | 186,28 | 133,53 | 0,59 | 1,03 |
| 9,42  | 136,78 | 186,35 | 133,48 | 0,59 | 1,02 |
| 9,48  | 135,68 | 186,41 | 133,43 | 0,59 | 1,02 |
| 9,55  | 134,59 | 186,48 | 133,38 | 0,60 | 1,01 |
| 9,61  | 133,49 | 186,54 | 133,33 | 0,60 | 1,00 |
| 9,68  | 132,39 | 186,61 | 133,27 | 0,61 | 0,99 |
| 9,75  | 131,28 | 186,68 | 133,22 | 0,61 | 0,99 |
| 9,81  | 130,17 | 186,74 | 133,17 | 0,62 | 0,98 |
| 9,88  | 129,06 | 186,81 | 133,12 | 0,62 | 0,97 |
| 9,94  | 127,94 | 186,87 | 133,07 | 0,62 | 0,96 |
| 10,01 | 126,82 | 186,94 | 133,02 | 0,63 | 0,95 |
| 10,08 | 125,69 | 187,01 | 132,97 | 0,63 | 0,95 |
| 10,14 | 124,56 | 187,07 | 132,91 | 0,64 | 0,94 |
| 10,21 | 123,42 | 187,14 | 132,86 | 0,64 | 0,93 |
| 10,28 | 122,28 | 187,21 | 132,81 | 0,64 | 0,92 |
| 10,35 | 121,14 | 187,28 | 132,76 | 0,65 | 0,91 |
| 10,42 | 119,98 | 187,35 | 132,71 | 0,65 | 0,90 |
| 10,48 | 118,83 | 187,41 | 132,65 | 0,66 | 0,90 |
| 10,55 | 117,66 | 187,48 | 132,60 | 0,66 | 0,89 |
| 10,62 | 116,49 | 187,55 | 132,55 | 0,67 | 0,88 |
| 10,69 | 115,32 | 187,62 | 132,50 | 0,67 | 0,87 |
| 10,76 | 114,13 | 187,69 | 132,44 | 0,67 | 0,86 |
| 10,83 | 112,94 | 187,76 | 132,39 | 0,68 | 0,85 |
| 10,90 | 111,75 | 187,83 | 132,34 | 0,68 | 0,84 |
| 10,97 | 110,54 | 187,90 | 132,29 | 0,69 | 0,84 |
| 11,03 | 109,33 | 187,96 | 132,23 | 0,69 | 0,83 |
| 11,10 | 108,11 | 188,03 | 132,18 | 0,70 | 0,82 |
| 11,17 | 106,89 | 188,10 | 132,13 | 0,70 | 0,81 |
| 11,25 | 105,65 | 188,18 | 132,07 | 0,71 | 0,80 |
| 11,32 | 104,41 | 188,25 | 132,02 | 0,71 | 0,79 |
| 11,39 | 103,16 | 188,32 | 131,97 | 0,71 | 0,78 |
| 11,46 | 101,90 | 188,39 | 131,91 | 0,72 | 0,77 |
| 11,53 | 100,63 | 188,46 | 131,86 | 0,72 | 0,76 |
| 11,60 | 99,35  | 188,53 | 131,80 | 0,73 | 0,75 |
| 11,67 | 98,06  | 188,60 | 131,75 | 0,73 | 0,74 |
| 11,74 | 96,76  | 188,67 | 131,70 | 0,74 | 0,73 |
| 11,81 | 95,45  | 188,74 | 131,64 | 0,74 | 0,73 |
| 11,89 | 94,13  | 188,82 | 131,59 | 0,75 | 0,72 |

|       |       |        |        |      |      |
|-------|-------|--------|--------|------|------|
| 11,96 | 92,80 | 188,89 | 131,53 | 0,75 | 0,71 |
| 12,03 | 91,46 | 188,96 | 131,48 | 0,75 | 0,70 |
| 12,10 | 90,10 | 189,03 | 131,42 | 0,76 | 0,69 |
| 12,18 | 88,74 | 189,11 | 131,37 | 0,76 | 0,68 |
| 12,25 | 87,36 | 189,18 | 131,32 | 0,77 | 0,67 |
| 12,32 | 85,97 | 189,25 | 131,26 | 0,77 | 0,65 |
| 12,40 | 84,57 | 189,33 | 131,21 | 0,78 | 0,64 |
| 12,47 | 83,16 | 189,40 | 131,15 | 0,78 | 0,63 |
| 12,55 | 81,73 | 189,48 | 131,10 | 0,79 | 0,62 |
| 12,62 | 80,29 | 189,55 | 131,04 | 0,79 | 0,61 |
| 12,69 | 78,83 | 189,62 | 130,99 | 0,80 | 0,60 |
| 12,77 | 77,36 | 189,70 | 130,93 | 0,80 | 0,59 |
| 12,84 | 75,87 | 189,77 | 130,87 | 0,81 | 0,58 |
| 12,92 | 74,37 | 189,85 | 130,82 | 0,81 | 0,57 |
| 12,99 | 72,85 | 189,92 | 130,76 | 0,82 | 0,56 |
| 13,07 | 71,32 | 190,00 | 130,71 | 0,82 | 0,55 |
| 13,14 | 69,85 | 190,07 | 130,66 | 0,82 | 0,53 |
| 13,21 | 68,38 | 190,14 | 130,60 | 0,83 | 0,52 |
| 13,29 | 66,89 | 190,22 | 130,55 | 0,83 | 0,51 |
| 13,36 | 65,38 | 190,29 | 130,50 | 0,84 | 0,50 |
| 13,43 | 63,87 | 190,36 | 130,44 | 0,84 | 0,49 |
| 13,50 | 62,35 | 190,43 | 130,39 | 0,85 | 0,48 |
| 13,57 | 60,81 | 190,50 | 130,34 | 0,85 | 0,47 |
| 13,64 | 59,26 | 190,57 | 130,29 | 0,86 | 0,45 |
| 13,72 | 57,70 | 190,65 | 130,23 | 0,86 | 0,44 |
| 13,79 | 56,12 | 190,72 | 130,18 | 0,86 | 0,43 |
| 13,86 | 54,53 | 190,79 | 130,13 | 0,87 | 0,42 |
| 13,93 | 52,92 | 190,86 | 130,08 | 0,87 | 0,41 |
| 14,00 | 51,31 | 190,93 | 130,03 | 0,88 | 0,39 |
| 14,07 | 49,67 | 191,00 | 129,97 | 0,88 | 0,38 |
| 14,15 | 48,02 | 191,08 | 129,92 | 0,89 | 0,37 |
| 14,22 | 46,36 | 191,15 | 129,87 | 0,89 | 0,36 |
| 14,29 | 44,68 | 191,22 | 129,82 | 0,90 | 0,34 |
| 14,36 | 42,99 | 191,29 | 129,77 | 0,90 | 0,33 |
| 14,43 | 41,28 | 191,36 | 129,71 | 0,91 | 0,32 |
| 14,51 | 39,55 | 191,44 | 129,66 | 0,91 | 0,30 |
| 14,58 | 37,80 | 191,51 | 129,61 | 0,91 | 0,29 |
| 14,65 | 36,04 | 191,58 | 129,56 | 0,92 | 0,28 |
| 14,72 | 34,26 | 191,65 | 129,51 | 0,92 | 0,26 |
| 14,79 | 32,46 | 191,72 | 129,46 | 0,93 | 0,25 |
| 14,86 | 30,64 | 191,79 | 129,41 | 0,93 | 0,24 |
| 14,94 | 28,81 | 191,87 | 129,35 | 0,94 | 0,22 |
| 15,01 | 26,95 | 191,94 | 129,30 | 0,94 | 0,21 |
| 15,08 | 25,08 | 192,01 | 129,25 | 0,95 | 0,19 |
| 15,15 | 23,18 | 192,08 | 129,20 | 0,95 | 0,18 |
| 15,22 | 21,26 | 192,15 | 129,15 | 0,95 | 0,16 |
| 15,29 | 19,33 | 192,22 | 129,10 | 0,96 | 0,15 |

|       |       |        |        |      |      |
|-------|-------|--------|--------|------|------|
| 15,37 | 17,37 | 192,30 | 129,05 | 0,96 | 0,13 |
| 15,44 | 15,39 | 192,37 | 129,00 | 0,97 | 0,12 |
| 15,51 | 13,39 | 192,44 | 128,94 | 0,97 | 0,10 |
| 15,58 | 11,36 | 192,51 | 128,89 | 0,98 | 0,09 |
| 15,65 | 9,31  | 192,58 | 128,84 | 0,98 | 0,07 |
| 15,72 | 7,24  | 192,65 | 128,79 | 0,99 | 0,06 |
| 15,80 | 5,14  | 192,73 | 128,74 | 0,99 | 0,04 |
| 15,87 | 3,02  | 192,80 | 128,69 | 1,00 | 0,02 |
| 15,94 | 0,87  | 192,87 | 128,64 | 1,00 | 0,01 |

**Semicírculo de bi-material parede fina com profundidade de entalhe de 4,42.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF (N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|--------------------------------------------|----------------------------------------|--------|------|------------------------------------------|
| 0     | 6959,83                                    | 436,68                                 | 174,42 | 0,00 | 15,94                                    |
| 0,02  | 6424,12                                    | 436,63                                 | 174,44 | 0,00 | 14,71                                    |
| 0,04  | 5977,2                                     | 436,58                                 | 174,46 | 0,00 | 13,69                                    |
| 0,06  | 5569,06                                    | 436,53                                 | 174,48 | 0,01 | 12,76                                    |
| 0,08  | 5218,41                                    | 436,47                                 | 174,5  | 0,01 | 11,96                                    |
| 0,1   | 4894,1                                     | 436,42                                 | 174,52 | 0,01 | 11,21                                    |
| 0,12  | 4615,25                                    | 436,37                                 | 174,54 | 0,01 | 10,58                                    |
| 0,14  | 4353,75                                    | 436,31                                 | 174,56 | 0,02 | 9,98                                     |
| 0,16  | 4127,35                                    | 436,26                                 | 174,58 | 0,02 | 9,46                                     |
| 0,18  | 3917,86                                    | 436,2                                  | 174,6  | 0,02 | 8,98                                     |
| 0,21  | 3731,22                                    | 436,15                                 | 174,63 | 0,03 | 8,55                                     |
| 0,23  | 3557,83                                    | 436,09                                 | 174,65 | 0,03 | 8,16                                     |
| 0,25  | 3402,54                                    | 436,04                                 | 174,67 | 0,03 | 7,80                                     |
| 0,27  | 3257,84                                    | 435,98                                 | 174,69 | 0,03 | 7,47                                     |
| 0,29  | 3121,51                                    | 435,92                                 | 174,71 | 0,04 | 7,16                                     |
| 0,31  | 2995,81                                    | 435,87                                 | 174,73 | 0,04 | 6,87                                     |
| 0,34  | 2882,06                                    | 435,81                                 | 174,76 | 0,04 | 6,61                                     |
| 0,36  | 2775,46                                    | 435,75                                 | 174,78 | 0,04 | 6,37                                     |
| 0,38  | 2677,19                                    | 435,69                                 | 174,8  | 0,05 | 6,14                                     |
| 0,4   | 2584,19                                    | 435,63                                 | 174,82 | 0,05 | 5,93                                     |
| 0,43  | 2497,8                                     | 435,57                                 | 174,85 | 0,05 | 5,73                                     |
| 0,45  | 2415,89                                    | 435,51                                 | 174,87 | 0,05 | 5,55                                     |
| 0,47  | 2339,39                                    | 435,45                                 | 174,89 | 0,06 | 5,37                                     |
| 0,49  | 2266,64                                    | 435,39                                 | 174,91 | 0,06 | 5,21                                     |
| 0,52  | 2198,35                                    | 435,33                                 | 174,94 | 0,06 | 5,05                                     |
| 0,54  | 2133,19                                    | 435,27                                 | 174,96 | 0,07 | 4,90                                     |
| 0,57  | 2071,72                                    | 435,21                                 | 174,99 | 0,07 | 4,76                                     |
| 0,59  | 2012,94                                    | 435,15                                 | 175,01 | 0,07 | 4,63                                     |
| 0,61  | 1957,26                                    | 435,09                                 | 175,03 | 0,07 | 4,50                                     |
| 0,64  | 1903,94                                    | 435,02                                 | 175,06 | 0,08 | 4,38                                     |
| 0,66  | 1853,67                                    | 434,96                                 | 175,08 | 0,08 | 4,26                                     |
| 0,69  | 1805,01                                    | 434,9                                  | 175,11 | 0,08 | 4,15                                     |
| 0,71  | 1758,58                                    | 434,83                                 | 175,13 | 0,09 | 4,04                                     |
| 0,74  | 1713,95                                    | 434,77                                 | 175,16 | 0,09 | 3,94                                     |
| 0,76  | 1670,76                                    | 434,7                                  | 175,18 | 0,09 | 3,84                                     |

|      |         |        |        |      |      |
|------|---------|--------|--------|------|------|
| 0,79 | 1629,14 | 434,64 | 175,21 | 0,10 | 3,75 |
| 0,81 | 1589,12 | 434,57 | 175,23 | 0,10 | 3,66 |
| 0,84 | 1550,36 | 434,51 | 175,26 | 0,10 | 3,57 |
| 0,86 | 1513    | 434,44 | 175,28 | 0,11 | 3,48 |
| 0,89 | 1476,74 | 434,37 | 175,31 | 0,11 | 3,40 |
| 0,92 | 1441,67 | 434,31 | 175,34 | 0,11 | 3,32 |
| 0,94 | 1407,57 | 434,24 | 175,36 | 0,12 | 3,24 |
| 0,97 | 1374,52 | 434,17 | 175,39 | 0,12 | 3,17 |
| 1    | 1342,35 | 434,1  | 175,42 | 0,12 | 3,09 |
| 1,02 | 1311,35 | 434,03 | 175,44 | 0,12 | 3,02 |
| 1,05 | 1280,96 | 433,96 | 175,47 | 0,13 | 2,95 |
| 1,08 | 1251,38 | 433,89 | 175,5  | 0,13 | 2,88 |
| 1,1  | 1222,43 | 433,82 | 175,52 | 0,14 | 2,82 |
| 1,13 | 1193,8  | 433,75 | 175,55 | 0,14 | 2,75 |
| 1,16 | 1165,76 | 433,68 | 175,58 | 0,14 | 2,69 |
| 1,19 | 1138,35 | 433,6  | 175,61 | 0,15 | 2,63 |
| 1,22 | 1111,37 | 433,53 | 175,64 | 0,15 | 2,56 |
| 1,24 | 1085,21 | 433,46 | 175,66 | 0,15 | 2,50 |
| 1,27 | 1059,54 | 433,39 | 175,69 | 0,16 | 2,44 |
| 1,3  | 1034,21 | 433,31 | 175,72 | 0,16 | 2,39 |
| 1,33 | 1009,3  | 433,24 | 175,75 | 0,16 | 2,33 |
| 1,36 | 984,27  | 433,16 | 175,78 | 0,17 | 2,27 |
| 1,39 | 959,57  | 433,09 | 175,81 | 0,17 | 2,22 |
| 1,42 | 935,27  | 433,01 | 175,84 | 0,17 | 2,16 |
| 1,45 | 911,18  | 432,93 | 175,87 | 0,18 | 2,10 |
| 1,48 | 887,38  | 432,86 | 175,9  | 0,18 | 2,05 |
| 1,51 | 863,75  | 432,78 | 175,93 | 0,18 | 2,00 |
| 1,54 | 840,34  | 432,7  | 175,96 | 0,19 | 1,94 |
| 1,57 | 817,06  | 432,62 | 175,99 | 0,19 | 1,89 |
| 1,6  | 793,96  | 432,54 | 176,02 | 0,20 | 1,84 |
| 1,63 | 770,95  | 432,46 | 176,05 | 0,20 | 1,78 |
| 1,67 | 748,23  | 432,38 | 176,09 | 0,20 | 1,73 |
| 1,7  | 725,63  | 432,3  | 176,12 | 0,21 | 1,68 |
| 1,73 | 703,06  | 432,22 | 176,15 | 0,21 | 1,63 |
| 1,76 | 680,39  | 432,14 | 176,18 | 0,22 | 1,57 |
| 1,79 | 657,55  | 432,06 | 176,21 | 0,22 | 1,52 |
| 1,83 | 634,63  | 431,98 | 176,25 | 0,22 | 1,47 |
| 1,86 | 611,72  | 431,89 | 176,28 | 0,23 | 1,42 |
| 1,89 | 588,66  | 431,81 | 176,31 | 0,23 | 1,36 |
| 1,93 | 565,58  | 431,72 | 176,35 | 0,24 | 1,31 |
| 1,96 | 542,29  | 431,64 | 176,38 | 0,24 | 1,26 |
| 1,99 | 518,92  | 431,55 | 176,41 | 0,24 | 1,20 |
| 2,03 | 495,31  | 431,47 | 176,45 | 0,25 | 1,15 |
| 2,06 | 471,58  | 431,38 | 176,48 | 0,25 | 1,09 |
| 2,1  | 447,55  | 431,29 | 176,52 | 0,26 | 1,04 |
| 2,13 | 423,41  | 431,21 | 176,55 | 0,26 | 0,98 |
| 2,17 | 399     | 431,12 | 176,59 | 0,26 | 0,93 |

|      |        |        |        |      |       |
|------|--------|--------|--------|------|-------|
| 2,2  | 374,34 | 431,03 | 176,62 | 0,27 | 0,87  |
| 2,24 | 349,16 | 430,94 | 176,66 | 0,27 | 0,81  |
| 2,27 | 323,57 | 430,85 | 176,69 | 0,28 | 0,75  |
| 2,31 | 306,99 | 430,76 | 176,73 | 0,28 | 0,71  |
| 2,34 | 297,24 | 430,67 | 176,76 | 0,29 | 0,69  |
| 2,38 | 288,14 | 430,57 | 176,8  | 0,29 | 0,67  |
| 2,42 | 278,88 | 430,48 | 176,84 | 0,30 | 0,65  |
| 2,45 | 270,23 | 430,39 | 176,87 | 0,30 | 0,63  |
| 2,49 | 261,38 | 430,3  | 176,91 | 0,30 | 0,61  |
| 2,53 | 253,49 | 430,2  | 176,95 | 0,31 | 0,59  |
| 2,57 | 245,35 | 430,11 | 176,99 | 0,31 | 0,57  |
| 2,61 | 238,07 | 430,01 | 177,03 | 0,32 | 0,55  |
| 2,64 | 230,49 | 429,92 | 177,06 | 0,32 | 0,54  |
| 2,68 | 224,14 | 429,82 | 177,1  | 0,33 | 0,52  |
| 2,72 | 217,43 | 429,72 | 177,14 | 0,33 | 0,51  |
| 2,76 | 211,94 | 429,62 | 177,18 | 0,34 | 0,49  |
| 2,8  | 206,03 | 429,52 | 177,22 | 0,34 | 0,48  |
| 2,84 | 201,81 | 429,43 | 177,26 | 0,35 | 0,47  |
| 2,88 | 197,18 | -50,93 | 177,3  | 0,35 | -3,87 |
| 3,01 | 185,26 | -50,89 | 177,43 | 0,37 | -3,64 |
| 3,15 | 173,14 | -50,85 | 177,57 | 0,38 | -3,40 |
| 3,28 | 162,73 | -50,81 | 177,7  | 0,40 | -3,20 |
| 3,41 | 152,16 | -50,77 | 177,83 | 0,42 | -3,00 |
| 3,54 | 142,99 | -50,73 | 177,96 | 0,43 | -2,82 |
| 3,68 | 133,68 | -50,7  | 178,1  | 0,45 | -2,64 |
| 3,81 | 125,53 | -50,66 | 178,23 | 0,47 | -2,48 |
| 3,94 | 117,26 | -50,62 | 178,36 | 0,48 | -2,32 |
| 4,07 | 109,96 | -50,58 | 178,49 | 0,50 | -2,17 |
| 4,21 | 102,55 | -50,54 | 178,63 | 0,51 | -2,03 |
| 4,34 | 95,97  | -50,5  | 178,76 | 0,53 | -1,90 |
| 4,47 | 89,29  | -50,47 | 178,89 | 0,55 | -1,77 |
| 4,6  | 83,34  | -50,43 | 179,02 | 0,56 | -1,65 |
| 4,74 | 77,29  | -50,39 | 179,16 | 0,58 | -1,53 |
| 4,87 | 71,89  | -50,35 | 179,29 | 0,60 | -1,43 |
| 5    | 66,39  | -50,31 | 179,42 | 0,61 | -1,32 |
| 5,13 | 61,47  | -50,28 | 179,55 | 0,63 | -1,22 |
| 5,27 | 56,46  | -50,24 | 179,69 | 0,64 | -1,12 |
| 5,4  | 51,99  | -50,2  | 179,82 | 0,66 | -1,04 |
| 5,53 | 47,42  | -50,16 | 179,95 | 0,68 | -0,95 |
| 5,66 | 43,36  | -50,13 | 180,08 | 0,69 | -0,87 |
| 5,8  | 39,2   | -50,09 | 180,22 | 0,71 | -0,78 |
| 5,93 | 35,52  | -50,05 | 180,35 | 0,72 | -0,71 |
| 6,06 | 31,74  | -50,01 | 180,48 | 0,74 | -0,63 |
| 6,19 | 28,43  | -49,98 | 180,61 | 0,76 | -0,57 |
| 6,33 | 25,01  | -49,94 | 180,75 | 0,77 | -0,50 |
| 6,46 | 22,07  | -49,9  | 180,88 | 0,79 | -0,44 |
| 6,59 | 19,02  | -49,87 | 181,01 | 0,81 | -0,38 |

|      |       |        |        |      |       |
|------|-------|--------|--------|------|-------|
| 6,72 | 16,45 | -49,83 | 181,14 | 0,82 | -0,33 |
| 6,86 | 13,75 | -49,79 | 181,28 | 0,84 | -0,28 |
| 6,99 | 11,56 | -49,76 | 181,41 | 0,85 | -0,23 |
| 7,12 | 9,23  | -49,72 | 181,54 | 0,87 | -0,19 |
| 7,25 | 7,45  | -49,68 | 181,67 | 0,89 | -0,15 |
| 7,39 | 5,5   | -49,65 | 181,81 | 0,90 | -0,11 |
| 7,52 | 4,16  | -49,61 | 181,94 | 0,92 | -0,08 |
| 7,65 | 2,63  | -49,57 | 182,07 | 0,94 | -0,05 |
| 7,78 | 1,77  | -49,54 | 182,2  | 0,95 | -0,04 |
| 7,92 | 0,69  | -49,5  | 182,34 | 0,97 | -0,01 |
| 8,05 | 0,37  | -49,47 | 182,47 | 0,98 | -0,01 |
| 8,18 | -0,17 | -49,43 | 182,6  | 1,00 | 0,00  |

**Semicírculo de bi-material parede fina com profundidade de entalhe de 5,04.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------|------|------------------------------------------|
| 0     | 8753,51                                   | 473,28                                 | 175,04 | 0,00 | 18,50                                    |
| 0,02  | 8213,56                                   | 473,24                                 | 175,06 | 0,00 | 17,36                                    |
| 0,03  | 7745,75                                   | 473,19                                 | 175,07 | 0,00 | 16,37                                    |
| 0,05  | 7311,75                                   | 473,15                                 | 175,09 | 0,01 | 15,45                                    |
| 0,06  | 6926,24                                   | 473,10                                 | 175,1  | 0,01 | 14,64                                    |
| 0,08  | 6559,69                                   | 473,06                                 | 175,12 | 0,01 | 13,87                                    |
| 0,1   | 6239,04                                   | 473,01                                 | 175,14 | 0,01 | 13,19                                    |
| 0,11  | 5931,76                                   | 472,97                                 | 175,15 | 0,01 | 12,54                                    |
| 0,13  | 5659,64                                   | 472,92                                 | 175,17 | 0,02 | 11,97                                    |
| 0,14  | 5404,26                                   | 472,87                                 | 175,18 | 0,02 | 11,43                                    |
| 0,16  | 5173,22                                   | 472,83                                 | 175,2  | 0,02 | 10,94                                    |
| 0,18  | 4955,68                                   | 472,78                                 | 175,22 | 0,02 | 10,48                                    |
| 0,19  | 4758,83                                   | 472,73                                 | 175,23 | 0,03 | 10,07                                    |
| 0,21  | 4573,67                                   | 472,68                                 | 175,25 | 0,03 | 9,68                                     |
| 0,23  | 4393,82                                   | 472,64                                 | 175,27 | 0,03 | 9,30                                     |
| 0,25  | 4224,93                                   | 472,59                                 | 175,29 | 0,03 | 8,94                                     |
| 0,26  | 4072,28                                   | 472,54                                 | 175,3  | 0,03 | 8,62                                     |
| 0,28  | 3928,85                                   | 472,49                                 | 175,32 | 0,04 | 8,32                                     |
| 0,3   | 3796,13                                   | 472,44                                 | 175,34 | 0,04 | 8,04                                     |
| 0,32  | 3669,07                                   | 472,39                                 | 175,36 | 0,04 | 7,77                                     |
| 0,33  | 3550,4                                    | 472,34                                 | 175,37 | 0,04 | 7,52                                     |
| 0,35  | 3436,88                                   | 472,29                                 | 175,39 | 0,05 | 7,28                                     |
| 0,37  | 3330,4                                    | 472,24                                 | 175,41 | 0,05 | 7,05                                     |
| 0,39  | 3228,36                                   | 472,19                                 | 175,43 | 0,05 | 6,84                                     |
| 0,41  | 3132,26                                   | 472,14                                 | 175,45 | 0,05 | 6,63                                     |
| 0,43  | 3039,94                                   | 472,09                                 | 175,47 | 0,06 | 6,44                                     |
| 0,44  | 2952,61                                   | 472,03                                 | 175,48 | 0,06 | 6,26                                     |
| 0,46  | 2868,59                                   | 471,98                                 | 175,5  | 0,06 | 6,08                                     |
| 0,48  | 2788,87                                   | 471,93                                 | 175,52 | 0,06 | 5,91                                     |
| 0,5   | 2712,08                                   | 471,88                                 | 175,54 | 0,07 | 5,75                                     |
| 0,52  | 2639,7                                    | 471,82                                 | 175,56 | 0,07 | 5,59                                     |
| 0,54  | 2568,38                                   | 471,77                                 | 175,58 | 0,07 | 5,44                                     |

|      |         |        |        |      |      |
|------|---------|--------|--------|------|------|
| 0,56 | 2500,67 | 471,71 | 175,6  | 0,07 | 5,30 |
| 0,58 | 2435,72 | 471,66 | 175,62 | 0,08 | 5,16 |
| 0,6  | 2372,68 | 471,61 | 175,64 | 0,08 | 5,03 |
| 0,62 | 2311,75 | 471,55 | 175,66 | 0,08 | 4,90 |
| 0,64 | 2253,19 | 471,49 | 175,68 | 0,08 | 4,78 |
| 0,66 | 2196,29 | 471,44 | 175,7  | 0,09 | 4,66 |
| 0,68 | 2141,47 | 471,38 | 175,72 | 0,09 | 4,54 |
| 0,7  | 2088,07 | 471,32 | 175,74 | 0,09 | 4,43 |
| 0,72 | 2036,47 | 471,27 | 175,76 | 0,10 | 4,32 |
| 0,74 | 1986,15 | 471,21 | 175,78 | 0,10 | 4,22 |
| 0,76 | 1937,42 | 471,15 | 175,8  | 0,10 | 4,11 |
| 0,78 | 1889,87 | 471,09 | 175,82 | 0,10 | 4,01 |
| 0,8  | 1844,22 | 471,03 | 175,84 | 0,11 | 3,92 |
| 0,82 | 1798,88 | 470,98 | 175,86 | 0,11 | 3,82 |
| 0,84 | 1754,92 | 470,92 | 175,88 | 0,11 | 3,73 |
| 0,87 | 1712,18 | 470,86 | 175,91 | 0,11 | 3,64 |
| 0,89 | 1669,71 | 470,80 | 175,93 | 0,12 | 3,55 |
| 0,91 | 1628,11 | 470,73 | 175,95 | 0,12 | 3,46 |
| 0,93 | 1587,57 | 470,67 | 175,97 | 0,12 | 3,37 |
| 0,95 | 1547,59 | 470,61 | 175,99 | 0,13 | 3,29 |
| 0,98 | 1509,09 | 470,55 | 176,02 | 0,13 | 3,21 |
| 1    | 1470,74 | 470,49 | 176,04 | 0,13 | 3,13 |
| 1,02 | 1432,99 | 470,42 | 176,06 | 0,14 | 3,05 |
| 1,04 | 1396,28 | 470,36 | 176,08 | 0,14 | 2,97 |
| 1,07 | 1359,1  | 470,30 | 176,11 | 0,14 | 2,89 |
| 1,09 | 1322,37 | 470,23 | 176,13 | 0,14 | 2,81 |
| 1,11 | 1286,3  | 470,17 | 176,15 | 0,15 | 2,74 |
| 1,14 | 1250,51 | 470,10 | 176,18 | 0,15 | 2,66 |
| 1,16 | 1215,22 | 470,04 | 176,2  | 0,15 | 2,59 |
| 1,19 | 1180,15 | 469,97 | 176,23 | 0,16 | 2,51 |
| 1,21 | 1145,49 | 469,91 | 176,25 | 0,16 | 2,44 |
| 1,23 | 1110,99 | 469,84 | 176,27 | 0,16 | 2,36 |
| 1,26 | 1076,84 | 469,77 | 176,3  | 0,17 | 2,29 |
| 1,28 | 1042,82 | 469,70 | 176,32 | 0,17 | 2,22 |
| 1,31 | 1009,46 | 469,64 | 176,35 | 0,17 | 2,15 |
| 1,33 | 975,94  | 469,57 | 176,37 | 0,18 | 2,08 |
| 1,36 | 942,63  | 469,50 | 176,4  | 0,18 | 2,01 |
| 1,38 | 909,34  | 469,43 | 176,42 | 0,18 | 1,94 |
| 1,41 | 875,64  | 469,36 | 176,45 | 0,19 | 1,87 |
| 1,43 | 841,82  | 469,29 | 176,47 | 0,19 | 1,79 |
| 1,46 | 808,05  | 469,22 | 176,5  | 0,19 | 1,72 |
| 1,49 | 774,07  | 469,15 | 176,53 | 0,20 | 1,65 |
| 1,51 | 740,1   | 469,08 | 176,55 | 0,20 | 1,58 |
| 1,54 | 705,85  | 469,00 | 176,58 | 0,20 | 1,51 |
| 1,56 | 671,53  | 468,93 | 176,6  | 0,21 | 1,43 |
| 1,59 | 636,87  | 468,86 | 176,63 | 0,21 | 1,36 |
| 1,62 | 602,08  | 468,78 | 176,66 | 0,21 | 1,28 |

|      |        |        |        |      |       |
|------|--------|--------|--------|------|-------|
| 1,64 | 566,91 | 468,71 | 176,68 | 0,22 | 1,21  |
| 1,67 | 546,04 | 468,63 | 176,71 | 0,22 | 1,17  |
| 1,7  | 531,18 | 468,56 | 176,74 | 0,22 | 1,13  |
| 1,73 | 516,35 | 468,48 | 176,77 | 0,23 | 1,10  |
| 1,76 | 502,74 | 468,41 | 176,8  | 0,23 | 1,07  |
| 1,78 | 488,86 | 468,33 | 176,82 | 0,24 | 1,04  |
| 1,81 | 475,88 | 468,25 | 176,85 | 0,24 | 1,02  |
| 1,84 | 462,64 | 468,18 | 176,88 | 0,24 | 0,99  |
| 1,87 | 450,24 | 468,10 | 176,91 | 0,25 | 0,96  |
| 1,9  | 437,64 | 468,02 | 176,94 | 0,25 | 0,94  |
| 1,93 | 425,72 | 467,94 | 176,97 | 0,25 | 0,91  |
| 1,96 | 413,56 | 467,86 | 177    | 0,26 | 0,88  |
| 1,99 | 402,77 | 467,78 | 177,03 | 0,26 | 0,86  |
| 2,01 | 391,61 | 467,70 | 177,05 | 0,27 | 0,84  |
| 2,04 | 381,55 | 467,62 | 177,08 | 0,27 | 0,82  |
| 2,07 | 371,09 | 467,54 | 177,11 | 0,27 | 0,79  |
| 2,11 | 362,36 | 467,45 | 177,15 | 0,28 | 0,78  |
| 2,14 | 353,13 | 467,37 | 177,18 | 0,28 | 0,76  |
| 2,17 | 345,52 | 467,29 | 177,21 | 0,29 | 0,74  |
| 2,2  | 337,36 | 467,20 | 177,24 | 0,29 | 0,72  |
| 2,23 | 331,55 | 467,12 | 177,27 | 0,29 | 0,71  |
| 2,26 | 325,08 | -55,40 | 177,3  | 0,30 | -5,87 |
| 2,39 | 304,03 | -55,36 | 177,43 | 0,32 | -5,49 |
| 2,53 | 282,74 | -55,32 | 177,57 | 0,33 | -5,11 |
| 2,66 | 264,87 | -55,27 | 177,7  | 0,35 | -4,79 |
| 2,79 | 246,74 | -55,23 | 177,83 | 0,37 | -4,47 |
| 2,92 | 231,28 | -55,19 | 177,96 | 0,39 | -4,19 |
| 3,06 | 215,6  | -55,15 | 178,1  | 0,40 | -3,91 |
| 3,19 | 202,05 | -55,11 | 178,23 | 0,42 | -3,67 |
| 3,32 | 188,32 | -55,06 | 178,36 | 0,44 | -3,42 |
| 3,45 | 176,33 | -55,02 | 178,49 | 0,46 | -3,20 |
| 3,59 | 164,18 | -54,98 | 178,63 | 0,47 | -2,99 |
| 3,72 | 153,48 | -54,94 | 178,76 | 0,49 | -2,79 |
| 3,85 | 142,63 | -54,90 | 178,89 | 0,51 | -2,60 |
| 3,98 | 133,01 | -54,86 | 179,02 | 0,53 | -2,42 |
| 4,12 | 123,26 | -54,81 | 179,16 | 0,54 | -2,25 |
| 4,25 | 114,58 | -54,77 | 179,29 | 0,56 | -2,09 |
| 4,38 | 105,76 | -54,73 | 179,42 | 0,58 | -1,93 |
| 4,51 | 97,9   | -54,69 | 179,55 | 0,60 | -1,79 |
| 4,65 | 89,91  | -54,65 | 179,69 | 0,61 | -1,65 |
| 4,78 | 82,78  | -54,61 | 179,82 | 0,63 | -1,52 |
| 4,91 | 75,51  | -54,57 | 179,95 | 0,65 | -1,38 |
| 5,04 | 69,04  | -54,53 | 180,08 | 0,67 | -1,27 |
| 5,18 | 62,43  | -54,49 | 180,22 | 0,68 | -1,15 |
| 5,31 | 56,59  | -54,45 | 180,35 | 0,70 | -1,04 |
| 5,44 | 50,59  | -54,41 | 180,48 | 0,72 | -0,93 |
| 5,57 | 45,33  | -54,37 | 180,61 | 0,74 | -0,83 |

|      |       |        |        |      |       |
|------|-------|--------|--------|------|-------|
| 5,71 | 39,91 | -54,33 | 180,75 | 0,75 | -0,73 |
| 5,84 | 35,24 | -54,29 | 180,88 | 0,77 | -0,65 |
| 5,97 | 30,39 | -54,24 | 181,01 | 0,79 | -0,56 |
| 6,1  | 26,3  | -54,20 | 181,14 | 0,81 | -0,49 |
| 6,24 | 22,01 | -54,17 | 181,28 | 0,82 | -0,41 |
| 6,37 | 18,52 | -54,13 | 181,41 | 0,84 | -0,34 |
| 6,5  | 14,81 | -54,09 | 181,54 | 0,86 | -0,27 |
| 6,63 | 11,96 | -54,05 | 181,67 | 0,88 | -0,22 |
| 6,77 | 8,85  | -54,01 | 181,81 | 0,89 | -0,16 |
| 6,9  | 6,69  | -53,97 | 181,94 | 0,91 | -0,12 |
| 7,03 | 4,25  | -53,93 | 182,07 | 0,93 | -0,08 |
| 7,16 | 2,85  | -53,89 | 182,2  | 0,95 | -0,05 |
| 7,3  | 1,12  | -53,85 | 182,34 | 0,96 | -0,02 |
| 7,43 | 0,6   | -53,81 | 182,47 | 0,98 | -0,01 |
| 7,56 | -0,28 | -53,77 | 182,6  | 1,00 | 0,01  |

