

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA REAL E DO  
USO DA TEORIA DA DISTÂNCIA CRÍTICA EM  
MATERIAIS SEMI-FRÁGEIS**

**RENATO VIEIRA ALVES TERRA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO DE 2013**

# AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA REAL E DO USO DA TEORIA DA DISTÂNCIA CRÍTICA EM MATERIAIS SEMI-FRÁGEIS

**RENATO VIEIRA ALVES TERRA**

“Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

Orientador: Prof. EDUARDO ATEM DE CARVALHO, Ph. D.

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO DE 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

32/2013

Terra, Renato Vieira Alves

Avaliação da tenacidade à fratura real e do uso da teoria da distância crítica em materiais semi-frágeis / Renato Vieira Alves Terra. – Campos dos Goytacazes, 2013.

xiii, 124f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2013.

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 92-94.

1. TEORIA DAS DISTÂNCIAS CRÍTICAS 2. MATERIAIS SEMI-FRÁGEIS 3. TENACIDADE À FRATURA REAL 4.

EXTENSOMETRIA ELÉTRICA 5. CONCENTRADORES DE TENSÃO I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II.

Título.

CDD 620.1126

# AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA REAL E DO USO DA TEORIA DA DISTÂNCIA CRÍTICA EM MATERIAIS SEMI-FRÁGEIS

**RENATO VIEIRA ALVES TERRA**

“Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

Aprovada em 26 de Fevereiro de 2013

Comissão Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Elaine Cristina Pereira (D. Sc. em Engenharia e Ciência dos Materiais) –  
Avaliador Externo – Faculdade Redentor

---

Prof. Guilherme Chagas Cordeiro (D. Sc. em Engenharia Civil) – LECIV/UENF

---

Prof.<sup>a</sup> Ana Lúcia Diegues Skury (D. Sc em Engenharia e Ciência dos Materiais)  
– LAMAV/UENF

---

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph. D. em Engenharia Mecânica) –  
LAMAV/UENF (Orientador)

### **Dedicatória**

O título aqui conquistado não é só meu, é principalmente dos meus pais, Rachel e Sirney. Não há palavras que descrevam o que por mim fizeram, por isso é a eles dedicado.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a meus pais, Rachel e Sirney, por todo suporte, compreensão e carinho, sem os quais não teria chegado até aqui.

À minha companheira Carolina que, com grande paciência, suportou os diversos momentos em que, mesmo estando desembarcado, tive de estar ausente para cumprir as exigências do curso.

Aos professores que assinam como examinadores deste trabalho, bem como a todos que fizeram parte dessa jornada de conhecimento. Uma gratidão especial à Prof.<sup>a</sup> Ana Lúcia pela ajuda nas inúmeras vezes em que tive de usar seus equipamentos e laboratórios. Por conseguinte, aos técnicos de laboratório Renan e Rômulo, pois tornaram possível a confecção de vários dos corpos de prova utilizados.

Ao aluno de doutorado Mário Lucas e seu bolsista André pela ajuda na confecção dos corpos de geopolímeros.

Ao colega Daniel, graduando em Engenharia de Materiais e aluno de IC, pela ajuda no preparo dos corpos de prova e execução dos ensaios.

À CAPES pela bolsa concedida nos primeiros meses de mestrado, que posteriormente foi voluntariamente cancelada devido a criação de vínculo empregatício.

Especial agradecimento ao meu orientador e mestre, o Prof. Eduardo Atem de Carvalho, que após tanto tempo de convívio passou a ser também um amigo, o “Zé”. Obrigado pela paciência e ensinamentos, não restritos somente ao caráter científico.

Por fim, muito obrigado a todos os professores, amigos e familiares que, mesmo não tendo sido citados explicitamente, contribuíram direta ou indiretamente para minha formação pessoal e profissional. Esta é apenas mais uma etapa que começou há muitos anos atrás!

*“Ao verme que primeiro roer as frias  
carnes de meu cadáver, dedico, como  
saudosa lembrança, minhas  
contribuições a este mundo e a  
satisfação de fazer parte deste ciclo tão  
indiferente e inexorável, misterioso e  
belo, chamado vida”.*

*(Renato Terra, 23/04/2013,  
inspirado em Machado de Assis  
“Memórias Póstumas de Brás Cubas”)*

## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 – Objetivos .....	2
1.2 – Motivação.....	3
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 – Conceitos Básicos de Ensaio Mecânicos e Mecânica da Fratura.....	4
2.1.1 – Ensaio de Flexão.....	4
2.1.2 – Mecânica da Fratura.....	6
2.2 – Propriedades dos Materiais Frágeis Utilizados .....	10
2.2.1 – Granito .....	10
2.2.2 – Geopolímeros .....	12
2.3 – Aplicação do Método dos Elementos Finitos .....	14
2.4 – A Teoria da Distância Crítica.....	15
2.4.1 – Um Histórico da Aplicação da TDC.....	15
2.4.2 – Fundamentos Teóricos.....	17
2.4.3 – Os Métodos Relacionados a TDC.....	22
2.4.4 – Aplicações da TDC .....	25
2.5 – Strain Gages (SG) ou Extensômetro(s) de Resistência Elétrica (ERE) .....	27
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 – Materiais e Equipamentos.....	32
3.1.1 – Granitos .....	32
3.1.2 – Geopolímeros .....	32
3.1.3 – Equipamentos e Materiais Utilizados.....	34
3.2 – Métodos .....	40
3.2.1 – Preparação dos Corpos de Prova .....	40
3.2.2 – Preparação e Escolha dos Corpos para Ensaio com os SG.....	42
3.2.3 – Ensaio Mecânico de Flexão à 4 Pontos .....	43
3.3 – Cálculos dos Resultados.....	46
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	50
4.1 – Análise dos Patamares de Fratura das Curvas Tensão x Deformação.....	50



4.2 – Análise dos Resultados de Cargas, deformações, $\sigma_{Máx}$ , $K_t$ , $K_{IC}$ , L e TDC .....	64
4.2.1 – Resultados para os CPGA.....	64
4.2.2 – Resultados para os CPGC .....	68
4.2.3 – Resultados para os CPGP.....	71
4.3 – Discussão sobre os Resultados dos ensaios com SG ( $\epsilon \times t$ e $F_{(INSTRON)} \times \epsilon_{(SG)}$ ) .....	74
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....	89
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
APÊNDICE A: Medidas dos corpos de prova.....	95
A.1 – Medidas dos CPGA lisos e para os três tipos de entalhe.....	95
A.2 – Medidas dos CPGC lisos e para os três tipos de entalhe .....	99
A.3 – Medidas dos CPGP lisos e para os três tipos de entalhe.....	103
A.4 – Ilustrações das medidas realizadas nos corpos .....	107
APÊNDICE B: Gráficos típicos de deformação x força obtidos a partir da INSTRON.....	110
APÊNDICE C: Tabelas com a Apresentação dos Cálculos e Resultados da INSTRON. ...	112
C.1 – Para os CPGA.....	112
C.2 – Para os CPGC.....	116
C.3 – Para os CPGP .....	120
ANEXO A – $K_t$ para flexão de uma barra com entalhe em U profundo.....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagramas de ensaios de flexão de três e quatro pontos com as respectivas distribuições de forças e formas dos momentos fletores, (FERRANTE, 1996). .....	4
Figura 2: Distorção no campo de tensões internas de um corpo na presença de uma trinca em sua estrutura (CALLISTER, 2000). .....	7
Figura 3: Os três modos de propagação das trincas de acordo com o carregamento aplicado (ANDERSON, 2005). .....	10
Figura 4: Estrutura química dos geopolímeros (BARBOSA, 1999, apud SILVA, 2011). .....	13
Figura 5: Resultados obtidos por TAYLOR (2007), de predições usando a TDC em (a) fratura frágil em carbetto de silício, (b) fadiga de aço, (c) fratura de compósitos de fibra laminadas, (d) fratura de alumina, (e) fadiga de aço. ....	19
Figura 6: Alguns tipos de extensômetros: (a) uniaxial, (b) roseta dupla a 90° e (c) roseta tripla a 90° ( <a href="http://www.excelsensor.com.br">http://www.excelsensor.com.br</a> , em 02/12/2011). ....	30
Figura 7 Máquina universal de ensaios INSTRON. ....	34
Figura 8: Medidor de perfis PANTEC. ....	35
Figura 9: Microscópio Confocal Olympus. ....	35
Figura 10: Aparato utilizado no corte semicircular dos corpos de prova. À esquerda furadeira e broca de 1,574” após perfurar um dos corpos de granito e à direita detalhe do entalhe semicircular pronto. ....	37
Figura 11: Serra utilizada no corte dos corpos de prova em U profundo e suporte de madeira para fixar os corpos de prova. ....	38
Figura 12: Mesa Mitutoyo para verificação das imperfeições nas faces dos corpos de prova. ....	38
Figura 13: Moldes de acrílico para a fabricação dos corpos de geopolímeros lisos (esquerda) e moldes de acrílico com o bastão de silicone cortado para a fabricação dos corpos de prova de geopolímeros em arco de círculo (direita). ....	39
Figura 14: Materiais usados na preparação dos corpos de prova. Esquadro de metal, lixa, paquímetro, marcador e broca de Ø1,574”. ....	40
Figura 15: Corpos após a secagem e antes da retirada das fitas (esquerda) e teste de resistência (120 Ohms) dos SG após terem sido colados aos corpos de prova (direita). ....	43

Figura 16: CPGC sendo ensaiados na INSTRON. Liso (A), em círculo menor (B), maior (C) e em U profundo (D) sendo centralizado usando um esquadro. ....	44
Figura 17: Aparato para ensaio formado pelo conjunto máquina universal de ensaios INSTRON, corpo de prova com SG, SG Indicator e computadores para leitura dos dados. ....	45
Figura 18: Corpo de prova na INSTRON conectado via fio de cobre ao SG Indicator (esquerda) e SG Indicator ligado ao computador com o software de aquisição das deformações (direita). ....	45
Figura 19: Representação gráfica de $r$ . Desenho baseado em CARVALHO (1992), p. 73. ....	48
Figura 20: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 1. ....	51
Figura 21: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 2. ....	51
Figura 22: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 3. ....	52
Figura 23: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 5. ....	53
Figura 24: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 8. ....	53
Figura 25: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado em U profundo 1. ....	54
Figura 26: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado em U profundo 2. ....	55
Figura 27: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo menor 3. ....	56
Figura 28: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo menor 6. ....	56
Figura 29: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo maior 3. ....	57
Figura 30: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo maior 4. ....	58
Figura 31: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC liso 4 (com SG grande). ....	58