**Semicírculo de bi-material parede fina com profundidade de entalhe de 5,67.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------|------|------------------------------------------|
| 0     | 11191,4                                   | 517,18                                 | 175,67 | 0,00 | 21,64                                    |
| 0,01  | 10676,2                                   | 517,14                                 | 175,68 | 0,00 | 20,64                                    |
| 0,02  | 10214,2                                   | 517,11                                 | 175,69 | 0,00 | 19,75                                    |
| 0,03  | 9779,14                                   | 517,07                                 | 175,7  | 0,00 | 18,91                                    |
| 0,05  | 9379,41                                   | 517,04                                 | 175,72 | 0,01 | 18,14                                    |
| 0,06  | 8985,42                                   | 517,00                                 | 175,73 | 0,01 | 17,38                                    |
| 0,07  | 8634,67                                   | 516,97                                 | 175,74 | 0,01 | 16,70                                    |
| 0,08  | 8292,58                                   | 516,93                                 | 175,75 | 0,01 | 16,04                                    |
| 0,09  | 7980,47                                   | 516,90                                 | 175,76 | 0,01 | 15,44                                    |
| 0,1   | 7682,65                                   | 516,86                                 | 175,77 | 0,02 | 14,86                                    |
| 0,12  | 7408,22                                   | 516,82                                 | 175,79 | 0,02 | 14,33                                    |
| 0,13  | 7146,08                                   | 516,79                                 | 175,8  | 0,02 | 13,83                                    |
| 0,14  | 6905,94                                   | 516,75                                 | 175,81 | 0,02 | 13,36                                    |
| 0,15  | 6677,47                                   | 516,71                                 | 175,82 | 0,02 | 12,92                                    |
| 0,16  | 6444,46                                   | 516,67                                 | 175,83 | 0,02 | 12,47                                    |
| 0,18  | 6222,67                                   | 516,64                                 | 175,85 | 0,03 | 12,04                                    |
| 0,19  | 6019,72                                   | 516,60                                 | 175,86 | 0,03 | 11,65                                    |
| 0,2   | 5829,02                                   | 516,56                                 | 175,87 | 0,03 | 11,28                                    |
| 0,22  | 5652,46                                   | 516,52                                 | 175,89 | 0,03 | 10,94                                    |
| 0,23  | 5481,01                                   | 516,48                                 | 175,9  | 0,03 | 10,61                                    |
| 0,24  | 5319,69                                   | 516,44                                 | 175,91 | 0,03 | 10,30                                    |
| 0,25  | 5163,69                                   | 516,40                                 | 175,92 | 0,04 | 10,00                                    |
| 0,27  | 5016,28                                   | 516,36                                 | 175,94 | 0,04 | 9,71                                     |
| 0,28  | 4873,67                                   | 516,32                                 | 175,95 | 0,04 | 9,44                                     |
| 0,29  | 4738,55                                   | 516,28                                 | 175,96 | 0,04 | 9,18                                     |
| 0,31  | 4607,6                                    | 516,24                                 | 175,98 | 0,04 | 8,93                                     |
| 0,32  | 4483,07                                   | 516,20                                 | 175,99 | 0,05 | 8,68                                     |
| 0,33  | 4362,26                                   | 516,16                                 | 176    | 0,05 | 8,45                                     |
| 0,35  | 4247,16                                   | 516,12                                 | 176,02 | 0,05 | 8,23                                     |

|      |         |        |        |      |      |
|------|---------|--------|--------|------|------|
| 0,36 | 4135,42 | 516,08 | 176,03 | 0,05 | 8,01 |
| 0,37 | 4029,94 | 516,04 | 176,04 | 0,05 | 7,81 |
| 0,39 | 3922,89 | 515,99 | 176,06 | 0,06 | 7,60 |
| 0,4  | 3822,15 | 515,95 | 176,07 | 0,06 | 7,41 |
| 0,42 | 3726,07 | 515,91 | 176,09 | 0,06 | 7,22 |
| 0,43 | 3632,24 | 515,86 | 176,1  | 0,06 | 7,04 |
| 0,45 | 3541,28 | 515,82 | 176,12 | 0,06 | 6,87 |
| 0,46 | 3453,79 | 515,78 | 176,13 | 0,07 | 6,70 |
| 0,47 | 3368,47 | 515,73 | 176,14 | 0,07 | 6,53 |
| 0,49 | 3286,26 | 515,69 | 176,16 | 0,07 | 6,37 |
| 0,5  | 3205,85 | 515,64 | 176,17 | 0,07 | 6,22 |
| 0,52 | 3128,15 | 515,60 | 176,19 | 0,07 | 6,07 |
| 0,53 | 3052,06 | 515,55 | 176,2  | 0,08 | 5,92 |
| 0,55 | 2978,43 | 515,51 | 176,22 | 0,08 | 5,78 |
| 0,56 | 2906,33 | 515,46 | 176,23 | 0,08 | 5,64 |
| 0,58 | 2837,61 | 515,42 | 176,25 | 0,08 | 5,51 |
| 0,59 | 2767,3  | 515,37 | 176,26 | 0,09 | 5,37 |
| 0,61 | 2699,72 | 515,32 | 176,28 | 0,09 | 5,24 |
| 0,63 | 2635,13 | 515,28 | 176,3  | 0,09 | 5,11 |
| 0,64 | 2570,43 | 515,23 | 176,31 | 0,09 | 4,99 |
| 0,66 | 2507,02 | 515,18 | 176,33 | 0,09 | 4,87 |
| 0,67 | 2445,59 | 515,13 | 176,34 | 0,10 | 4,75 |
| 0,69 | 2384,7  | 515,08 | 176,36 | 0,10 | 4,63 |
| 0,7  | 2326,99 | 515,04 | 176,37 | 0,10 | 4,52 |
| 0,72 | 2267,34 | 514,99 | 176,39 | 0,10 | 4,40 |
| 0,74 | 2208,99 | 514,94 | 176,41 | 0,11 | 4,29 |
| 0,75 | 2153,67 | 514,89 | 176,42 | 0,11 | 4,18 |
| 0,77 | 2096,74 | 514,84 | 176,44 | 0,11 | 4,07 |
| 0,79 | 2040,52 | 514,79 | 176,46 | 0,11 | 3,96 |
| 0,8  | 1985,47 | 514,74 | 176,47 | 0,12 | 3,86 |
| 0,82 | 1930,77 | 514,69 | 176,49 | 0,12 | 3,75 |
| 0,84 | 1876,98 | 514,63 | 176,51 | 0,12 | 3,65 |
| 0,86 | 1823,5  | 514,58 | 176,53 | 0,12 | 3,54 |
| 0,87 | 1770,79 | 514,53 | 176,54 | 0,13 | 3,44 |
| 0,89 | 1718,34 | 514,48 | 176,56 | 0,13 | 3,34 |
| 0,91 | 1666,59 | 514,42 | 176,58 | 0,13 | 3,24 |
| 0,93 | 1615,1  | 514,37 | 176,6  | 0,13 | 3,14 |
| 0,94 | 1565,3  | 514,32 | 176,61 | 0,14 | 3,04 |
| 0,96 | 1513,86 | 514,26 | 176,63 | 0,14 | 2,94 |
| 0,98 | 1463,23 | 514,21 | 176,65 | 0,14 | 2,85 |
| 1    | 1413,55 | 514,15 | 176,67 | 0,14 | 2,75 |
| 1,02 | 1362,66 | 514,10 | 176,69 | 0,15 | 2,65 |
| 1,03 | 1311,6  | 514,04 | 176,7  | 0,15 | 2,55 |
| 1,05 | 1260,65 | 513,99 | 176,72 | 0,15 | 2,45 |
| 1,07 | 1209,43 | 513,93 | 176,74 | 0,15 | 2,35 |
| 1,09 | 1158,35 | 513,88 | 176,76 | 0,16 | 2,25 |
| 1,11 | 1106,9  | 513,82 | 176,78 | 0,16 | 2,15 |

|      |         |        |        |      |       |
|------|---------|--------|--------|------|-------|
| 1,13 | 1055,45 | 513,76 | 176,8  | 0,16 | 2,05  |
| 1,15 | 1003,54 | 513,70 | 176,82 | 0,17 | 1,95  |
| 1,17 | 951,57  | 513,65 | 176,84 | 0,17 | 1,85  |
| 1,19 | 899,12  | 513,59 | 176,86 | 0,17 | 1,75  |
| 1,21 | 853,33  | 513,53 | 176,88 | 0,17 | 1,66  |
| 1,23 | 832,24  | 513,47 | 176,9  | 0,18 | 1,62  |
| 1,25 | 811,9   | 513,41 | 176,92 | 0,18 | 1,58  |
| 1,27 | 793,9   | 513,35 | 176,94 | 0,18 | 1,55  |
| 1,29 | 775,07  | 513,29 | 176,96 | 0,19 | 1,51  |
| 1,31 | 757,87  | 513,23 | 176,98 | 0,19 | 1,48  |
| 1,33 | 740,28  | 513,17 | 177    | 0,19 | 1,44  |
| 1,35 | 723,72  | 513,10 | 177,02 | 0,19 | 1,41  |
| 1,37 | 706,94  | 513,04 | 177,04 | 0,20 | 1,38  |
| 1,39 | 690,61  | 512,98 | 177,06 | 0,20 | 1,35  |
| 1,41 | 674,1   | 512,92 | 177,08 | 0,20 | 1,31  |
| 1,43 | 659,61  | 512,85 | 177,1  | 0,21 | 1,29  |
| 1,45 | 644,52  | 512,79 | 177,12 | 0,21 | 1,26  |
| 1,47 | 630,7   | 512,72 | 177,14 | 0,21 | 1,23  |
| 1,5  | 616,45  | 512,66 | 177,17 | 0,22 | 1,20  |
| 1,52 | 604,7   | 512,59 | 177,19 | 0,22 | 1,18  |
| 1,54 | 592,2   | 512,53 | 177,21 | 0,22 | 1,16  |
| 1,56 | 581,77  | 512,46 | 177,23 | 0,23 | 1,14  |
| 1,58 | 570,69  | 512,40 | 177,25 | 0,23 | 1,11  |
| 1,61 | 562,81  | 512,33 | 177,28 | 0,23 | 1,10  |
| 1,63 | 553,79  | -60,77 | 177,3  | 0,24 | -9,11 |
| 1,76 | 513,93  | -60,72 | 177,43 | 0,25 | -8,46 |
| 1,9  | 473,96  | -60,67 | 177,57 | 0,27 | -7,81 |
| 2,03 | 441,59  | -60,63 | 177,7  | 0,29 | -7,28 |
| 2,16 | 408,8   | -60,58 | 177,83 | 0,31 | -6,75 |
| 2,29 | 381,61  | -60,53 | 177,96 | 0,33 | -6,30 |
| 2,43 | 354,08  | -60,49 | 178,1  | 0,35 | -5,85 |
| 2,56 | 330,79  | -60,44 | 178,23 | 0,37 | -5,47 |
| 2,69 | 307,22  | -60,40 | 178,36 | 0,39 | -5,09 |
| 2,82 | 286,96  | -60,35 | 178,49 | 0,41 | -4,75 |
| 2,96 | 266,47  | -60,30 | 178,63 | 0,43 | -4,42 |
| 3,09 | 248,65  | -60,26 | 178,76 | 0,45 | -4,13 |
| 3,22 | 230,61  | -60,21 | 178,89 | 0,46 | -3,83 |
| 3,35 | 214,78  | -60,17 | 179,02 | 0,48 | -3,57 |
| 3,49 | 198,74  | -60,12 | 179,16 | 0,50 | -3,31 |
| 3,62 | 184,57  | -60,08 | 179,29 | 0,52 | -3,07 |
| 3,75 | 170,2   | -60,03 | 179,42 | 0,54 | -2,84 |
| 3,88 | 157,45  | -59,99 | 179,55 | 0,56 | -2,62 |
| 4,02 | 144,5   | -59,94 | 179,69 | 0,58 | -2,41 |
| 4,15 | 132,99  | -59,90 | 179,82 | 0,60 | -2,22 |
| 4,28 | 121,28  | -59,85 | 179,95 | 0,62 | -2,03 |
| 4,41 | 110,87  | -59,81 | 180,08 | 0,64 | -1,85 |
| 4,55 | 100,26  | -59,76 | 180,22 | 0,66 | -1,68 |

|      |       |        |        |      |       |
|------|-------|--------|--------|------|-------|
| 4,68 | 90,88 | -59,72 | 180,35 | 0,67 | -1,52 |
| 4,81 | 81,27 | -59,67 | 180,48 | 0,69 | -1,36 |
| 4,94 | 72,84 | -59,63 | 180,61 | 0,71 | -1,22 |
| 5,08 | 64,17 | -59,59 | 180,75 | 0,73 | -1,08 |
| 5,21 | 56,67 | -59,54 | 180,88 | 0,75 | -0,95 |
| 5,34 | 48,9  | -59,50 | 181,01 | 0,77 | -0,82 |
| 5,47 | 42,34 | -59,45 | 181,14 | 0,79 | -0,71 |
| 5,61 | 35,46 | -59,41 | 181,28 | 0,81 | -0,60 |
| 5,74 | 29,85 | -59,37 | 181,41 | 0,83 | -0,50 |
| 5,87 | 23,89 | -59,32 | 181,54 | 0,85 | -0,40 |
| 6    | 19,3  | -59,28 | 181,67 | 0,87 | -0,33 |
| 6,14 | 14,3  | -59,24 | 181,81 | 0,89 | -0,24 |
| 6,27 | 10,81 | -59,19 | 181,94 | 0,90 | -0,18 |
| 6,4  | 6,86  | -59,15 | 182,07 | 0,92 | -0,12 |
| 6,53 | 4,6   | -59,11 | 182,2  | 0,94 | -0,08 |
| 6,67 | 1,8   | -59,06 | 182,34 | 0,96 | -0,03 |
| 6,8  | 0,97  | -59,02 | 182,47 | 0,98 | -0,02 |
| 6,93 | -0,45 | -58,98 | 182,6  | 1,00 | 0,01  |

**Semicírculo de bi-material parede fina com profundidade de entalhe de 6,30.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------|------|------------------------------------------|
| 0     | 14798                                     | 569,86                                 | 176,3  | 0,00 | 25,97                                    |
| 0,01  | 14358,5                                   | 569,83                                 | 176,31 | 0,00 | 25,20                                    |
| 0,01  | 13954,1                                   | 569,81                                 | 176,31 | 0,00 | 24,49                                    |
| 0,02  | 13566,2                                   | 569,79                                 | 176,32 | 0,00 | 23,81                                    |
| 0,03  | 13195                                     | 569,76                                 | 176,33 | 0,00 | 23,16                                    |
| 0,04  | 12810,9                                   | 569,74                                 | 176,34 | 0,01 | 22,49                                    |
| 0,04  | 12464,9                                   | 569,72                                 | 176,34 | 0,01 | 21,88                                    |
| 0,05  | 12125                                     | 569,69                                 | 176,35 | 0,01 | 21,28                                    |
| 0,06  | 11803,5                                   | 569,67                                 | 176,36 | 0,01 | 20,72                                    |
| 0,06  | 11489,7                                   | 569,64                                 | 176,36 | 0,01 | 20,17                                    |
| 0,07  | 11193,8                                   | 569,62                                 | 176,37 | 0,01 | 19,65                                    |
| 0,08  | 10906,5                                   | 569,59                                 | 176,38 | 0,01 | 19,15                                    |
| 0,09  | 10639,3                                   | 569,57                                 | 176,39 | 0,01 | 18,68                                    |
| 0,09  | 10379,9                                   | 569,54                                 | 176,39 | 0,01 | 18,22                                    |
| 0,1   | 10086,5                                   | 569,52                                 | 176,4  | 0,02 | 17,71                                    |
| 0,11  | 9820,55                                   | 569,49                                 | 176,41 | 0,02 | 17,24                                    |
| 0,12  | 9559,99                                   | 569,47                                 | 176,42 | 0,02 | 16,79                                    |
| 0,12  | 9316,15                                   | 569,44                                 | 176,42 | 0,02 | 16,36                                    |
| 0,13  | 9091,84                                   | 569,42                                 | 176,43 | 0,02 | 15,97                                    |
| 0,14  | 8869,64                                   | 569,39                                 | 176,44 | 0,02 | 15,58                                    |
| 0,15  | 8659,25                                   | 569,36                                 | 176,45 | 0,02 | 15,21                                    |
| 0,16  | 8452,74                                   | 569,34                                 | 176,46 | 0,02 | 14,85                                    |
| 0,16  | 8255,34                                   | 569,31                                 | 176,46 | 0,03 | 14,50                                    |
| 0,17  | 8061,84                                   | 569,28                                 | 176,47 | 0,03 | 14,16                                    |
| 0,18  | 7876,45                                   | 569,26                                 | 176,48 | 0,03 | 13,84                                    |
| 0,19  | 7694,58                                   | 569,23                                 | 176,49 | 0,03 | 13,52                                    |

|      |         |        |        |      |       |
|------|---------|--------|--------|------|-------|
| 0,2  | 7519,74 | 569,20 | 176,5  | 0,03 | 13,21 |
| 0,2  | 7348,07 | 569,17 | 176,5  | 0,03 | 12,91 |
| 0,21 | 7182,9  | 569,15 | 176,51 | 0,03 | 12,62 |
| 0,22 | 7020,64 | 569,12 | 176,52 | 0,04 | 12,34 |
| 0,23 | 6867,59 | 569,09 | 176,53 | 0,04 | 12,07 |
| 0,24 | 6702,4  | 569,06 | 176,54 | 0,04 | 11,78 |
| 0,25 | 6549,85 | 569,03 | 176,55 | 0,04 | 11,51 |
| 0,26 | 6406,71 | 569,00 | 176,56 | 0,04 | 11,26 |
| 0,26 | 6264,25 | 568,98 | 176,56 | 0,04 | 11,01 |
| 0,27 | 6125,76 | 568,95 | 176,57 | 0,04 | 10,77 |
| 0,28 | 5992,12 | 568,92 | 176,58 | 0,04 | 10,53 |
| 0,29 | 5861,26 | 568,89 | 176,59 | 0,05 | 10,30 |
| 0,3  | 5734,88 | 568,86 | 176,6  | 0,05 | 10,08 |
| 0,31 | 5610,53 | 568,83 | 176,61 | 0,05 | 9,86  |
| 0,32 | 5490,09 | 568,80 | 176,62 | 0,05 | 9,65  |
| 0,33 | 5371,42 | 568,77 | 176,63 | 0,05 | 9,44  |
| 0,34 | 5256,35 | 568,74 | 176,64 | 0,05 | 9,24  |
| 0,35 | 5142,94 | 568,71 | 176,65 | 0,05 | 9,04  |
| 0,35 | 5037,51 | 568,67 | 176,65 | 0,06 | 8,86  |
| 0,36 | 4920,12 | 568,64 | 176,66 | 0,06 | 8,65  |
| 0,37 | 4809,7  | 568,61 | 176,67 | 0,06 | 8,46  |
| 0,38 | 4709,2  | 568,58 | 176,68 | 0,06 | 8,28  |
| 0,39 | 4605,83 | 568,55 | 176,69 | 0,06 | 8,10  |
| 0,4  | 4504,62 | 568,52 | 176,7  | 0,06 | 7,92  |
| 0,41 | 4407,51 | 568,48 | 176,71 | 0,07 | 7,75  |
| 0,42 | 4309,48 | 568,45 | 176,72 | 0,07 | 7,58  |
| 0,43 | 4222,13 | 568,42 | 176,73 | 0,07 | 7,43  |
| 0,44 | 4120,83 | 568,38 | 176,74 | 0,07 | 7,25  |
| 0,45 | 4023,22 | 568,35 | 176,75 | 0,07 | 7,08  |
| 0,46 | 3936,22 | 568,32 | 176,76 | 0,07 | 6,93  |
| 0,47 | 3842,52 | 568,28 | 176,77 | 0,08 | 6,76  |
| 0,48 | 3751,1  | 568,25 | 176,78 | 0,08 | 6,60  |
| 0,49 | 3662,29 | 568,22 | 176,79 | 0,08 | 6,45  |
| 0,5  | 3573,79 | 568,18 | 176,8  | 0,08 | 6,29  |
| 0,51 | 3486,91 | 568,15 | 176,81 | 0,08 | 6,14  |
| 0,52 | 3400,45 | 568,11 | 176,82 | 0,08 | 5,99  |
| 0,54 | 3315,54 | 568,08 | 176,84 | 0,08 | 5,84  |
| 0,55 | 3231,06 | 568,04 | 176,85 | 0,09 | 5,69  |
| 0,56 | 3148,12 | 568,00 | 176,86 | 0,09 | 5,54  |
| 0,57 | 3065,64 | 567,97 | 176,87 | 0,09 | 5,40  |
| 0,58 | 2990,01 | 567,93 | 176,88 | 0,09 | 5,26  |
| 0,59 | 2902,98 | 567,90 | 176,89 | 0,09 | 5,11  |
| 0,6  | 2819,22 | 567,86 | 176,9  | 0,10 | 4,96  |
| 0,61 | 2742,46 | 567,82 | 176,91 | 0,10 | 4,83  |
| 0,62 | 2661    | 567,78 | 176,92 | 0,10 | 4,69  |
| 0,63 | 2579,38 | 567,75 | 176,93 | 0,10 | 4,54  |
| 0,65 | 2497,82 | 567,71 | 176,95 | 0,10 | 4,40  |

|      |         |        |        |      |        |
|------|---------|--------|--------|------|--------|
| 0,66 | 2416,06 | 567,67 | 176,96 | 0,10 | 4,26   |
| 0,67 | 2334,76 | 567,63 | 176,97 | 0,11 | 4,11   |
| 0,68 | 2253,02 | 567,59 | 176,98 | 0,11 | 3,97   |
| 0,69 | 2171,62 | 567,56 | 176,99 | 0,11 | 3,83   |
| 0,7  | 2089,69 | 567,52 | 177    | 0,11 | 3,68   |
| 0,72 | 2008,09 | 567,48 | 177,02 | 0,11 | 3,54   |
| 0,73 | 1925,89 | 567,44 | 177,03 | 0,12 | 3,39   |
| 0,74 | 1846,6  | 567,40 | 177,04 | 0,12 | 3,25   |
| 0,75 | 1762,11 | 567,36 | 177,05 | 0,12 | 3,11   |
| 0,76 | 1678,26 | 567,32 | 177,06 | 0,12 | 2,96   |
| 0,78 | 1596,39 | 567,28 | 177,08 | 0,12 | 2,81   |
| 0,79 | 1510,52 | 567,24 | 177,09 | 0,13 | 2,66   |
| 0,8  | 1423,59 | 567,19 | 177,1  | 0,13 | 2,51   |
| 0,81 | 1335,91 | 567,15 | 177,11 | 0,13 | 2,36   |
| 0,83 | 1247,5  | 567,11 | 177,13 | 0,13 | 2,20   |
| 0,84 | 1199,63 | 567,07 | 177,14 | 0,13 | 2,12   |
| 0,85 | 1177,34 | 567,03 | 177,15 | 0,14 | 2,08   |
| 0,87 | 1156,04 | 566,98 | 177,17 | 0,14 | 2,04   |
| 0,88 | 1138,19 | 566,94 | 177,18 | 0,14 | 2,01   |
| 0,89 | 1118,79 | 566,90 | 177,19 | 0,14 | 1,97   |
| 0,9  | 1100,13 | 566,85 | 177,2  | 0,14 | 1,94   |
| 0,92 | 1081,8  | 566,81 | 177,22 | 0,15 | 1,91   |
| 0,93 | 1067,34 | 566,77 | 177,23 | 0,15 | 1,88   |
| 0,94 | 1051,27 | 566,72 | 177,24 | 0,15 | 1,86   |
| 0,96 | 1037,12 | 566,68 | 177,26 | 0,15 | 1,83   |
| 0,97 | 1022,83 | 566,63 | 177,27 | 0,15 | 1,81   |
| 0,99 | 1012,7  | 566,59 | 177,29 | 0,16 | 1,79   |
| 1    | 1000,02 | -67,21 | 177,3  | 0,16 | -14,88 |
| 1,13 | 914,92  | -67,15 | 177,43 | 0,18 | -13,62 |
| 1,27 | 831,06  | -67,10 | 177,57 | 0,20 | -12,38 |
| 1,4  | 766,88  | -67,05 | 177,7  | 0,22 | -11,44 |
| 1,53 | 702,35  | -67,00 | 177,83 | 0,24 | -10,48 |
| 1,66 | 651,04  | -66,95 | 177,96 | 0,26 | -9,72  |
| 1,8  | 599,38  | -66,90 | 178,1  | 0,28 | -8,96  |
| 1,93 | 557,02  | -66,85 | 178,23 | 0,31 | -8,33  |
| 2,06 | 514,38  | -66,80 | 178,36 | 0,33 | -7,70  |
| 2,19 | 478,57  | -66,75 | 178,49 | 0,35 | -7,17  |
| 2,33 | 442,52  | -66,69 | 178,63 | 0,37 | -6,64  |
| 2,46 | 411,69  | -66,64 | 178,76 | 0,39 | -6,18  |
| 2,59 | 380,64  | -66,59 | 178,89 | 0,41 | -5,72  |
| 2,72 | 353,71  | -66,54 | 179,02 | 0,43 | -5,32  |
| 2,86 | 326,56  | -66,49 | 179,16 | 0,45 | -4,91  |
| 2,99 | 302,78  | -66,44 | 179,29 | 0,47 | -4,56  |
| 3,12 | 278,76  | -66,39 | 179,42 | 0,50 | -4,20  |
| 3,25 | 257,58  | -66,34 | 179,55 | 0,52 | -3,88  |
| 3,39 | 236,15  | -66,29 | 179,69 | 0,54 | -3,56  |
| 3,52 | 217,17  | -66,24 | 179,82 | 0,56 | -3,28  |

|      |        |        |        |      |       |
|------|--------|--------|--------|------|-------|
| 3,65 | 197,93 | -66,19 | 179,95 | 0,58 | -2,99 |
| 3,78 | 180,87 | -66,15 | 180,08 | 0,60 | -2,73 |
| 3,92 | 163,53 | -66,10 | 180,22 | 0,62 | -2,47 |
| 4,05 | 148,2  | -66,05 | 180,35 | 0,64 | -2,24 |
| 4,18 | 132,54 | -66,00 | 180,48 | 0,66 | -2,01 |
| 4,31 | 118,8  | -65,95 | 180,61 | 0,68 | -1,80 |
| 4,45 | 104,7  | -65,90 | 180,75 | 0,71 | -1,59 |
| 4,58 | 92,49  | -65,85 | 180,88 | 0,73 | -1,40 |
| 4,71 | 79,86  | -65,80 | 181,01 | 0,75 | -1,21 |
| 4,84 | 69,15  | -65,75 | 181,14 | 0,77 | -1,05 |
| 4,98 | 57,97  | -65,71 | 181,28 | 0,79 | -0,88 |
| 5,11 | 48,81  | -65,66 | 181,41 | 0,81 | -0,74 |
| 5,24 | 39,1   | -65,61 | 181,54 | 0,83 | -0,60 |
| 5,37 | 31,57  | -65,56 | 181,67 | 0,85 | -0,48 |
| 5,51 | 23,41  | -65,51 | 181,81 | 0,87 | -0,36 |
| 5,64 | 17,68  | -65,47 | 181,94 | 0,89 | -0,27 |
| 5,77 | 11,2   | -65,42 | 182,07 | 0,92 | -0,17 |
| 5,9  | 7,49   | -65,37 | 182,2  | 0,94 | -0,11 |
| 6,04 | 2,89   | -65,32 | 182,34 | 0,96 | -0,04 |
| 6,17 | 1,56   | -65,27 | 182,47 | 0,98 | -0,02 |
| 6,3  | -0,76  | -65,23 | 182,6  | 1,00 | 0,01  |

**Semicírculo de bi-material parede fina com profundidade de entalhe de 6,93.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------|------|------------------------------------------|
| 0     | 40416,5                                   | 177,56                                 | 163,07 | 0,00 | 227,62                                   |
| 0,01  | 26978,9                                   | 177,54                                 | 163,08 | 0,00 | 151,96                                   |
| 0,03  | 23008,6                                   | 177,53                                 | 163,1  | 0,00 | 129,61                                   |
| 0,04  | 19944,5                                   | 177,51                                 | 163,11 | 0,01 | 112,36                                   |
| 0,05  | 17687,4                                   | 177,50                                 | 163,12 | 0,01 | 99,65                                    |
| 0,07  | 16075,3                                   | 177,48                                 | 163,14 | 0,01 | 90,58                                    |
| 0,08  | 14825,1                                   | 177,46                                 | 163,15 | 0,01 | 83,54                                    |
| 0,1   | 13754,4                                   | 177,44                                 | 163,17 | 0,02 | 77,52                                    |
| 0,12  | 12858,6                                   | 177,42                                 | 163,19 | 0,02 | 72,48                                    |
| 0,13  | 11906,1                                   | 177,40                                 | 163,2  | 0,02 | 67,11                                    |
| 0,15  | 11010,3                                   | 177,38                                 | 163,22 | 0,03 | 62,07                                    |
| 0,17  | 10189                                     | 177,36                                 | 163,24 | 0,03 | 57,45                                    |
| 0,19  | 9470,81                                   | 177,33                                 | 163,26 | 0,03 | 53,41                                    |
| 0,21  | 8755,05                                   | 177,31                                 | 163,28 | 0,04 | 49,38                                    |
| 0,23  | 8034,59                                   | 177,28                                 | 163,3  | 0,04 | 45,32                                    |
| 0,25  | 7297,75                                   | 177,26                                 | 163,32 | 0,04 | 41,17                                    |
| 0,27  | 6579,06                                   | 177,23                                 | 163,34 | 0,05 | 37,12                                    |
| 0,3   | 5817,81                                   | 177,20                                 | 163,37 | 0,05 | 32,83                                    |
| 0,32  | 5038,4                                    | 177,17                                 | 163,39 | 0,06 | 28,44                                    |
| 0,34  | 4175,85                                   | 177,14                                 | 163,41 | 0,06 | 23,57                                    |
| 0,37  | 2312,74                                   | -21,01                                 | 163,44 | 0,07 | -110,08                                  |
| 0,5   | 1895,61                                   | -20,99                                 | 163,57 | 0,09 | -90,31                                   |
| 0,64  | 1640,74                                   | -20,97                                 | 163,71 | 0,11 | -78,23                                   |

|      |         |        |        |      |        |
|------|---------|--------|--------|------|--------|
| 0,77 | 1482,47 | -20,95 | 163,84 | 0,14 | -70,75 |
| 0,9  | 1326,08 | -20,93 | 163,97 | 0,16 | -63,34 |
| 1,03 | 1211,48 | -20,92 | 164,1  | 0,18 | -57,92 |
| 1,17 | 1099,05 | -20,90 | 164,24 | 0,21 | -52,59 |
| 1,3  | 1011,19 | -20,88 | 164,37 | 0,23 | -48,43 |
| 1,43 | 924,46  | -20,86 | 164,5  | 0,25 | -44,32 |
| 1,56 | 853,93  | -20,84 | 164,63 | 0,28 | -40,97 |
| 1,7  | 784     | -20,82 | 164,77 | 0,30 | -37,65 |
| 1,83 | 725,53  | -20,80 | 164,9  | 0,32 | -34,87 |
| 1,96 | 667,35  | -20,79 | 165,03 | 0,35 | -32,11 |
| 2,09 | 617,72  | -20,77 | 165,16 | 0,37 | -29,74 |
| 2,23 | 568,19  | -20,75 | 165,3  | 0,39 | -27,38 |
| 2,36 | 525,3   | -20,73 | 165,43 | 0,42 | -25,34 |
| 2,49 | 482,36  | -20,71 | 165,56 | 0,44 | -23,29 |
| 2,62 | 444,79  | -20,70 | 165,69 | 0,46 | -21,49 |
| 2,76 | 407,07  | -20,68 | 165,83 | 0,49 | -19,69 |
| 2,89 | 373,82  | -20,66 | 165,96 | 0,51 | -18,09 |
| 3,02 | 340,34  | -20,64 | 166,09 | 0,53 | -16,49 |
| 3,15 | 310,73  | -20,62 | 166,22 | 0,56 | -15,07 |
| 3,29 | 280,8   | -20,60 | 166,36 | 0,58 | -13,63 |
| 3,42 | 254,35  | -20,59 | 166,49 | 0,60 | -12,35 |
| 3,55 | 227,49  | -20,57 | 166,62 | 0,63 | -11,06 |
| 3,68 | 203,88  | -20,55 | 166,75 | 0,65 | -9,92  |
| 3,82 | 179,76  | -20,53 | 166,89 | 0,67 | -8,75  |
| 3,95 | 158,8   | -20,52 | 167,02 | 0,70 | -7,74  |
| 4,08 | 137,23  | -20,50 | 167,15 | 0,72 | -6,69  |
| 4,21 | 118,85  | -20,48 | 167,28 | 0,74 | -5,80  |
| 4,35 | 99,74   | -20,46 | 167,42 | 0,77 | -4,87  |
| 4,48 | 83,98   | -20,45 | 167,55 | 0,79 | -4,11  |
| 4,61 | 67,34   | -20,43 | 167,68 | 0,81 | -3,30  |
| 4,74 | 54,36   | -20,41 | 167,81 | 0,84 | -2,66  |
| 4,88 | 40,32   | -20,39 | 167,95 | 0,86 | -1,98  |
| 5,01 | 30,41   | -20,38 | 168,08 | 0,88 | -1,49  |
| 5,14 | 19,22   | -20,36 | 168,21 | 0,91 | -0,94  |
| 5,27 | 12,81   | -20,34 | 168,34 | 0,93 | -0,63  |
| 5,41 | 4,84    | -20,32 | 168,48 | 0,95 | -0,24  |
| 5,54 | 2,61    | -20,31 | 168,61 | 0,98 | -0,13  |
| 5,67 | -1,35   | -20,29 | 168,74 | 1,00 | 0,07   |

**Semicírculo de bi-material parede espessa com profundidade de entalhe de 4,42.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 1532,99                                   | 174,42 | 128,71                                 | 0,00 | 11,91                                    |
| 0,04  | 1292,51                                   | 174,46 | 128,67                                 | 0,00 | 10,04                                    |
| 0,09  | 1123,09                                   | 174,51 | 128,64                                 | 0,00 | 8,73                                     |
| 0,14  | 986,57                                    | 174,56 | 128,60                                 | 0,00 | 7,67                                     |
| 0,18  | 886,59                                    | 174,60 | 128,56                                 | 0,01 | 6,90                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 0,23 | 803,07 | 174,65 | 128,52 | 0,01 | 6,25 |
| 0,27 | 737,94 | 174,69 | 128,48 | 0,01 | 5,74 |
| 0,32 | 683,34 | 174,74 | 128,44 | 0,01 | 5,32 |
| 0,36 | 637,68 | 174,78 | 128,40 | 0,01 | 4,97 |
| 0,41 | 599,22 | 174,83 | 128,37 | 0,01 | 4,67 |
| 0,46 | 566,24 | 174,88 | 128,33 | 0,02 | 4,41 |
| 0,50 | 537,58 | 174,92 | 128,29 | 0,02 | 4,19 |
| 0,55 | 512,53 | 174,97 | 128,25 | 0,02 | 4,00 |
| 0,59 | 490,50 | 175,01 | 128,21 | 0,02 | 3,83 |
| 0,64 | 470,87 | 175,06 | 128,17 | 0,02 | 3,67 |
| 0,69 | 453,38 | 175,11 | 128,13 | 0,02 | 3,54 |
| 0,73 | 437,59 | 175,15 | 128,09 | 0,02 | 3,42 |
| 0,78 | 423,38 | 175,20 | 128,05 | 0,03 | 3,31 |
| 0,83 | 410,39 | 175,25 | 128,01 | 0,03 | 3,21 |
| 0,88 | 398,61 | 175,30 | 127,97 | 0,03 | 3,11 |
| 0,92 | 387,73 | 175,34 | 127,93 | 0,03 | 3,03 |
| 0,97 | 377,79 | 175,39 | 127,89 | 0,03 | 2,95 |
| 1,02 | 368,54 | 175,44 | 127,85 | 0,03 | 2,88 |
| 1,07 | 360,04 | 175,49 | 127,81 | 0,04 | 2,82 |
| 1,11 | 352,07 | 175,53 | 127,77 | 0,04 | 2,76 |
| 1,16 | 344,72 | 175,58 | 127,73 | 0,04 | 2,70 |
| 1,21 | 337,78 | 175,63 | 127,69 | 0,04 | 2,65 |
| 1,26 | 331,35 | 175,68 | 127,65 | 0,04 | 2,60 |
| 1,31 | 325,24 | 175,73 | 127,61 | 0,04 | 2,55 |
| 1,36 | 319,55 | 175,78 | 127,57 | 0,05 | 2,50 |
| 1,41 | 314,14 | 175,83 | 127,53 | 0,05 | 2,46 |
| 1,46 | 309,08 | 175,88 | 127,49 | 0,05 | 2,42 |
| 1,50 | 304,23 | 175,92 | 127,45 | 0,05 | 2,39 |
| 1,55 | 299,69 | 175,97 | 127,41 | 0,05 | 2,35 |
| 1,60 | 295,34 | 176,02 | 127,36 | 0,05 | 2,32 |
| 1,65 | 291,24 | 176,07 | 127,32 | 0,06 | 2,29 |
| 1,70 | 287,30 | 176,12 | 127,28 | 0,06 | 2,26 |
| 1,75 | 283,59 | 176,17 | 127,24 | 0,06 | 2,23 |
| 1,80 | 280,01 | 176,22 | 127,20 | 0,06 | 2,20 |
| 1,85 | 276,62 | 176,27 | 127,16 | 0,06 | 2,18 |
| 1,90 | 273,35 | 176,32 | 127,12 | 0,06 | 2,15 |
| 1,95 | 270,24 | 176,37 | 127,07 | 0,07 | 2,13 |
| 2,00 | 267,23 | 176,42 | 127,03 | 0,07 | 2,10 |
| 2,05 | 264,37 | 176,47 | 126,99 | 0,07 | 2,08 |
| 2,11 | 261,59 | 176,53 | 126,95 | 0,07 | 2,06 |
| 2,16 | 258,95 | 176,58 | 126,91 | 0,07 | 2,04 |
| 2,21 | 256,39 | 176,63 | 126,87 | 0,07 | 2,02 |
| 2,26 | 253,94 | 176,68 | 126,82 | 0,08 | 2,00 |
| 2,31 | 251,56 | 176,73 | 126,78 | 0,08 | 1,98 |
| 2,36 | 249,28 | 176,78 | 126,74 | 0,08 | 1,97 |
| 2,41 | 247,06 | 176,83 | 126,70 | 0,08 | 1,95 |
| 2,47 | 244,94 | 176,89 | 126,65 | 0,08 | 1,93 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 2,52 | 242,86 | 176,94 | 126,61 | 0,09 | 1,92 |
| 2,57 | 240,88 | 176,99 | 126,57 | 0,09 | 1,90 |
| 2,62 | 238,94 | 177,04 | 126,53 | 0,09 | 1,89 |
| 2,68 | 237,08 | 177,10 | 126,48 | 0,09 | 1,87 |
| 2,73 | 235,26 | 177,15 | 126,44 | 0,09 | 1,86 |
| 2,78 | 233,51 | 177,20 | 126,40 | 0,09 | 1,85 |
| 2,83 | 231,79 | 177,25 | 126,35 | 0,10 | 1,83 |
| 2,89 | 230,14 | 177,31 | 126,31 | 0,10 | 1,82 |
| 2,94 | 228,53 | 177,36 | 126,27 | 0,10 | 1,81 |
| 2,99 | 226,97 | 177,41 | 126,22 | 0,10 | 1,80 |
| 3,05 | 225,44 | 177,47 | 126,18 | 0,10 | 1,79 |
| 3,10 | 223,97 | 177,52 | 126,14 | 0,10 | 1,78 |
| 3,16 | 222,52 | 177,58 | 126,09 | 0,11 | 1,76 |
| 3,21 | 221,12 | 177,63 | 126,05 | 0,11 | 1,75 |
| 3,26 | 219,75 | 177,68 | 126,01 | 0,11 | 1,74 |
| 3,32 | 218,43 | 177,74 | 125,96 | 0,11 | 1,73 |
| 3,37 | 217,12 | 177,79 | 125,92 | 0,11 | 1,72 |
| 3,43 | 215,86 | 177,85 | 125,87 | 0,12 | 1,71 |
| 3,48 | 214,62 | 177,90 | 125,83 | 0,12 | 1,71 |
| 3,54 | 213,42 | 177,96 | 125,79 | 0,12 | 1,70 |
| 3,59 | 212,23 | 178,01 | 125,74 | 0,12 | 1,69 |
| 3,65 | 211,09 | 178,07 | 125,70 | 0,12 | 1,68 |
| 3,70 | 209,96 | 178,12 | 125,65 | 0,13 | 1,67 |
| 3,76 | 208,86 | 178,18 | 125,61 | 0,13 | 1,66 |
| 3,82 | 207,78 | 178,24 | 125,56 | 0,13 | 1,65 |
| 3,87 | 206,73 | 178,29 | 125,52 | 0,13 | 1,65 |
| 3,93 | 205,69 | 178,35 | 125,47 | 0,13 | 1,64 |
| 3,98 | 204,68 | 178,40 | 125,43 | 0,13 | 1,63 |
| 4,04 | 203,69 | 178,46 | 125,38 | 0,14 | 1,62 |
| 4,10 | 202,73 | 178,52 | 125,34 | 0,14 | 1,62 |
| 4,15 | 201,77 | 178,57 | 125,29 | 0,14 | 1,61 |
| 4,21 | 200,84 | 178,63 | 125,25 | 0,14 | 1,60 |
| 4,27 | 199,93 | 178,69 | 125,20 | 0,14 | 1,60 |
| 4,33 | 199,03 | 178,75 | 125,16 | 0,15 | 1,59 |
| 4,38 | 198,15 | 178,80 | 125,11 | 0,15 | 1,58 |
| 4,44 | 197,29 | 178,86 | 125,07 | 0,15 | 1,58 |
| 4,50 | 196,44 | 178,92 | 125,02 | 0,15 | 1,57 |
| 4,56 | 195,61 | 178,98 | 124,97 | 0,15 | 1,57 |
| 4,62 | 194,79 | 179,04 | 124,93 | 0,16 | 1,56 |
| 4,67 | 193,98 | 179,09 | 124,88 | 0,16 | 1,55 |
| 4,73 | 193,19 | 179,15 | 124,84 | 0,16 | 1,55 |
| 4,79 | 192,41 | 179,21 | 124,79 | 0,16 | 1,54 |
| 4,85 | 191,65 | 179,27 | 124,74 | 0,16 | 1,54 |
| 4,91 | 190,89 | 179,33 | 124,70 | 0,17 | 1,53 |
| 4,97 | 190,15 | 179,39 | 124,65 | 0,17 | 1,53 |
| 5,03 | 189,42 | 179,45 | 124,60 | 0,17 | 1,52 |
| 5,09 | 188,70 | 179,51 | 124,56 | 0,17 | 1,51 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 5,15 | 188,00 | 179,57 | 124,51 | 0,17 | 1,51 |
| 5,21 | 187,30 | 179,63 | 124,46 | 0,18 | 1,50 |
| 5,27 | 186,61 | 179,69 | 124,42 | 0,18 | 1,50 |
| 5,33 | 185,93 | 179,75 | 124,37 | 0,18 | 1,49 |
| 5,39 | 185,27 | 179,81 | 124,32 | 0,18 | 1,49 |
| 5,45 | 184,60 | 179,87 | 124,28 | 0,18 | 1,49 |
| 5,51 | 183,96 | 179,93 | 124,23 | 0,19 | 1,48 |
| 5,57 | 183,31 | 179,99 | 124,18 | 0,19 | 1,48 |
| 5,63 | 182,68 | 180,05 | 124,13 | 0,19 | 1,47 |
| 5,69 | 182,05 | 180,11 | 124,09 | 0,19 | 1,47 |
| 5,75 | 181,44 | 180,17 | 124,04 | 0,19 | 1,46 |
| 5,82 | 180,82 | 180,24 | 123,99 | 0,20 | 1,46 |
| 5,88 | 180,22 | 180,30 | 123,94 | 0,20 | 1,45 |
| 5,94 | 179,63 | 180,36 | 123,90 | 0,20 | 1,45 |
| 6,00 | 179,04 | 180,42 | 123,85 | 0,20 | 1,45 |
| 6,06 | 178,45 | 180,48 | 123,80 | 0,21 | 1,44 |
| 6,13 | 177,88 | 180,55 | 123,75 | 0,21 | 1,44 |
| 6,19 | 177,31 | 180,61 | 123,70 | 0,21 | 1,43 |
| 6,25 | 176,75 | 180,67 | 123,66 | 0,21 | 1,43 |
| 6,32 | 176,19 | 180,74 | 123,61 | 0,21 | 1,43 |
| 6,38 | 175,64 | 180,80 | 123,56 | 0,22 | 1,42 |
| 6,44 | 175,09 | 180,86 | 123,51 | 0,22 | 1,42 |
| 6,51 | 174,55 | 180,93 | 123,46 | 0,22 | 1,41 |
| 6,57 | 174,01 | 180,99 | 123,41 | 0,22 | 1,41 |
| 6,63 | 173,48 | 181,05 | 123,36 | 0,22 | 1,41 |
| 6,70 | 172,95 | 181,12 | 123,31 | 0,23 | 1,40 |
| 6,76 | 172,43 | 181,18 | 123,27 | 0,23 | 1,40 |
| 6,83 | 171,91 | 181,25 | 123,22 | 0,23 | 1,40 |
| 6,89 | 171,40 | 181,31 | 123,17 | 0,23 | 1,39 |
| 6,96 | 170,89 | 181,38 | 123,12 | 0,24 | 1,39 |
| 7,02 | 170,38 | 181,44 | 123,07 | 0,24 | 1,38 |
| 7,09 | 169,88 | 181,51 | 123,02 | 0,24 | 1,38 |
| 7,15 | 169,38 | 181,57 | 122,97 | 0,24 | 1,38 |
| 7,22 | 168,89 | 181,64 | 122,92 | 0,24 | 1,37 |
| 7,29 | 168,40 | 181,71 | 122,87 | 0,25 | 1,37 |
| 7,35 | 167,91 | 181,77 | 122,82 | 0,25 | 1,37 |
| 7,42 | 167,43 | 181,84 | 122,77 | 0,25 | 1,36 |
| 7,48 | 166,94 | 181,90 | 122,72 | 0,25 | 1,36 |
| 7,55 | 166,46 | 181,97 | 122,67 | 0,26 | 1,36 |
| 7,62 | 165,99 | 182,04 | 122,62 | 0,26 | 1,35 |
| 7,69 | 165,52 | 182,11 | 122,57 | 0,26 | 1,35 |
| 7,75 | 165,04 | 182,17 | 122,52 | 0,26 | 1,35 |
| 7,82 | 164,58 | 182,24 | 122,47 | 0,26 | 1,34 |
| 7,89 | 164,11 | 182,31 | 122,42 | 0,27 | 1,34 |
| 7,96 | 163,65 | 182,38 | 122,37 | 0,27 | 1,34 |
| 8,02 | 163,18 | 182,44 | 122,32 | 0,27 | 1,33 |
| 8,09 | 162,72 | 182,51 | 122,27 | 0,27 | 1,33 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 8,16  | 162,27 | 182,58 | 122,21 | 0,28 | 1,33 |
| 8,23  | 161,81 | 182,65 | 122,16 | 0,28 | 1,32 |
| 8,30  | 161,36 | 182,72 | 122,11 | 0,28 | 1,32 |
| 8,37  | 160,90 | 182,79 | 122,06 | 0,28 | 1,32 |
| 8,44  | 160,45 | 182,86 | 122,01 | 0,29 | 1,32 |
| 8,51  | 160,00 | 182,93 | 121,96 | 0,29 | 1,31 |
| 8,58  | 159,55 | 183,00 | 121,91 | 0,29 | 1,31 |
| 8,65  | 159,10 | 183,07 | 121,86 | 0,29 | 1,31 |
| 8,72  | 158,66 | 183,14 | 121,80 | 0,29 | 1,30 |
| 8,79  | 158,21 | 183,21 | 121,75 | 0,30 | 1,30 |
| 8,86  | 157,77 | 183,28 | 121,70 | 0,30 | 1,30 |
| 8,93  | 157,32 | 183,35 | 121,65 | 0,30 | 1,29 |
| 9,00  | 156,88 | 183,42 | 121,60 | 0,30 | 1,29 |
| 9,07  | 156,44 | 183,49 | 121,54 | 0,31 | 1,29 |
| 9,14  | 155,99 | 183,56 | 121,49 | 0,31 | 1,28 |
| 9,21  | 155,55 | 183,63 | 121,44 | 0,31 | 1,28 |
| 9,28  | 155,11 | 183,70 | 121,39 | 0,31 | 1,28 |
| 9,36  | 154,67 | 183,78 | 121,33 | 0,32 | 1,27 |
| 9,43  | 154,23 | 183,85 | 121,28 | 0,32 | 1,27 |
| 9,50  | 153,79 | 183,92 | 121,23 | 0,32 | 1,27 |
| 9,57  | 153,34 | 183,99 | 121,18 | 0,32 | 1,27 |
| 9,65  | 152,90 | 184,07 | 121,12 | 0,33 | 1,26 |
| 9,72  | 152,46 | 184,14 | 121,07 | 0,33 | 1,26 |
| 9,79  | 152,02 | 184,21 | 121,02 | 0,33 | 1,26 |
| 9,87  | 151,57 | 184,29 | 120,96 | 0,33 | 1,25 |
| 9,94  | 151,13 | 184,36 | 120,91 | 0,34 | 1,25 |
| 10,01 | 150,68 | 184,43 | 120,86 | 0,34 | 1,25 |
| 10,09 | 150,24 | 184,51 | 120,80 | 0,34 | 1,24 |
| 10,16 | 149,79 | 184,58 | 120,75 | 0,34 | 1,24 |
| 10,24 | 149,34 | 184,66 | 120,70 | 0,35 | 1,24 |
| 10,31 | 148,89 | 184,73 | 120,64 | 0,35 | 1,23 |
| 10,39 | 148,45 | 184,81 | 120,59 | 0,35 | 1,23 |
| 10,46 | 147,99 | 184,88 | 120,54 | 0,35 | 1,23 |
| 10,54 | 147,54 | 184,96 | 120,48 | 0,36 | 1,22 |
| 10,61 | 147,09 | 185,03 | 120,43 | 0,36 | 1,22 |
| 10,69 | 146,63 | 185,11 | 120,37 | 0,36 | 1,22 |
| 10,77 | 146,17 | 185,19 | 120,32 | 0,36 | 1,21 |
| 10,84 | 145,71 | 185,26 | 120,26 | 0,37 | 1,21 |
| 10,92 | 145,25 | 185,34 | 120,21 | 0,37 | 1,21 |
| 10,99 | 144,79 | 185,41 | 120,16 | 0,37 | 1,20 |
| 11,07 | 144,32 | 185,49 | 120,10 | 0,37 | 1,20 |
| 11,15 | 143,85 | 185,57 | 120,05 | 0,38 | 1,20 |
| 11,23 | 143,38 | 185,65 | 119,99 | 0,38 | 1,19 |
| 11,30 | 142,91 | 185,72 | 119,94 | 0,38 | 1,19 |
| 11,38 | 142,43 | 185,80 | 119,88 | 0,38 | 1,19 |
| 11,46 | 141,96 | 185,88 | 119,83 | 0,39 | 1,18 |
| 11,54 | 141,47 | 185,96 | 119,77 | 0,39 | 1,18 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 11,62 | 140,99 | 186,04 | 119,72 | 0,39 | 1,18 |
| 11,70 | 140,50 | 186,12 | 119,66 | 0,40 | 1,17 |
| 11,77 | 140,01 | 186,19 | 119,61 | 0,40 | 1,17 |
| 11,85 | 139,52 | 186,27 | 119,55 | 0,40 | 1,17 |
| 11,93 | 139,02 | 186,35 | 119,49 | 0,40 | 1,16 |
| 12,01 | 138,51 | 186,43 | 119,44 | 0,41 | 1,16 |
| 12,09 | 138,01 | 186,51 | 119,38 | 0,41 | 1,16 |
| 12,17 | 137,50 | 186,59 | 119,33 | 0,41 | 1,15 |
| 12,25 | 136,98 | 186,67 | 119,27 | 0,41 | 1,15 |
| 12,33 | 136,47 | 186,75 | 119,22 | 0,42 | 1,14 |
| 12,42 | 135,94 | 186,84 | 119,16 | 0,42 | 1,14 |
| 12,50 | 135,41 | 186,92 | 119,10 | 0,42 | 1,14 |
| 12,58 | 134,88 | 187,00 | 119,05 | 0,43 | 1,13 |
| 12,66 | 134,34 | 187,08 | 118,99 | 0,43 | 1,13 |
| 12,74 | 133,80 | 187,16 | 118,93 | 0,43 | 1,12 |
| 12,82 | 133,25 | 187,24 | 118,88 | 0,43 | 1,12 |
| 12,91 | 132,70 | 187,33 | 118,82 | 0,44 | 1,12 |
| 12,99 | 132,14 | 187,41 | 118,76 | 0,44 | 1,11 |
| 13,07 | 131,57 | 187,49 | 118,71 | 0,44 | 1,11 |
| 13,15 | 131,00 | 187,57 | 118,65 | 0,44 | 1,10 |
| 13,24 | 130,42 | 187,66 | 118,59 | 0,45 | 1,10 |
| 13,32 | 129,84 | 187,74 | 118,54 | 0,45 | 1,10 |
| 13,40 | 129,25 | 187,82 | 118,48 | 0,45 | 1,09 |
| 13,49 | 128,65 | 187,91 | 118,42 | 0,46 | 1,09 |
| 13,57 | 128,04 | 187,99 | 118,36 | 0,46 | 1,08 |
| 13,66 | 127,43 | 188,08 | 118,31 | 0,46 | 1,08 |
| 13,74 | 126,81 | 188,16 | 118,25 | 0,46 | 1,07 |
| 13,83 | 126,18 | 188,25 | 118,19 | 0,47 | 1,07 |
| 13,91 | 125,54 | 188,33 | 118,13 | 0,47 | 1,06 |
| 14,00 | 124,90 | 188,42 | 118,08 | 0,47 | 1,06 |
| 14,08 | 124,24 | 188,50 | 118,02 | 0,48 | 1,05 |
| 14,17 | 123,58 | 188,59 | 117,96 | 0,48 | 1,05 |
| 14,26 | 122,91 | 188,68 | 117,90 | 0,48 | 1,04 |
| 14,34 | 122,22 | 188,76 | 117,84 | 0,48 | 1,04 |
| 14,43 | 121,53 | 188,85 | 117,78 | 0,49 | 1,03 |
| 14,52 | 120,83 | 188,94 | 117,73 | 0,49 | 1,03 |
| 14,60 | 120,11 | 189,02 | 117,67 | 0,49 | 1,02 |
| 14,69 | 119,39 | 189,11 | 117,61 | 0,50 | 1,02 |
| 14,78 | 118,65 | 189,20 | 117,55 | 0,50 | 1,01 |
| 14,87 | 117,91 | 189,29 | 117,49 | 0,50 | 1,00 |
| 14,95 | 117,15 | 189,37 | 117,43 | 0,51 | 1,00 |
| 15,04 | 116,38 | 189,46 | 117,37 | 0,51 | 0,99 |
| 15,13 | 115,59 | 189,55 | 117,31 | 0,51 | 0,99 |
| 15,22 | 114,79 | 189,64 | 117,26 | 0,51 | 0,98 |
| 15,31 | 113,98 | 189,73 | 117,20 | 0,52 | 0,97 |
| 15,40 | 113,15 | 189,82 | 117,14 | 0,52 | 0,97 |
| 15,49 | 112,31 | 189,91 | 117,08 | 0,52 | 0,96 |

|       |       |        |        |      |       |
|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| 15,58 | 67,74 | 190,00 | -11,75 | 0,53 | -5,76 |
| 15,93 | 24,00 | 190,35 | -11,73 | 0,54 | -2,05 |
| 16,28 | 23,95 | 190,70 | -11,71 | 0,55 | -2,05 |
| 16,63 | 23,90 | 191,05 | -11,68 | 0,56 | -2,05 |
| 16,98 | 23,83 | 191,40 | -11,66 | 0,57 | -2,04 |
| 17,33 | 23,76 | 191,75 | -11,64 | 0,59 | -2,04 |
| 17,68 | 23,67 | 192,10 | -11,61 | 0,60 | -2,04 |
| 18,03 | 23,59 | 192,45 | -11,59 | 0,61 | -2,03 |
| 18,38 | 23,49 | 192,80 | -11,57 | 0,62 | -2,03 |
| 18,73 | 23,38 | 193,15 | -11,55 | 0,63 | -2,02 |
| 19,08 | 23,27 | 193,50 | -11,53 | 0,65 | -2,02 |
| 19,43 | 23,15 | 193,85 | -11,50 | 0,66 | -2,01 |
| 19,78 | 23,02 | 194,20 | -11,48 | 0,67 | -2,00 |
| 20,13 | 22,88 | 194,55 | -11,46 | 0,68 | -2,00 |
| 20,48 | 22,74 | 194,90 | -11,44 | 0,69 | -1,99 |
| 20,83 | 22,59 | 195,25 | -11,42 | 0,70 | -1,98 |
| 21,18 | 22,43 | 195,60 | -11,40 | 0,72 | -1,97 |
| 21,53 | 22,27 | 195,95 | -11,38 | 0,73 | -1,96 |
| 21,88 | 22,09 | 196,30 | -11,35 | 0,74 | -1,95 |
| 22,23 | 21,92 | 196,65 | -11,33 | 0,75 | -1,93 |
| 22,58 | 21,73 | 197,00 | -11,31 | 0,76 | -1,92 |
| 22,93 | 21,54 | 197,35 | -11,29 | 0,78 | -1,91 |
| 23,28 | 21,33 | 197,70 | -11,27 | 0,79 | -1,89 |
| 23,63 | 21,13 | 198,05 | -11,25 | 0,80 | -1,88 |
| 23,98 | 20,91 | 198,40 | -11,23 | 0,81 | -1,86 |
| 24,33 | 20,68 | 198,75 | -11,21 | 0,82 | -1,85 |
| 24,68 | 20,45 | 199,10 | -11,19 | 0,83 | -1,83 |
| 25,03 | 20,21 | 199,45 | -11,17 | 0,85 | -1,81 |
| 25,38 | 19,96 | 199,80 | -11,15 | 0,86 | -1,79 |
| 25,73 | 19,70 | 200,15 | -11,13 | 0,87 | -1,77 |
| 26,08 | 19,43 | 200,50 | -11,11 | 0,88 | -1,75 |
| 26,43 | 19,15 | 200,85 | -11,09 | 0,89 | -1,73 |
| 26,78 | 18,86 | 201,20 | -11,07 | 0,91 | -1,70 |
| 27,13 | 18,56 | 201,55 | -11,05 | 0,92 | -1,68 |
| 27,48 | 18,25 | 201,90 | -11,03 | 0,93 | -1,65 |
| 27,83 | 17,93 | 202,25 | -11,01 | 0,94 | -1,63 |
| 28,18 | 17,60 | 202,60 | -10,99 | 0,95 | -1,60 |
| 28,53 | 17,25 | 202,95 | -10,97 | 0,96 | -1,57 |
| 28,88 | 16,89 | 203,30 | -10,96 | 0,98 | -1,54 |
| 29,23 | 16,51 | 203,65 | -10,94 | 0,99 | -1,51 |
| 29,58 | 16,12 | 204,00 | -10,92 | 1,00 | -1,48 |