Figura 32: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC liso 8 (com SG pequeno).....	59
Figura 33: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC entalhado em U profundo 20 (SG1). ....	59
Figura 34: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC entalhado em círculo menor 2 (SG1). ....	60
Figura 35: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC entalhado em círculo maior 1 (SG1).....	60
Figura 36: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em círculo menor 16. ....	61
Figura 37: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP liso 2 (SG2). ....	62
Figura 38: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em U profundo 3. ....	62
Figura 39: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em círculo menor 1 (SG1). ....	63
Figura 40: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em círculo maior 3 (SG1).....	63
Figura 41: Fotos em microscópio confocal de defeitos nos CPGA liso 10. Sendo A com aumento de 216x (escala 200 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$ ); e B e C (colorida) com aumento de 426x (escala 100 $\mu\text{m}$ x 100 $\mu\text{m}$ ). ....	66
Figura 42: Fotos em microscópio confocal de defeitos nos CPGC. A (colorida) e B – CPGC em círculo maior 8 com aumento de 345x (escala 125 $\mu\text{m}$ x 125 $\mu\text{m}$ ); e C (colorida) e D CPGC liso 13 com aumento de 420x (escala 105 $\mu\text{m}$ x 105 $\mu\text{m}$ ). ....	69
Figura 43: Fotos em microscópio confocal de defeitos no CPGP liso 19. A - 108x de aumento e escala de 400 $\mu\text{m}$ x 400 $\mu\text{m}$ . B - 216x de aumento e escala de 200 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$ . C (colorida) e D - 328x de aumento e escala de 125 $\mu\text{m}$ x 125 $\mu\text{m}$ . ....	72
Figura 44: Fotos em microscópio confocal de defeitos no CPGP em U profundo 2, A (colorida) e B (preto e branco) com 367x de aumento e escala de 118 $\mu\text{m}$ x 118 $\mu\text{m}$ . ....	72
Figura 45: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGA Liso 11. ....	74
Figura 46: Curva Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGA Liso 11.....	75

Figura 47: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGA em U profundo 12. ....	76
Figura 48: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGA em U profundo 12. ....	76
Figura 49: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGA em círculo menor 11. ....	77
Figura 50: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGA em círculo menor 11. ....	77
Figura 51: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 4. ....	78
Figura 52: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 4. ....	78
Figura 53: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 8. ....	79
Figura 54: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 8. ....	79
Figura 55: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em U profundo 20. ....	80
Figura 56: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em U profundo 20. ....	80
Figura 57: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo menor 2.....	81
Figura 58: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo menor 2.....	81
Figura 59: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo maior 1.....	82
Figura 60: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo maior 1.....	82
Figura 61: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 1. ....	84
Figura 62: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 1. ....	84
Figura 63: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 2. ....	85

Figura 64: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 2. ....	85
Figura 65: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em U profundo 1.....	86
Figura 66: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em U profundo 1.....	86
Figura 67: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo menor 1.....	87
Figura 68: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo menor 1.....	87
Figura 69: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo maior 3.....	88
Figura 70: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo maior 3.....	88
Figura A.1: Identificação das medidas realizadas nos corpos lisos.....	107
Figura A.2: Identificação das medidas realizadas nos corpos em U profundo. ....	107
Figura A.3: Identificação das medidas realizadas nos corpos em arco de círculo menor.....	108
Figura A.4: Identificação das medidas realizadas nos corpos em arco de círculo maior. ....	109
Figura B.1: Gráfico comparativo do comportamento do deslocamento x força para os CPGA.....	110
Figura B.2: Gráfico comparativo do comportamento do deslocamento x força para os CPGC.....	111
Figura B.3: Gráfico comparativo do comportamento do deslocamento x força para os CPGP.....	111
Figura AA.1: Chart para cálculo de $K_t$ para uma barra entalhada em U profundo submetida à flexão (Retirado de PILKEY, et al., 2008, p.110). ....	124

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Características físicas e mineralógicas do granito cinza andorinha. ....	12
Tabela 2: Resumo do número de CP ensaiados.....	42
Tabela 3: Resumo dos resultados encontrados para os CPGA. ....	67
Tabela 4: Resumo dos resultados encontrados para os CPGC.....	70
Tabela 5: Resumo dos resultados encontrados para os CPGP. ....	73
Tabela A.1: Medidas dos CPGA sem entalhes (mm).....	95
Tabela A.2: Medidas dos CPGA entalhados em U profundo (mm). ....	96
Tabela A.3: Medidas dos CPGA entalhados em arco de círculo menor (mm). ....	97
Tabela A.4: Medidas dos CPGA entalhados em arco de círculo maior (mm). ....	98
Tabela A.5: Medidas dos CPGC sem entalhes (mm).....	99
Tabela A.6: Medidas dos CPGC entalhados em U profundo (mm).....	100
Tabela A.7: Medidas dos CPGC entalhados em arco de círculo menor (mm). ....	101
Tabela A.8: Medidas dos CPGC entalhados em arco de círculo maior (mm). ....	102
Tabela A.9: Medidas dos CPGP sem entalhes (mm). ....	103
Tabela A.10: Medidas dos CPGP entalhados em U profundo (mm). ....	104
Tabela A.11: Medidas dos CPGP entalhados em arco de círculo menor (mm). ....	105
Tabela A.12: Medidas dos CPGP entalhados em arco de círculo maior (mm). ....	106
Tabela C.1: Resultados obtidos para os CPGA sem entalhes. ....	112
Tabela C.2: Resultados obtidos para os CPGA entalhados em U Profundo.....	113
Tabela C.3: Resultados obtidos para os CPGA entalhados em círculo menor. ....	114
Tabela C.4: Resultados obtidos para os CPGA entalhados em círculo maior.....	115
Tabela C.5: Resultados obtidos para os CPGC sem entalhes.....	116
Tabela C.6: Resultados obtidos para os CPGC entalhados em U profundo.....	117
Tabela C.7: Resultados obtidos para os CPGC entalhados em arco de círculo menor. .....	118
Tabela C.8: Resultados obtidos para os CPGC entalhados em arco de círculo maior. .....	119
Tabela C.9: Resultados obtidos para os CPGP sem entalhes. ....	120
Tabela C.10: Resultados obtidos para os CPGP entalhados em U profundo. ....	121
Tabela C.11: Resultados obtidos para os CPGP entalhados arco de círculo menor. .....	122
Tabela C.12: Resultados obtidos para os CPGP entalhados arco de círculo maior. .....	123

## LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

### Minúsculas

**a** – Comprimento de uma trinca passante (subscrito: **o** parâmetro de ElHaddad, é o mesmo que L);

**b** – Largura dos corpos de prova, os subscritos são:

**A** – Largura no lado A;

**Ct** – Largura no centro para o corpo liso;

**B** – Largura no lado B;

**cm** – Largura em cima (face superior);

**bx** – Largura em baixo (face inferior);

**med** – Largura média);

**d** – distância entre os roletes superior e inferior:  $d = (l_2 - l_1)/2$ ;

**e** – deformação de flexão obtida da INSTRON;

**h** – Altura/espessura dos corpos de prova, os subscritos significam:

**Af** – Altura no lado A frente; **Ac** = Altura no lado A costas; **Amed** = Altura no lado A média;

**Ct** – Altura no centro para o corpo liso;

**Bf** – Altura no lado B frente; **Bc** – Altura no lado B costas; **Bmed** – Altura no lado B média;

**med** – Altura média de  $h_A$ ,  $h_{Ct}$  e  $h_B$ ;

**med AB** – Altura média de  $h_A$  e  $h_B$ ;

**T** – Altura total na direção do entalhe, sendo **Tf** = frente, **Tc** = costas, **Tmed** = média;

**med ABT** – Altura média entre  $h_A$ ,  $h_B$ ,  $h_{Tf}$  e  $h_{Tc}$ ;

**h<sub>C</sub>** – Espessura do corpo no entalhe, sendo **Cf** = frente; **Cc** = costas; **Cmed** = média);

**l** - afastamento entre os apoios da INSTRON para o ensaio de 3 pontos;

**l<sub>1</sub>** – afastamento entre os roletes superiores da INSTRON para ensaio de 4 pontos;

**l<sub>2</sub>** – afastamento entre os roletes inferiores da INSTRON para ensaio de 4 pontos;

**r** – distância da ponta da trinca às tensões que atuam num elemento localizado  $r$  e  $\theta$  da ponta da trinca (subscrito: **c** - distância da ponta da trinca ao ponto de máxima tensão);

**t** – tempo;

**y** – distância do ponto em estudo em um corpo à linha neutra;



**w** – dimensão característica da peça ou corpo;

### **Maiúsculas**

**A** – Área de seção transversal;

**D** – Corda do entalhe circular (subscritos: f = frente; ct = centro; c = costas; med = média);

**E** – Módulo de Elasticidade Flexural;

**F** - Carga aplicada no corpo de prova;

**I<sub>z</sub>** – Momento de inércia;

**K<sub>th</sub>** – Limiar de fadiga do material;

**K<sub>t</sub>** – Fator concentrador de tensão para os corpos entalhados;

**K<sub>i</sub>** – Fator de intensidade de tensão ou tenacidade à fratura (subscrito: IC = sob modo I de carregamento);

**L** – Parâmetro de comprimento do material da TDC; ou comprimento de um condutor elétrico.

**M** – Momento Fletor;

**P** – Profundidade do entalhe (subscritos: f = frente; c = costas; med = média);

**R** – Raio na Coordenada Polar; Resistência Elétrica;

**S** – Sensibilidade do metal ou do SG (subscritos: **a** – sensibilidade do metal ou liga usado no condutor de SG; **g** – Sensibilidade para o SG ou *gage factor*).

### **Abreviações**

**Amp.** – Amplitude amostral;

**CP** – Corpo(s) de Prova(s);

**CPGA** – Corpo(s) de Prova de Granito Andorinha;

**CPGC** – Corpo(s) de Prova de Granito Chocolate;

**CPGP** – Corpo(s) de Prova de Geopolímeros;

**CV** – Coeficiente de Variação;

**DC** – Distância(s) Crítica(s);

**DP** – Desvio padrão amostral;

**Máx.** – Valor máximo de uma amostra;

**MFLE** – Mecânica da Fratura Linear Elástica

**Mín.** – Valor mínimo de uma amostra;

**ML** – Método da Linha

**MP** – Método do Ponto

**Q2** – Mediana;

**SG** – *Strain Gages* (**ERE** – Extensômetros de Resistência Elétrica);

**TDC** – Teoria da Distância Crítica

**Alfabeto Grego**

$\Delta$  – *Range*/variação;

$\varepsilon$  – Deformação de flexão calculada;

$\theta$  – ângulo de elemento localizado  $r$  e  $\theta$  da ponta de uma trinca;

$\Theta$  - Ângulo da direção da coordenada polar;

$\rho$  – Raio de curvatura da ponta do entalhe; Resistividade do material;

$\sigma$  – Tensão (subscritos: **N** – nominal; **Máx** – máxima de ruptura; **o** - limite de fadiga de espécie plana do material ou tensão característica do corpo plano; **u** – limite à fadiga ou tensão última da espécime plana; **on** – tensão característica do corpo entalhado calculada pelo MP ou ML);

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

$\tau_{xy}$  – Tensão cisalhante em x-y;

$\varnothing$  – Diâmetro;

## **RESUMO**

### **AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA REAL E DO USO DA TEORIA DA DISTÂNCIA CRÍTICA EM MATERIAIS SEMI-FRÁGEIS**

**Renato Vieira Alves Terra**

26 de Fevereiro de 2013

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho

Este trabalho teve o objetivo de verificar a aplicabilidade da Teoria das Distâncias Críticas – TDC como uma ferramenta que usa informações de campos de tensão local para prever os efeitos da concentração de tensão sob materiais frágeis e correlacionar com algumas de suas propriedades mecânicas, quando submetidos em ensaio de flexão a 4 pontos. Foram estudados três tipos de materiais – granito andorinha, granito chocolate (ou marrom absoluto) e um geopolímero, sob 4 tipos de configurações diferentes cada um: lisos (sem entalhes), entalhados em U profundo, entalhados em arco de círculo menor e maior. A partir dos corpos lisos são obtidas as tensões de ruptura e módulos de elasticidade dos materiais. A geometria dos corpos entalhados definiu os parâmetros empregados pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) para a determinação do fator de concentração de tensões ( $K_t$ ) e do fator de intensidade de tensões ( $K_{IC}$ ) e, com estes dados, foi possível calcular o comprimento característico –  $L$ , para os materiais estudados. Também foi feito a análise do comportamento de fratura dos materiais utilizando *strain gages* (SG) para se monitorar a evolução da deformação compressiva na parte superior do corpo de prova. Os resultados, correlacionados com a tensão de flexão, permitiram determinar o verdadeiro limite de trabalho dos materiais, quando da presença de entalhes profundos não singulares. Os resultados de tensão obtidos para todos os materiais estudados, embora estes apresentassem população de defeitos diferentes entre si, apresentaram semelhanças quanto à determinação pela TDC. Desta forma observou-se que a TDC, em combinação com conceitos tradicionais da Mecânica da Fratura Linear Elástica – MFLE, pode ser empregada como ferramenta simples na obtenção de propriedades de materiais frágeis.

## **ABSTRACT**

### **ACTUAL FRACTURE STRENGTH EVALUATION AND CRITICAL DISTANCE THEORY USE FOR SEMI-BRITTLE MATERIALS**

**Renato Vieira Alves Terra**

26 de Fevereiro de 2013

Advisor: Eduardo Atem de Carvalho

This work's goal was to verify the Critical Distance Theory - TDC applicability as a tool that uses local stress fields information to predict stress concentration effects over brittle materials and correlate it to some mechanical properties, when submitted to four-point bending test. Three types of materials were studied – pidgeon-eye granite, chocolate granite (or absolute brown) and a geopolymer, under four different configurations each: straight (unnotched), deep U-notched, minor and major arcs of circle. Ultimate strength and Elastic modulus were obtained from the straight specimens. The notched specimen dimensions fed a Finite Element Method analysis and  $K_t$  e  $K_{IC}$  were determined. Form this, the characteristic length –  $L$  was calculated, for the mentioned materials. A fracture behavior analysis was also performed with the aid of strain gages (SG), for compressive strain monitoring at the specimen's uppe face. Results, correlated to flexural stress, allowed to determine the true working limit for the studied materials, when in presence of non-singular deep notches. Stress results found for all the studied materials, although each one of the presented a vastly different defect population, tended to be similar, when determined by CDT. It may be observed that CDT, combined with traditional LFM fundamentals, may be used as a simple tool for brittle materials properties determination.

# ***CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO***

Atualmente, os métodos relacionados à Teoria da Distância Crítica (TDC) vêm sendo usados no projeto e reparo de componentes cerâmicos e compósitos e são incluídos frequentemente em modelos de fraturas mecânicas mais complexas. Há uma necessidade de mais trabalhos no estudo da teoria básica da Distância Crítica (DC) e sua relação com outras teorias da fratura, como a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). Devido à capacidade da TDC prever efeitos de tamanho sobre o rompimento dos materiais, alguns trabalhos também têm sido desenvolvidos em nanomateriais e componentes biomédicos microscópicos.

Como desde a sua fundação o LAMAV/UENF tem se dedicado às investigações quanto à natureza, performance, vida útil e aplicação de diversos materiais utilizados na indústria, o trabalho em voga se encaixa perfeitamente nessa visão institucional.

Muitos componentes mecânicos têm descontinuidades como furos, rasgos de chavetas e entalhes em U, em cuja vizinhança imediata ocorre o fenômeno da concentração de tensões, ou seja, um aumento no valor das tensões atuantes causado não só pela diminuição da área resistente como também pela perturbação que a descontinuidade causa (CARVALHO et al., 2009). Desde os trabalhos de NEUBER (1958) e PETERSON (1959), diversos outros pesquisadores escreveram trabalhos para discutir estes fenômenos, principalmente os que têm por base os concentradores de tensões, normalmente quantificados pelo fator de concentração de tensões  $K_t$ . No entanto, nas últimas décadas, a TDC foi resgatada em diversos trabalhos de David Taylor como alternativa à predição desses problemas.

Segundo a TDC (TAYLOR, 2007), processos de fratura de materiais frequentemente envolvem uma escala de comprimento característica, que nos revela os efeitos das concentrações de tensão como trincas e entalhes. Este parâmetro de escala, definido como  $L$  e dependente da dureza e resistência à fratura do material, pode ser usado em conjunção com análises de tensão elástica linear para predições mais acuradas dos parâmetros de projeto e dos mecanismos de falha dos materiais. Por conseguinte, baseado no conceito da TDC, desenvolveram-se diversos métodos similares, são eles: os métodos do ponto, da linha, da área, do volume, da trinca imaginária e da fratura finita. Todos, apesar de guardarem certas semelhanças, apresentam resultados diferentes de acordo com a aplicação e, portanto, merecem maiores registros dos resultados que vem sendo obtidos de acordo com a

aplicabilidade a cada caso. Assim, foi demonstrado em diversas das referências aqui mencionadas, que os métodos do ponto e da linha são os que vêm apresentando melhores resultados em materiais frágeis (TAYLOR, 1999, 2004, 2007; SUSMEL L. e TAYLOR D., 2007).

Grandes dificuldades surgem no uso de materiais frágeis em situações de carregamento devido à natureza do seu comportamento, embora potencialmente muito alta, sua tensão de ruptura é grandemente afetada por pequenos defeitos como rugosidade da superfície, ranhuras, inclusões, e outros defeitos. Efeitos estes muitas vezes tradicionalmente previstos estatisticamente por Distribuição de Weibull – DW, em que a tenacidade à fratura torna-se uma variável estocástica, numericamente por MEF, ou empiricamente por ensaios mecânicos e análises de fotoelasticidade. Para complementar este estudo tem sido aplicada a TDC (CASTRO, et al., 2009).

Portanto, não por acaso que a teoria da TDC está se tornando mais comumente aplicada, o aumento da capacidade computacional dos últimos tempos, assim como a capacidade de sua implementação em combinação com o MEF (fazendo com que muito mais componentes possam ser analisados usando malhas de densidade suficientemente grandes), vem impulsionando sua utilização. Principalmente no uso de campos de componentes de tensão de natureza tridimensional complexa que implicam a consideração de efeitos de restrições reduzidas e carregamento multiaxial (CASTRO, et al., 2009).

## 1.1 – Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de testar a viabilidade de aplicação da Teoria da Distância Crítica – TDC na determinação de propriedades mecânicas de materiais frágeis. *Ad-hoc*, os seguintes objetivos específicos podem ser mencionados:

- Acoplar à utilização da TDC, análises por elementos finitos e ensaios mecânicos de flexão para a determinação mais rigorosa das propriedades mecânicas;
- Testar a validade da TDC no comportamento à fratura de materiais frágeis com alta população de defeitos estruturais – granitos e geopolímeros, bem como a viabilidade da aplicação da TDC a estes corpos quando lisos ou submetidos a diversas geometrias de entalhes (U profundo, em arco de círculo menor e maior).

## **1.2 – Motivação**

Durante muitos anos falhas mecânicas têm provocado prejuízos não só financeiros como também humanos em diversos setores da indústria. Grande parte destas falhas ocorre devido ao efeito dos concentradores de tensão que fazem com que peças falhem sob tensões menores que as previstas em projeto. Assim, ultimamente a TDC vem sendo aplicada como poderosa ferramenta para prever os efeitos de características intrínsecas dos materiais (como pequenos defeitos em sua estrutura, rugosidades de superfície, ranhuras e inclusões) ou características de projeto como entalhes, furos e entalhes de chaveta, sobre as tensões de ruptura destes corpos.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Conceitos Básicos de Ensaio Mecânicos e Mecânica da Fratura

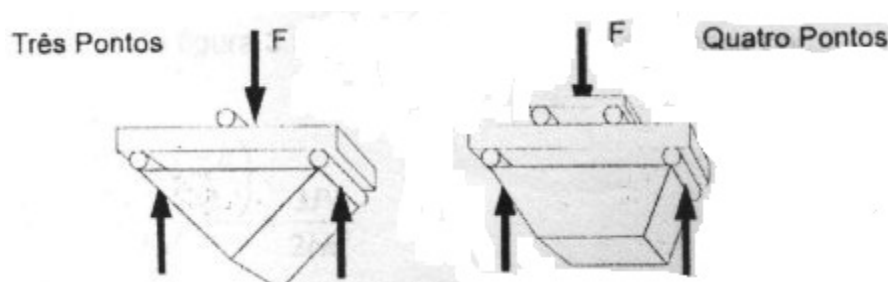
#### 2.1.1 – Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra geometricamente padronizada. A carga aplicada parte de um valor inicial igual a zero e aumenta, a uma determinada taxa de flexão, até a ruptura do corpo de prova. É um ensaio bastante aplicado em materiais frágeis como cerâmicos e metais duros, ferro fundido, aço ferramenta e aço rápido, pois fornece dados quantitativos da deformação desses materiais (FERRANTE, 1996).

Os principais tipos de ensaio de flexão são:

- **Ensaio de flexão em três pontos**

É utilizada uma barra bi apoiada com aplicação de carga no centro da distância entre os apoios, ou seja, existem três pontos de carga (Figura 1).



**Figura 1: Diagramas de ensaios de flexão de três e quatro pontos com as respectivas distribuições de forças e formas dos momentos fletores, (FERRANTE, 1996).**

A tensão nominal em um ensaio de flexão a três pontos, para qualquer ponto no corpo é dada por (TIMOSHENKO, et al., 1982):

$$\sigma_N = \frac{-My}{I_z} \quad \text{Equação 1}$$

onde M é o momento fletor, y a distância do ponto em estudo em um corpo à linha neutra e  $I_z$  o momento de inércia.

Para uma tensão de flexão exatamente no centro de uma barra prismática – ponto de aplicação da força F na Figura 1, para o caso de flexão em três pontos, temos:



$$\sigma_N = \frac{\left(\frac{-F}{2}\right) \cdot l \cdot \left(\frac{-h}{2}\right)}{\left(\frac{bh^3}{12}\right)} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad \text{Equação 2}$$

onde  $l$  é o afastamento entre os apoios da máquina universal de ensaios para o ensaio de 3 pontos e  $b$  e  $h$ , respectivamente, a largura e altura do CP.

Esta clássica fórmula não considera as tensões de contato, cisalhante transversal e de compressão. Considera somente os efeitos fletores sobre o estado geral de tensões (TIMOSHENKO, et al., 1982).

- **Ensaio de flexão em quatro pontos**

Consiste de uma barra bi-apoiada com aplicação de carga em dois pontos equidistante dos apoios (Figura 1), tem como objetivo gerar uma região trativa pura na zona estudada. Supõe-se nesse caso que a distribuição ideal de tensões é fora da região dos apoios, pois ali ocorre um estado complexo de tensões. Desenvolvendo a Equação 1 para a tensão no centro do paralelepípedo da Figura 1 para um ensaio de flexão em quatro pontos (TIMOSHENKO, et al., 1982):

$$\sigma_N = \frac{\left(\frac{-F}{2}\right) \cdot a \cdot \left(\frac{h}{2}\right)}{\left(\frac{bh^3}{12}\right)} = \frac{3Fa}{bh^2} \quad \text{Equação 3}$$

em que  $a$  é a distância entre os cutelos superior ( $l_1$ ) e inferior ( $l_2$ ),  $a = (l_1 - l_2)/2$ .