**Semicírculo de bi-material parede espessa com profundidade de entalhe de 5,04.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 1683,74                                   | 175,04 | 131,65                                 | 0,00 | 12,79                                    |
| 0,04  | 1430,00                                   | 175,08 | 131,61                                 | 0,00 | 10,87                                    |
| 0,09  | 1248,68                                   | 175,13 | 131,57                                 | 0,00 | 9,49                                     |
| 0,13  | 1101,15                                   | 175,17 | 131,54                                 | 0,00 | 8,37                                     |
| 0,17  | 992,04                                    | 175,21 | 131,50                                 | 0,01 | 7,54                                     |
| 0,22  | 900,18                                    | 175,26 | 131,46                                 | 0,01 | 6,85                                     |
| 0,26  | 828,18                                    | 175,30 | 131,42                                 | 0,01 | 6,30                                     |
| 0,30  | 767,41                                    | 175,34 | 131,38                                 | 0,01 | 5,84                                     |
| 0,35  | 716,45                                    | 175,39 | 131,35                                 | 0,01 | 5,45                                     |
| 0,39  | 673,28                                    | 175,43 | 131,31                                 | 0,01 | 5,13                                     |
| 0,44  | 636,21                                    | 175,48 | 131,27                                 | 0,02 | 4,85                                     |
| 0,48  | 603,85                                    | 175,52 | 131,23                                 | 0,02 | 4,60                                     |
| 0,53  | 575,53                                    | 175,57 | 131,19                                 | 0,02 | 4,39                                     |
| 0,57  | 550,53                                    | 175,61 | 131,16                                 | 0,02 | 4,20                                     |
| 0,62  | 528,23                                    | 175,66 | 131,12                                 | 0,02 | 4,03                                     |
| 0,66  | 508,31                                    | 175,70 | 131,08                                 | 0,02 | 3,88                                     |
| 0,71  | 490,30                                    | 175,75 | 131,04                                 | 0,02 | 3,74                                     |
| 0,75  | 474,06                                    | 175,79 | 131,00                                 | 0,03 | 3,62                                     |
| 0,80  | 459,20                                    | 175,84 | 130,96                                 | 0,03 | 3,51                                     |
| 0,84  | 445,68                                    | 175,88 | 130,92                                 | 0,03 | 3,40                                     |
| 0,89  | 433,20                                    | 175,93 | 130,89                                 | 0,03 | 3,31                                     |
| 0,93  | 421,78                                    | 175,97 | 130,85                                 | 0,03 | 3,22                                     |
| 0,98  | 411,14                                    | 176,02 | 130,81                                 | 0,03 | 3,14                                     |
| 1,02  | 401,34                                    | 176,06 | 130,77                                 | 0,04 | 3,07                                     |
| 1,07  | 392,15                                    | 176,11 | 130,73                                 | 0,04 | 3,00                                     |
| 1,12  | 383,65                                    | 176,16 | 130,69                                 | 0,04 | 2,94                                     |
| 1,16  | 375,64                                    | 176,20 | 130,65                                 | 0,04 | 2,88                                     |
| 1,21  | 368,18                                    | 176,25 | 130,61                                 | 0,04 | 2,82                                     |
| 1,26  | 361,11                                    | 176,30 | 130,57                                 | 0,04 | 2,77                                     |
| 1,30  | 354,51                                    | 176,34 | 130,53                                 | 0,05 | 2,72                                     |
| 1,35  | 348,22                                    | 176,39 | 130,49                                 | 0,05 | 2,67                                     |
| 1,40  | 342,33                                    | 176,44 | 130,45                                 | 0,05 | 2,62                                     |
| 1,44  | 336,70                                    | 176,48 | 130,41                                 | 0,05 | 2,58                                     |
| 1,49  | 331,40                                    | 176,53 | 130,37                                 | 0,05 | 2,54                                     |
| 1,54  | 326,33                                    | 176,58 | 130,33                                 | 0,05 | 2,50                                     |
| 1,59  | 321,54                                    | 176,63 | 130,29                                 | 0,05 | 2,47                                     |
| 1,63  | 316,94                                    | 176,67 | 130,25                                 | 0,06 | 2,43                                     |
| 1,68  | 312,60                                    | 176,72 | 130,21                                 | 0,06 | 2,40                                     |
| 1,73  | 308,41                                    | 176,77 | 130,17                                 | 0,06 | 2,37                                     |
| 1,78  | 304,43                                    | 176,82 | 130,13                                 | 0,06 | 2,34                                     |
| 1,83  | 300,59                                    | 176,87 | 130,09                                 | 0,06 | 2,31                                     |
| 1,88  | 296,94                                    | 176,92 | 130,05                                 | 0,06 | 2,28                                     |
| 1,92  | 293,40                                    | 176,96 | 130,01                                 | 0,07 | 2,26                                     |
| 1,97  | 290,03                                    | 177,01 | 129,97                                 | 0,07 | 2,23                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 2,02 | 286,76 | 177,06 | 129,93 | 0,07 | 2,21 |
| 2,07 | 283,65 | 177,11 | 129,89 | 0,07 | 2,18 |
| 2,12 | 280,62 | 177,16 | 129,84 | 0,07 | 2,16 |
| 2,17 | 277,73 | 177,21 | 129,80 | 0,07 | 2,14 |
| 2,22 | 274,91 | 177,26 | 129,76 | 0,08 | 2,12 |
| 2,27 | 272,21 | 177,31 | 129,72 | 0,08 | 2,10 |
| 2,32 | 269,58 | 177,36 | 129,68 | 0,08 | 2,08 |
| 2,37 | 267,06 | 177,41 | 129,64 | 0,08 | 2,06 |
| 2,42 | 264,61 | 177,46 | 129,60 | 0,08 | 2,04 |
| 2,47 | 262,25 | 177,51 | 129,55 | 0,09 | 2,02 |
| 2,52 | 259,94 | 177,56 | 129,51 | 0,09 | 2,01 |
| 2,57 | 257,72 | 177,61 | 129,47 | 0,09 | 1,99 |
| 2,62 | 255,55 | 177,66 | 129,43 | 0,09 | 1,97 |
| 2,67 | 253,47 | 177,71 | 129,39 | 0,09 | 1,96 |
| 2,72 | 251,42 | 177,76 | 129,34 | 0,09 | 1,94 |
| 2,77 | 249,45 | 177,81 | 129,30 | 0,10 | 1,93 |
| 2,82 | 247,51 | 177,86 | 129,26 | 0,10 | 1,91 |
| 2,87 | 245,65 | 177,91 | 129,22 | 0,10 | 1,90 |
| 2,93 | 243,82 | 177,97 | 129,17 | 0,10 | 1,89 |
| 2,98 | 242,05 | 178,02 | 129,13 | 0,10 | 1,87 |
| 3,03 | 240,31 | 178,07 | 129,09 | 0,10 | 1,86 |
| 3,08 | 238,63 | 178,12 | 129,05 | 0,11 | 1,85 |
| 3,13 | 236,98 | 178,17 | 129,00 | 0,11 | 1,84 |
| 3,19 | 235,39 | 178,23 | 128,96 | 0,11 | 1,83 |
| 3,24 | 233,83 | 178,28 | 128,92 | 0,11 | 1,81 |
| 3,29 | 232,31 | 178,33 | 128,88 | 0,11 | 1,80 |
| 3,34 | 230,81 | 178,38 | 128,83 | 0,12 | 1,79 |
| 3,40 | 229,36 | 178,44 | 128,79 | 0,12 | 1,78 |
| 3,45 | 227,92 | 178,49 | 128,75 | 0,12 | 1,77 |
| 3,50 | 226,54 | 178,54 | 128,70 | 0,12 | 1,76 |
| 3,56 | 225,17 | 178,60 | 128,66 | 0,12 | 1,75 |
| 3,61 | 223,84 | 178,65 | 128,61 | 0,12 | 1,74 |
| 3,66 | 222,53 | 178,70 | 128,57 | 0,13 | 1,73 |
| 3,72 | 221,25 | 178,76 | 128,53 | 0,13 | 1,72 |
| 3,77 | 220,00 | 178,81 | 128,48 | 0,13 | 1,71 |
| 3,83 | 218,77 | 178,87 | 128,44 | 0,13 | 1,70 |
| 3,88 | 217,57 | 178,92 | 128,40 | 0,13 | 1,69 |
| 3,93 | 216,39 | 178,97 | 128,35 | 0,14 | 1,69 |
| 3,99 | 215,23 | 179,03 | 128,31 | 0,14 | 1,68 |
| 4,04 | 214,10 | 179,08 | 128,26 | 0,14 | 1,67 |
| 4,10 | 212,98 | 179,14 | 128,22 | 0,14 | 1,66 |
| 4,15 | 211,89 | 179,19 | 128,17 | 0,14 | 1,65 |
| 4,21 | 210,82 | 179,25 | 128,13 | 0,15 | 1,65 |
| 4,26 | 209,76 | 179,30 | 128,08 | 0,15 | 1,64 |
| 4,32 | 208,72 | 179,36 | 128,04 | 0,15 | 1,63 |
| 4,38 | 207,71 | 179,42 | 127,99 | 0,15 | 1,62 |
| 4,43 | 206,70 | 179,47 | 127,95 | 0,15 | 1,62 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 4,49 | 205,72 | 179,53 | 127,90 | 0,15 | 1,61 |
| 4,54 | 204,75 | 179,58 | 127,86 | 0,16 | 1,60 |
| 4,60 | 203,79 | 179,64 | 127,81 | 0,16 | 1,59 |
| 4,66 | 202,85 | 179,70 | 127,77 | 0,16 | 1,59 |
| 4,71 | 201,93 | 179,75 | 127,72 | 0,16 | 1,58 |
| 4,77 | 201,02 | 179,81 | 127,68 | 0,16 | 1,57 |
| 4,83 | 200,12 | 179,87 | 127,63 | 0,17 | 1,57 |
| 4,88 | 199,23 | 179,92 | 127,59 | 0,17 | 1,56 |
| 4,94 | 198,37 | 179,98 | 127,54 | 0,17 | 1,56 |
| 5,00 | 197,51 | 180,04 | 127,50 | 0,17 | 1,55 |
| 5,06 | 196,66 | 180,10 | 127,45 | 0,17 | 1,54 |
| 5,11 | 195,83 | 180,15 | 127,40 | 0,18 | 1,54 |
| 5,17 | 195,00 | 180,21 | 127,36 | 0,18 | 1,53 |
| 5,23 | 194,19 | 180,27 | 127,31 | 0,18 | 1,53 |
| 5,29 | 193,39 | 180,33 | 127,26 | 0,18 | 1,52 |
| 5,35 | 192,59 | 180,39 | 127,22 | 0,18 | 1,51 |
| 5,41 | 191,81 | 180,45 | 127,17 | 0,19 | 1,51 |
| 5,47 | 191,04 | 180,51 | 127,13 | 0,19 | 1,50 |
| 5,52 | 190,28 | 180,56 | 127,08 | 0,19 | 1,50 |
| 5,58 | 189,52 | 180,62 | 127,03 | 0,19 | 1,49 |
| 5,64 | 188,77 | 180,68 | 126,99 | 0,19 | 1,49 |
| 5,70 | 188,04 | 180,74 | 126,94 | 0,20 | 1,48 |
| 5,76 | 187,31 | 180,80 | 126,89 | 0,20 | 1,48 |
| 5,82 | 186,59 | 180,86 | 126,84 | 0,20 | 1,47 |
| 5,88 | 185,87 | 180,92 | 126,80 | 0,20 | 1,47 |
| 5,94 | 185,17 | 180,98 | 126,75 | 0,21 | 1,46 |
| 6,00 | 184,47 | 181,04 | 126,70 | 0,21 | 1,46 |
| 6,06 | 183,77 | 181,10 | 126,66 | 0,21 | 1,45 |
| 6,13 | 183,09 | 181,17 | 126,61 | 0,21 | 1,45 |
| 6,19 | 182,41 | 181,23 | 126,56 | 0,21 | 1,44 |
| 6,25 | 181,74 | 181,29 | 126,51 | 0,22 | 1,44 |
| 6,31 | 181,07 | 181,35 | 126,46 | 0,22 | 1,43 |
| 6,37 | 180,41 | 181,41 | 126,42 | 0,22 | 1,43 |
| 6,43 | 179,76 | 181,47 | 126,37 | 0,22 | 1,42 |
| 6,49 | 179,11 | 181,53 | 126,32 | 0,22 | 1,42 |
| 6,56 | 178,46 | 181,60 | 126,27 | 0,23 | 1,41 |
| 6,62 | 177,82 | 181,66 | 126,22 | 0,23 | 1,41 |
| 6,68 | 177,19 | 181,72 | 126,18 | 0,23 | 1,40 |
| 6,74 | 176,56 | 181,78 | 126,13 | 0,23 | 1,40 |
| 6,81 | 175,94 | 181,85 | 126,08 | 0,24 | 1,40 |
| 6,87 | 175,32 | 181,91 | 126,03 | 0,24 | 1,39 |
| 6,93 | 174,70 | 181,97 | 125,98 | 0,24 | 1,39 |
| 7,00 | 174,09 | 182,04 | 125,93 | 0,24 | 1,38 |
| 7,06 | 173,48 | 182,10 | 125,88 | 0,24 | 1,38 |
| 7,12 | 172,88 | 182,16 | 125,83 | 0,25 | 1,37 |
| 7,19 | 172,28 | 182,23 | 125,79 | 0,25 | 1,37 |
| 7,25 | 171,68 | 182,29 | 125,74 | 0,25 | 1,37 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 7,31  | 171,09 | 182,35 | 125,69 | 0,25 | 1,36 |
| 7,38  | 170,50 | 182,42 | 125,64 | 0,25 | 1,36 |
| 7,44  | 169,91 | 182,48 | 125,59 | 0,26 | 1,35 |
| 7,51  | 169,33 | 182,55 | 125,54 | 0,26 | 1,35 |
| 7,57  | 168,75 | 182,61 | 125,49 | 0,26 | 1,34 |
| 7,64  | 168,17 | 182,68 | 125,44 | 0,26 | 1,34 |
| 7,70  | 167,59 | 182,74 | 125,39 | 0,27 | 1,34 |
| 7,77  | 167,02 | 182,81 | 125,34 | 0,27 | 1,33 |
| 7,84  | 166,45 | 182,88 | 125,29 | 0,27 | 1,33 |
| 7,90  | 165,88 | 182,94 | 125,24 | 0,27 | 1,32 |
| 7,97  | 165,31 | 183,01 | 125,19 | 0,28 | 1,32 |
| 8,03  | 164,75 | 183,07 | 125,14 | 0,28 | 1,32 |
| 8,10  | 164,18 | 183,14 | 125,09 | 0,28 | 1,31 |
| 8,17  | 163,62 | 183,21 | 125,04 | 0,28 | 1,31 |
| 8,23  | 163,06 | 183,27 | 124,99 | 0,28 | 1,30 |
| 8,30  | 162,50 | 183,34 | 124,94 | 0,29 | 1,30 |
| 8,37  | 161,95 | 183,41 | 124,89 | 0,29 | 1,30 |
| 8,44  | 161,39 | 183,48 | 124,84 | 0,29 | 1,29 |
| 8,50  | 160,83 | 183,54 | 124,78 | 0,29 | 1,29 |
| 8,57  | 160,28 | 183,61 | 124,73 | 0,30 | 1,28 |
| 8,64  | 159,72 | 183,68 | 124,68 | 0,30 | 1,28 |
| 8,71  | 159,17 | 183,75 | 124,63 | 0,30 | 1,28 |
| 8,78  | 158,62 | 183,82 | 124,58 | 0,30 | 1,27 |
| 8,85  | 158,07 | 183,89 | 124,53 | 0,31 | 1,27 |
| 8,92  | 157,52 | 183,96 | 124,48 | 0,31 | 1,27 |
| 8,98  | 156,97 | 184,02 | 124,43 | 0,31 | 1,26 |
| 9,05  | 156,41 | 184,09 | 124,37 | 0,31 | 1,26 |
| 9,12  | 155,86 | 184,16 | 124,32 | 0,32 | 1,25 |
| 9,19  | 155,31 | 184,23 | 124,27 | 0,32 | 1,25 |
| 9,26  | 154,76 | 184,30 | 124,22 | 0,32 | 1,25 |
| 9,33  | 154,21 | 184,37 | 124,17 | 0,32 | 1,24 |
| 9,40  | 153,65 | 184,44 | 124,11 | 0,32 | 1,24 |
| 9,47  | 153,10 | 184,51 | 124,06 | 0,33 | 1,23 |
| 9,54  | 152,55 | 184,58 | 124,01 | 0,33 | 1,23 |
| 9,62  | 151,99 | 184,66 | 123,96 | 0,33 | 1,23 |
| 9,69  | 151,43 | 184,73 | 123,90 | 0,33 | 1,22 |
| 9,76  | 150,88 | 184,80 | 123,85 | 0,34 | 1,22 |
| 9,83  | 150,32 | 184,87 | 123,80 | 0,34 | 1,21 |
| 9,90  | 149,76 | 184,94 | 123,75 | 0,34 | 1,21 |
| 9,97  | 149,19 | 185,01 | 123,69 | 0,34 | 1,21 |
| 10,05 | 148,63 | 185,09 | 123,64 | 0,35 | 1,20 |
| 10,12 | 148,07 | 185,16 | 123,59 | 0,35 | 1,20 |
| 10,19 | 147,50 | 185,23 | 123,53 | 0,35 | 1,19 |
| 10,26 | 146,93 | 185,30 | 123,48 | 0,35 | 1,19 |
| 10,34 | 146,36 | 185,38 | 123,43 | 0,36 | 1,19 |
| 10,41 | 145,78 | 185,45 | 123,37 | 0,36 | 1,18 |
| 10,48 | 145,21 | 185,52 | 123,32 | 0,36 | 1,18 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 10,56 | 144,63 | 185,60 | 123,27 | 0,36 | 1,17 |
| 10,63 | 144,05 | 185,67 | 123,21 | 0,37 | 1,17 |
| 10,71 | 143,46 | 185,75 | 123,16 | 0,37 | 1,16 |
| 10,78 | 142,88 | 185,82 | 123,11 | 0,37 | 1,16 |
| 10,85 | 142,29 | 185,89 | 123,05 | 0,37 | 1,16 |
| 10,93 | 141,69 | 185,97 | 123,00 | 0,38 | 1,15 |
| 11,00 | 141,10 | 186,04 | 122,94 | 0,38 | 1,15 |
| 11,08 | 140,50 | 186,12 | 122,89 | 0,38 | 1,14 |
| 11,15 | 139,89 | 186,19 | 122,84 | 0,39 | 1,14 |
| 11,23 | 139,28 | 186,27 | 122,78 | 0,39 | 1,13 |
| 11,31 | 138,67 | 186,35 | 122,73 | 0,39 | 1,13 |
| 11,38 | 138,05 | 186,42 | 122,67 | 0,39 | 1,13 |
| 11,46 | 137,43 | 186,50 | 122,62 | 0,40 | 1,12 |
| 11,54 | 136,80 | 186,58 | 122,56 | 0,40 | 1,12 |
| 11,61 | 136,17 | 186,65 | 122,51 | 0,40 | 1,11 |
| 11,69 | 135,54 | 186,73 | 122,45 | 0,40 | 1,11 |
| 11,77 | 134,90 | 186,81 | 122,40 | 0,41 | 1,10 |
| 11,84 | 134,25 | 186,88 | 122,34 | 0,41 | 1,10 |
| 11,92 | 133,60 | 186,96 | 122,29 | 0,41 | 1,09 |
| 12,00 | 132,94 | 187,04 | 122,23 | 0,41 | 1,09 |
| 12,08 | 132,28 | 187,12 | 122,18 | 0,42 | 1,08 |
| 12,16 | 131,61 | 187,20 | 122,12 | 0,42 | 1,08 |
| 12,23 | 130,93 | 187,27 | 122,06 | 0,42 | 1,07 |
| 12,31 | 130,25 | 187,35 | 122,01 | 0,43 | 1,07 |
| 12,39 | 129,56 | 187,43 | 121,95 | 0,43 | 1,06 |
| 12,47 | 128,86 | 187,51 | 121,90 | 0,43 | 1,06 |
| 12,55 | 128,16 | 187,59 | 121,84 | 0,43 | 1,05 |
| 12,63 | 127,45 | 187,67 | 121,79 | 0,44 | 1,05 |
| 12,71 | 126,73 | 187,75 | 121,73 | 0,44 | 1,04 |
| 12,79 | 126,00 | 187,83 | 121,67 | 0,44 | 1,04 |
| 12,87 | 125,26 | 187,91 | 121,62 | 0,44 | 1,03 |
| 12,95 | 124,52 | 187,99 | 121,56 | 0,45 | 1,02 |
| 13,03 | 123,77 | 188,07 | 121,50 | 0,45 | 1,02 |
| 13,11 | 123,00 | 188,15 | 121,45 | 0,45 | 1,01 |
| 13,20 | 122,23 | 188,24 | 121,39 | 0,46 | 1,01 |
| 13,28 | 121,45 | 188,32 | 121,33 | 0,46 | 1,00 |
| 13,36 | 120,66 | 188,40 | 121,28 | 0,46 | 0,99 |
| 13,44 | 119,85 | 188,48 | 121,22 | 0,46 | 0,99 |
| 13,52 | 119,04 | 188,56 | 121,16 | 0,47 | 0,98 |
| 13,61 | 118,22 | 188,65 | 121,11 | 0,47 | 0,98 |
| 13,69 | 117,38 | 188,73 | 121,05 | 0,47 | 0,97 |
| 13,77 | 116,53 | 188,81 | 120,99 | 0,48 | 0,96 |
| 13,85 | 115,67 | 188,89 | 120,93 | 0,48 | 0,96 |
| 13,94 | 114,80 | 188,98 | 120,88 | 0,48 | 0,95 |
| 14,02 | 113,92 | 189,06 | 120,82 | 0,48 | 0,94 |
| 14,11 | 113,02 | 189,15 | 120,76 | 0,49 | 0,94 |
| 14,19 | 112,10 | 189,23 | 120,70 | 0,49 | 0,93 |

|       |        |        |        |      |       |
|-------|--------|--------|--------|------|-------|
| 14,27 | 111,18 | 189,31 | 120,64 | 0,49 | 0,92  |
| 14,36 | 110,24 | 189,40 | 120,59 | 0,50 | 0,91  |
| 14,44 | 109,28 | 189,48 | 120,53 | 0,50 | 0,91  |
| 14,53 | 108,31 | 189,57 | 120,47 | 0,50 | 0,90  |
| 14,62 | 107,32 | 189,66 | 120,41 | 0,50 | 0,89  |
| 14,70 | 106,31 | 189,74 | 120,35 | 0,51 | 0,88  |
| 14,79 | 105,29 | 189,83 | 120,30 | 0,51 | 0,88  |
| 14,87 | 104,25 | 189,91 | 120,24 | 0,51 | 0,87  |
| 14,96 | 63,05  | 190,00 | -12,07 | 0,52 | -5,22 |
| 15,31 | 22,89  | 190,35 | -12,05 | 0,53 | -1,90 |
| 15,66 | 22,84  | 190,70 | -12,02 | 0,54 | -1,90 |
| 16,01 | 22,78  | 191,05 | -12,00 | 0,55 | -1,90 |
| 16,36 | 22,70  | 191,40 | -11,97 | 0,56 | -1,90 |
| 16,71 | 22,62  | 191,75 | -11,95 | 0,58 | -1,89 |
| 17,06 | 22,52  | 192,10 | -11,93 | 0,59 | -1,89 |
| 17,41 | 22,41  | 192,45 | -11,91 | 0,60 | -1,88 |
| 17,76 | 22,30  | 192,80 | -11,88 | 0,61 | -1,88 |
| 18,11 | 22,17  | 193,15 | -11,86 | 0,63 | -1,87 |
| 18,46 | 22,03  | 193,50 | -11,84 | 0,64 | -1,86 |
| 18,81 | 21,89  | 193,85 | -11,81 | 0,65 | -1,85 |
| 19,16 | 21,73  | 194,20 | -11,79 | 0,66 | -1,84 |
| 19,51 | 21,56  | 194,55 | -11,77 | 0,67 | -1,83 |
| 19,86 | 21,39  | 194,90 | -11,75 | 0,69 | -1,82 |
| 20,21 | 21,21  | 195,25 | -11,73 | 0,70 | -1,81 |
| 20,56 | 21,01  | 195,60 | -11,70 | 0,71 | -1,80 |
| 20,91 | 20,81  | 195,95 | -11,68 | 0,72 | -1,78 |
| 21,26 | 20,60  | 196,30 | -11,66 | 0,73 | -1,77 |
| 21,61 | 20,38  | 196,65 | -11,64 | 0,75 | -1,75 |
| 21,96 | 20,15  | 197,00 | -11,62 | 0,76 | -1,73 |
| 22,31 | 19,91  | 197,35 | -11,60 | 0,77 | -1,72 |
| 22,66 | 19,66  | 197,70 | -11,58 | 0,78 | -1,70 |
| 23,01 | 19,40  | 198,05 | -11,55 | 0,79 | -1,68 |
| 23,36 | 19,13  | 198,40 | -11,53 | 0,81 | -1,66 |
| 23,71 | 18,85  | 198,75 | -11,51 | 0,82 | -1,64 |
| 24,06 | 18,56  | 199,10 | -11,49 | 0,83 | -1,61 |
| 24,41 | 18,25  | 199,45 | -11,47 | 0,84 | -1,59 |
| 24,76 | 17,94  | 199,80 | -11,45 | 0,85 | -1,57 |
| 25,11 | 17,62  | 200,15 | -11,43 | 0,87 | -1,54 |
| 25,46 | 17,28  | 200,50 | -11,41 | 0,88 | -1,51 |
| 25,81 | 16,93  | 200,85 | -11,39 | 0,89 | -1,49 |
| 26,16 | 16,56  | 201,20 | -11,37 | 0,90 | -1,46 |
| 26,51 | 16,18  | 201,55 | -11,35 | 0,92 | -1,43 |
| 26,86 | 15,79  | 201,90 | -11,33 | 0,93 | -1,39 |
| 27,21 | 15,38  | 202,25 | -11,31 | 0,94 | -1,36 |
| 27,56 | 14,96  | 202,60 | -11,29 | 0,95 | -1,32 |
| 27,91 | 14,52  | 202,95 | -11,27 | 0,96 | -1,29 |
| 28,26 | 14,06  | 203,30 | -11,25 | 0,98 | -1,25 |

|       |       |        |        |      |       |
|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| 28,61 | 13,59 | 203,65 | -11,23 | 0,99 | -1,21 |
| 28,96 | 13,09 | 204,00 | -11,21 | 1,00 | -1,17 |