Este tipo de ensaio tem como principais resultados: módulo de ruptura na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade. Os resultados fornecidos podem variar com a temperatura, a velocidade de aplicação da carga, os defeitos superficiais e principalmente com a geometria da seção transversal da amostra (TIMOSHENKO, et al., 1982).

Apesar da existência de vários tipos de testes para determinação da resistência mecânica de materiais frágeis, o ensaio de flexão é o que se mostra de mais fácil execução para a avaliação da tensão máxima de ruptura. Possuindo grande praticidade na colocação da amostra na máquina e rapidez na execução dos ensaios (DUARTE, 2000).

Vale ressaltar que os esforços resultantes deste ensaio nas superfícies superior e inferior do corpo de prova são compressivos e trativos, respectivamente, resultando, numa situação ideal, na iniciação da fratura na parte inferior do corpo de

prova, uma vez que os materiais frágeis possuem maior resistência sob cargas compressivas do que sob cargas trativas (GARCIA, et al., 2000).

Segundo FERRANTE (1996), os ensaios a quatro pontos são mais adequados, porque no ensaio de três pontos a carga de tração máxima ocorre ao longo de uma linha na superfície inferior do corpo de prova, enquanto que para o ensaio a quatro pontos a carga máxima ocorre em um plano, o que faz com que a probabilidade de o defeito mais crítico do corpo de prova encontrar-se com a linha de tensão máxima seja pequena. Como consequência, o ensaio a quatro pontos fornece valores de tensão de ruptura menores que os obtidos com ensaios de três pontos.

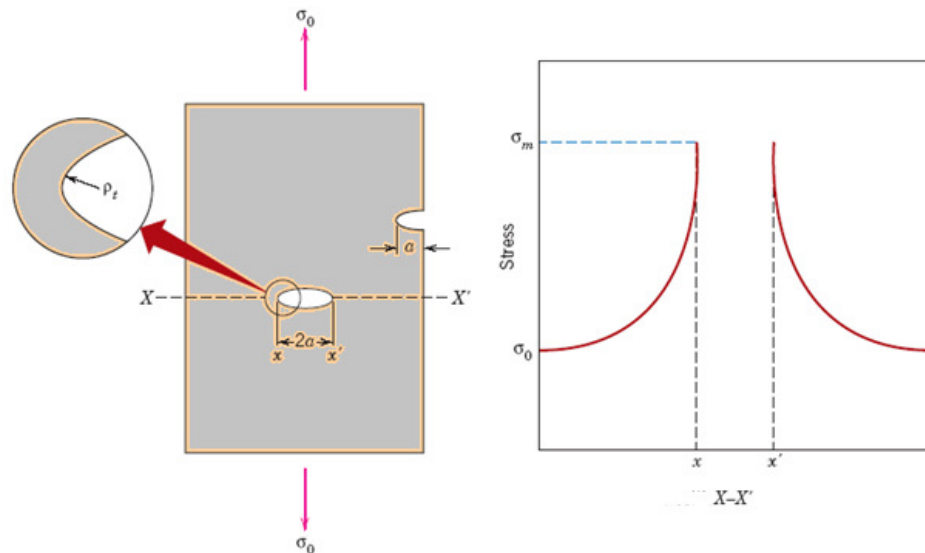
Cabe ressaltar ainda alguns dos fatores que influenciam na distribuição de tensões num corpo de prova submetido a ensaios de flexão, os principais deles são a curvatura do corpo de prova, o grau de paralelismo entre as faces do corpo, desalinhamento do carregamento sob o corpo e o fator de concentração de tensão –  $K_t$  (DUARTE, 2000).

Aos fatores que influenciam na distribuição de tensões dos corpos, tais como os relatados no parágrafo anterior, algumas vezes estão relacionados à tensões adicionais; podendo ser tensões de torção, tensões devido a curvatura do corpo de prova, tensões de contato, tensões cisalhantes transversais e cisalhantes de atrito, que são geralmente tensões de contato existentes em ensaios flexurais (DUARTE, 2000).

## **2.1.2 – Mecânica da Fratura**

### *2.1.2.1 – O Fator de Concentração de Tensões ( $K_t$ )*

É sabido que defeitos intrínsecos aos materiais são encontrados em sua estrutura microscópica, estes defeitos podem ser descontinuidades, vazios, entalhes, trincas, etc. Tais defeitos, que são dependentes da geometria e orientação da trinca, causam uma distorção no campo de tensões internas do material, geralmente elevando as tensões e causando uma redução da seção resistiva (Figura 2). Assim, a região do defeito recebe uma tensão maior que a encontrada no restante da estrutura, devido a este fato são chamadas concentradores de tensões. Por conseguinte, a resistência à fratura real de um corpo é geralmente menor que a obtida pelo cálculo energético teórico baseado nas ligações atômicas (CALLISTER, 2000).



**Figura 2: Distorção no campo de tensões internas de um corpo na presença de uma trinca em sua estrutura (CALLISTER, 2000).**

O fator de concentração de tensão  $K_t$  é definido, de forma geral, como a razão entre a tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) no corpo e uma tensão tomada como de referência, a tensão nominal ( $\sigma_{nom}$ ):

$$K_t = \frac{\sigma_{M\acute{a}x}}{\sigma_N} \quad \text{Equação 4}$$

Vale ressaltar que o índice “t” na equação anterior existe para lembrar que este é um fator teórico e que é calculado baseado na teoria da elasticidade ou na derivada vinda de uma análise de tensão experimental. Portanto, o fator de concentração de tensão pode ser obtido: analiticamente (teoria da elasticidade), numericamente (por exemplo, pelo método dos elementos finitos) ou experimentalmente (por fotoelasticidade ou ensaios mecânicos utilizando *Strain Gages – SG*), (ANDERSON, 2005).

Uma abordagem segundo o balanço de energia de *Griffith* para dimensionalização da extensão de uma trinca nos afirma que o seu crescimento, ou seja, o crescimento da fratura ocorre quando a energia disponível para o crescimento da trinca supera a resistência do material. A resistência do material pode ser uma energia de superfície, uma deformação plástica, ou outro tipo de energia de dissipação associada com a propagação de uma trinca. Neste contexto, um dos conceitos fundamentais de mecânica da fratura é que a tenacidade à fratura é independente do tamanho e geometria do corpo trincado (ANDERSON, 2005).

Uma chapa entalhada, ou com um defeito elíptico como uma trinca, por exemplo, possui variação nas linhas de força de tensão que cortam o material. Se o

defeito estiver orientado na direção das linhas de força as alterações no campo de tensões serão de menor expressão do que se essa trinca fosse ortogonal ao campo de tensões como a trinca de comprimento  $2a$  na Figura 2 (DAILLY et al., 1991).

CALLISTER (2000) cita que Inglis mostrou que a tensão nominal, aplicada a uma placa infinita contendo uma trinca passante de comprimento  $2a$  e considerando que o raio de curvatura na extremidade da elipse  $\rho$  seja muito menor que o tamanho da trinca, era aumentada nas extremidades do eixo maior da elipse de tal modo que a tensão máxima, na ponta do eixo maior da elipse, ficaria:

$$\sigma_{Máx} = 2\sigma_N \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \text{Equação 5}$$

Igualando a Equação 4 e a Equação 5, teríamos uma equação que descreve o efeito de geometria na ponta de uma trinca (CALLISTER, 2000):

$$K_t = 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \text{Equação 6}$$

São facilmente encontradas na literatura, informações na forma de gráficos, tabelas e expressões analíticas, para auxiliar a obtenção dos valores de  $K_t$  para diversas geometrias e carregamentos. Estas informações foram inicialmente reunidas por Peterson, que compilou resultados de diversos trabalhos, os quais empregaram fotoelasticidade bidimensional e tridimensional, soluções analíticas e soluções por diferenças finitas para a determinação de  $K_t$  (CARVALHO et al., 2009).

#### 2.1.2.2 – Fator de Intensidade de Tensões

A intensidade do campo linear elástico de tensões em torno da ponta de uma trinca (em modo I) é controlada pelo fator de intensidade de tensões  $K_I$ . Este fator, representado pela Equação 7, inclui todas as informações a respeito dos efeitos de carga e da geometria do corpo e da trinca. Ele depende da tensão aplicada ( $\sigma$ ), do tamanho da trinca ( $a$ ), e da geometria da peça e da trinca, representada através da função adimensional  $f(a/w)$ , que quantifica todo efeito de geometria do corpo e da trinca no campo de tensões, onde  $w$  é uma dimensão característica da peça ou corpo (largura, por exemplo), (CASTRO, et al., 2009).

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad \text{Equação 7}$$

O subíndice I faz referência ao modo de propagação da trinca, portanto, também pode ser I, II ou III. Cada modo de carregamento produz  $1/\sqrt{r}$  excentricidades na ponta da trinca, mas a constante de proporcionalidade K, que indica a diferença entre um componente trincado e outro e serve para definir um fator de escala para a magnitude do campo de tensões, depende do modo de propagação da trinca (ANDERSON, 2005).

Para um modo de propagação misto, as contribuições dos componentes de tensão são aditivas (ANDERSON, 2005):

$$\sigma_{ij}^{total} = \sigma_{ij}^I + \sigma_{ij}^{II} + \sigma_{ij}^{III} \quad \text{Equação 8}$$

ANDERSON (2005), traz maiores detalhes sobre os modos de propagação das trincas e as equações que as descrevem.

A fratura ocorre quando a intensidade da tensão crítica,  $K_{IC}$ , se igual a  $K_I$ . Nesse caso,  $K_I$  é a força motriz para a fratura e  $K_{IC}$  a medida da resistência do material (ANDERSON, 2005).

Comparativamente, podemos perceber que o fator de intensidade de tensões  $K_I$  incorpora mais informações que o fator de concentração de tensões  $K_t$ . Se  $K_I$  é conhecido, podemos determinar o máximo fator de intensidade de tensões que causaria falha,  $K_{IC}$ , geralmente descrito na literatura como a tenacidade à fratura do material.

### 2.1.2.3– Tenacidade à Fratura

A tenacidade quantifica a resistência do material à propagação de uma trinca. A fratura, causada pela propagação brusca de uma trinca é geralmente o mecanismo de falha predominante nos materiais frágeis. A fratura pode ocorrer sob um campo de tensões quase elástico nos materiais mais frágeis, ou pode estar associada à plasticidade nos materiais dúcteis (CASTRO et al., 2009).

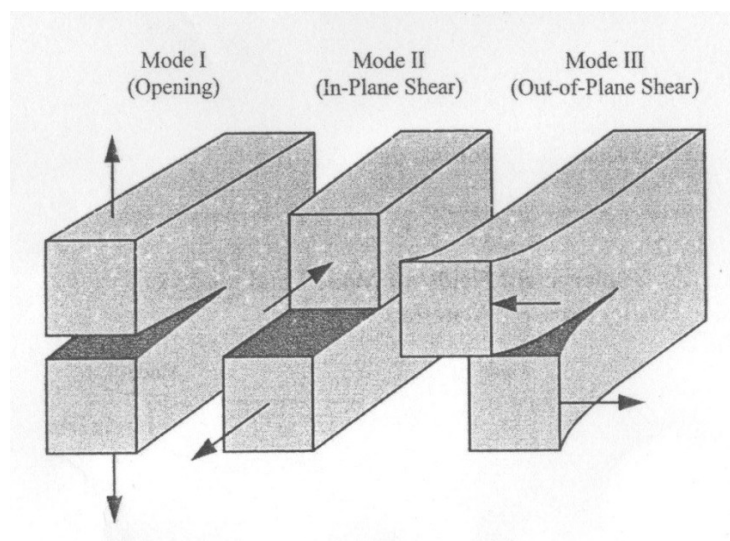
Rigorosamente, a tenacidade pode ser definida como a medida da capacidade de um material absorver energia até que frature. Em certos casos, ela pode ser entendida como uma propriedade que indica a resistência do material à fratura quando uma trinca se faz presente (CALLISTER, 2000).

As trincas são modeladas como entalhes afiados fazendo o raio da ponta tender a zero, logo, não são tratadas por técnicas tradicionais de análises de tensões que preveriam uma tensão tendendo ao infinito nas pontas (CASTRO et al., 2009).

#### 2.1.2.4 – Tensões nas Trincas e Entalhes

Há três modos de carregar as trincas, a depender do tipo de carregamento que deslocam a superfície da trinca de diferentes maneiras (Figura 3), chamados de:

- Modo I: carga normal ao plano da trinca. É o mais encontrado uma vez que ela não dissipa energia por esse modo. Possui melhor desenvolvimento por métodos analíticos e experimentais que os demais modos.
- Modo II: carga de corte por cisalhamento perpendicular à ponta da trinca;
- Modo III: carga de torção ou de cisalhamento paralelo à ponta da trinca.



**Figura 3: Os três modos de propagação das trincas de acordo com o carregamento aplicado (ANDERSON, 2005).**

## 2.2 – Propriedades dos Materiais Frágeis Utilizados

### 2.2.1 – Granito

O granito é uma rocha ígnea intrusiva - resultante da solidificação do magma a grandes profundidades da crosta terrestre. Possui como principais constituintes o quartzo, feldspatos (em várias formas – ortoclase, sanidina e microlina) e micas (como biotita e muscovita). Em sua microestrutura granular os minerais apresentam-se facilmente identificáveis devido ao retardamento de sua solidificação em processos em que a troca rápida de calor entre o magma e o ambiente é dificultada pela camada de rochas já solidificadas que o envolvem. Este processo dá aos

minerais tempo hábil para difundir na estrutura ainda liquefeita da rocha que após solidificação é chamada granito (TEIXEIRA et al., 2003).

Macroscopicamente, o quartzo é reconhecido como o mineral incolor ou fumê, geralmente translúcido, muito comum nos granitos, podendo-se também encontrá-lo na cor azulada em rochas específicas. Os feldspatos (microclínio, ortoclásio e plagioclásios), são os principais balizadores do padrão cromático das rochas silicáticas, conferindo as colorações avermelhada, rosada e creme-acinzentada nos granitos homogêneos (isótopos) e orientados/movimentados (anisótopos). A cor negra variavelmente impregnada na matriz das rochas silicáticas, é conferida pelos minerais máficos (silicatos ferro-magnesianos), sobretudo anfibólio (hornblenda) e mica (biotita). Nos granitos mais leucocráticos (claros), portanto com menor quantidade de minerais ferro-magnesianos, o quartzo e o feldspato compõem normalmente entre 85% e 95% da rocha (TEIXEIRA et al., 2003; ABIROCHAS, 2013).

Assim, as propriedades físicas dos granitos variam intensamente de acordo com o teor de cada um dos minerais descritos acima, por isso, são muitas as variedades de granitos reconhecidas. Na Tabela 1 observa-se características físicas e mineralógicas comuns a um granito cinza andorinha, sendo o exemplo em questão de um exemplar cuja procedência é de Majé-RJ, fornecido pela marmoraria Silva Areal Mármore e Granitos Ltda (DRM-RJ, 2003).

Não foram encontrados dados confiáveis na literatura sobre as propriedades físicas e composição mineralógica especificamente do granito marrom absoluto, ou granito chocolate como aqui denominado.

**Tabela 1: Características físicas e mineralógicas do granito cinza andorinha (DRM-RJ, 2003).**

<b>Classificação Petrográfica</b>	Biotita Granito
<b>Composição Mineralógica</b>	
Plagioclásio	25%
Microclina	25-30%
Quartzo	20%
Biotita	15-20%
Opacos	5%
Titanita	<5%
Minerais acessórios (muscovita, allanita, apatita, Clorita, hidróxido de ferro, sericita)	< 5%
<b>Características Tecnológicas</b>	
Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	2,693
Porosidade Aparente (%)	0,71
Absorção de Água (%)	0,27
Compressão Uniaxial (MPa)	145,2
Desgaste Amsler (mm/1000m)	0,94
Dilatação Térmica Linear (10 <sup>3</sup> /m °C)	10,1
Flexão em 4 Pontos (MPa)	21,73
Impacto de Corpo Duro (m)	0,60

### 2.2.2 – Geopolímeros

MAURI, (2008), *apud* SILVA (2011), menciona que a primeira utilização do termo “geopolímero” foi cunhada por Davidovits em 1979 em patentes usadas para descrever uma família de aglomerantes minerais que consistem de um polímero de Si-O-Al, semelhante às encontradas nas zeólitas artificiais. Apesar de ser considerado um material relativamente novo, o geopolímero é considerado passar por um tipo de álcali-ativação, havendo relatos de sua utilização desde a antiguidade

Trata-se de um processo químico que leva determinados materiais, que podem ser parcial ou totalmente amorfos, a se transformarem em estruturas cimentícias compactas. O processo é composto por três estágios: dissolução de espécies solúveis na fase alcalina; reorganização e difusão de íons dissolvidos com

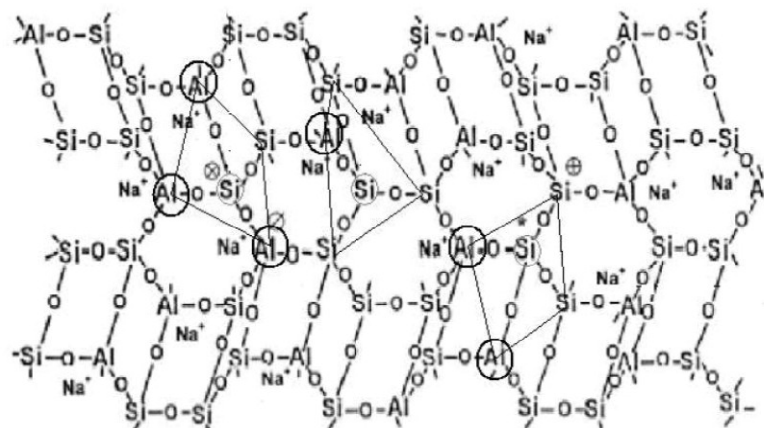


a formação de pequenas estruturas coaguladas; e crescimento e condensação dessas estruturas para a formação dos produtos.

Assim, os geopolímeros são também conhecidos como aglomerantes aluminossilicatos álcali-ativados. Diferem substancialmente de cimentos pozolânicos convencionais, porque os geopolímeros usam um caminho de reação totalmente diferente para atingir a integridade estrutural já que cimentos pozolânicos geralmente dependem da presença de cálcio e geopolímeros não apresentam a formação de hidratos, tais como C-S-H, para formação da matriz e obtenção de resistência. Na verdade, os geopolímeros utilizam a policondensação da sílica, precursores de alumina e certa quantidade de álcalis para atingir resistência mecânica (SILVA, 2011).

A estrutura química do polímero inorgânico à base de sílico-aluminato conhecido como geopolímero, é formado por uma estrutura com razão Si/Al  $\geq 2$ , e consiste de unidades funcionais compostas por tetraedros de  $\text{SiQ}_4(\text{xAl})$  apresentando estrutura amorfa a semicristalina, conforme mostra a Figura 4.

O processo de geopolimerização envolve reações químicas dos minerais Si/Al em condições altamente alcalinas que produzem a ligação polimérica Si-O-Al-O, como mostra a fórmula  $\text{M}_n[-(\text{Si-O}_2)_z\text{-Al-O}]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ ; onde, "M" é o elemento alcalino ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ); em que o símbolo "-" indica a presença de uma ligação; "z" é igual a 1, 2 ou 3; "n" é o grau de polimerização e "w" possui um valor próximo de 7. Quando "z" é igual a 2, o polissialato é chamado de polisiloxossilato ou PSS (SILVA, 2011).



**Figura 4: Estrutura química dos geopolímeros (BARBOSA, 1999, *apud* SILVA, 2011).**

O geopolímero polissialato apresenta propriedades similares a alguns materiais sólidos naturais, como, por exemplo, rigidez, resistência mecânica, inércia química e estabilidade. MAURI (2008) e BALAGURU *et al.* (1997), citados por SILVA (2011), apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas conhecidas para os geopolímeros, entre elas:

- Podem ser obtidos geopolímeros com resistência à compressão com valores de até 150 MPa e valores de resistência à tração de até 16 MPa;
- Apresentam resistência à temperaturas de até 1000 °C, à ataques ácidos e boa resistência a sulfatos;
- Apresentam baixa reação álcali-agregado;
- Permitem confinar metais pesados como o ferro, chumbo, níquel, cobre, tungstênio, cádmio e ainda rádio-nuclídeos.
- Compatibilidade com o elemento de reforço em estruturas de concreto armado com excelente aderência à superfície do concreto. Além de características de resistência ao fogo, à degradação sob a ação de raios UV e compatibilidade química com o concreto.

DAVIDOVITS (1988), *apud* SILVA (2011), ainda menciona que os geopolímeros podem ser aplicados nos campos da indústria automotiva, aeroespacial, na metalurgia, na engenharia civil, nas indústrias plásticas ou mesmo na arte; sendo que esta aplicação depende das composições molares entre os elementos envolvidos.

### **2.3 – Aplicação do Método dos Elementos Finitos**

O cálculo exato dos concentradores de tensão não é uma tarefa tão trivial devido à complexidade das soluções analíticas envolvidas (as poucas soluções analíticas encontradas possuem o nome de seus descobridores). Mas por possuírem soluções lineares elásticas, resultam em soluções únicas – dantes somente solucionadas por fotoelasticidade e ensaios extensométricos, mas que atualmente passaram a ter soluções numéricas importantes devido à facilidade do cálculo através de computadores, principalmente pelos métodos dos elementos finitos – MEF.

O MEF é uma técnica de análise que calcula todo o campo de deslocamentos, deformações e tensões nas estruturas, que são subdivididas em uma malha em pequenas partes (ou elementos finitos), que devem se manter

compatíveis após a aplicação do carregamento. Neste método, a malha na região da raiz do entalhe deve ser bem refinada em relação ao seu raio  $\rho$ . Os cálculos pelo MEF não substituem os métodos tradicionais locais de análise, pois não é necessário nem recomendável recalcular todo o campo de tensões em toda peça a cada evento de um carregamento de fadiga complexo (CASTRO, et al., 2009).

Devido a este trabalho apenas fazer uso de técnicas reconhecidas na comunidade científica, já explanadas por outros pesquisadores, não foram tratadas aqui. Detalhes teóricos sobre o MEF são vastos e facilmente encontrados na literatura e sua explanação foge ao escopo do presente trabalho.