**Semicírculo de bi-material parede espessa com profundidade de entalhe de 5,67.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 1843,47                                   | 175,67 | 134,76                                 | 0,00 | 13,68                                    |
| 0,04  | 1577,01                                   | 175,71 | 134,73                                 | 0,00 | 11,71                                    |
| 0,08  | 1383,91                                   | 175,75 | 134,69                                 | 0,00 | 10,27                                    |
| 0,12  | 1225,28                                   | 175,79 | 134,65                                 | 0,00 | 9,10                                     |
| 0,17  | 1106,80                                   | 175,84 | 134,62                                 | 0,01 | 8,22                                     |
| 0,21  | 1006,29                                   | 175,88 | 134,58                                 | 0,01 | 7,48                                     |
| 0,25  | 927,06                                    | 175,92 | 134,54                                 | 0,01 | 6,89                                     |
| 0,29  | 859,77                                    | 175,96 | 134,51                                 | 0,01 | 6,39                                     |
| 0,33  | 803,18                                    | 176,00 | 134,47                                 | 0,01 | 5,97                                     |
| 0,38  | 754,96                                    | 176,05 | 134,43                                 | 0,01 | 5,62                                     |
| 0,42  | 713,49                                    | 176,09 | 134,40                                 | 0,01 | 5,31                                     |
| 0,46  | 677,14                                    | 176,13 | 134,36                                 | 0,02 | 5,04                                     |
| 0,50  | 645,28                                    | 176,17 | 134,32                                 | 0,02 | 4,80                                     |
| 0,55  | 617,06                                    | 176,22 | 134,28                                 | 0,02 | 4,60                                     |
| 0,59  | 591,87                                    | 176,26 | 134,25                                 | 0,02 | 4,41                                     |
| 0,63  | 569,29                                    | 176,30 | 134,21                                 | 0,02 | 4,24                                     |
| 0,68  | 548,87                                    | 176,35 | 134,17                                 | 0,02 | 4,09                                     |
| 0,72  | 530,39                                    | 176,39 | 134,13                                 | 0,03 | 3,95                                     |
| 0,76  | 513,49                                    | 176,43 | 134,10                                 | 0,03 | 3,83                                     |
| 0,81  | 498,08                                    | 176,48 | 134,06                                 | 0,03 | 3,72                                     |
| 0,85  | 483,85                                    | 176,52 | 134,02                                 | 0,03 | 3,61                                     |
| 0,89  | 470,79                                    | 176,56 | 133,98                                 | 0,03 | 3,51                                     |
| 0,94  | 458,63                                    | 176,61 | 133,94                                 | 0,03 | 3,42                                     |
| 0,98  | 447,40                                    | 176,65 | 133,91                                 | 0,03 | 3,34                                     |
| 1,03  | 436,88                                    | 176,70 | 133,87                                 | 0,04 | 3,26                                     |
| 1,07  | 427,12                                    | 176,74 | 133,83                                 | 0,04 | 3,19                                     |
| 1,11  | 417,92                                    | 176,78 | 133,79                                 | 0,04 | 3,12                                     |
| 1,16  | 409,34                                    | 176,83 | 133,75                                 | 0,04 | 3,06                                     |
| 1,20  | 401,21                                    | 176,87 | 133,71                                 | 0,04 | 3,00                                     |
| 1,25  | 393,61                                    | 176,92 | 133,67                                 | 0,04 | 2,94                                     |
| 1,29  | 386,36                                    | 176,96 | 133,64                                 | 0,05 | 2,89                                     |
| 1,34  | 379,56                                    | 177,01 | 133,60                                 | 0,05 | 2,84                                     |
| 1,38  | 373,07                                    | 177,05 | 133,56                                 | 0,05 | 2,79                                     |
| 1,43  | 366,95                                    | 177,10 | 133,52                                 | 0,05 | 2,75                                     |
| 1,47  | 361,08                                    | 177,14 | 133,48                                 | 0,05 | 2,71                                     |
| 1,52  | 355,54                                    | 177,19 | 133,44                                 | 0,05 | 2,66                                     |
| 1,57  | 350,21                                    | 177,24 | 133,40                                 | 0,06 | 2,63                                     |
| 1,61  | 345,17                                    | 177,28 | 133,36                                 | 0,06 | 2,59                                     |
| 1,66  | 340,31                                    | 177,33 | 133,32                                 | 0,06 | 2,55                                     |
| 1,70  | 335,69                                    | 177,37 | 133,28                                 | 0,06 | 2,52                                     |
| 1,75  | 331,23                                    | 177,42 | 133,24                                 | 0,06 | 2,49                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,80 | 326,98 | 177,47 | 133,20 | 0,06 | 2,45 |
| 1,84 | 322,86 | 177,51 | 133,16 | 0,07 | 2,42 |
| 1,89 | 318,94 | 177,56 | 133,12 | 0,07 | 2,40 |
| 1,94 | 315,13 | 177,61 | 133,08 | 0,07 | 2,37 |
| 1,98 | 311,49 | 177,65 | 133,04 | 0,07 | 2,34 |
| 2,03 | 307,96 | 177,70 | 133,00 | 0,07 | 2,32 |
| 2,08 | 304,57 | 177,75 | 132,96 | 0,07 | 2,29 |
| 2,13 | 301,28 | 177,80 | 132,92 | 0,08 | 2,27 |
| 2,17 | 298,12 | 177,84 | 132,88 | 0,08 | 2,24 |
| 2,22 | 295,05 | 177,89 | 132,84 | 0,08 | 2,22 |
| 2,27 | 292,09 | 177,94 | 132,80 | 0,08 | 2,20 |
| 2,32 | 289,21 | 177,99 | 132,76 | 0,08 | 2,18 |
| 2,36 | 286,44 | 178,03 | 132,72 | 0,08 | 2,16 |
| 2,41 | 283,73 | 178,08 | 132,68 | 0,09 | 2,14 |
| 2,46 | 281,12 | 178,13 | 132,64 | 0,09 | 2,12 |
| 2,51 | 278,57 | 178,18 | 132,60 | 0,09 | 2,10 |
| 2,56 | 276,11 | 178,23 | 132,56 | 0,09 | 2,08 |
| 2,61 | 273,70 | 178,28 | 132,52 | 0,09 | 2,07 |
| 2,66 | 271,37 | 178,33 | 132,48 | 0,09 | 2,05 |
| 2,70 | 269,09 | 178,37 | 132,43 | 0,10 | 2,03 |
| 2,75 | 266,88 | 178,42 | 132,39 | 0,10 | 2,02 |
| 2,80 | 264,72 | 178,47 | 132,35 | 0,10 | 2,00 |
| 2,85 | 262,63 | 178,52 | 132,31 | 0,10 | 1,98 |
| 2,90 | 260,57 | 178,57 | 132,27 | 0,10 | 1,97 |
| 2,95 | 258,59 | 178,62 | 132,23 | 0,10 | 1,96 |
| 3,00 | 256,63 | 178,67 | 132,18 | 0,11 | 1,94 |
| 3,05 | 254,74 | 178,72 | 132,14 | 0,11 | 1,93 |
| 3,10 | 252,88 | 178,77 | 132,10 | 0,11 | 1,91 |
| 3,15 | 251,07 | 178,82 | 132,06 | 0,11 | 1,90 |
| 3,20 | 249,29 | 178,87 | 132,02 | 0,11 | 1,89 |
| 3,25 | 247,57 | 178,92 | 131,97 | 0,11 | 1,88 |
| 3,30 | 245,86 | 178,97 | 131,93 | 0,12 | 1,86 |
| 3,36 | 244,21 | 179,03 | 131,89 | 0,12 | 1,85 |
| 3,41 | 242,58 | 179,08 | 131,85 | 0,12 | 1,84 |
| 3,46 | 240,99 | 179,13 | 131,80 | 0,12 | 1,83 |
| 3,51 | 239,43 | 179,18 | 131,76 | 0,12 | 1,82 |
| 3,56 | 237,91 | 179,23 | 131,72 | 0,13 | 1,81 |
| 3,61 | 236,40 | 179,28 | 131,68 | 0,13 | 1,80 |
| 3,66 | 234,94 | 179,33 | 131,63 | 0,13 | 1,78 |
| 3,72 | 233,50 | 179,39 | 131,59 | 0,13 | 1,77 |
| 3,77 | 232,09 | 179,44 | 131,55 | 0,13 | 1,76 |
| 3,82 | 230,70 | 179,49 | 131,50 | 0,13 | 1,75 |
| 3,87 | 229,34 | 179,54 | 131,46 | 0,14 | 1,74 |
| 3,93 | 228,00 | 179,60 | 131,42 | 0,14 | 1,73 |
| 3,98 | 226,69 | 179,65 | 131,37 | 0,14 | 1,73 |
| 4,03 | 225,40 | 179,70 | 131,33 | 0,14 | 1,72 |
| 4,08 | 224,13 | 179,75 | 131,29 | 0,14 | 1,71 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 4,14 | 222,88 | 179,81 | 131,24 | 0,15 | 1,70 |
| 4,19 | 221,66 | 179,86 | 131,20 | 0,15 | 1,69 |
| 4,24 | 220,45 | 179,91 | 131,15 | 0,15 | 1,68 |
| 4,30 | 219,26 | 179,97 | 131,11 | 0,15 | 1,67 |
| 4,35 | 218,09 | 180,02 | 131,07 | 0,15 | 1,66 |
| 4,41 | 216,94 | 180,08 | 131,02 | 0,16 | 1,66 |
| 4,46 | 215,80 | 180,13 | 130,98 | 0,16 | 1,65 |
| 4,51 | 214,69 | 180,18 | 130,93 | 0,16 | 1,64 |
| 4,57 | 213,59 | 180,24 | 130,89 | 0,16 | 1,63 |
| 4,62 | 212,50 | 180,29 | 130,84 | 0,16 | 1,62 |
| 4,68 | 211,43 | 180,35 | 130,80 | 0,17 | 1,62 |
| 4,73 | 210,38 | 180,40 | 130,76 | 0,17 | 1,61 |
| 4,79 | 209,34 | 180,46 | 130,71 | 0,17 | 1,60 |
| 4,84 | 208,32 | 180,51 | 130,67 | 0,17 | 1,59 |
| 4,90 | 207,31 | 180,57 | 130,62 | 0,17 | 1,59 |
| 4,96 | 206,31 | 180,63 | 130,58 | 0,17 | 1,58 |
| 5,01 | 205,32 | 180,68 | 130,53 | 0,18 | 1,57 |
| 5,07 | 204,35 | 180,74 | 130,49 | 0,18 | 1,57 |
| 5,12 | 203,38 | 180,79 | 130,44 | 0,18 | 1,56 |
| 5,18 | 202,43 | 180,85 | 130,39 | 0,18 | 1,55 |
| 5,24 | 201,49 | 180,91 | 130,35 | 0,18 | 1,55 |
| 5,29 | 200,57 | 180,96 | 130,30 | 0,19 | 1,54 |
| 5,35 | 199,65 | 181,02 | 130,26 | 0,19 | 1,53 |
| 5,41 | 198,74 | 181,08 | 130,21 | 0,19 | 1,53 |
| 5,46 | 197,84 | 181,13 | 130,17 | 0,19 | 1,52 |
| 5,52 | 196,96 | 181,19 | 130,12 | 0,19 | 1,51 |
| 5,58 | 196,08 | 181,25 | 130,07 | 0,20 | 1,51 |
| 5,64 | 195,21 | 181,31 | 130,03 | 0,20 | 1,50 |
| 5,69 | 194,34 | 181,36 | 129,98 | 0,20 | 1,50 |
| 5,75 | 193,49 | 181,42 | 129,94 | 0,20 | 1,49 |
| 5,81 | 192,65 | 181,48 | 129,89 | 0,21 | 1,48 |
| 5,87 | 191,81 | 181,54 | 129,84 | 0,21 | 1,48 |
| 5,93 | 190,98 | 181,60 | 129,80 | 0,21 | 1,47 |
| 5,98 | 190,16 | 181,65 | 129,75 | 0,21 | 1,47 |
| 6,04 | 189,35 | 181,71 | 129,70 | 0,21 | 1,46 |
| 6,10 | 188,54 | 181,77 | 129,66 | 0,22 | 1,45 |
| 6,16 | 187,74 | 181,83 | 129,61 | 0,22 | 1,45 |
| 6,22 | 186,94 | 181,89 | 129,56 | 0,22 | 1,44 |
| 6,28 | 186,16 | 181,95 | 129,51 | 0,22 | 1,44 |
| 6,34 | 185,37 | 182,01 | 129,47 | 0,22 | 1,43 |
| 6,40 | 184,60 | 182,07 | 129,42 | 0,23 | 1,43 |
| 6,46 | 183,83 | 182,13 | 129,37 | 0,23 | 1,42 |
| 6,52 | 183,06 | 182,19 | 129,32 | 0,23 | 1,42 |
| 6,58 | 182,30 | 182,25 | 129,28 | 0,23 | 1,41 |
| 6,64 | 181,55 | 182,31 | 129,23 | 0,23 | 1,40 |
| 6,70 | 180,80 | 182,37 | 129,18 | 0,24 | 1,40 |
| 6,76 | 180,06 | 182,43 | 129,13 | 0,24 | 1,39 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 6,82 | 179,32 | 182,49 | 129,09 | 0,24 | 1,39 |
| 6,88 | 178,58 | 182,55 | 129,04 | 0,24 | 1,38 |
| 6,95 | 177,85 | 182,62 | 128,99 | 0,25 | 1,38 |
| 7,01 | 177,12 | 182,68 | 128,94 | 0,25 | 1,37 |
| 7,07 | 176,40 | 182,74 | 128,89 | 0,25 | 1,37 |
| 7,13 | 175,68 | 182,80 | 128,84 | 0,25 | 1,36 |
| 7,19 | 174,96 | 182,86 | 128,80 | 0,25 | 1,36 |
| 7,25 | 174,25 | 182,92 | 128,75 | 0,26 | 1,35 |
| 7,32 | 173,54 | 182,99 | 128,70 | 0,26 | 1,35 |
| 7,38 | 172,83 | 183,05 | 128,65 | 0,26 | 1,34 |
| 7,44 | 172,13 | 183,11 | 128,60 | 0,26 | 1,34 |
| 7,51 | 171,42 | 183,18 | 128,55 | 0,26 | 1,33 |
| 7,57 | 170,73 | 183,24 | 128,50 | 0,27 | 1,33 |
| 7,63 | 170,03 | 183,30 | 128,45 | 0,27 | 1,32 |
| 7,70 | 169,33 | 183,37 | 128,40 | 0,27 | 1,32 |
| 7,76 | 168,64 | 183,43 | 128,35 | 0,27 | 1,31 |
| 7,82 | 167,95 | 183,49 | 128,30 | 0,28 | 1,31 |
| 7,89 | 167,26 | 183,56 | 128,26 | 0,28 | 1,30 |
| 7,95 | 166,57 | 183,62 | 128,21 | 0,28 | 1,30 |
| 8,02 | 165,89 | 183,69 | 128,16 | 0,28 | 1,29 |
| 8,08 | 165,20 | 183,75 | 128,11 | 0,29 | 1,29 |
| 8,15 | 164,52 | 183,82 | 128,06 | 0,29 | 1,28 |
| 8,21 | 163,84 | 183,88 | 128,01 | 0,29 | 1,28 |
| 8,28 | 163,16 | 183,95 | 127,96 | 0,29 | 1,28 |
| 8,34 | 162,48 | 184,01 | 127,91 | 0,29 | 1,27 |
| 8,41 | 161,79 | 184,08 | 127,86 | 0,30 | 1,27 |
| 8,47 | 161,12 | 184,14 | 127,81 | 0,30 | 1,26 |
| 8,54 | 160,44 | 184,21 | 127,75 | 0,30 | 1,26 |
| 8,61 | 159,76 | 184,28 | 127,70 | 0,30 | 1,25 |
| 8,67 | 159,08 | 184,34 | 127,65 | 0,31 | 1,25 |
| 8,74 | 158,40 | 184,41 | 127,60 | 0,31 | 1,24 |
| 8,81 | 157,72 | 184,48 | 127,55 | 0,31 | 1,24 |
| 8,87 | 157,04 | 184,54 | 127,50 | 0,31 | 1,23 |
| 8,94 | 156,36 | 184,61 | 127,45 | 0,32 | 1,23 |
| 9,01 | 155,68 | 184,68 | 127,40 | 0,32 | 1,22 |
| 9,07 | 155,00 | 184,74 | 127,35 | 0,32 | 1,22 |
| 9,14 | 154,32 | 184,81 | 127,30 | 0,32 | 1,21 |
| 9,21 | 153,64 | 184,88 | 127,25 | 0,33 | 1,21 |
| 9,28 | 152,95 | 184,95 | 127,19 | 0,33 | 1,20 |
| 9,35 | 152,26 | 185,02 | 127,14 | 0,33 | 1,20 |
| 9,42 | 151,58 | 185,09 | 127,09 | 0,33 | 1,19 |
| 9,48 | 150,89 | 185,15 | 127,04 | 0,33 | 1,19 |
| 9,55 | 150,19 | 185,22 | 126,99 | 0,34 | 1,18 |
| 9,62 | 149,50 | 185,29 | 126,93 | 0,34 | 1,18 |
| 9,69 | 148,81 | 185,36 | 126,88 | 0,34 | 1,17 |
| 9,76 | 148,11 | 185,43 | 126,83 | 0,34 | 1,17 |
| 9,83 | 147,41 | 185,50 | 126,78 | 0,35 | 1,16 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 9,90  | 146,70 | 185,57 | 126,73 | 0,35 | 1,16 |
| 9,97  | 146,00 | 185,64 | 126,67 | 0,35 | 1,15 |
| 10,04 | 145,29 | 185,71 | 126,62 | 0,35 | 1,15 |
| 10,11 | 144,58 | 185,78 | 126,57 | 0,36 | 1,14 |
| 10,18 | 143,86 | 185,85 | 126,52 | 0,36 | 1,14 |
| 10,25 | 143,14 | 185,92 | 126,46 | 0,36 | 1,13 |
| 10,33 | 142,42 | 186,00 | 126,41 | 0,36 | 1,13 |
| 10,40 | 141,69 | 186,07 | 126,36 | 0,37 | 1,12 |
| 10,47 | 140,96 | 186,14 | 126,30 | 0,37 | 1,12 |
| 10,54 | 140,23 | 186,21 | 126,25 | 0,37 | 1,11 |
| 10,61 | 139,49 | 186,28 | 126,20 | 0,37 | 1,11 |
| 10,68 | 138,75 | 186,35 | 126,14 | 0,38 | 1,10 |
| 10,76 | 138,00 | 186,43 | 126,09 | 0,38 | 1,09 |
| 10,83 | 137,24 | 186,50 | 126,04 | 0,38 | 1,09 |
| 10,90 | 136,49 | 186,57 | 125,98 | 0,38 | 1,08 |
| 10,98 | 135,72 | 186,65 | 125,93 | 0,39 | 1,08 |
| 11,05 | 134,95 | 186,72 | 125,88 | 0,39 | 1,07 |
| 11,12 | 134,18 | 186,79 | 125,82 | 0,39 | 1,07 |
| 11,20 | 133,40 | 186,87 | 125,77 | 0,40 | 1,06 |
| 11,27 | 132,61 | 186,94 | 125,71 | 0,40 | 1,05 |
| 11,34 | 131,82 | 187,01 | 125,66 | 0,40 | 1,05 |
| 11,42 | 131,01 | 187,09 | 125,61 | 0,40 | 1,04 |
| 11,49 | 130,21 | 187,16 | 125,55 | 0,41 | 1,04 |
| 11,57 | 129,39 | 187,24 | 125,50 | 0,41 | 1,03 |
| 11,64 | 128,57 | 187,31 | 125,44 | 0,41 | 1,02 |
| 11,72 | 127,74 | 187,39 | 125,39 | 0,41 | 1,02 |
| 11,79 | 126,90 | 187,46 | 125,33 | 0,42 | 1,01 |
| 11,87 | 126,05 | 187,54 | 125,28 | 0,42 | 1,01 |
| 11,95 | 125,20 | 187,62 | 125,22 | 0,42 | 1,00 |
| 12,02 | 124,33 | 187,69 | 125,17 | 0,42 | 0,99 |
| 12,10 | 123,46 | 187,77 | 125,11 | 0,43 | 0,99 |
| 12,18 | 122,58 | 187,85 | 125,06 | 0,43 | 0,98 |
| 12,25 | 121,69 | 187,92 | 125,00 | 0,43 | 0,97 |
| 12,33 | 120,78 | 188,00 | 124,95 | 0,44 | 0,97 |
| 12,41 | 119,87 | 188,08 | 124,89 | 0,44 | 0,96 |
| 12,48 | 118,95 | 188,15 | 124,84 | 0,44 | 0,95 |
| 12,56 | 118,02 | 188,23 | 124,78 | 0,44 | 0,95 |
| 12,64 | 117,07 | 188,31 | 124,72 | 0,45 | 0,94 |
| 12,72 | 116,11 | 188,39 | 124,67 | 0,45 | 0,93 |
| 12,80 | 115,14 | 188,47 | 124,61 | 0,45 | 0,92 |
| 12,87 | 114,16 | 188,54 | 124,56 | 0,45 | 0,92 |
| 12,95 | 113,16 | 188,62 | 124,50 | 0,46 | 0,91 |
| 13,03 | 112,16 | 188,70 | 124,44 | 0,46 | 0,90 |
| 13,11 | 111,13 | 188,78 | 124,39 | 0,46 | 0,89 |
| 13,19 | 110,10 | 188,86 | 124,33 | 0,47 | 0,89 |
| 13,27 | 109,04 | 188,94 | 124,27 | 0,47 | 0,88 |
| 13,35 | 107,98 | 189,02 | 124,22 | 0,47 | 0,87 |

|       |        |        |        |      |       |
|-------|--------|--------|--------|------|-------|
| 13,43 | 106,90 | 189,10 | 124,16 | 0,47 | 0,86  |
| 13,51 | 105,80 | 189,18 | 124,10 | 0,48 | 0,85  |
| 13,59 | 104,68 | 189,26 | 124,05 | 0,48 | 0,84  |
| 13,67 | 103,55 | 189,34 | 123,99 | 0,48 | 0,84  |
| 13,76 | 102,40 | 189,43 | 123,93 | 0,49 | 0,83  |
| 13,84 | 101,23 | 189,51 | 123,88 | 0,49 | 0,82  |
| 13,92 | 100,05 | 189,59 | 123,82 | 0,49 | 0,81  |
| 14,00 | 98,84  | 189,67 | 123,76 | 0,49 | 0,80  |
| 14,08 | 97,61  | 189,75 | 123,70 | 0,50 | 0,79  |
| 14,16 | 96,37  | 189,83 | 123,65 | 0,50 | 0,78  |
| 14,25 | 95,10  | 189,92 | 123,59 | 0,50 | 0,77  |
| 14,33 | 57,75  | 190,00 | -12,41 | 0,51 | -4,66 |
| 14,68 | 21,66  | 190,35 | -12,38 | 0,52 | -1,75 |
| 15,03 | 21,60  | 190,70 | -12,36 | 0,53 | -1,75 |
| 15,38 | 21,53  | 191,05 | -12,33 | 0,54 | -1,75 |
| 15,73 | 21,44  | 191,40 | -12,31 | 0,56 | -1,74 |
| 16,08 | 21,35  | 191,75 | -12,28 | 0,57 | -1,74 |
| 16,43 | 21,23  | 192,10 | -12,26 | 0,58 | -1,73 |
| 16,78 | 21,10  | 192,45 | -12,24 | 0,59 | -1,72 |
| 17,13 | 20,96  | 192,80 | -12,21 | 0,60 | -1,72 |
| 17,48 | 20,81  | 193,15 | -12,19 | 0,62 | -1,71 |
| 17,83 | 20,64  | 193,50 | -12,17 | 0,63 | -1,70 |
| 18,18 | 20,46  | 193,85 | -12,14 | 0,64 | -1,68 |
| 18,53 | 20,27  | 194,20 | -12,12 | 0,65 | -1,67 |
| 18,88 | 20,07  | 194,55 | -12,10 | 0,67 | -1,66 |
| 19,23 | 19,85  | 194,90 | -12,08 | 0,68 | -1,64 |
| 19,58 | 19,63  | 195,25 | -12,05 | 0,69 | -1,63 |
| 19,93 | 19,39  | 195,60 | -12,03 | 0,70 | -1,61 |
| 20,28 | 19,15  | 195,95 | -12,01 | 0,72 | -1,59 |
| 20,63 | 18,89  | 196,30 | -11,99 | 0,73 | -1,58 |
| 20,98 | 18,62  | 196,65 | -11,96 | 0,74 | -1,56 |
| 21,33 | 18,33  | 197,00 | -11,94 | 0,75 | -1,53 |
| 21,68 | 18,04  | 197,35 | -11,92 | 0,77 | -1,51 |
| 22,03 | 17,73  | 197,70 | -11,90 | 0,78 | -1,49 |
| 22,38 | 17,41  | 198,05 | -11,88 | 0,79 | -1,47 |
| 22,73 | 17,07  | 198,40 | -11,85 | 0,80 | -1,44 |
| 23,08 | 16,73  | 198,75 | -11,83 | 0,81 | -1,41 |
| 23,43 | 16,37  | 199,10 | -11,81 | 0,83 | -1,39 |
| 23,78 | 15,99  | 199,45 | -11,79 | 0,84 | -1,36 |
| 24,13 | 15,60  | 199,80 | -11,77 | 0,85 | -1,33 |
| 24,48 | 15,20  | 200,15 | -11,75 | 0,86 | -1,29 |
| 24,83 | 14,78  | 200,50 | -11,73 | 0,88 | -1,26 |
| 25,18 | 14,34  | 200,85 | -11,71 | 0,89 | -1,22 |
| 25,53 | 13,89  | 201,20 | -11,69 | 0,90 | -1,19 |
| 25,88 | 13,41  | 201,55 | -11,67 | 0,91 | -1,15 |
| 26,23 | 12,92  | 201,90 | -11,65 | 0,93 | -1,11 |
| 26,58 | 12,42  | 202,25 | -11,63 | 0,94 | -1,07 |

|       |       |        |        |      |       |
|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| 26,93 | 11,88 | 202,60 | -11,61 | 0,95 | -1,02 |
| 27,28 | 11,33 | 202,95 | -11,58 | 0,96 | -0,98 |
| 27,63 | 10,76 | 203,30 | -11,56 | 0,98 | -0,93 |
| 27,98 | 10,16 | 203,65 | -11,54 | 0,99 | -0,88 |
| 28,33 | 9,54  | 204,00 | -11,53 | 1,00 | -0,83 |