## **2.4 – A Teoria da Distância Crítica**

### **2.4.1 – Um Histórico da Aplicação da TDC**

O princípio da utilização da TDC remete-se à década de 1950. Quando foi inicialmente proposto, não era possível obter precisão nos componentes dos campos de tensão, então seu uso industrial na previsão da fadiga de metais, requereu que ele fosse simplificado e apresentado como equações empíricas. Logo em seguida, variantes da TDC foram utilizados por projetistas de ferramentas e equipamentos, mas isso não foi adiante dado que usando o método dos elementos finitos – MEF poderia se obter uma maior acurácia do quadro de tensões nos corpos. Nos anos 1970, quando os métodos da TDC foram propostos para prever fratura em compósitos de fibra, foi possível correlacioná-los teoricamente à teoria da mecânica da fratura linear elástica – MFLE, o que permitiu que  $L$ , o parâmetro de comprimento material, chave para aplicação da TDC, fosse definido por meio do uso da Equação 10. Atualmente a TDC vem sendo usada no projeto e reparo de diversos componentes frágeis e é incluída frequentemente em modelos de fraturas mecânicas mais complexas (TAYLOR, 2007).

Taylor, desenvolvedor das principais técnicas da TDC atuais, descobriu que este método apresentava bons resultados para prever efeitos de entalhes de materiais metálicos sobre fadiga. A mesma abordagem já era usada por mais de 50 anos, tendo sido primeiramente proposta por NEUBER (1958) e PETERSON (1959). Outras pesquisas revelaram suaves modificações da teoria, aplicadas na predição de fraturas de materiais frágeis, compósitos e polímeros (TAYLOR, 2007).

TAYLOR (2004) menciona que a TDC proposta originalmente por NEUBER (1958), era tratada como um melhoramento no conceito de análise de tensões. Ele

afirmou que uma tensão elástica próxima a um entalhe singular não aumenta até os altos valores preditos pela teoria do contínuo porque a tensão tornava-se média para materiais tais que ele chamava cristais e partículas estruturais, isso pode ser interpretado como um efeito de características microestruturais como grãos, precipitados, etc. Ele propôs também que derivações matemáticas de valores de tensão em áreas de alto gradiente de tensão deveriam ser conduzidos usando volumes finitos (i. e. os volumes dos cristais) ao invés de volumes infinitesimais como é uma prática normal em mecânica da fratura. Há de se lembrar que naquele tempo era difícil fazer isso matematicamente, mas hoje é muito mais fácil, graças ao uso do MEF, que podem prover informação detalhada sobre tensões locais próximas às características de projeto ou de defeitos do corpo.

Segundo TAYLOR (2004), NEUBER (1958) em seu artigo "*Theory of Notch Stresses*" teria desenvolvido sua abordagem como um método para prever o limite de altos ciclos de fadiga de corpos entalhados, propondo que o limite de fadiga seria alcançado quando a tensão média sobre o tamanho do cristal é igual ao limite de fadiga do corpo plano (i. e. não entalhado) do mesmo material. Para simplificar a análise matemática ele usou a tensão média sobre uma linha se estendendo para fora da raiz do entalhe: chamado de método da linha – ML. Peterson em seu livro "*Notch Sensitivity*" (1959, New York, McGraw Hill), simplificou esta análise mostrando que a predição podia ser feita usando a tensão em um único ponto, localizado a uma distância crítica  $r_c$  do entalhe, depois conhecido como método do ponto – MP. Dois outros métodos são ainda possíveis, usando tensões médias sobre uma área ou volume local, respectivamente. O princípio é o mesmo em todos os casos: o efeito do gradiente de tensão é levado em consideração usando a tensão medida (ou média) em alguma distância crítica, que é uma propriedade do material.

Esses métodos têm sido aplicados na indústria na forma de fatores de correção empíricos, ou seja, como fatores de redução de resistência à fadiga  $K_t$  e do índice de sensibilidade do entalhe  $q$  – que são normalmente simplificadas usando as equações propostas por Neuber e Peterson que relacionam  $K_t$  e  $K_f$  como uma função da raiz do raio do entalhe e uma constante de comprimento do material. Resultados mais acurados podem ser obtidos utilizando o método de forma explícita em combinação com o MEF. Taylor, dentre outros pesquisadores, demonstraram isso para uma larga variedade de materiais e tipos de entalhes, para diversos casos de componentes de engenharia e para materiais como soldas (TAYLOR, 2004).

Considere o caso de uma trinca para a qual ocorre falha por fadiga se o *range* de intensidade de tensão  $\Delta K$  é maior que o limiar de fadiga do material  $\Delta K_{th}$ . Dado que a tensão crítica é um limite de fadiga de espécie plana do material,  $\Delta\sigma_0$ , pode ser mostrado que essa tensão ocorre em um ponto cuja distância da ponta da trinca é  $r_c$ , onde:

$$r_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_0} \right)^2 \quad \text{Equação 9}$$

Conclusivamente, o ressurgimento da aplicação da TDC deveu-se, portanto, ao aumento do uso da análise de estruturas trincadas e entalhadas pelo MEF. Isso ocorreu pelo fato de ambos possuírem boa adaptação e particularmente, da TDC ser fácil de ser utilizada em conjunto com o MEF, além de poderem ser testados contra uma vasta gama de problemas.

#### 2.4.2 – Fundamentos Teóricos

Concepções modernas da teoria da fratura geralmente aceitam uma escala de comprimento material – um parâmetro com dimensão de comprimento que é incorporado ao modelo teórico. Em outras aproximações, no entanto, como nos modelos de zonas de processo, um comprimento físico aparece implícito na teoria. Nas técnicas da TDC as escalas de comprimento são apresentadas explicitamente dentro dos modelos. Uma escala de comprimento comumente usado é  $L$ , dado por:

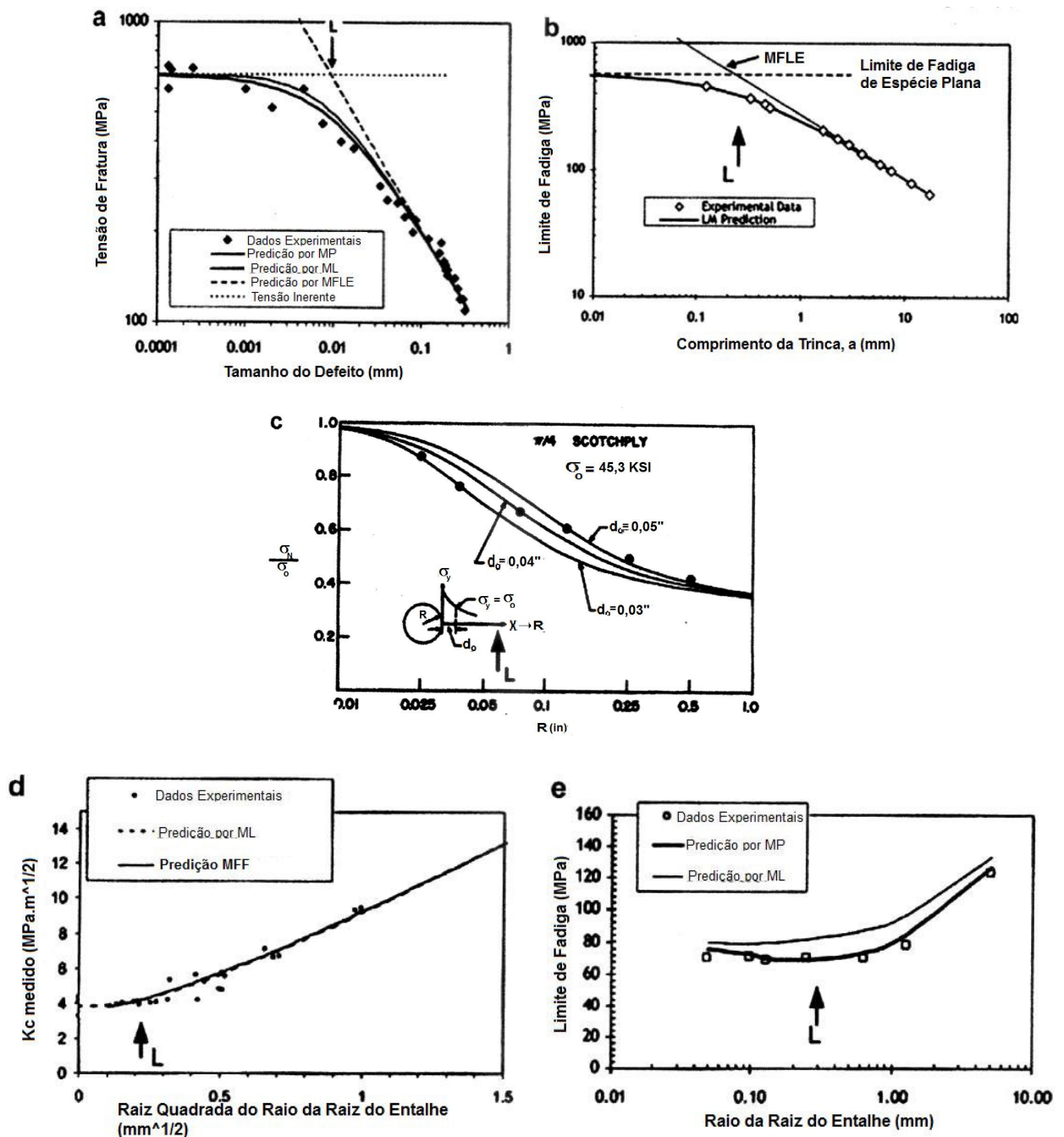
$$L = \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{K_C}{\sigma_0} \right)^2 \quad \text{Equação 10}$$

onde  $K_C$  é a tenacidade à fratura e  $\sigma_0$  a tensão característica da espécie plana. Para problemas de fadiga podemos utilizar a mesma equação trocando as constantes do material pelo limiar de propagação da trinca  $\Delta K_{th}$  e o limite à fadiga  $\Delta\sigma_0$ .  $K_C$  é normalmente medido sob condições de deformação plana, embora haja evidências que mostrem que a TDC possa ser aplicada em casos de geometrias de corpos com restrições reduzidas (TAYLOR, 2007).

O parâmetro físico  $L$ , também conhecido como  $a_0$  (parâmetro de ElHaddad), quando aplicado em corpos contendo trincas sobre ensaios de fadiga tem sido alvo de diversos debates sobre sua aplicação, principalmente, sobre o significado físico do mesmo (TAYLOR, 2004).

A Figura 5 mostra uma variedade de dados que evidenciam a relevância da constante de comprimento apresentada acima. Na Figura 5a observamos o efeito do comprimento da trinca submetida a uma tensão de fratura para um material cerâmico: grandes trincas assumem a forma de fraturas mecânicas lineares elásticas, mas para pequenas trincas os dados experimentais se afastam da linha de MFLE, tendendo à  $\sigma_0$ . O valor de  $L$  como definido anteriormente ocorre no meio desta região de transição.

Dessa maneira, TAYLOR (2007) afirma ser a teoria da MFLE aplicável se o comprimento da trinca é muito maior que  $L$ . Se a trinca é muito menor que  $L$ , esta não terá efeito algum sobre a resistência, ou tenacidade do material. O mesmo comportamento é observado para metais na Figura 5b. A Figura 5c mostra que efeitos de tamanho ocorrem não apenas para trincas, mas também em entalhes – neste caso furos circulares em material compósito de fibra. Furos muito pequenos não possuem efeito algum na tensão máxima de ruptura do material, ainda que furos muito grandes mostrem o efeito completo de seu fator  $K_t$ . Portanto, a transição de comportamento ocorre para furos de mesma ordem de magnitude de  $L$ . A Figura 5d mostra a tenacidade à fratura medida para um entalhe em U como uma função do raio da origem  $\rho$ , se  $\rho = 0$  temos uma trinca viva e se  $\rho$  assume valores grandes, o valor medido de  $K_c$  é o mesmo de uma trinca, mas a partir de um raio crítico este começa a aumentar. Este raio crítico é da mesma ordem de magnitude de  $L$ . Dados similares podem ser obtidos para o efeito de  $\rho$  sob limite de fadiga, como pode ser visto na Figura 5e.



**Figura 5: Resultados obtidos por TAYLOR (2007), de previsões usando a TDC em (a) fratura frágil em carbeto de silício, (b) fadiga de aço, (c) fratura de compósitos de fibra laminadas, (d) fratura de alumina, (e) fadiga de aço.**

Portanto, o uso prático da TDC carrega a necessidade de valores característicos de tensão,  $\sigma_0$ . Isso significa na prática a fabricação de corpos de teste com defeitos significativamente menores que L em tamanho, de modo que não afete a resistência à ruptura medida. Para tanto é preciso obter corpos com efeito de tamanho máximo de 1-10  $\mu\text{m}$ . No entanto, é possível deduzir  $\sigma_0$ , sem medi-lo diretamente. Já que se precisa de duas constantes do material ( $\sigma_0$ ,  $K_{IC}$  ou L), pode-

se encontrá-las em dados de teste usando duas espécimes diferentes: exemplo, uma espécime trincada e uma entalhada. Quanto mais diferentes as espécimes são em termos de comprimento de trinca, entalhe, raio da origem, etc. mais confiáveis serão os valores das constantes obtidas. Alternativamente, pode-se usar corpos planos contendo defeitos e identificar o tamanho dos defeitos que causaram fratura após o teste (TAYLOR, 2004).

A respeito das fraturas de corpos entalhados, a TDC torna-se importante em qualquer situação onde o raio da raiz do entalhe,  $\rho$ , é similar ao tamanho da distância crítica  $L$ . Se  $\rho \ll L$  então MFLE pode ser usada: o  $K_c$  medido será igual àquele para uma trinca viva. Se  $\rho \gg L$ , embora a TDC continue válida, o gradiente de tensão próximo ao entalhe será tão baixo que a tensão no ponto crítico ( $L$ ) será quase igual à tensão na raiz do entalhe, então é possível simplesmente usar o fator de concentração de tensão,  $K_t$ , para prever a tensão à fratura. Por exemplo, testando alumina com entalhes de raio da raiz de 0,5 mm ou maior, encontra-se que  $K_t$  poderia sempre ser usado satisfatoriamente. A vantagem do uso da TDC, no entanto, é que pode ser usada para todos os valores de  $\rho$ , incluindo a região de transição onde nem MFLE, nem  $K_t$ , é válido (TAYLOR, 2004).

TAYLOR (2004), cita outros modelos teóricos para comportamento de entalhes, incluindo aquele de TSUJI et al. (1999) e ANDO et al. (1992), que usaram um modelo baseado na estimativa do tamanho da zona de processo, que é a região à frente da trinca ou do entalhe em que acontece o dano ao material (o que é análogo à zona plástica em metais). Já USAMI et al. (1986) assumiram que a fratura era precedida pela formação de uma ou mais pequenas trincas, em seu modelo, a condição para fraturar torna-se a condição para a propagação da maior delas, que é calculada usando equações similares de MFLE. Outro método de previsão que tem sido proposto para pequenas trincas é uma modificação simples da equação básica de mecânica da fratura, aumentando a intensidade da tensão por adicionar um termo extra,  $a_0$ , ao comprimento da trinca ( $a$ ):

$$K = F\sigma(\pi[a+a_0])^{1/2} \quad \text{Equação 11}$$

sendo  $F$  a constante geométrica,  $a_0$  uma constante que se aproxima de zero, assim como o comprimento da trinca " $a$ ". A resistência predita se aproxima de uma constante que, se  $a_0$  corretamente escolhido, será igual à resistência à fratura da espécime plana,  $\sigma_0$ . *Apud* TAYLOR (2004) a mesma abordagem tem sido proposta para prever os limites de fadiga de trincas curtas por ELHADDAD et al. (1980) e



HOSHIDE e INOUE (1991), que têm tentado conectar o valor de  $a_0$  à profundidade de uma camada de superfície de um material mais fraco que a estrutura interna do material, e afetado pelas irregularidades de superfície do material. Eles argumentam que pequenas trincas desenvolvem nessa camada antes do final da fratura ocorrer.

Os modelos acima descritos são muito importantes para entender os processos de fratura, mas são de valores limitados quando vamos fazer previsões sobre o comportamento de componentes porque não podem ser verificados na prática. São feitas suposições sobre a existência de zonas de processo danificadas, camadas de superfície e microtrincas pré-existentes, e sobre o critério que conecta estas características ao final do processo de fratura. A propagação de trincas e a dureza são controlados por muitos fatores. Em TAYLOR (2004) lê-se que RITCHIE et. al. (1999), têm identificado uma variedade de mecanismos que afetam a tenacidade, dividindo as em dois tipos: mecanismos intrínsecos que atuam na frente da trinca (zonas de dano) e mecanismos extrínsecos que atuam atrás da ponta da trinca. Mecanismos extrínsecos parecem prover uma contribuição maior em cerâmicas e outros materiais sem plasticidade. É difícil identificar os mecanismos que influenciam em um material, e ainda mais difícil para quantificar suas contribuições.

Uma análise dos métodos de previsão discutidos até aqui mostra que na prática eles são muito similares ao método da TDC. O parâmetro de ElHaddad  $a_0$  tem o mesmo valor de  $L$  no caso de  $F = 1$ , quando os resultados da equação 11 podem ser calculados matematicamente tomando uma linha média de tensão sobre um comprimento  $2a_0$ . O método de USAMI et al. (1986) é baseado na tensão num ponto e o cálculo da zona de processo, no trabalho de TSUJI et al. (1999) é feito pelas tensões médias sobre a linha (TAYLOR, 2004).

Em uma tentativa de descrever o MP baseado na intensidade da tensão para prever a resistência estática de corpos frágeis sujeitos a um carregamento multiaxial, SUSMEL e TAYLOR (2007) checaram a validade experimental da teoria usando dados obtidos de um carregamento de modo misto I/II e de modo misto I/III. Seus resultados apresentaram-se bem sucedidos, dando estimativas de falha da ordem de +/- 20%, esta ordem de falha aconteceu independentemente do ângulo de abertura do entalhe, do raio da raiz aumentadora de tensão e da variabilidade de direções do campo de tensão danificando a zona de processo. (SUSMEL et al., 2007)

### 2.4.3 – Os Métodos Relacionados a TDC

Os métodos relatados em TAYLOR (2007) usam o parâmetro L em conjunção com uma análise linear elástica. Dois destes métodos são baseados em tensões e dois deles são baseados no fator de intensidade de tensões. As previsões feitas por estes métodos são muito similares, tanto que são considerados como diferentes manifestações da TDC.

- i. **O método do ponto – MP:** Nesse método uma análise da tensão elástica é conduzida e a falha é assumida ocorrer se a tensão é igual a  $\sigma_0$  a certa distância do entalhe,  $r_c$ . A mesma aproximação pode ser usada para prever a resistência à fadiga, substituindo a tensão cíclica apropriada. Alguns autores tem mostrado que  $r_c$  é igual a  $L/2$ , em problemas de fratura de cerâmicas, compósitos e fadiga de metais,  $\sigma_0 = \sigma_u$ , sendo  $\sigma_u$  a tensão última do material, geralmente calculada usando um corpo de espécie plana, sem trincas e com o mínimo de defeitos. Exemplos de aplicação do MP são mostrados na Figura 5.

Para o MP, TAYLOR (2007) mostrou que a resistência à fratura predita de espécimes trincadas,  $\sigma_{0c}$ , é:

$$\sigma_{0c}(r) = \frac{\sigma_0}{\left[1 - \left(\frac{a}{a + \frac{L}{2}}\right)^2\right]^{1/2}} \quad \text{Equação 12}$$

para espécies entalhadas, as tensões atuantes em torno de um buraco circular em uma placa infinita podem ser descritas, em coordenadas polares, com equações de tensão em função da distância R e  $\Theta$  da origem do entalhe (TAYLOR, 2004):

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma}{2} \cdot \left[1 + \left(\frac{P}{R}\right)^2 + \cos 2\Theta \left(1 + 3\left(\frac{P}{R}\right)^4\right)\right] \quad \text{Equação 13}$$

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{P}{R}\right)^2 - \cos 2\Theta \left(1 - 4\left(\frac{P}{R}\right)^2 + 3\left(\frac{P}{R}\right)^4\right)\right] \quad \text{Equação 14}$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\sigma}{2} \cdot \left[ 1 + 2\left(\frac{P}{R}\right)^2 - 3\left(\frac{P}{R}\right)^4 \right] \text{sen}2\Theta \quad \text{Equação 15}$$

que descrevem, respectivamente, as tensões tangencial, radial e cisalhantes. Assim, para corpos com esta geometria, MP é obtido fazendo  $\Theta = 0$  na equação 13:

$$\sigma_{on} = \frac{2\sigma_o}{2 + \left(\frac{P}{P + L/2}\right)^2 + 3\left(\frac{P}{P + L/2}\right)^4} \quad \text{Equação 16}$$

onde P é a profundidade do entalhe.

Susmel e Taylor provaram que uma abordagem multiaxial do MP, aplicado ao caso da predição da resistência estática de entalhes em componentes frágeis sujeitos a variados modos de carregamento, I/II ou I/III, é capaz de modelar satisfatoriamente o comportamento de trincamento do material, predizendo corretamente a orientação do plano de propagação da trinca sobre carregamento misto (SUSMEL, et al., 2007).

- ii. **O método da linha – ML:** Este foi o primeiro dos métodos da TDC a ser inventado. É similar ao método do ponto, exceto pela tensão que é determinada pela média ao longo de uma linha começando na origem do entalhe. O comprimento dessa linha é 2L. Como visto na Figura 5, o ML apresenta-se ligeiramente diferente do MP, mas ambos são geralmente capazes de predições razoáveis de dados experimentais (TAYLOR, 2007).

A distância crítica – DC, para o método da linha é  $4r_c$ . Esta análise dá bons resultados somente para trincas longas, mas comparações com dados experimentais mostraram que seu uso dá boas predições também para trincas curtas e para entalhes de vários tamanhos e formas em um vasto range de materiais. Isso é muito útil porque significa que a DC pode ser calculada a partir do conhecimento baseado no comportamento da propriedade de outros materiais e não precisa ser estimada de dados experimentais (TAYLOR, 2004).

O ML também é obtido da equação 13, fazendo  $\Theta = 0$ :

$$\sigma_{on} = \frac{2L\sigma_o}{2L + P - \left(\frac{0,5P^2}{P + 2L}\right) - \left(\frac{0,5P^4}{(P + 2L)^3}\right)} \quad \text{Equação 17}$$

A fim de ocorrer a falha, a tensão média deve exceder o limite à fadiga do material em algum volume crítico ao redor da tensão crítica. Por simplicidade de cálculo, essa abordagem é frequentemente reduzida a uma consideração da tensão em um único ponto, ou à média sobre uma distância ou área. Essas várias aproximações são referidas como métodos do ponto, linha, área e volume. Não confundir para o caso de um problema 2D, que o método da área seja equivalente ao método do volume (TAYLOR, 1999).