**Semicírculo de bi-material parede espessa com profundidade de entalhe de 6,30.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 2011,21                                   | 176,30 | 138,02                                 | 0,00 | 14,57                                    |
| 0,04  | 1732,74                                   | 176,34 | 137,99                                 | 0,00 | 12,56                                    |
| 0,08  | 1528,14                                   | 176,38 | 137,95                                 | 0,00 | 11,08                                    |
| 0,12  | 1358,47                                   | 176,42 | 137,91                                 | 0,00 | 9,85                                     |
| 0,16  | 1230,49                                   | 176,46 | 137,88                                 | 0,01 | 8,92                                     |
| 0,20  | 1121,10                                   | 176,50 | 137,84                                 | 0,01 | 8,13                                     |
| 0,24  | 1034,37                                   | 176,54 | 137,81                                 | 0,01 | 7,51                                     |
| 0,28  | 960,25                                    | 176,58 | 137,77                                 | 0,01 | 6,97                                     |
| 0,32  | 897,74                                    | 176,62 | 137,74                                 | 0,01 | 6,52                                     |
| 0,36  | 844,17                                    | 176,66 | 137,70                                 | 0,01 | 6,13                                     |
| 0,40  | 798,02                                    | 176,70 | 137,66                                 | 0,01 | 5,80                                     |
| 0,44  | 757,41                                    | 176,74 | 137,63                                 | 0,02 | 5,50                                     |
| 0,48  | 721,77                                    | 176,78 | 137,59                                 | 0,02 | 5,25                                     |
| 0,52  | 690,07                                    | 176,82 | 137,55                                 | 0,02 | 5,02                                     |
| 0,56  | 661,76                                    | 176,86 | 137,52                                 | 0,02 | 4,81                                     |
| 0,60  | 636,31                                    | 176,90 | 137,48                                 | 0,02 | 4,63                                     |
| 0,65  | 613,29                                    | 176,95 | 137,44                                 | 0,02 | 4,46                                     |
| 0,69  | 592,40                                    | 176,99 | 137,41                                 | 0,02 | 4,31                                     |
| 0,73  | 573,28                                    | 177,03 | 137,37                                 | 0,03 | 4,17                                     |
| 0,77  | 555,82                                    | 177,07 | 137,33                                 | 0,03 | 4,05                                     |
| 0,81  | 539,68                                    | 177,11 | 137,30                                 | 0,03 | 3,93                                     |
| 0,85  | 524,84                                    | 177,15 | 137,26                                 | 0,03 | 3,82                                     |
| 0,90  | 511,02                                    | 177,20 | 137,22                                 | 0,03 | 3,72                                     |
| 0,94  | 498,24                                    | 177,24 | 137,19                                 | 0,03 | 3,63                                     |
| 0,98  | 486,26                                    | 177,28 | 137,15                                 | 0,04 | 3,55                                     |
| 1,02  | 475,14                                    | 177,32 | 137,11                                 | 0,04 | 3,47                                     |
| 1,07  | 464,64                                    | 177,37 | 137,07                                 | 0,04 | 3,39                                     |
| 1,11  | 454,84                                    | 177,41 | 137,04                                 | 0,04 | 3,32                                     |
| 1,15  | 445,55                                    | 177,45 | 137,00                                 | 0,04 | 3,25                                     |
| 1,19  | 436,85                                    | 177,49 | 136,96                                 | 0,04 | 3,19                                     |
| 1,24  | 428,57                                    | 177,54 | 136,92                                 | 0,04 | 3,13                                     |
| 1,28  | 420,78                                    | 177,58 | 136,89                                 | 0,05 | 3,07                                     |
| 1,32  | 413,33                                    | 177,62 | 136,85                                 | 0,05 | 3,02                                     |
| 1,37  | 406,31                                    | 177,67 | 136,81                                 | 0,05 | 2,97                                     |
| 1,41  | 399,58                                    | 177,71 | 136,77                                 | 0,05 | 2,92                                     |
| 1,45  | 393,21                                    | 177,75 | 136,73                                 | 0,05 | 2,88                                     |
| 1,50  | 387,09                                    | 177,80 | 136,70                                 | 0,05 | 2,83                                     |
| 1,54  | 381,30                                    | 177,84 | 136,66                                 | 0,06 | 2,79                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,58 | 375,71 | 177,88 | 136,62 | 0,06 | 2,75 |
| 1,63 | 370,38 | 177,93 | 136,58 | 0,06 | 2,71 |
| 1,67 | 365,24 | 177,97 | 136,54 | 0,06 | 2,67 |
| 1,72 | 360,34 | 178,02 | 136,50 | 0,06 | 2,64 |
| 1,76 | 355,59 | 178,06 | 136,46 | 0,06 | 2,61 |
| 1,81 | 351,06 | 178,11 | 136,43 | 0,07 | 2,57 |
| 1,85 | 346,66 | 178,15 | 136,39 | 0,07 | 2,54 |
| 1,90 | 342,46 | 178,20 | 136,35 | 0,07 | 2,51 |
| 1,94 | 338,37 | 178,24 | 136,31 | 0,07 | 2,48 |
| 1,99 | 334,45 | 178,29 | 136,27 | 0,07 | 2,45 |
| 2,03 | 330,64 | 178,33 | 136,23 | 0,07 | 2,43 |
| 2,08 | 326,98 | 178,38 | 136,19 | 0,07 | 2,40 |
| 2,12 | 323,41 | 178,42 | 136,15 | 0,08 | 2,38 |
| 2,17 | 319,98 | 178,47 | 136,11 | 0,08 | 2,35 |
| 2,21 | 316,64 | 178,51 | 136,07 | 0,08 | 2,33 |
| 2,26 | 313,42 | 178,56 | 136,03 | 0,08 | 2,30 |
| 2,31 | 310,27 | 178,61 | 135,99 | 0,08 | 2,28 |
| 2,35 | 307,24 | 178,65 | 135,95 | 0,08 | 2,26 |
| 2,40 | 304,27 | 178,70 | 135,91 | 0,09 | 2,24 |
| 2,45 | 301,40 | 178,75 | 135,87 | 0,09 | 2,22 |
| 2,49 | 298,59 | 178,79 | 135,83 | 0,09 | 2,20 |
| 2,54 | 295,88 | 178,84 | 135,79 | 0,09 | 2,18 |
| 2,59 | 293,22 | 178,89 | 135,75 | 0,09 | 2,16 |
| 2,63 | 290,64 | 178,93 | 135,71 | 0,10 | 2,14 |
| 2,68 | 288,12 | 178,98 | 135,67 | 0,10 | 2,12 |
| 2,73 | 285,67 | 179,03 | 135,63 | 0,10 | 2,11 |
| 2,77 | 283,27 | 179,07 | 135,59 | 0,10 | 2,09 |
| 2,82 | 280,94 | 179,12 | 135,55 | 0,10 | 2,07 |
| 2,87 | 278,65 | 179,17 | 135,51 | 0,10 | 2,06 |
| 2,92 | 276,44 | 179,22 | 135,47 | 0,11 | 2,04 |
| 2,97 | 274,26 | 179,27 | 135,43 | 0,11 | 2,03 |
| 3,01 | 272,14 | 179,31 | 135,39 | 0,11 | 2,01 |
| 3,06 | 270,05 | 179,36 | 135,35 | 0,11 | 2,00 |
| 3,11 | 268,02 | 179,41 | 135,30 | 0,11 | 1,98 |
| 3,16 | 266,02 | 179,46 | 135,26 | 0,11 | 1,97 |
| 3,21 | 264,07 | 179,51 | 135,22 | 0,12 | 1,95 |
| 3,26 | 262,15 | 179,56 | 135,18 | 0,12 | 1,94 |
| 3,31 | 260,28 | 179,61 | 135,14 | 0,12 | 1,93 |
| 3,35 | 258,44 | 179,65 | 135,10 | 0,12 | 1,91 |
| 3,40 | 256,65 | 179,70 | 135,06 | 0,12 | 1,90 |
| 3,45 | 254,88 | 179,75 | 135,01 | 0,12 | 1,89 |
| 3,50 | 253,15 | 179,80 | 134,97 | 0,13 | 1,88 |
| 3,55 | 251,45 | 179,85 | 134,93 | 0,13 | 1,86 |
| 3,60 | 249,78 | 179,90 | 134,89 | 0,13 | 1,85 |
| 3,65 | 248,14 | 179,95 | 134,85 | 0,13 | 1,84 |
| 3,70 | 246,53 | 180,00 | 134,80 | 0,13 | 1,83 |
| 3,75 | 244,95 | 180,05 | 134,76 | 0,14 | 1,82 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 3,80 | 243,40 | 180,10 | 134,72 | 0,14 | 1,81 |
| 3,85 | 241,87 | 180,15 | 134,68 | 0,14 | 1,80 |
| 3,91 | 240,37 | 180,21 | 134,63 | 0,14 | 1,79 |
| 3,96 | 238,89 | 180,26 | 134,59 | 0,14 | 1,77 |
| 4,01 | 237,44 | 180,31 | 134,55 | 0,14 | 1,76 |
| 4,06 | 236,00 | 180,36 | 134,51 | 0,15 | 1,75 |
| 4,11 | 234,59 | 180,41 | 134,46 | 0,15 | 1,74 |
| 4,16 | 233,20 | 180,46 | 134,42 | 0,15 | 1,73 |
| 4,21 | 231,83 | 180,51 | 134,38 | 0,15 | 1,73 |
| 4,26 | 230,48 | 180,56 | 134,33 | 0,15 | 1,72 |
| 4,32 | 229,16 | 180,62 | 134,29 | 0,16 | 1,71 |
| 4,37 | 227,84 | 180,67 | 134,25 | 0,16 | 1,70 |
| 4,42 | 226,55 | 180,72 | 134,20 | 0,16 | 1,69 |
| 4,47 | 225,28 | 180,77 | 134,16 | 0,16 | 1,68 |
| 4,53 | 224,03 | 180,83 | 134,12 | 0,16 | 1,67 |
| 4,58 | 222,79 | 180,88 | 134,07 | 0,17 | 1,66 |
| 4,63 | 221,57 | 180,93 | 134,03 | 0,17 | 1,65 |
| 4,68 | 220,36 | 180,98 | 133,98 | 0,17 | 1,64 |
| 4,74 | 219,16 | 181,04 | 133,94 | 0,17 | 1,64 |
| 4,79 | 217,98 | 181,09 | 133,90 | 0,17 | 1,63 |
| 4,84 | 216,82 | 181,14 | 133,85 | 0,17 | 1,62 |
| 4,90 | 215,67 | 181,20 | 133,81 | 0,18 | 1,61 |
| 4,95 | 214,53 | 181,25 | 133,76 | 0,18 | 1,60 |
| 5,01 | 213,41 | 181,31 | 133,72 | 0,18 | 1,60 |
| 5,06 | 212,30 | 181,36 | 133,67 | 0,18 | 1,59 |
| 5,11 | 211,20 | 181,41 | 133,63 | 0,18 | 1,58 |
| 5,17 | 210,11 | 181,47 | 133,58 | 0,19 | 1,57 |
| 5,22 | 209,03 | 181,52 | 133,54 | 0,19 | 1,57 |
| 5,28 | 207,97 | 181,58 | 133,49 | 0,19 | 1,56 |
| 5,33 | 206,92 | 181,63 | 133,45 | 0,19 | 1,55 |
| 5,39 | 205,87 | 181,69 | 133,40 | 0,19 | 1,54 |
| 5,44 | 204,84 | 181,74 | 133,36 | 0,20 | 1,54 |
| 5,50 | 203,82 | 181,80 | 133,31 | 0,20 | 1,53 |
| 5,55 | 202,80 | 181,85 | 133,27 | 0,20 | 1,52 |
| 5,61 | 201,80 | 181,91 | 133,22 | 0,20 | 1,51 |
| 5,67 | 200,80 | 181,97 | 133,18 | 0,20 | 1,51 |
| 5,72 | 199,81 | 182,02 | 133,13 | 0,21 | 1,50 |
| 5,78 | 198,83 | 182,08 | 133,09 | 0,21 | 1,49 |
| 5,83 | 197,86 | 182,13 | 133,04 | 0,21 | 1,49 |
| 5,89 | 196,90 | 182,19 | 132,99 | 0,21 | 1,48 |
| 5,95 | 195,94 | 182,25 | 132,95 | 0,21 | 1,47 |
| 6,00 | 194,99 | 182,30 | 132,90 | 0,22 | 1,47 |
| 6,06 | 194,05 | 182,36 | 132,86 | 0,22 | 1,46 |
| 6,12 | 193,12 | 182,42 | 132,81 | 0,22 | 1,45 |
| 6,18 | 192,19 | 182,48 | 132,76 | 0,22 | 1,45 |
| 6,23 | 191,26 | 182,53 | 132,72 | 0,23 | 1,44 |
| 6,29 | 190,35 | 182,59 | 132,67 | 0,23 | 1,43 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 6,35 | 189,44 | 182,65 | 132,62 | 0,23 | 1,43 |
| 6,41 | 188,54 | 182,71 | 132,58 | 0,23 | 1,42 |
| 6,46 | 187,64 | 182,76 | 132,53 | 0,23 | 1,42 |
| 6,52 | 186,75 | 182,82 | 132,48 | 0,24 | 1,41 |
| 6,58 | 185,86 | 182,88 | 132,44 | 0,24 | 1,40 |
| 6,64 | 184,98 | 182,94 | 132,39 | 0,24 | 1,40 |
| 6,70 | 184,10 | 183,00 | 132,34 | 0,24 | 1,39 |
| 6,76 | 183,22 | 183,06 | 132,29 | 0,24 | 1,38 |
| 6,82 | 182,35 | 183,12 | 132,25 | 0,25 | 1,38 |
| 6,88 | 181,49 | 183,18 | 132,20 | 0,25 | 1,37 |
| 6,94 | 180,62 | 183,24 | 132,15 | 0,25 | 1,37 |
| 7,00 | 179,76 | 183,30 | 132,10 | 0,25 | 1,36 |
| 7,06 | 178,91 | 183,36 | 132,06 | 0,25 | 1,35 |
| 7,12 | 178,06 | 183,42 | 132,01 | 0,26 | 1,35 |
| 7,18 | 177,21 | 183,48 | 131,96 | 0,26 | 1,34 |
| 7,24 | 176,36 | 183,54 | 131,91 | 0,26 | 1,34 |
| 7,30 | 175,52 | 183,60 | 131,87 | 0,26 | 1,33 |
| 7,36 | 174,68 | 183,66 | 131,82 | 0,27 | 1,33 |
| 7,42 | 173,84 | 183,72 | 131,77 | 0,27 | 1,32 |
| 7,48 | 173,00 | 183,78 | 131,72 | 0,27 | 1,31 |
| 7,54 | 172,17 | 183,84 | 131,67 | 0,27 | 1,31 |
| 7,60 | 171,33 | 183,90 | 131,62 | 0,27 | 1,30 |
| 7,66 | 170,50 | 183,96 | 131,57 | 0,28 | 1,30 |
| 7,73 | 169,67 | 184,03 | 131,53 | 0,28 | 1,29 |
| 7,79 | 168,85 | 184,09 | 131,48 | 0,28 | 1,28 |
| 7,85 | 168,02 | 184,15 | 131,43 | 0,28 | 1,28 |
| 7,91 | 167,19 | 184,21 | 131,38 | 0,29 | 1,27 |
| 7,98 | 166,37 | 184,28 | 131,33 | 0,29 | 1,27 |
| 8,04 | 165,55 | 184,34 | 131,28 | 0,29 | 1,26 |
| 8,10 | 164,72 | 184,40 | 131,23 | 0,29 | 1,26 |
| 8,16 | 163,90 | 184,46 | 131,18 | 0,29 | 1,25 |
| 8,23 | 163,08 | 184,53 | 131,13 | 0,30 | 1,24 |
| 8,29 | 162,26 | 184,59 | 131,08 | 0,30 | 1,24 |
| 8,35 | 161,43 | 184,65 | 131,03 | 0,30 | 1,23 |
| 8,42 | 160,61 | 184,72 | 130,98 | 0,30 | 1,23 |
| 8,48 | 159,79 | 184,78 | 130,93 | 0,31 | 1,22 |
| 8,55 | 158,96 | 184,85 | 130,88 | 0,31 | 1,21 |
| 8,61 | 158,14 | 184,91 | 130,83 | 0,31 | 1,21 |
| 8,68 | 157,31 | 184,98 | 130,78 | 0,31 | 1,20 |
| 8,74 | 156,48 | 185,04 | 130,73 | 0,32 | 1,20 |
| 8,81 | 155,65 | 185,11 | 130,68 | 0,32 | 1,19 |
| 8,87 | 154,82 | 185,17 | 130,63 | 0,32 | 1,19 |
| 8,94 | 153,99 | 185,24 | 130,58 | 0,32 | 1,18 |
| 9,00 | 153,16 | 185,30 | 130,53 | 0,32 | 1,17 |
| 9,07 | 152,32 | 185,37 | 130,48 | 0,33 | 1,17 |
| 9,13 | 151,48 | 185,43 | 130,43 | 0,33 | 1,16 |
| 9,20 | 150,64 | 185,50 | 130,38 | 0,33 | 1,16 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 9,27  | 149,80 | 185,57 | 130,33 | 0,33 | 1,15 |
| 9,33  | 148,95 | 185,63 | 130,28 | 0,34 | 1,14 |
| 9,40  | 148,10 | 185,70 | 130,22 | 0,34 | 1,14 |
| 9,47  | 147,25 | 185,77 | 130,17 | 0,34 | 1,13 |
| 9,53  | 146,39 | 185,83 | 130,12 | 0,34 | 1,13 |
| 9,60  | 145,53 | 185,90 | 130,07 | 0,35 | 1,12 |
| 9,67  | 144,67 | 185,97 | 130,02 | 0,35 | 1,11 |
| 9,74  | 143,80 | 186,04 | 129,97 | 0,35 | 1,11 |
| 9,80  | 142,93 | 186,10 | 129,92 | 0,35 | 1,10 |
| 9,87  | 142,06 | 186,17 | 129,86 | 0,36 | 1,09 |
| 9,94  | 141,18 | 186,24 | 129,81 | 0,36 | 1,09 |
| 10,01 | 140,29 | 186,31 | 129,76 | 0,36 | 1,08 |
| 10,08 | 139,40 | 186,38 | 129,71 | 0,36 | 1,07 |
| 10,15 | 138,50 | 186,45 | 129,66 | 0,37 | 1,07 |
| 10,22 | 137,60 | 186,52 | 129,60 | 0,37 | 1,06 |
| 10,28 | 136,70 | 186,58 | 129,55 | 0,37 | 1,06 |
| 10,35 | 135,78 | 186,65 | 129,50 | 0,37 | 1,05 |
| 10,42 | 134,87 | 186,72 | 129,45 | 0,38 | 1,04 |
| 10,49 | 133,94 | 186,79 | 129,39 | 0,38 | 1,04 |
| 10,56 | 133,01 | 186,86 | 129,34 | 0,38 | 1,03 |
| 10,63 | 132,07 | 186,93 | 129,29 | 0,38 | 1,02 |
| 10,70 | 131,12 | 187,00 | 129,23 | 0,39 | 1,01 |
| 10,78 | 130,17 | 187,08 | 129,18 | 0,39 | 1,01 |
| 10,85 | 129,21 | 187,15 | 129,13 | 0,39 | 1,00 |
| 10,92 | 128,24 | 187,22 | 129,07 | 0,39 | 0,99 |
| 10,99 | 127,26 | 187,29 | 129,02 | 0,40 | 0,99 |
| 11,06 | 126,28 | 187,36 | 128,97 | 0,40 | 0,98 |
| 11,13 | 125,28 | 187,43 | 128,91 | 0,40 | 0,97 |
| 11,20 | 124,28 | 187,50 | 128,86 | 0,40 | 0,96 |
| 11,28 | 123,27 | 187,58 | 128,81 | 0,41 | 0,96 |
| 11,35 | 122,24 | 187,65 | 128,75 | 0,41 | 0,95 |
| 11,42 | 121,21 | 187,72 | 128,70 | 0,41 | 0,94 |
| 11,49 | 120,16 | 187,79 | 128,65 | 0,41 | 0,93 |
| 11,57 | 119,11 | 187,87 | 128,59 | 0,42 | 0,93 |
| 11,64 | 118,04 | 187,94 | 128,54 | 0,42 | 0,92 |
| 11,71 | 116,97 | 188,01 | 128,48 | 0,42 | 0,91 |
| 11,79 | 115,88 | 188,09 | 128,43 | 0,43 | 0,90 |
| 11,86 | 114,78 | 188,16 | 128,37 | 0,43 | 0,89 |
| 11,94 | 113,66 | 188,24 | 128,32 | 0,43 | 0,89 |
| 12,01 | 112,53 | 188,31 | 128,26 | 0,43 | 0,88 |
| 12,08 | 111,39 | 188,38 | 128,21 | 0,44 | 0,87 |
| 12,16 | 110,24 | 188,46 | 128,15 | 0,44 | 0,86 |
| 12,23 | 109,07 | 188,53 | 128,10 | 0,44 | 0,85 |
| 12,31 | 107,88 | 188,61 | 128,04 | 0,44 | 0,84 |
| 12,38 | 106,68 | 188,68 | 127,99 | 0,45 | 0,83 |
| 12,46 | 105,47 | 188,76 | 127,93 | 0,45 | 0,82 |
| 12,54 | 104,23 | 188,84 | 127,88 | 0,45 | 0,82 |

|       |        |        |        |      |       |
|-------|--------|--------|--------|------|-------|
| 12,61 | 102,99 | 188,91 | 127,82 | 0,46 | 0,81  |
| 12,69 | 101,72 | 188,99 | 127,77 | 0,46 | 0,80  |
| 12,76 | 100,44 | 189,06 | 127,71 | 0,46 | 0,79  |
| 12,84 | 99,13  | 189,14 | 127,66 | 0,46 | 0,78  |
| 12,92 | 97,81  | 189,22 | 127,60 | 0,47 | 0,77  |
| 13,00 | 96,47  | 189,30 | 127,54 | 0,47 | 0,76  |
| 13,07 | 95,11  | 189,37 | 127,49 | 0,47 | 0,75  |
| 13,15 | 93,73  | 189,45 | 127,43 | 0,47 | 0,74  |
| 13,23 | 92,32  | 189,53 | 127,38 | 0,48 | 0,72  |
| 13,31 | 90,90  | 189,61 | 127,32 | 0,48 | 0,71  |
| 13,38 | 89,45  | 189,68 | 127,26 | 0,48 | 0,70  |
| 13,46 | 87,97  | 189,76 | 127,21 | 0,49 | 0,69  |
| 13,54 | 86,48  | 189,84 | 127,15 | 0,49 | 0,68  |
| 13,62 | 84,95  | 189,92 | 127,09 | 0,49 | 0,67  |
| 13,70 | 51,89  | 190,00 | -12,76 | 0,49 | -4,07 |
| 14,05 | 20,34  | 190,35 | -12,73 | 0,51 | -1,60 |
| 14,40 | 20,27  | 190,70 | -12,71 | 0,52 | -1,60 |
| 14,75 | 20,19  | 191,05 | -12,68 | 0,53 | -1,59 |
| 15,10 | 20,08  | 191,40 | -12,66 | 0,55 | -1,59 |
| 15,45 | 19,96  | 191,75 | -12,63 | 0,56 | -1,58 |
| 15,80 | 19,82  | 192,10 | -12,61 | 0,57 | -1,57 |
| 16,15 | 19,67  | 192,45 | -12,58 | 0,58 | -1,56 |
| 16,50 | 19,50  | 192,80 | -12,56 | 0,60 | -1,55 |
| 16,85 | 19,31  | 193,15 | -12,54 | 0,61 | -1,54 |
| 17,20 | 19,11  | 193,50 | -12,51 | 0,62 | -1,53 |
| 17,55 | 18,89  | 193,85 | -12,49 | 0,63 | -1,51 |
| 17,90 | 18,66  | 194,20 | -12,47 | 0,65 | -1,50 |
| 18,25 | 18,42  | 194,55 | -12,44 | 0,66 | -1,48 |
| 18,60 | 18,16  | 194,90 | -12,42 | 0,67 | -1,46 |
| 18,95 | 17,88  | 195,25 | -12,40 | 0,68 | -1,44 |
| 19,30 | 17,59  | 195,60 | -12,37 | 0,70 | -1,42 |
| 19,65 | 17,29  | 195,95 | -12,35 | 0,71 | -1,40 |
| 20,00 | 16,98  | 196,30 | -12,33 | 0,72 | -1,38 |
| 20,35 | 16,65  | 196,65 | -12,30 | 0,73 | -1,35 |
| 20,70 | 16,30  | 197,00 | -12,28 | 0,75 | -1,33 |
| 21,05 | 15,94  | 197,35 | -12,26 | 0,76 | -1,30 |
| 21,40 | 15,56  | 197,70 | -12,24 | 0,77 | -1,27 |
| 21,75 | 15,17  | 198,05 | -12,21 | 0,79 | -1,24 |
| 22,10 | 14,76  | 198,40 | -12,19 | 0,80 | -1,21 |
| 22,45 | 14,34  | 198,75 | -12,17 | 0,81 | -1,18 |
| 22,80 | 13,89  | 199,10 | -12,15 | 0,82 | -1,14 |
| 23,15 | 13,44  | 199,45 | -12,13 | 0,84 | -1,11 |
| 23,50 | 12,96  | 199,80 | -12,10 | 0,85 | -1,07 |
| 23,85 | 12,46  | 200,15 | -12,08 | 0,86 | -1,03 |
| 24,20 | 11,94  | 200,50 | -12,06 | 0,87 | -0,99 |
| 24,55 | 11,41  | 200,85 | -12,04 | 0,89 | -0,95 |
| 24,90 | 10,85  | 201,20 | -12,02 | 0,90 | -0,90 |

|       |       |        |        |      |       |
|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| 25,25 | 10,27 | 201,55 | -12,00 | 0,91 | -0,86 |
| 25,60 | 9,66  | 201,90 | -11,98 | 0,92 | -0,81 |
| 25,95 | 9,04  | 202,25 | -11,96 | 0,94 | -0,76 |
| 26,30 | 8,38  | 202,60 | -11,93 | 0,95 | -0,70 |
| 26,65 | 7,70  | 202,95 | -11,91 | 0,96 | -0,65 |
| 27,00 | 6,99  | 203,30 | -11,89 | 0,97 | -0,59 |
| 27,35 | 6,26  | 203,65 | -11,87 | 0,99 | -0,53 |
| 27,70 | 5,49  | 204,00 | -11,85 | 1,00 | -0,46 |

**Semicírculo de bi-material parede espessa com profundidade de entalhe de 6,93.**

| r(mm) | $\sigma_{\theta}$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | ri+r   | $\sigma_{\theta}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | r/W  | $\sigma_{\theta}$ MEF/ $\sigma_{\theta}$ |
|-------|-------------------------------------------|--------|----------------------------------------|------|------------------------------------------|
| 0,00  | 2188,31                                   | 176,93 | 141,43                                 | 0,00 | 15,47                                    |
| 0,04  | 1898,51                                   | 176,97 | 141,40                                 | 0,00 | 13,43                                    |
| 0,08  | 1682,70                                   | 177,01 | 141,36                                 | 0,00 | 11,90                                    |
| 0,11  | 1502,05                                   | 177,04 | 141,33                                 | 0,00 | 10,63                                    |
| 0,15  | 1364,42                                   | 177,08 | 141,29                                 | 0,01 | 9,66                                     |
| 0,19  | 1245,91                                   | 177,12 | 141,26                                 | 0,01 | 8,82                                     |
| 0,23  | 1151,39                                   | 177,16 | 141,22                                 | 0,01 | 8,15                                     |
| 0,27  | 1070,11                                   | 177,20 | 141,19                                 | 0,01 | 7,58                                     |
| 0,30  | 1001,35                                   | 177,23 | 141,15                                 | 0,01 | 7,09                                     |
| 0,34  | 942,08                                    | 177,27 | 141,12                                 | 0,01 | 6,68                                     |
| 0,38  | 890,94                                    | 177,31 | 141,08                                 | 0,01 | 6,31                                     |
| 0,42  | 845,75                                    | 177,35 | 141,05                                 | 0,02 | 6,00                                     |
| 0,46  | 806,03                                    | 177,39 | 141,01                                 | 0,02 | 5,72                                     |
| 0,50  | 770,59                                    | 177,43 | 140,98                                 | 0,02 | 5,47                                     |
| 0,54  | 738,91                                    | 177,47 | 140,94                                 | 0,02 | 5,24                                     |
| 0,58  | 710,34                                    | 177,51 | 140,91                                 | 0,02 | 5,04                                     |
| 0,62  | 684,48                                    | 177,55 | 140,87                                 | 0,02 | 4,86                                     |
| 0,66  | 660,96                                    | 177,59 | 140,84                                 | 0,02 | 4,69                                     |
| 0,70  | 639,43                                    | 177,63 | 140,80                                 | 0,03 | 4,54                                     |
| 0,74  | 619,71                                    | 177,67 | 140,76                                 | 0,03 | 4,40                                     |
| 0,77  | 601,49                                    | 177,70 | 140,73                                 | 0,03 | 4,27                                     |
| 0,81  | 584,71                                    | 177,74 | 140,69                                 | 0,03 | 4,16                                     |
| 0,85  | 569,07                                    | 177,78 | 140,66                                 | 0,03 | 4,05                                     |
| 0,90  | 554,59                                    | 177,83 | 140,62                                 | 0,03 | 3,94                                     |
| 0,94  | 541,01                                    | 177,87 | 140,58                                 | 0,03 | 3,85                                     |
| 0,98  | 528,38                                    | 177,91 | 140,55                                 | 0,04 | 3,76                                     |
| 1,02  | 516,47                                    | 177,95 | 140,51                                 | 0,04 | 3,68                                     |
| 1,06  | 505,33                                    | 177,99 | 140,48                                 | 0,04 | 3,60                                     |
| 1,10  | 494,77                                    | 178,03 | 140,44                                 | 0,04 | 3,52                                     |
| 1,14  | 484,86                                    | 178,07 | 140,40                                 | 0,04 | 3,45                                     |
| 1,18  | 475,43                                    | 178,11 | 140,37                                 | 0,04 | 3,39                                     |
| 1,22  | 466,55                                    | 178,15 | 140,33                                 | 0,05 | 3,32                                     |
| 1,26  | 458,07                                    | 178,19 | 140,29                                 | 0,05 | 3,27                                     |
| 1,30  | 450,05                                    | 178,23 | 140,25                                 | 0,05 | 3,21                                     |
| 1,34  | 442,37                                    | 178,27 | 140,22                                 | 0,05 | 3,15                                     |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 1,39 | 435,10 | 178,32 | 140,18 | 0,05 | 3,10 |
| 1,43 | 428,10 | 178,36 | 140,14 | 0,05 | 3,05 |
| 1,47 | 421,48 | 178,40 | 140,11 | 0,05 | 3,01 |
| 1,51 | 415,08 | 178,44 | 140,07 | 0,06 | 2,96 |
| 1,55 | 408,99 | 178,48 | 140,03 | 0,06 | 2,92 |
| 1,60 | 403,10 | 178,53 | 139,99 | 0,06 | 2,88 |
| 1,64 | 397,48 | 178,57 | 139,96 | 0,06 | 2,84 |
| 1,68 | 392,04 | 178,61 | 139,92 | 0,06 | 2,80 |
| 1,72 | 386,84 | 178,65 | 139,88 | 0,06 | 2,77 |
| 1,77 | 381,80 | 178,70 | 139,84 | 0,07 | 2,73 |
| 1,81 | 376,97 | 178,74 | 139,81 | 0,07 | 2,70 |
| 1,85 | 372,27 | 178,78 | 139,77 | 0,07 | 2,66 |
| 1,90 | 367,77 | 178,83 | 139,73 | 0,07 | 2,63 |
| 1,94 | 363,39 | 178,87 | 139,69 | 0,07 | 2,60 |
| 1,98 | 359,18 | 178,91 | 139,65 | 0,07 | 2,57 |
| 2,03 | 355,07 | 178,96 | 139,61 | 0,07 | 2,54 |
| 2,07 | 351,12 | 179,00 | 139,58 | 0,08 | 2,52 |
| 2,11 | 347,26 | 179,04 | 139,54 | 0,08 | 2,49 |
| 2,16 | 343,55 | 179,09 | 139,50 | 0,08 | 2,46 |
| 2,20 | 339,92 | 179,13 | 139,46 | 0,08 | 2,44 |
| 2,24 | 336,42 | 179,17 | 139,42 | 0,08 | 2,41 |
| 2,29 | 332,99 | 179,22 | 139,38 | 0,08 | 2,39 |
| 2,33 | 329,68 | 179,26 | 139,34 | 0,09 | 2,37 |
| 2,38 | 326,43 | 179,31 | 139,30 | 0,09 | 2,34 |
| 2,42 | 323,29 | 179,35 | 139,27 | 0,09 | 2,32 |
| 2,47 | 320,21 | 179,40 | 139,23 | 0,09 | 2,30 |
| 2,51 | 317,23 | 179,44 | 139,19 | 0,09 | 2,28 |
| 2,56 | 314,31 | 179,49 | 139,15 | 0,09 | 2,26 |
| 2,60 | 311,47 | 179,53 | 139,11 | 0,10 | 2,24 |
| 2,65 | 308,69 | 179,58 | 139,07 | 0,10 | 2,22 |
| 2,69 | 305,99 | 179,62 | 139,03 | 0,10 | 2,20 |
| 2,74 | 303,33 | 179,67 | 138,99 | 0,10 | 2,18 |
| 2,78 | 300,76 | 179,71 | 138,95 | 0,10 | 2,16 |
| 2,83 | 298,23 | 179,76 | 138,91 | 0,10 | 2,15 |
| 2,88 | 295,76 | 179,81 | 138,87 | 0,11 | 2,13 |
| 2,92 | 293,34 | 179,85 | 138,83 | 0,11 | 2,11 |
| 2,97 | 290,97 | 179,90 | 138,79 | 0,11 | 2,10 |
| 3,01 | 288,65 | 179,94 | 138,75 | 0,11 | 2,08 |
| 3,06 | 286,38 | 179,99 | 138,71 | 0,11 | 2,06 |
| 3,11 | 284,15 | 180,04 | 138,67 | 0,11 | 2,05 |
| 3,15 | 281,97 | 180,08 | 138,63 | 0,12 | 2,03 |
| 3,20 | 279,82 | 180,13 | 138,59 | 0,12 | 2,02 |
| 3,25 | 277,73 | 180,18 | 138,55 | 0,12 | 2,00 |
| 3,29 | 275,66 | 180,22 | 138,51 | 0,12 | 1,99 |
| 3,34 | 273,64 | 180,27 | 138,47 | 0,12 | 1,98 |
| 3,39 | 271,65 | 180,32 | 138,42 | 0,13 | 1,96 |
| 3,44 | 269,71 | 180,37 | 138,38 | 0,13 | 1,95 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 3,48 | 267,79 | 180,41 | 138,34 | 0,13 | 1,94 |
| 3,53 | 265,91 | 180,46 | 138,30 | 0,13 | 1,92 |
| 3,58 | 264,05 | 180,51 | 138,26 | 0,13 | 1,91 |
| 3,63 | 262,24 | 180,56 | 138,22 | 0,13 | 1,90 |
| 3,68 | 260,45 | 180,61 | 138,18 | 0,14 | 1,88 |
| 3,73 | 258,69 | 180,66 | 138,14 | 0,14 | 1,87 |
| 3,77 | 256,95 | 180,70 | 138,09 | 0,14 | 1,86 |
| 3,82 | 255,25 | 180,75 | 138,05 | 0,14 | 1,85 |
| 3,87 | 253,56 | 180,80 | 138,01 | 0,14 | 1,84 |
| 3,92 | 251,91 | 180,85 | 137,97 | 0,14 | 1,83 |
| 3,97 | 250,27 | 180,90 | 137,93 | 0,15 | 1,81 |
| 4,02 | 248,67 | 180,95 | 137,89 | 0,15 | 1,80 |
| 4,07 | 247,08 | 181,00 | 137,84 | 0,15 | 1,79 |
| 4,12 | 245,52 | 181,05 | 137,80 | 0,15 | 1,78 |
| 4,17 | 243,97 | 181,10 | 137,76 | 0,15 | 1,77 |
| 4,22 | 242,46 | 181,15 | 137,72 | 0,16 | 1,76 |
| 4,27 | 240,95 | 181,20 | 137,67 | 0,16 | 1,75 |
| 4,32 | 239,48 | 181,25 | 137,63 | 0,16 | 1,74 |
| 4,37 | 238,02 | 181,30 | 137,59 | 0,16 | 1,73 |
| 4,42 | 236,58 | 181,35 | 137,55 | 0,16 | 1,72 |
| 4,47 | 235,15 | 181,40 | 137,50 | 0,17 | 1,71 |
| 4,52 | 233,74 | 181,45 | 137,46 | 0,17 | 1,70 |
| 4,57 | 232,35 | 181,50 | 137,42 | 0,17 | 1,69 |
| 4,62 | 230,98 | 181,55 | 137,37 | 0,17 | 1,68 |
| 4,67 | 229,62 | 181,60 | 137,33 | 0,17 | 1,67 |
| 4,72 | 228,27 | 181,65 | 137,29 | 0,17 | 1,66 |
| 4,78 | 226,94 | 181,71 | 137,24 | 0,18 | 1,65 |
| 4,83 | 225,63 | 181,76 | 137,20 | 0,18 | 1,64 |
| 4,88 | 224,33 | 181,81 | 137,16 | 0,18 | 1,64 |
| 4,93 | 223,04 | 181,86 | 137,11 | 0,18 | 1,63 |
| 4,98 | 221,77 | 181,91 | 137,07 | 0,18 | 1,62 |
| 5,03 | 220,51 | 181,96 | 137,03 | 0,19 | 1,61 |
| 5,09 | 219,26 | 182,02 | 136,98 | 0,19 | 1,60 |
| 5,14 | 218,02 | 182,07 | 136,94 | 0,19 | 1,59 |
| 5,19 | 216,80 | 182,12 | 136,89 | 0,19 | 1,58 |
| 5,25 | 215,58 | 182,18 | 136,85 | 0,19 | 1,58 |
| 5,30 | 214,38 | 182,23 | 136,81 | 0,20 | 1,57 |
| 5,35 | 213,19 | 182,28 | 136,76 | 0,20 | 1,56 |
| 5,40 | 212,00 | 182,33 | 136,72 | 0,20 | 1,55 |
| 5,46 | 210,83 | 182,39 | 136,67 | 0,20 | 1,54 |
| 5,51 | 209,67 | 182,44 | 136,63 | 0,20 | 1,53 |
| 5,57 | 208,51 | 182,50 | 136,58 | 0,21 | 1,53 |
| 5,62 | 207,37 | 182,55 | 136,54 | 0,21 | 1,52 |
| 5,67 | 206,23 | 182,60 | 136,49 | 0,21 | 1,51 |
| 5,73 | 205,10 | 182,66 | 136,45 | 0,21 | 1,50 |
| 5,78 | 203,98 | 182,71 | 136,40 | 0,21 | 1,50 |
| 5,84 | 202,87 | 182,77 | 136,36 | 0,22 | 1,49 |

|      |        |        |        |      |      |
|------|--------|--------|--------|------|------|
| 5,89 | 201,77 | 182,82 | 136,31 | 0,22 | 1,48 |
| 5,95 | 200,67 | 182,88 | 136,27 | 0,22 | 1,47 |
| 6,00 | 199,58 | 182,93 | 136,22 | 0,22 | 1,47 |
| 6,06 | 198,49 | 182,99 | 136,18 | 0,22 | 1,46 |
| 6,11 | 197,42 | 183,04 | 136,13 | 0,23 | 1,45 |
| 6,17 | 196,35 | 183,10 | 136,09 | 0,23 | 1,44 |
| 6,22 | 195,29 | 183,15 | 136,04 | 0,23 | 1,44 |
| 6,28 | 194,23 | 183,21 | 135,99 | 0,23 | 1,43 |
| 6,33 | 193,17 | 183,26 | 135,95 | 0,23 | 1,42 |
| 6,39 | 192,13 | 183,32 | 135,90 | 0,24 | 1,41 |
| 6,45 | 191,08 | 183,38 | 135,86 | 0,24 | 1,41 |
| 6,50 | 190,04 | 183,43 | 135,81 | 0,24 | 1,40 |
| 6,56 | 189,01 | 183,49 | 135,76 | 0,24 | 1,39 |
| 6,62 | 187,98 | 183,55 | 135,72 | 0,24 | 1,39 |
| 6,67 | 186,95 | 183,60 | 135,67 | 0,25 | 1,38 |
| 6,73 | 185,93 | 183,66 | 135,62 | 0,25 | 1,37 |
| 6,79 | 184,92 | 183,72 | 135,58 | 0,25 | 1,36 |
| 6,85 | 183,90 | 183,78 | 135,53 | 0,25 | 1,36 |
| 6,90 | 182,89 | 183,83 | 135,48 | 0,26 | 1,35 |
| 6,96 | 181,88 | 183,89 | 135,44 | 0,26 | 1,34 |
| 7,02 | 180,88 | 183,95 | 135,39 | 0,26 | 1,34 |
| 7,08 | 179,87 | 184,01 | 135,34 | 0,26 | 1,33 |
| 7,14 | 178,88 | 184,07 | 135,29 | 0,26 | 1,32 |
| 7,19 | 177,88 | 184,12 | 135,25 | 0,27 | 1,32 |
| 7,25 | 176,88 | 184,18 | 135,20 | 0,27 | 1,31 |
| 7,31 | 175,89 | 184,24 | 135,15 | 0,27 | 1,30 |
| 7,37 | 174,90 | 184,30 | 135,10 | 0,27 | 1,29 |
| 7,43 | 173,91 | 184,36 | 135,06 | 0,27 | 1,29 |
| 7,49 | 172,92 | 184,42 | 135,01 | 0,28 | 1,28 |
| 7,55 | 171,93 | 184,48 | 134,96 | 0,28 | 1,27 |
| 7,61 | 170,94 | 184,54 | 134,91 | 0,28 | 1,27 |
| 7,67 | 169,96 | 184,60 | 134,86 | 0,28 | 1,26 |
| 7,73 | 168,97 | 184,66 | 134,82 | 0,29 | 1,25 |
| 7,79 | 167,99 | 184,72 | 134,77 | 0,29 | 1,25 |
| 7,85 | 167,00 | 184,78 | 134,72 | 0,29 | 1,24 |
| 7,91 | 166,02 | 184,84 | 134,67 | 0,29 | 1,23 |
| 7,97 | 165,04 | 184,90 | 134,62 | 0,29 | 1,23 |
| 8,03 | 164,05 | 184,96 | 134,57 | 0,30 | 1,22 |
| 8,09 | 163,06 | 185,02 | 134,52 | 0,30 | 1,21 |
| 8,15 | 162,08 | 185,08 | 134,48 | 0,30 | 1,21 |
| 8,22 | 161,09 | 185,15 | 134,43 | 0,30 | 1,20 |
| 8,28 | 160,10 | 185,21 | 134,38 | 0,31 | 1,19 |
| 8,34 | 159,11 | 185,27 | 134,33 | 0,31 | 1,18 |
| 8,40 | 158,11 | 185,33 | 134,28 | 0,31 | 1,18 |
| 8,46 | 157,12 | 185,39 | 134,23 | 0,31 | 1,17 |
| 8,53 | 156,12 | 185,46 | 134,18 | 0,31 | 1,16 |
| 8,59 | 155,12 | 185,52 | 134,13 | 0,32 | 1,16 |

|       |        |        |        |      |      |
|-------|--------|--------|--------|------|------|
| 8,65  | 154,12 | 185,58 | 134,08 | 0,32 | 1,15 |
| 8,71  | 153,12 | 185,64 | 134,03 | 0,32 | 1,14 |
| 8,78  | 152,11 | 185,71 | 133,98 | 0,32 | 1,14 |
| 8,84  | 151,10 | 185,77 | 133,93 | 0,33 | 1,13 |
| 8,90  | 150,09 | 185,83 | 133,88 | 0,33 | 1,12 |
| 8,97  | 149,07 | 185,90 | 133,83 | 0,33 | 1,11 |
| 9,03  | 148,05 | 185,96 | 133,78 | 0,33 | 1,11 |
| 9,09  | 147,02 | 186,02 | 133,73 | 0,34 | 1,10 |
| 9,16  | 145,99 | 186,09 | 133,68 | 0,34 | 1,09 |
| 9,22  | 144,96 | 186,15 | 133,63 | 0,34 | 1,08 |
| 9,29  | 143,92 | 186,22 | 133,58 | 0,34 | 1,08 |
| 9,35  | 142,88 | 186,28 | 133,53 | 0,35 | 1,07 |
| 9,42  | 141,83 | 186,35 | 133,48 | 0,35 | 1,06 |
| 9,48  | 140,78 | 186,41 | 133,43 | 0,35 | 1,06 |
| 9,55  | 139,72 | 186,48 | 133,38 | 0,35 | 1,05 |
| 9,61  | 138,65 | 186,54 | 133,33 | 0,36 | 1,04 |
| 9,68  | 137,58 | 186,61 | 133,27 | 0,36 | 1,03 |
| 9,75  | 136,50 | 186,68 | 133,22 | 0,36 | 1,02 |
| 9,81  | 135,42 | 186,74 | 133,17 | 0,36 | 1,02 |
| 9,88  | 134,33 | 186,81 | 133,12 | 0,36 | 1,01 |
| 9,94  | 133,23 | 186,87 | 133,07 | 0,37 | 1,00 |
| 10,01 | 132,12 | 186,94 | 133,02 | 0,37 | 0,99 |
| 10,08 | 131,01 | 187,01 | 132,97 | 0,37 | 0,99 |
| 10,14 | 129,89 | 187,07 | 132,91 | 0,37 | 0,98 |
| 10,21 | 128,75 | 187,14 | 132,86 | 0,38 | 0,97 |
| 10,28 | 127,62 | 187,21 | 132,81 | 0,38 | 0,96 |
| 10,35 | 126,47 | 187,28 | 132,76 | 0,38 | 0,95 |
| 10,42 | 125,31 | 187,35 | 132,71 | 0,38 | 0,94 |
| 10,48 | 124,14 | 187,41 | 132,65 | 0,39 | 0,94 |
| 10,55 | 122,96 | 187,48 | 132,60 | 0,39 | 0,93 |
| 10,62 | 121,77 | 187,55 | 132,55 | 0,39 | 0,92 |
| 10,69 | 120,57 | 187,62 | 132,50 | 0,39 | 0,91 |
| 10,76 | 119,36 | 187,69 | 132,44 | 0,40 | 0,90 |
| 10,83 | 118,14 | 187,76 | 132,39 | 0,40 | 0,89 |
| 10,90 | 116,91 | 187,83 | 132,34 | 0,40 | 0,88 |
| 10,97 | 115,66 | 187,90 | 132,29 | 0,41 | 0,87 |
| 11,03 | 114,40 | 187,96 | 132,23 | 0,41 | 0,87 |
| 11,10 | 113,13 | 188,03 | 132,18 | 0,41 | 0,86 |
| 11,17 | 111,85 | 188,10 | 132,13 | 0,41 | 0,85 |
| 11,25 | 110,55 | 188,18 | 132,07 | 0,42 | 0,84 |
| 11,32 | 109,23 | 188,25 | 132,02 | 0,42 | 0,83 |
| 11,39 | 107,90 | 188,32 | 131,97 | 0,42 | 0,82 |
| 11,46 | 106,56 | 188,39 | 131,91 | 0,42 | 0,81 |
| 11,53 | 105,20 | 188,46 | 131,86 | 0,43 | 0,80 |
| 11,60 | 103,82 | 188,53 | 131,80 | 0,43 | 0,79 |
| 11,67 | 102,43 | 188,60 | 131,75 | 0,43 | 0,78 |
| 11,74 | 101,02 | 188,67 | 131,70 | 0,43 | 0,77 |

|       |       |        |        |      |       |
|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| 11,81 | 99,59 | 188,74 | 131,64 | 0,44 | 0,76  |
| 11,89 | 98,14 | 188,82 | 131,59 | 0,44 | 0,75  |
| 11,96 | 96,68 | 188,89 | 131,53 | 0,44 | 0,73  |
| 12,03 | 95,19 | 188,96 | 131,48 | 0,44 | 0,72  |
| 12,10 | 93,68 | 189,03 | 131,42 | 0,45 | 0,71  |
| 12,18 | 92,16 | 189,11 | 131,37 | 0,45 | 0,70  |
| 12,25 | 90,61 | 189,18 | 131,32 | 0,45 | 0,69  |
| 12,32 | 89,04 | 189,25 | 131,26 | 0,46 | 0,68  |
| 12,40 | 87,44 | 189,33 | 131,21 | 0,46 | 0,67  |
| 12,47 | 85,83 | 189,40 | 131,15 | 0,46 | 0,65  |
| 12,55 | 84,18 | 189,48 | 131,10 | 0,46 | 0,64  |
| 12,62 | 82,52 | 189,55 | 131,04 | 0,47 | 0,63  |
| 12,69 | 80,82 | 189,62 | 130,99 | 0,47 | 0,62  |
| 12,77 | 79,10 | 189,70 | 130,93 | 0,47 | 0,60  |
| 12,84 | 77,36 | 189,77 | 130,87 | 0,47 | 0,59  |
| 12,92 | 75,58 | 189,85 | 130,82 | 0,48 | 0,58  |
| 12,99 | 73,77 | 189,92 | 130,76 | 0,48 | 0,56  |
| 13,07 | 45,46 | 190,00 | -13,13 | 0,48 | -3,46 |
| 13,42 | 18,94 | 190,35 | -13,10 | 0,50 | -1,45 |
| 13,77 | 18,85 | 190,70 | -13,07 | 0,51 | -1,44 |
| 14,12 | 18,75 | 191,05 | -13,05 | 0,52 | -1,44 |
| 14,47 | 18,62 | 191,40 | -13,02 | 0,53 | -1,43 |
| 14,82 | 18,48 | 191,75 | -13,00 | 0,55 | -1,42 |
| 15,17 | 18,31 | 192,10 | -12,97 | 0,56 | -1,41 |
| 15,52 | 18,12 | 192,45 | -12,95 | 0,57 | -1,40 |
| 15,87 | 17,91 | 192,80 | -12,92 | 0,59 | -1,39 |
| 16,22 | 17,69 | 193,15 | -12,90 | 0,60 | -1,37 |
| 16,57 | 17,44 | 193,50 | -12,87 | 0,61 | -1,35 |
| 16,92 | 17,19 | 193,85 | -12,85 | 0,63 | -1,34 |
| 17,27 | 16,90 | 194,20 | -12,83 | 0,64 | -1,32 |
| 17,62 | 16,61 | 194,55 | -12,80 | 0,65 | -1,30 |
| 17,97 | 16,29 | 194,90 | -12,78 | 0,66 | -1,28 |
| 18,32 | 15,96 | 195,25 | -12,75 | 0,68 | -1,25 |
| 18,67 | 15,61 | 195,60 | -12,73 | 0,69 | -1,23 |
| 19,02 | 15,25 | 195,95 | -12,71 | 0,70 | -1,20 |
| 19,37 | 14,86 | 196,30 | -12,68 | 0,72 | -1,17 |
| 19,72 | 14,46 | 196,65 | -12,66 | 0,73 | -1,14 |
| 20,07 | 14,04 | 197,00 | -12,64 | 0,74 | -1,11 |
| 20,42 | 13,61 | 197,35 | -12,61 | 0,75 | -1,08 |
| 20,77 | 13,15 | 197,70 | -12,59 | 0,77 | -1,04 |
| 21,12 | 12,67 | 198,05 | -12,57 | 0,78 | -1,01 |
| 21,47 | 12,18 | 198,40 | -12,54 | 0,79 | -0,97 |
| 21,82 | 11,66 | 198,75 | -12,52 | 0,81 | -0,93 |
| 22,17 | 11,12 | 199,10 | -12,50 | 0,82 | -0,89 |
| 22,52 | 10,57 | 199,45 | -12,48 | 0,83 | -0,85 |
| 22,87 | 9,99  | 199,80 | -12,45 | 0,84 | -0,80 |
| 23,22 | 9,38  | 200,15 | -12,43 | 0,86 | -0,75 |

|       |      |        |        |      |       |
|-------|------|--------|--------|------|-------|
| 23,57 | 8,75 | 200,50 | -12,41 | 0,87 | -0,71 |
| 23,92 | 8,10 | 200,85 | -12,39 | 0,88 | -0,65 |
| 24,27 | 7,42 | 201,20 | -12,37 | 0,90 | -0,60 |
| 24,62 | 6,72 | 201,55 | -12,34 | 0,91 | -0,54 |
| 24,97 | 5,98 | 201,90 | -12,32 | 0,92 | -0,49 |
| 25,32 | 5,22 | 202,25 | -12,30 | 0,94 | -0,42 |
| 25,67 | 4,42 | 202,60 | -12,28 | 0,95 | -0,36 |
| 26,02 | 3,59 | 202,95 | -12,26 | 0,96 | -0,29 |
| 26,37 | 2,72 | 203,30 | -12,24 | 0,97 | -0,22 |
| 26,72 | 1,82 | 203,65 | -12,22 | 0,99 | -0,15 |
| 27,07 | 0,88 | 204,00 | -12,19 | 1,00 | -0,07 |

## Apêndice IV

Tensões radiais para a menor e maior profundidade de entalhe. Os vasos analisados são os de parede fina e espessa de aço e bi-material. Valores obtidos do software.

### Vaso de aço parede fina e espessa

| Aço parede fina – profundidade do entalhe de 4,42 |                                    | Aço parede fina - profundidade do entalhe de 6,93 |                                    | Aço parede espessa - profundidade do entalhe de 4,42 |                                    | Aço parede espessa - profundidade do entalhe de 6.93 |                                    |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|
| r (mm)                                            | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | r (mm)                                            | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | r (mm)                                               | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | r (mm)                                               | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) |
| 0                                                 | 30,74                              | 0                                                 | 1464,65                            | 0,00                                                 | 11,75                              | 0,00                                                 | 13,98                              |
| 0,02                                              | 271,93                             | 0,01                                              | -2367,83                           | 0,04                                                 | 81,13                              | 0,04                                                 | 112,20                             |
| 0,04                                              | 561,93                             | 0,01                                              | 2536,51                            | 0,09                                                 | 181,08                             | 0,08                                                 | 244,01                             |
| 0,06                                              | 733,91                             | 0,02                                              | 761,7                              | 0,14                                                 | 206,10                             | 0,11                                                 | 289,37                             |
| 0,08                                              | 930,71                             | 0,02                                              | 1263,77                            | 0,18                                                 | 246,30                             | 0,15                                                 | 352,53                             |
| 0,1                                               | 1044,99                            | 0,03                                              | 1268,94                            | 0,23                                                 | 254,83                             | 0,19                                                 | 373,25                             |
| 0,12                                              | 1180,68                            | 0,03                                              | 1522,18                            | 0,27                                                 | 270,14                             | 0,23                                                 | 403,17                             |
| 0,14                                              | 1253,06                            | 0,04                                              | 1723,49                            | 0,32                                                 | 270,97                             | 0,27                                                 | 411,24                             |
| 0,16                                              | 1342,39                            | 0,04                                              | 1915,1                             | 0,36                                                 | 275,40                             | 0,30                                                 | 424,58                             |
| 0,18                                              | 1387,96                            | 0,04                                              | 2108                               | 0,41                                                 | 272,18                             | 0,34                                                 | 425,26                             |
| 0,21                                              | 1445,39                            | 0,05                                              | 2274,19                            | 0,46                                                 | 271,33                             | 0,38                                                 | 429,51                             |
| 0,23                                              | 1472,14                            | 0,05                                              | 2453,55                            | 0,50                                                 | 266,58                             | 0,42                                                 | 426,65                             |
| 0,25                                              | 1507,74                            | 0,06                                              | 2594,79                            | 0,55                                                 | 263,29                             | 0,46                                                 | 426,10                             |
| 0,27                                              | 1520,28                            | 0,06                                              | 2740,6                             | 0,59                                                 | 257,83                             | 0,50                                                 | 421,19                             |
| 0,29                                              | 1529,79                            | 0,07                                              | 2862,55                            | 0,64                                                 | 253,39                             | 0,54                                                 | 417,91                             |
| 0,31                                              | 1539,63                            | 0,07                                              | 2991,99                            | 0,69                                                 | 247,77                             | 0,58                                                 | 411,98                             |
| 0,34                                              | 1551,14                            | 0,08                                              | 3098,98                            | 0,73                                                 | 242,86                             | 0,62                                                 | 407,23                             |
| 0,36                                              | 1545,6                             | 0,08                                              | 3213,13                            | 0,78                                                 | 237,32                             | 0,66                                                 | 400,83                             |
| 0,38                                              | 1545,11                            | 0,09                                              | 3306,82                            | 0,83                                                 | 232,30                             | 0,70                                                 | 395,31                             |
| 0,4                                               | 1535,51                            | 0,1                                               | 3407,15                            | 0,88                                                 | 226,98                             | 0,74                                                 | 388,77                             |
| 0,43                                              | 1529,32                            | 0,1                                               | 3489,52                            | 0,92                                                 | 222,04                             | 0,77                                                 | 382,89                             |
| 0,45                                              | 1516,11                            | 0,11                                              | 3608,3                             | 0,97                                                 | 216,99                             | 0,81                                                 | 376,40                             |
| 0,47                                              | 1505,67                            | 0,11                                              | 3669,87                            | 1,02                                                 | 212,23                             | 0,85                                                 | 370,42                             |
| 0,49                                              | 1489,82                            | 0,12                                              | 3750,49                            | 1,07                                                 | 207,47                             | 0,90                                                 | 364,08                             |
| 0,52                                              | 1476,24                            | 0,12                                              | 3813,48                            | 1,11                                                 | 202,93                             | 0,94                                                 | 358,14                             |

|      |         |      |         |      |        |      |        |
|------|---------|------|---------|------|--------|------|--------|
| 0,54 | 1458,56 | 0,13 | 3870,13 | 1,16 | 198,45 | 0,98 | 352,02 |
| 0,57 | 1442,77 | 0,13 | 3915,33 | 1,21 | 194,15 | 1,02 | 346,21 |
| 0,59 | 1423,87 | 0,14 | 3966,43 | 1,26 | 189,95 | 1,06 | 340,34 |
| 0,61 | 1406,63 | 0,15 | 4005,6  | 1,31 | 185,90 | 1,10 | 334,71 |
| 0,64 | 1386,9  | 0,15 | 4050,08 | 1,36 | 181,96 | 1,14 | 329,09 |
| 0,66 | 1369,06 | 0,16 | 4082,98 | 1,41 | 178,14 | 1,18 | 323,68 |
| 0,69 | 1347,09 | 0,16 | 4120,43 | 1,46 | 174,44 | 1,22 | 318,32 |
| 0,71 | 1326,64 | 0,17 | 4146,92 | 1,50 | 170,84 | 1,26 | 313,13 |
| 0,74 | 1305,85 | 0,18 | 4177,8  | 1,55 | 167,37 | 1,30 | 308,01 |
| 0,76 | 1285,92 | 0,18 | 4198,24 | 1,60 | 163,98 | 1,34 | 303,05 |
| 0,79 | 1265,18 | 0,19 | 4222,81 | 1,65 | 160,72 | 1,39 | 298,18 |
| 0,81 | 1245,16 | 0,2  | 4237,51 | 1,70 | 157,53 | 1,43 | 293,43 |
| 0,84 | 1224,21 | 0,2  | 4292,79 | 1,75 | 154,46 | 1,47 | 288,79 |
| 0,86 | 1204    | 0,21 | 4290,36 | 1,80 | 151,44 | 1,51 | 284,25 |
| 0,89 | 1183,14 | 0,22 | 4290,79 | 1,85 | 148,55 | 1,55 | 279,83 |
| 0,92 | 1162,92 | 0,22 | 4298,52 | 1,90 | 145,70 | 1,60 | 275,49 |
| 0,94 | 1142,3  | 0,23 | 4295,66 | 1,95 | 142,97 | 1,64 | 271,28 |
| 0,97 | 1122,26 | 0,24 | 4289,96 | 2,00 | 140,28 | 1,68 | 267,14 |
| 1    | 1101,93 | 0,24 | 4287,46 | 2,05 | 137,70 | 1,72 | 263,11 |
| 1,02 | 1082,39 | 0,25 | 4279,46 | 2,11 | 135,15 | 1,77 | 259,16 |
| 1,05 | 1061,01 | 0,26 | 4280,57 | 2,16 | 132,71 | 1,81 | 255,31 |
| 1,08 | 1040,28 | 0,27 | 4264,99 | 2,21 | 130,29 | 1,85 | 251,53 |
| 1,1  | 1020,45 | 0,27 | 4252,91 | 2,26 | 127,97 | 1,90 | 247,86 |
| 1,13 | 1000,8  | 0,28 | 4238,11 | 2,31 | 125,68 | 1,94 | 244,24 |
| 1,16 | 981,28  | 0,29 | 4222,23 | 2,36 | 123,48 | 1,98 | 240,72 |
| 1,19 | 962,12  | 0,3  | 4202,83 | 2,41 | 121,31 | 2,03 | 237,25 |
| 1,22 | 943,22  | 0,3  | 4191,34 | 2,47 | 119,21 | 2,07 | 233,89 |
| 1,24 | 925,01  | 0,31 | 4166,83 | 2,52 | 117,14 | 2,11 | 230,56 |
| 1,27 | 904,72  | 0,32 | 4142,71 | 2,57 | 115,15 | 2,16 | 227,33 |
| 1,3  | 884,95  | 0,33 | 4116,24 | 2,62 | 113,18 | 2,20 | 224,14 |
| 1,33 | 866,58  | 0,34 | 4093,59 | 2,68 | 111,28 | 2,24 | 221,04 |
| 1,36 | 848,24  | 0,34 | 4061,72 | 2,73 | 109,40 | 2,29 | 217,98 |
| 1,39 | 830,03  | 0,35 | 4032,05 | 2,78 | 107,59 | 2,33 | 215,01 |
| 1,42 | 811,97  | 0,36 | 3999,9  | 2,83 | 105,80 | 2,38 | 212,06 |
| 1,45 | 793,92  | 0,37 | 3972,5  | 2,89 | 104,07 | 2,42 | 209,20 |
| 1,48 | 776,06  | 0,4  | 3854,15 | 2,94 | 102,35 | 2,47 | 206,37 |
| 1,51 | 758,33  | 0,42 | 3746,94 | 2,99 | 100,70 | 2,51 | 203,62 |
| 1,54 | 740,77  | 0,45 | 3612,98 | 3,05 | 99,05  | 2,56 | 200,89 |
| 1,57 | 723,39  | 0,48 | 3492,22 | 3,10 | 97,47  | 2,60 | 198,24 |
| 1,6  | 706,18  | 0,51 | 3354,16 | 3,16 | 95,90  | 2,65 | 195,61 |
| 1,63 | 689,16  | 0,53 | 3225,84 | 3,21 | 94,38  | 2,69 | 193,06 |
| 1,67 | 672,44  | 0,56 | 3086,69 | 3,26 | 92,88  | 2,74 | 190,53 |
| 1,7  | 654,96  | 0,59 | 2954,69 | 3,32 | 91,42  | 2,78 | 188,06 |
| 1,73 | 637,73  | 0,61 | 2816,33 | 3,37 | 89,97  | 2,83 | 185,61 |
| 1,76 | 621,33  | 0,64 | 2683,17 | 3,43 | 88,57  | 2,88 | 183,23 |
| 1,79 | 604,96  | 0,67 | 2546,94 | 3,48 | 87,19  | 2,92 | 180,87 |
| 1,83 | 588,86  | 0,7  | 2414,39 | 3,54 | 85,84  | 2,97 | 178,57 |

|      |        |      |         |      |       |      |        |
|------|--------|------|---------|------|-------|------|--------|
| 1,86 | 572,79 | 0,72 | 2281,3  | 3,59 | 84,51 | 3,01 | 176,28 |
| 1,89 | 556,89 | 0,75 | 2150,68 | 3,65 | 83,22 | 3,06 | 174,06 |
| 1,93 | 541,05 | 0,78 | 2021,58 | 3,70 | 81,94 | 3,11 | 171,85 |
| 1,96 | 525,44 | 0,8  | 1893,93 | 3,76 | 80,69 | 3,15 | 169,70 |
| 1,99 | 509,87 | 0,83 | 1769,57 | 3,82 | 79,46 | 3,20 | 167,56 |
| 2,03 | 494,57 | 0,86 | 1645,77 | 3,87 | 78,26 | 3,25 | 165,47 |
| 2,06 | 479,3  | 0,89 | 1526,83 | 3,93 | 77,07 | 3,29 | 163,40 |
| 2,1  | 464,33 | 0,91 | 1407,66 | 3,98 | 75,92 | 3,34 | 161,38 |
| 2,13 | 449,43 | 0,94 | 1294,83 | 4,04 | 74,77 | 3,39 | 159,37 |
| 2,17 | 434,37 | 0,97 | 1181,04 | 4,10 | 73,66 | 3,44 | 157,41 |
| 2,2  | 419,37 | 0,99 | 1075,06 | 4,15 | 72,55 | 3,48 | 155,46 |
| 2,24 | 404,99 | 1,02 | 967,39  | 4,21 | 71,48 | 3,53 | 153,56 |
| 2,27 | 390,57 | 1,05 | 869,05  | 4,27 | 70,41 | 3,58 | 151,67 |
| 2,31 | 376,47 | 1,08 | 768,31  | 4,33 | 69,37 | 3,63 | 149,82 |
| 2,34 | 362,32 | 1,1  | 678,51  | 4,38 | 68,34 | 3,68 | 147,98 |
| 2,38 | 348,5  | 1,13 | 585,59  | 4,44 | 67,33 | 3,73 | 146,18 |
| 2,42 | 334,65 | 1,16 | 505,38  | 4,50 | 66,34 | 3,77 | 144,40 |
| 2,45 | 321,02 | 1,18 | 421,28  | 4,56 | 65,37 | 3,82 | 142,65 |
| 2,49 | 307,35 | 1,21 | 351,92  | 4,62 | 64,40 | 3,87 | 140,91 |
| 2,53 | 294,18 | 1,24 | 277,85  | 4,67 | 63,46 | 3,92 | 139,21 |
| 2,57 | 280,93 | 1,27 | 220,89  | 4,73 | 62,53 | 3,97 | 137,52 |
| 2,61 | 267,99 | 1,29 | 158,31  | 4,79 | 61,62 | 4,02 | 135,87 |
| 2,64 | 254,97 | 1,32 | 115,83  | 4,85 | 60,72 | 4,07 | 134,23 |
| 2,68 | 242,48 | 1,35 | 66,71   | 4,91 | 59,84 | 4,12 | 132,62 |
| 2,72 | 229,89 | 1,38 | 41,64   | 4,97 | 58,96 | 4,17 | 131,01 |
| 2,76 | 217,7  | 1,4  | 9,39    | 5,03 | 58,11 | 4,22 | 129,45 |
| 2,8  | 205,38 | 1,43 | 4,87    | 5,09 | 57,26 | 4,27 | 127,88 |
| 2,84 | 193,66 | 1,46 | -7,28   | 5,15 | 56,43 | 4,32 | 126,35 |
| 2,88 | 181,83 |      |         | 5,21 | 55,61 | 4,37 | 124,83 |
| 2,91 | 174,19 |      |         | 5,27 | 54,81 | 4,42 | 123,34 |
| 2,93 | 166,43 |      |         | 5,33 | 54,01 | 4,47 | 121,85 |
| 2,96 | 159,03 |      |         | 5,39 | 53,23 | 4,52 | 120,40 |
| 2,99 | 151,55 |      |         | 5,45 | 52,45 | 4,57 | 118,94 |
| 3,02 | 144,43 |      |         | 5,51 | 51,70 | 4,62 | 117,52 |
| 3,04 | 137,22 |      |         | 5,57 | 50,95 | 4,67 | 116,11 |
| 3,07 | 130,39 |      |         | 5,63 | 50,21 | 4,72 | 114,72 |
| 3,1  | 123,46 |      |         | 5,69 | 49,48 | 4,78 | 113,34 |
| 3,12 | 116,93 |      |         | 5,75 | 48,77 | 4,83 | 111,98 |
| 3,15 | 110,29 |      |         | 5,82 | 48,05 | 4,88 | 110,63 |
| 3,18 | 104,05 |      |         | 5,88 | 47,36 | 4,93 | 109,30 |
| 3,21 | 97,71  |      |         | 5,94 | 46,67 | 4,98 | 107,98 |
| 3,23 | 91,79  |      |         | 6,00 | 45,99 | 5,03 | 106,68 |
| 3,26 | 85,75  |      |         | 6,06 | 45,32 | 5,09 | 105,39 |
| 3,29 | 80,15  |      |         | 6,13 | 44,67 | 5,14 | 104,12 |
| 3,31 | 74,42  |      |         | 6,19 | 44,01 | 5,19 | 102,86 |
| 3,34 | 69,15  |      |         | 6,25 | 43,37 | 5,25 | 101,62 |
| 3,37 | 63,75  |      |         | 6,32 | 42,73 | 5,30 | 100,38 |

3,4 58,83  
 3,42 53,76  
 3,45 49,2  
 3,48 44,49  
 3,5 40,3  
 3,53 35,95  
 3,56 32,16  
 3,59 28,2  
 3,61 24,82  
 3,64 21,25  
 3,67 18,31  
 3,69 15,16  
 3,72 12,68  
 3,75 9,98  
 3,78 7,98  
 3,8 5,75  
 3,83 4,27  
 3,86 2,56  
 3,89 1,66  
 3,91 0,51  
 3,94 0,27  
 3,97 -0,21

6,38 42,11  
 6,44 41,49  
 6,51 40,89  
 6,57 40,28  
 6,63 39,69  
 6,70 39,10  
 6,76 38,53  
 6,83 37,95  
 6,89 37,39  
 6,96 36,83  
 7,02 36,28  
 7,09 35,74  
 7,15 35,20  
 7,22 34,67  
 7,29 34,15  
 7,35 33,63  
 7,42 33,12  
 7,48 32,61  
 7,55 32,12  
 7,62 31,62  
 7,69 31,14  
 7,75 30,65  
 7,82 30,18  
 7,89 29,70  
 7,96 29,24  
 8,02 28,78  
 8,09 28,33  
 8,16 27,87  
 8,23 27,43  
 8,30 26,99  
 8,37 26,56  
 8,44 26,12  
 8,51 25,70  
 8,58 25,28  
 8,65 24,86  
 8,72 24,45  
 8,79 24,05  
 8,86 23,64  
 8,93 23,24  
 9,00 22,85  
 9,07 22,46  
 9,14 22,07  
 9,21 21,69  
 9,28 21,31  
 9,36 20,94  
 9,43 20,57  
 9,50 20,20

5,35 99,16  
 5,40 97,95  
 5,46 96,76  
 5,51 95,57  
 5,57 94,40  
 5,62 93,24  
 5,67 92,10  
 5,73 90,96  
 5,78 89,84  
 5,84 88,72  
 5,89 87,62  
 5,95 86,52  
 6,00 85,45  
 6,06 84,37  
 6,11 83,31  
 6,17 82,25  
 6,22 81,22  
 6,28 80,18  
 6,33 79,16  
 6,39 78,14  
 6,45 77,14  
 6,50 76,14  
 6,56 75,16  
 6,62 74,18  
 6,67 73,21  
 6,73 72,24  
 6,79 71,29  
 6,85 70,35  
 6,90 69,41  
 6,96 68,48  
 7,02 67,56  
 7,08 66,64  
 7,14 65,74  
 7,19 64,84  
 7,25 63,95  
 7,31 63,06  
 7,37 62,19  
 7,43 61,32  
 7,49 60,46  
 7,55 59,60  
 7,61 58,75  
 7,67 57,91  
 7,73 57,08  
 7,79 56,24  
 7,85 55,42  
 7,91 54,60  
 7,97 53,79

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 9,57  | 19,84 | 8,03  | 52,99 |
| 9,65  | 19,48 | 8,09  | 52,19 |
| 9,72  | 19,13 | 8,15  | 51,40 |
| 9,79  | 18,78 | 8,22  | 50,62 |
| 9,87  | 18,43 | 8,28  | 49,83 |
| 9,94  | 18,09 | 8,34  | 49,06 |
| 10,01 | 17,75 | 8,40  | 48,29 |
| 10,09 | 17,41 | 8,46  | 47,53 |
| 10,16 | 17,08 | 8,53  | 46,77 |
| 10,24 | 16,75 | 8,59  | 46,03 |
| 10,31 | 16,42 | 8,65  | 45,28 |
| 10,39 | 16,10 | 8,71  | 44,54 |
| 10,46 | 15,78 | 8,78  | 43,80 |
| 10,54 | 15,46 | 8,84  | 43,08 |
| 10,61 | 15,15 | 8,90  | 42,35 |
| 10,69 | 14,84 | 8,97  | 41,64 |
| 10,77 | 14,53 | 9,03  | 40,92 |
| 10,84 | 14,23 | 9,09  | 40,22 |
| 10,92 | 13,92 | 9,16  | 39,51 |
| 10,99 | 13,63 | 9,22  | 38,82 |
| 11,07 | 13,33 | 9,29  | 38,12 |
| 11,15 | 13,04 | 9,35  | 37,44 |
| 11,23 | 12,75 | 9,42  | 36,75 |
| 11,30 | 12,47 | 9,48  | 36,08 |
| 11,38 | 12,18 | 9,55  | 35,41 |
| 11,46 | 11,90 | 9,61  | 34,74 |
| 11,54 | 11,62 | 9,68  | 34,08 |
| 11,62 | 11,35 | 9,75  | 33,42 |
| 11,70 | 11,08 | 9,81  | 32,77 |
| 11,77 | 10,81 | 9,88  | 32,13 |
| 11,85 | 10,54 | 9,94  | 31,48 |
| 11,93 | 10,28 | 10,01 | 30,85 |
| 12,01 | 10,02 | 10,08 | 30,21 |
| 12,09 | 9,77  | 10,14 | 29,59 |
| 12,17 | 9,51  | 10,21 | 28,97 |
| 12,25 | 9,26  | 10,28 | 28,35 |
| 12,33 | 9,01  | 10,35 | 27,74 |
| 12,42 | 8,77  | 10,42 | 27,13 |
| 12,50 | 8,52  | 10,48 | 26,53 |
| 12,58 | 8,28  | 10,55 | 25,93 |
| 12,66 | 8,04  | 10,62 | 25,34 |
| 12,74 | 7,81  | 10,69 | 24,75 |
| 12,82 | 7,58  | 10,76 | 24,16 |
| 12,91 | 7,35  | 10,83 | 23,59 |
| 12,99 | 7,12  | 10,90 | 23,01 |
| 13,07 | 6,90  | 10,97 | 22,45 |
| 13,15 | 6,68  | 11,03 | 21,88 |

|       |      |       |       |
|-------|------|-------|-------|
| 13,24 | 6,46 | 11,10 | 21,33 |
| 13,32 | 6,24 | 11,17 | 20,77 |
| 13,40 | 6,03 | 11,25 | 20,23 |
| 13,49 | 5,82 | 11,32 | 19,68 |
| 13,57 | 5,62 | 11,39 | 19,15 |
| 13,66 | 5,41 | 11,46 | 18,61 |
| 13,74 | 5,21 | 11,53 | 18,09 |
| 13,83 | 5,01 | 11,60 | 17,56 |
| 13,91 | 4,82 | 11,67 | 17,05 |
| 14,00 | 4,62 | 11,74 | 16,53 |
| 14,08 | 4,43 | 11,81 | 16,03 |
| 14,17 | 4,25 | 11,89 | 15,52 |
| 14,26 | 4,07 | 11,96 | 15,03 |
| 14,34 | 3,88 | 12,03 | 14,54 |
| 14,43 | 3,71 | 12,10 | 14,06 |
| 14,52 | 3,53 | 12,18 | 13,58 |
| 14,60 | 3,36 | 12,25 | 13,11 |
| 14,69 | 3,19 | 12,32 | 12,64 |
| 14,78 | 3,03 | 12,40 | 12,18 |
| 14,87 | 2,87 | 12,47 | 11,72 |
| 14,95 | 2,71 | 12,55 | 11,28 |
| 15,04 | 2,55 | 12,62 | 10,83 |
| 15,13 | 2,40 | 12,69 | 10,40 |
| 15,22 | 2,25 | 12,77 | 9,96  |
| 15,31 | 2,11 | 12,84 | 9,54  |
| 15,40 | 1,97 | 12,92 | 9,12  |
| 15,49 | 1,84 | 12,99 | 8,72  |
| 15,58 | 1,70 | 13,07 | 8,31  |
| 15,65 | 1,60 | 13,14 | 7,94  |
| 15,72 | 1,50 | 13,21 | 7,56  |
| 15,80 | 1,40 | 13,29 | 7,21  |
| 15,87 | 1,30 | 13,36 | 6,85  |
| 15,94 | 1,21 | 13,43 | 6,51  |
| 16,01 | 1,12 | 13,50 | 6,17  |
| 16,08 | 1,04 | 13,57 | 5,84  |
| 16,15 | 0,95 | 13,64 | 5,51  |
| 16,23 | 0,87 | 13,72 | 5,21  |
| 16,30 | 0,79 | 13,79 | 4,89  |
| 16,37 | 0,72 | 13,86 | 4,60  |
| 16,44 | 0,65 | 13,93 | 4,30  |
| 16,51 | 0,58 | 14,00 | 4,03  |
| 16,58 | 0,51 | 14,07 | 3,75  |
| 16,66 | 0,45 | 14,15 | 3,49  |
| 16,73 | 0,39 | 14,22 | 3,22  |
| 16,80 | 0,33 | 14,29 | 2,98  |
| 16,87 | 0,28 | 14,36 | 2,74  |
| 16,94 | 0,23 | 14,43 | 2,51  |

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 17,02 | 0,18  | 14,51 | 2,28  |
| 17,09 | 0,14  | 14,58 | 2,08  |
| 17,16 | 0,09  | 14,65 | 1,87  |
| 17,23 | 0,06  | 14,72 | 1,68  |
| 17,30 | 0,02  | 14,79 | 1,49  |
| 17,37 | 0,00  | 14,86 | 1,33  |
| 17,45 | -0,03 | 14,94 | 1,15  |
| 17,52 | -0,05 | 15,01 | 1,01  |
| 17,59 | -0,08 | 15,08 | 0,85  |
| 17,66 | -0,09 | 15,15 | 0,73  |
| 17,73 | -0,10 | 15,22 | 0,60  |
| 17,80 | -0,11 | 15,29 | 0,49  |
| 17,88 | -0,12 | 15,37 | 0,38  |
| 17,95 | -0,11 | 15,44 | 0,30  |
| 18,02 | -0,11 | 15,51 | 0,21  |
| 18,09 | -0,10 | 15,58 | 0,16  |
| 18,16 | -0,09 | 15,65 | 0,09  |
| 18,23 | -0,07 | 15,72 | 0,06  |
| 18,31 | -0,06 | 15,80 | 0,01  |
| 18,38 | -0,03 | 15,87 | 0,01  |
| 18,45 | 0,00  | 15,94 | -0,01 |

### Vaso de bi-material parede fina e espessa.

| Bi-material parede fina-profundidade do entalhe de 4,42 |                                    | Bi-material parede fina -profundidade do entalhe de 6,93 |                                    | Bi-material parede espessa-profundidade do entalhe de 4,42 |                                    | Bi-material parede espessa -profundidade do entalhe de 6,93 |                                    |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| r (mm)                                                  | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | r (mm)                                                   | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | r (mm)                                                     | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) | r (mm)                                                      | $\sigma_r$ MEF(N/mm <sup>2</sup> ) |
| 0                                                       | -0,81                              | 0                                                        | 1182,06                            | 0,00                                                       | 11,02                              | 0,00                                                        | 12,18                              |
| 0,02                                                    | 91,41                              | 0,01                                                     | 736,66                             | 0,04                                                       | 79,19                              | 0,04                                                        | 105,56                             |
| 0,04                                                    | 202,05                             | 0,01                                                     | 2023,87                            | 0,09                                                       | 177,23                             | 0,08                                                        | 230,79                             |
| 0,06                                                    | 268,19                             | 0,02                                                     | 767,25                             | 0,14                                                       | 201,69                             | 0,11                                                        | 273,71                             |
| 0,08                                                    | 343,66                             | 0,02                                                     | 1112,24                            | 0,18                                                       | 241,02                             | 0,15                                                        | 333,54                             |
| 0,1                                                     | 388,08                             | 0,03                                                     | 1102,52                            | 0,23                                                       | 249,17                             | 0,19                                                        | 352,84                             |
| 0,12                                                    | 440,49                             | 0,03                                                     | 1260,89                            | 0,27                                                       | 264,01                             | 0,23                                                        | 380,91                             |
| 0,14                                                    | 469,09                             | 0,04                                                     | 1385,36                            | 0,32                                                       | 264,67                             | 0,27                                                        | 388,24                             |
| 0,16                                                    | 504,03                             | 0,04                                                     | 1492,05                            | 0,36                                                       | 268,87                             | 0,30                                                        | 400,58                             |
| 0,18                                                    | 522,55                             | 0,04                                                     | 1604,17                            | 0,41                                                       | 265,64                             | 0,34                                                        | 400,99                             |
| 0,21                                                    | 545,51                             | 0,05                                                     | 1679,48                            | 0,46                                                       | 264,73                             | 0,38                                                        | 404,79                             |
| 0,23                                                    | 556,95                             | 0,05                                                     | 1769,42                            | 0,50                                                       | 260,04                             | 0,42                                                        | 401,93                             |
| 0,25                                                    | 571,7                              | 0,06                                                     | 1836,13                            | 0,55                                                       | 256,77                             | 0,46                                                        | 401,24                             |
| 0,27                                                    | 577,8                              | 0,06                                                     | 1904,57                            | 0,59                                                       | 251,41                             | 0,50                                                        | 396,49                             |
| 0,29                                                    | 583,3                              | 0,07                                                     | 1958,85                            | 0,64                                                       | 247,03                             | 0,54                                                        | 393,28                             |

|      |        |      |         |      |        |      |        |
|------|--------|------|---------|------|--------|------|--------|
| 0,31 | 588,05 | 0,07 | 2019,04 | 0,69 | 241,52 | 0,58 | 387,59 |
| 0,34 | 593,6  | 0,08 | 2063,13 | 0,73 | 236,70 | 0,62 | 383,02 |
| 0,36 | 593,03 | 0,08 | 2113,23 | 0,78 | 231,28 | 0,66 | 376,91 |
| 0,38 | 594,3  | 0,09 | 2148,78 | 0,83 | 226,36 | 0,70 | 371,63 |
| 0,4  | 592,2  | 0,1  | 2189,87 | 0,88 | 221,16 | 0,74 | 365,41 |
| 0,43 | 591,35 | 0,1  | 2218,04 | 0,92 | 216,32 | 0,77 | 359,81 |
| 0,45 | 587,9  | 0,11 | 2294,14 | 0,97 | 211,38 | 0,81 | 353,65 |
| 0,47 | 585,48 | 0,11 | 2290,27 | 1,02 | 206,73 | 0,85 | 347,97 |
| 0,49 | 581,06 | 0,12 | 2297,53 | 1,07 | 202,07 | 0,90 | 341,96 |
| 0,52 | 577,48 | 0,12 | 2312,62 | 1,11 | 197,63 | 0,94 | 336,33 |
| 0,54 | 572,39 | 0,13 | 2313,41 | 1,16 | 193,26 | 0,98 | 330,53 |
| 0,57 | 568    | 0,13 | 2316,51 | 1,21 | 189,06 | 1,02 | 325,03 |
| 0,59 | 562,47 | 0,14 | 2322,74 | 1,26 | 184,96 | 1,06 | 319,47 |
| 0,61 | 557,55 | 0,15 | 2323,79 | 1,31 | 180,99 | 1,10 | 314,15 |
| 0,64 | 551,72 | 0,15 | 2328,3  | 1,36 | 177,15 | 1,14 | 308,84 |
| 0,66 | 546,59 | 0,16 | 2326,31 | 1,41 | 173,41 | 1,18 | 303,72 |
| 0,69 | 539,97 | 0,16 | 2327,41 | 1,46 | 169,81 | 1,22 | 298,65 |
| 0,71 | 533,88 | 0,17 | 2322    | 1,50 | 166,29 | 1,26 | 293,75 |
| 0,74 | 527,69 | 0,18 | 2319,54 | 1,55 | 162,91 | 1,30 | 288,92 |
| 0,76 | 521,82 | 0,18 | 2310,84 | 1,60 | 159,60 | 1,34 | 284,23 |
| 0,79 | 515,66 | 0,19 | 2304,9  | 1,65 | 156,41 | 1,39 | 279,63 |
| 0,81 | 509,76 | 0,2  | 2292,85 | 1,70 | 153,30 | 1,43 | 275,16 |
| 0,84 | 503,54 | 0,2  | 2331,29 | 1,75 | 150,30 | 1,47 | 270,78 |
| 0,86 | 497,59 | 0,21 | 2298,3  | 1,80 | 147,36 | 1,51 | 266,49 |
| 0,89 | 491,41 | 0,22 | 2262    | 1,85 | 144,54 | 1,55 | 262,33 |
| 0,92 | 485,47 | 0,22 | 2251,86 | 1,90 | 141,76 | 1,60 | 258,24 |
| 0,94 | 479,39 | 0,23 | 2221,89 | 1,95 | 139,09 | 1,64 | 254,27 |
| 0,97 | 473,53 | 0,24 | 2198,21 | 2,00 | 136,47 | 1,68 | 250,37 |
| 1    | 467,56 | 0,24 | 2175,48 | 2,05 | 133,95 | 1,72 | 246,58 |
| 1,02 | 461,89 | 0,25 | 2152,8  | 2,11 | 131,47 | 1,77 | 242,85 |
| 1,05 | 455,57 | 0,26 | 2138,81 | 2,16 | 129,09 | 1,81 | 239,24 |
| 1,08 | 449,47 | 0,27 | 2110,32 | 2,21 | 126,73 | 1,85 | 235,67 |
| 1,1  | 443,71 | 0,27 | 2082,7  | 2,26 | 124,47 | 1,90 | 232,22 |
| 1,13 | 438,03 | 0,28 | 2060,24 | 2,31 | 122,24 | 1,94 | 228,81 |
| 1,16 | 432,4  | 0,29 | 2033,21 | 2,36 | 120,09 | 1,98 | 225,50 |
| 1,19 | 426,9  | 0,3  | 2009,02 | 2,41 | 117,97 | 2,03 | 222,24 |
| 1,22 | 421,51 | 0,3  | 1993,19 | 2,47 | 115,93 | 2,07 | 219,08 |
| 1,24 | 416,37 | 0,31 | 1969,59 | 2,52 | 113,92 | 2,11 | 215,95 |
| 1,27 | 410,5  | 0,32 | 1940,19 | 2,57 | 111,98 | 2,16 | 212,92 |
| 1,3  | 404,77 | 0,33 | 1916,86 | 2,62 | 110,05 | 2,20 | 209,91 |
| 1,33 | 399,59 | 0,34 | 1898,07 | 2,68 | 108,21 | 2,24 | 207,01 |
| 1,36 | 394,42 | 0,34 | 1876,52 | 2,73 | 106,37 | 2,29 | 204,13 |
| 1,39 | 389,3  | 0,35 | 1850,02 | 2,78 | 104,61 | 2,33 | 201,34 |
| 1,42 | 384,24 | 0,36 | 1831,21 | 2,83 | 102,86 | 2,38 | 198,57 |
| 1,45 | 379,18 | 0,37 | 1815,58 | 2,89 | 101,18 | 2,42 | 195,89 |
| 1,48 | 374,21 | 0,5  | 1632,29 | 2,94 | 99,51  | 2,47 | 193,23 |
| 1,51 | 369,28 | 0,64 | 1472,26 | 2,99 | 97,89  | 2,51 | 190,64 |

|      |        |      |         |      |       |      |        |
|------|--------|------|---------|------|-------|------|--------|
| 1,54 | 364,41 | 0,77 | 1341,13 | 3,05 | 96,30 | 2,56 | 188,08 |
| 1,57 | 359,61 | 0,9  | 1221,27 | 3,10 | 94,76 | 2,60 | 185,60 |
| 1,6  | 354,89 | 1,03 | 1122,21 | 3,16 | 93,22 | 2,65 | 183,13 |
| 1,63 | 350,21 | 1,17 | 1027,8  | 3,21 | 91,75 | 2,69 | 180,74 |
| 1,67 | 345,67 | 1,3  | 949,27  | 3,26 | 90,28 | 2,74 | 178,36 |
| 1,7  | 340,84 | 1,43 | 872,82  | 3,32 | 88,86 | 2,78 | 176,05 |
| 1,73 | 336,09 | 1,56 | 808,37  | 3,37 | 87,46 | 2,83 | 173,75 |
| 1,76 | 331,64 | 1,7  | 744,93  | 3,43 | 86,10 | 2,88 | 171,52 |
| 1,79 | 327,23 | 1,83 | 690,69  | 3,48 | 84,75 | 2,92 | 169,31 |
| 1,83 | 322,88 | 1,96 | 636,95  | 3,54 | 83,44 | 2,97 | 167,15 |
| 1,86 | 318,57 | 2,09 | 590,42  | 3,59 | 82,14 | 3,01 | 165,01 |
| 1,89 | 314,3  | 2,23 | 544,09  | 3,65 | 80,89 | 3,06 | 162,93 |
| 1,93 | 310,07 | 2,36 | 503,55  | 3,70 | 79,64 | 3,11 | 160,86 |
| 1,96 | 305,88 | 2,49 | 463,04  | 3,76 | 78,43 | 3,15 | 158,84 |
| 1,99 | 301,75 | 2,62 | 427,32  | 3,82 | 77,23 | 3,20 | 156,84 |
| 2,03 | 297,66 | 2,76 | 391,5   | 3,87 | 76,07 | 3,25 | 154,89 |
| 2,06 | 293,62 | 2,89 | 359,75  | 3,93 | 74,91 | 3,29 | 152,95 |
| 2,1  | 289,63 | 3,02 | 327,8   | 3,98 | 73,79 | 3,34 | 151,06 |
| 2,13 | 285,71 | 3,15 | 299,43  | 4,04 | 72,67 | 3,39 | 149,18 |
| 2,17 | 281,66 | 3,29 | 270,76  | 4,10 | 71,59 | 3,44 | 147,35 |
| 2,2  | 277,67 | 3,42 | 245,34  | 4,15 | 70,52 | 3,48 | 145,52 |
| 2,24 | 273,85 | 3,55 | 219,54  | 4,21 | 69,47 | 3,53 | 143,74 |
| 2,27 | 270,05 | 3,68 | 196,81  | 4,27 | 68,43 | 3,58 | 141,98 |
| 2,31 | 266,29 | 3,82 | 173,59  | 4,33 | 67,43 | 3,63 | 140,25 |
| 2,34 | 262,56 | 3,95 | 153,38  | 4,38 | 66,42 | 3,68 | 138,53 |
| 2,38 | 258,86 | 4,08 | 132,59  | 4,44 | 65,45 | 3,73 | 136,85 |
| 2,42 | 255,19 | 4,21 | 114,84  | 4,50 | 64,48 | 3,77 | 135,18 |
| 2,45 | 251,51 | 4,35 | 96,4    | 4,56 | 63,54 | 3,82 | 133,55 |
| 2,49 | 247,86 | 4,48 | 81,17   | 4,62 | 62,60 | 3,87 | 131,93 |
| 2,53 | 244,28 | 4,61 | 65,11   | 4,67 | 61,69 | 3,92 | 130,34 |
| 2,57 | 240,73 | 4,74 | 52,56   | 4,73 | 60,79 | 3,97 | 128,77 |
| 2,61 | 237,16 | 4,88 | 39      | 4,79 | 59,91 | 4,02 | 127,22 |
| 2,64 | 233,62 | 5,01 | 29,41   | 4,85 | 59,03 | 4,07 | 125,69 |
| 2,68 | 230,13 | 5,14 | 18,6    | 4,91 | 58,17 | 4,12 | 124,18 |
| 2,72 | 226,66 | 5,27 | 12,4    | 4,97 | 57,32 | 4,17 | 122,69 |
| 2,76 | 223,17 | 5,41 | 4,7     | 5,03 | 56,50 | 4,22 | 121,23 |
| 2,8  | 219,71 | 5,54 | 2,53    | 5,09 | 55,67 | 4,27 | 119,77 |
| 2,84 | 216,26 | 5,67 | -1,3    | 5,15 | 54,87 | 4,32 | 118,34 |
| 2,88 | 141,86 |      |         | 5,21 | 54,07 | 4,37 | 116,92 |
| 3,01 | 100,93 |      |         | 5,27 | 53,30 | 4,42 | 115,53 |
| 3,15 | 95,6   |      |         | 5,33 | 52,52 | 4,47 | 114,15 |
| 3,28 | 90,65  |      |         | 5,39 | 51,77 | 4,52 | 112,79 |
| 3,41 | 85,78  |      |         | 5,45 | 51,02 | 4,57 | 111,44 |
| 3,54 | 81,25  |      |         | 5,51 | 50,28 | 4,62 | 110,12 |
| 3,68 | 76,76  |      |         | 5,57 | 49,55 | 4,67 | 108,80 |
| 3,81 | 72,59  |      |         | 5,63 | 48,84 | 4,72 | 107,50 |
| 3,94 | 68,45  |      |         | 5,69 | 48,13 | 4,78 | 106,22 |

|      |       |      |       |      |        |
|------|-------|------|-------|------|--------|
| 4,07 | 64,58 | 5,75 | 47,44 | 4,83 | 104,95 |
| 4,21 | 60,74 | 5,82 | 46,75 | 4,88 | 103,70 |
| 4,34 | 57,16 | 5,88 | 46,08 | 4,93 | 102,46 |
| 4,47 | 53,59 | 5,94 | 45,41 | 4,98 | 101,23 |
| 4,6  | 50,26 | 6,00 | 44,76 | 5,03 | 100,03 |
| 4,74 | 46,93 | 6,06 | 44,11 | 5,09 | 98,82  |
| 4,87 | 43,83 | 6,13 | 43,48 | 5,14 | 97,65  |
| 5    | 40,72 | 6,19 | 42,84 | 5,19 | 96,47  |
| 5,13 | 37,84 | 6,25 | 42,22 | 5,25 | 95,32  |
| 5,27 | 34,94 | 6,32 | 41,61 | 5,30 | 94,17  |
| 5,4  | 32,27 | 6,38 | 41,01 | 5,35 | 93,04  |
| 5,53 | 29,57 | 6,44 | 40,41 | 5,40 | 91,91  |
| 5,66 | 27,1  | 6,51 | 39,82 | 5,46 | 90,81  |
| 5,8  | 24,59 | 6,57 | 39,24 | 5,51 | 89,70  |
| 5,93 | 22,32 | 6,63 | 38,67 | 5,57 | 88,62  |
| 6,06 | 20    | 6,70 | 38,10 | 5,62 | 87,54  |
| 6,19 | 17,93 | 6,76 | 37,54 | 5,67 | 86,48  |
| 6,33 | 15,8  | 6,83 | 36,99 | 5,73 | 85,43  |
| 6,46 | 13,94 | 6,89 | 36,45 | 5,78 | 84,39  |
| 6,59 | 12,01 | 6,96 | 35,91 | 5,84 | 83,35  |
| 6,72 | 10,37 | 7,02 | 35,38 | 5,89 | 82,33  |
| 6,86 | 8,65  | 7,09 | 34,85 | 5,95 | 81,32  |
| 6,99 | 7,25  | 7,15 | 34,34 | 6,00 | 80,32  |
| 7,12 | 5,75  | 7,22 | 33,83 | 6,06 | 79,32  |
| 7,25 | 4,61  | 7,29 | 33,32 | 6,11 | 78,34  |
| 7,39 | 3,36  | 7,35 | 32,82 | 6,17 | 77,37  |
| 7,52 | 2,51  | 7,42 | 32,33 | 6,22 | 76,41  |
| 7,65 | 1,53  | 7,48 | 31,84 | 6,28 | 75,45  |
| 7,78 | 1,01  | 7,55 | 31,37 | 6,33 | 74,51  |
| 7,92 | 0,33  | 7,62 | 30,89 | 6,39 | 73,57  |
| 8,05 | 0,19  | 7,69 | 30,42 | 6,45 | 72,64  |
| 8,18 | -0,12 | 7,75 | 29,96 | 6,50 | 71,72  |
|      |       | 7,82 | 29,50 | 6,56 | 70,81  |
|      |       | 7,89 | 29,05 | 6,62 | 69,91  |
|      |       | 7,96 | 28,60 | 6,67 | 69,01  |
|      |       | 8,02 | 28,16 | 6,73 | 68,12  |
|      |       | 8,09 | 27,72 | 6,79 | 67,25  |
|      |       | 8,16 | 27,29 | 6,85 | 66,38  |
|      |       | 8,23 | 26,87 | 6,90 | 65,52  |
|      |       | 8,30 | 26,44 | 6,96 | 64,66  |
|      |       | 8,37 | 26,03 | 7,02 | 63,81  |
|      |       | 8,44 | 25,61 | 7,08 | 62,97  |
|      |       | 8,51 | 25,21 | 7,14 | 62,14  |
|      |       | 8,58 | 24,80 | 7,19 | 61,31  |
|      |       | 8,65 | 24,41 | 7,25 | 60,50  |
|      |       | 8,72 | 24,01 | 7,31 | 59,68  |
|      |       | 8,79 | 23,62 | 7,37 | 58,88  |

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 8,86  | 23,24 | 7,43  | 58,08 |
| 8,93  | 22,86 | 7,49  | 57,30 |
| 9,00  | 22,48 | 7,55  | 56,51 |
| 9,07  | 22,11 | 7,61  | 55,74 |
| 9,14  | 21,74 | 7,67  | 54,96 |
| 9,21  | 21,38 | 7,73  | 54,20 |
| 9,28  | 21,02 | 7,79  | 53,45 |
| 9,36  | 20,67 | 7,85  | 52,70 |
| 9,43  | 20,31 | 7,91  | 51,95 |
| 9,50  | 19,97 | 7,97  | 51,21 |
| 9,57  | 19,62 | 8,03  | 50,48 |
| 9,65  | 19,28 | 8,09  | 49,76 |
| 9,72  | 18,95 | 8,15  | 49,04 |
| 9,79  | 18,62 | 8,22  | 48,33 |
| 9,87  | 18,29 | 8,28  | 47,62 |
| 9,94  | 17,96 | 8,34  | 46,92 |
| 10,01 | 17,64 | 8,40  | 46,22 |
| 10,09 | 17,33 | 8,46  | 45,54 |
| 10,16 | 17,01 | 8,53  | 44,85 |
| 10,24 | 16,70 | 8,59  | 44,18 |
| 10,31 | 16,39 | 8,65  | 43,50 |
| 10,39 | 16,09 | 8,71  | 42,84 |
| 10,46 | 15,79 | 8,78  | 42,18 |
| 10,54 | 15,50 | 8,84  | 41,53 |
| 10,61 | 15,20 | 8,90  | 40,88 |
| 10,69 | 14,91 | 8,97  | 40,24 |
| 10,77 | 14,63 | 9,03  | 39,60 |
| 10,84 | 14,34 | 9,09  | 38,97 |
| 10,92 | 14,06 | 9,16  | 38,34 |
| 10,99 | 13,79 | 9,22  | 37,73 |
| 11,07 | 13,52 | 9,29  | 37,11 |
| 11,15 | 13,25 | 9,35  | 36,51 |
| 11,23 | 12,98 | 9,42  | 35,90 |
| 11,30 | 12,72 | 9,48  | 35,31 |
| 11,38 | 12,46 | 9,55  | 34,72 |
| 11,46 | 12,20 | 9,61  | 34,14 |
| 11,54 | 11,95 | 9,68  | 33,55 |
| 11,62 | 11,70 | 9,75  | 32,99 |
| 11,70 | 11,45 | 9,81  | 32,41 |
| 11,77 | 11,21 | 9,88  | 31,86 |
| 11,85 | 10,97 | 9,94  | 31,30 |
| 11,93 | 10,74 | 10,01 | 30,75 |
| 12,01 | 10,50 | 10,08 | 30,21 |
| 12,09 | 10,28 | 10,14 | 29,67 |
| 12,17 | 10,05 | 10,21 | 29,14 |
| 12,25 | 9,83  | 10,28 | 28,62 |
| 12,33 | 9,61  | 10,35 | 28,09 |

|       |      |       |       |
|-------|------|-------|-------|
| 12,42 | 9,39 | 10,42 | 27,59 |
| 12,50 | 9,18 | 10,48 | 27,08 |
| 12,58 | 8,97 | 10,55 | 26,58 |
| 12,66 | 8,76 | 10,62 | 26,08 |
| 12,74 | 8,56 | 10,69 | 25,60 |
| 12,82 | 8,36 | 10,76 | 25,12 |
| 12,91 | 8,17 | 10,83 | 24,65 |
| 12,99 | 7,98 | 10,90 | 24,18 |
| 13,07 | 7,79 | 10,97 | 23,72 |
| 13,15 | 7,61 | 11,03 | 23,27 |
| 13,24 | 7,43 | 11,10 | 22,83 |
| 13,32 | 7,25 | 11,17 | 22,38 |
| 13,40 | 7,08 | 11,25 | 21,96 |
| 13,49 | 6,91 | 11,32 | 21,53 |
| 13,57 | 6,75 | 11,39 | 21,12 |
| 13,66 | 6,59 | 11,46 | 20,71 |
| 13,74 | 6,44 | 11,53 | 20,32 |
| 13,83 | 6,28 | 11,60 | 19,92 |
| 13,91 | 6,14 | 11,67 | 19,54 |
| 14,00 | 5,99 | 11,74 | 19,16 |
| 14,08 | 5,86 | 11,81 | 18,80 |
| 14,17 | 5,72 | 11,89 | 18,44 |
| 14,26 | 5,59 | 11,96 | 18,10 |
| 14,34 | 5,47 | 12,03 | 17,75 |
| 14,43 | 5,35 | 12,10 | 17,43 |
| 14,52 | 5,23 | 12,18 | 17,10 |
| 14,60 | 5,13 | 12,25 | 16,80 |
| 14,69 | 5,02 | 12,32 | 16,50 |
| 14,78 | 4,93 | 12,40 | 16,22 |
| 14,87 | 4,83 | 12,47 | 15,93 |
| 14,95 | 4,75 | 12,55 | 15,68 |
| 15,04 | 4,66 | 12,62 | 15,41 |
| 15,13 | 4,60 | 12,69 | 15,18 |
| 15,22 | 4,52 | 12,77 | 14,94 |
| 15,31 | 4,47 | 12,84 | 14,74 |
| 15,40 | 4,40 | 12,92 | 14,52 |
| 15,49 | 4,36 | 12,99 | 14,34 |
| 15,58 | 4,31 | 13,07 | 14,15 |
| 15,93 | 4,03 | 13,42 | 13,32 |
| 16,28 | 3,74 | 13,77 | 12,48 |
| 16,63 | 3,49 | 14,12 | 11,74 |
| 16,98 | 3,23 | 14,47 | 10,99 |
| 17,33 | 3,00 | 14,82 | 10,33 |
| 17,68 | 2,77 | 15,17 | 9,66  |
| 18,03 | 2,57 | 15,52 | 9,06  |
| 18,38 | 2,37 | 15,87 | 8,46  |
| 18,73 | 2,19 | 16,22 | 7,92  |

|       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|
| 19,08 | 2,01  | 16,57 | 7,37  |
| 19,43 | 1,85  | 16,92 | 6,88  |
| 19,78 | 1,68  | 17,27 | 6,39  |
| 20,13 | 1,54  | 17,62 | 5,94  |
| 20,48 | 1,40  | 17,97 | 5,49  |
| 20,83 | 1,27  | 18,32 | 5,09  |
| 21,18 | 1,14  | 18,67 | 4,68  |
| 21,53 | 1,03  | 19,02 | 4,32  |
| 21,88 | 0,91  | 19,37 | 3,94  |
| 22,23 | 0,81  | 19,72 | 3,61  |
| 22,58 | 0,71  | 20,07 | 3,28  |
| 22,93 | 0,62  | 20,42 | 2,98  |
| 23,28 | 0,53  | 20,77 | 2,67  |
| 23,63 | 0,46  | 21,12 | 2,41  |
| 23,98 | 0,38  | 21,47 | 2,13  |
| 24,33 | 0,32  | 21,82 | 1,90  |
| 24,68 | 0,25  | 22,17 | 1,65  |
| 25,03 | 0,20  | 22,52 | 1,45  |
| 25,38 | 0,14  | 22,87 | 1,23  |
| 25,73 | 0,10  | 23,22 | 1,05  |
| 26,08 | 0,06  | 23,57 | 0,86  |
| 26,43 | 0,03  | 23,92 | 0,72  |
| 26,78 | 0,00  | 24,27 | 0,56  |
| 27,13 | -0,02 | 24,62 | 0,44  |
| 27,48 | -0,04 | 24,97 | 0,32  |
| 27,83 | -0,05 | 25,32 | 0,23  |
| 28,18 | -0,06 | 25,67 | 0,14  |
| 28,53 | -0,05 | 26,02 | 0,09  |
| 28,88 | -0,04 | 26,37 | 0,03  |
| 29,23 | -0,02 | 26,72 | 0,01  |
| 29,58 | 0,00  | 27,07 | -0,01 |