Portanto, há outros métodos similares envolvendo a aproximação da região em análise por uma área ou volume. Em trabalhos anteriores Taylor mostrou que esses quatro métodos dão resultados similares, mas que o MP é o mais fácil de usar e também dá predições mais acuradas, motivo pelo qual tem sido mais usado (TAYLOR, 2007).

Tentando prever este fenômeno, vários pesquisadores tem assumido que um aumento aparente na resistência para pequenos entalhes é devido ao fato de que a concentração de tensão ocorre sobre apenas um pequeno volume do material. Trabalhos a respeito têm sido revisado por SHEPPARD (1991) e por TAYLOR e O'DONNELL (1994), (TAYLOR, 1999).

- iii. **O método da trinca imaginária – MTI:** É uma aproximação de mecânica da fratura. Supõe-se existir uma trinca na origem do entalhe, a falha é dita ocorrer quando essa trinca alcança a intensidade de tensão crítica  $K_c$  (ou em fadiga,  $\Delta K_{th}$ ). O comprimento dessa trinca é igual a  $L$ , embora algumas correções quanto a forma da trinca possam ser necessárias. Esse método dá predições idênticas ao ML para o caso de uma trinca passante central em um corpo grande, e resultados bastante similares para problemas envolvendo outras geometrias de trincas ou entalhes (TAYLOR, 2007).
- iv. **Mecânicas da Fratura Finita – MFF:** Nesse método a condição para falha é obtida usando um balanço de energia similar àquele de Griffith, mas assumindo uma quantidade finita de extensão de trincas. O critério de falha neste caso é dado por:

$$\int_0^{2L} K^2 da = K_c^2 \cdot 2L \quad \text{Equação 18}$$

Resultando que o valor apropriado para a extensão da trinca é  $2L$ , apesar de correções quanto à forma da trinca poderem ser necessárias. Essa aproximação dá resultados idênticos ao ML para o caso de uma trinca viva e bastante similar para o caso de entalhes (Figura 5d). A Figura 5d mostra predições quase coincidentes para MFF e ML (TAYLOR, 2007).

Há algumas situações em que os métodos acima divergem. TAYLOR (2007) apresentou resultados em que mostra predições para a resistência à fratura de uma viga de concreto carregada em três pontos em flexão, como uma função do tamanho da viga. Os métodos ML e MFF tenderam a extremos opostos quando a altura da viga se aproxima de  $L$ , isso cria um problema para pequenos componentes, uma solução seria a aplicação de ambos os métodos simultaneamente, ML e MFF, resultando que  $L$  não seria mais uma constante. Com isso tem sido possível medir o efeito de tamanho em vigas de concreto entalhadas ou não – este é um resultado importante porque a resistência de pequenos corpos de teste de vigas de concreto diferem das de grandes estruturas.

#### 2.4.4 – Aplicações da TDC

Faz-se conveniente resumir agora alguns dos problemas que o método da TDC pode prever. TAYLOR (2007) faz uma análise interessante desses problemas:

- a. **Trincas curtas e pequenos defeitos.** Comparando a Figura 5a e a Figura 5b podemos perceber que as resistências à fratura como uma função do comprimento da trinca são bastante similares quanto à forma do gráfico para fratura em matérias frágeis como cerâmicas e para limite à fadiga de metais. Em ambos os casos, a MFLE falha para trincas de comprimentos curtos, fenômeno este muito importante no comportamento de materiais com pequenos defeitos, como defeitos de fabricação, e no número de ciclos necessários para pequenas trincas de fadiga crescerem.
- b. **Entalhes Singulares.** As Figuras 5d e 5e, ilustram o efeito do raio da raiz do entalhe, similares em forma, quando o interesse é a fadiga ou fratura frágil em metais, cerâmicas ou polímeros. A TDC é capaz de prever estes efeitos, incluindo a origem do raio crítico para comportamento parecido ao de trincas, que pode em certos materiais ter vários milímetros.

- c. **Entalhes não danificados.** Predição do comportamento de entalhes cegos, i.e. aqueles com baixos valores de fator de concentração de tensão  $K_t$ . Um efeito interessante ocorre em alguns materiais, em que a tensão crítica  $\sigma_o$  é maior que a tensão  $\sigma_u$  do corpo ou do limite à fadiga do espécime plano no caso de comportamento de fadiga. Consequentemente, há uma classe de entalhes, aqueles em que  $K_t < \sigma_o/\sigma_u$ , que não possuem efeito de enfraquecimento sobre o corpo, i.e., a introdução do entalhe não diminui a resistência do corpo (exceto quando o entalhe reduz a capacidade de carregamento da seção).
- d. **Efeitos de tamanho.** O comportamento anômalo de trincas curtas é um exemplo de efeitos de escala e tamanho. A Figura 5c apresenta outro exemplo, o efeito do raio do furo, é um fator importante apesar de todos eles terem o mesmo  $K_t$ . A TDC é capaz de prever este efeito que é similar tanto em fraturas monotônicas (como aqui demonstrado) quanto para fadiga de materiais metálicos. Outro exemplo de efeito de tamanho é a variação na resistência do corpo que ocorre quando o tamanho inteiro do corpo é mudado sem mudanças em sua forma. Tem sido demonstrado nos trabalhos de TAYLOR que a TDC pode ser útil nesses problemas, embora ele ressalte que complicações ocorrem quando o tamanho do corpo torna-se próximo à  $L$ , necessitando uma forma modificada de tratamento, em que  $L$  torna-se uma quantidade variável.
- e. **Componentes de Engenharia:** A TDC pode apresentar previsões acuradas do comportamento da concentração de tensões características que não são formas entalhadas padrões – por exemplo, o caso de uma quina viva em uma amostra de grafite nuclear. Um caso particular de aplicação desse estudo é o de um componente de suspensão de veículo para o qual a posição da falha por fadiga não foi a mesma que a posição da máxima tensão calculada, um efeito que a TDC consegue antecipar. A TDC também é aplicada em casos em que uma alta tensão local surge devido ao contato entre corpos, como fadiga por fricção e juntas pino-carregadas.

O comprimento característico  $L$  é calculado usando apenas propriedades macroscópicas dos materiais ( $\sigma_o$  e  $K_{IC}$ ). A esse respeito a abordagem é muito similar à MFLE e não depende do conhecimento do mecanismo da fratura. Uma

diferença entre os métodos está nas características do campo de tensão local que é usado como critério de falha. Os métodos da TDC são mais versáteis que os da MFLE, ainda que possam prever o comportamento de longas trincas com a mesma acurácia, além de também poderem prever o comportamento de trincas curtas e entalhes e outras concentrações de tensão. Em muitos casos é mais apropriado utilizar a TDC que a MFLE, mesmo em casos em que MFLE seja aplicável. Por exemplo, TDC pode ser mais facilmente incorporado ao MEF para prever fratura em componentes de geometria complexa onde o cálculo de  $K_t$  é difícil e inclina-se a erros (TAYLOR, 2004).

TAYLOR (1999) relata uma descoberta interessante sobre a TDC. Parece não haver nenhuma diferença fundamental entre o comportamento de trincas de concentrações de tensões mais suaves, como furos, e o comportamento de corpos planos não entalhados. O limite à fadiga ou resistência à fratura do material, de todas as três categorias de estruturas geométricas (liso, entalhado ou trincado) pode ser predito usando a mesma lei geral. Sugere-se, no entanto, que ao menos até que o limite à fadiga ou fratura seja alcançado, esses processos são indistinguíveis, tanto que a presença de uma trinca pré-existente não altera o mecanismo pelo qual a trinca prossegue até falhar.

## **2.5 – Strain Gages (SG) ou Extensômetro(s) de Resistência Elétrica (ERE)**

Dentre as ferramentas utilizadas para leitura da deformação laboratorial dos corpos – extensômetros, relógio comparador, detector eletrônico de deslocamento, fotoelasticidade – a ferramenta mais utilizada é o extensômetro por resistência elétrica, que vem sendo utilizado desde 1940 no campo de Análise Experimental de Tensões. O extensômetro é um dispositivo relativamente simples, que é aplicado à superfície do material. Geralmente é um resistor elétrico com uma fina camada de material condutor depositado sobre um composto isolante. O extensômetro é sensível às deformações resultantes das cargas impostas à estrutura, sendo possível estudá-las e medir o seu comportamento (HANNAH e REED, 1992; BRUSAMARELLO et al., 2004).

A precisão desejada nas medidas, o nível de proteção em relação ao ambiente e a credibilidade das medidas a médio e longo prazo são variáveis em

função do tipo e da geometria do extensômetro, além da forma com que é colado no corpo em ensaio (BRUSAMARELLO et al., 2004).

Alterações dos sinais dos valores de deformação podem acontecer devido a diferenças de tensão da rede elétrica, tendo uma maior influência nos sensores considerados de alta precisão, que devem possuir mínima susceptibilidade a variáveis externas que possam interferir no sinal captado. Os extensômetros podem ser divididos em quatro grupos principais (DALLY e RILEY, 2005):

- Mecânicos – as medidas de deformação são obtidas através da flexão de membros do extensômetro, que devem ser transformados em sinais digitais para posterior leitura;
- Ópticos – as medidas são baseadas em uma abertura padrão formada por pequenas barras coladas ao corpo de prova, por onde um feixe de laser passa, ou em entalhes em V na superfície do corpo de prova, onde os feixes rebatem. Ambos os métodos geram um difratograma padrão que serve de base para as demais medidas;
- Elétricos – existem três diferentes tipos: por capacitância, por indutância e por resistência, sendo o último o mais usado;
- Acústicos – as medidas são obtidas através de variações de frequência com um padrão.

Os ERE mais comuns e que serão os utilizados, são constituídos de uma resistência elétrica colada sensível à deformação e se baseiam na equação da resistência elétrica de um condutor que é dada pela seguinte expressão (DALLY e RILEY, 2005):

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad \text{Equação 19}$$

onde:

R é a resistência elétrica;

$\rho$  é a resistividade do material;

L é o comprimento do condutor;

A é a área da seção transversal;

que, após derivação e feitas algumas simplificações, chega-se à Equação 20::

$$S_a = \frac{dR/R}{\epsilon_x} = \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x} + (1 + 2\nu) \quad \text{Equação 20}$$



onde  $S_a$  é definido como a sensibilidade do metal ou liga usada no condutor,  $\epsilon_x$  a deformação do material ao longo de um dado eixo e  $\nu$  seu coeficiente de Poisson.

Pode-se perceber da equação 20 que a sensibilidade do metal ou liga à deformação é devido a mudanças nas dimensões do condutor, como expresso pelo

termo  $(1+2\nu)$  e a mudança na resistência específica representada pelo termo  $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x}$ .

Estudos experimentais mostram que a sensibilidade  $S_a$  varia de 2 a 4 para a maioria das ligas metálicas usadas na fabricação dos extensômetros elétricos. Devido ao termo  $(1+2\nu)$  ser aproximadamente 1,6 para a maioria desses materiais, a contribuição devido à mudança na resistência específica com a deformação varia de 0,4 a 2,4. Esse aumento é devido a variações no número de elétrons livres e a mudança de sua mobilidade com a deformação (DALLY e RILEY, 2005).

Um extensômetro elétrico apresenta uma mudança na resistência  $\frac{\Delta R}{R}$  que é relacionada à deformação longitudinal ao *grid* pela expressão (DALLY e RILEY, 2005):

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \epsilon_x \quad \text{Equação 21}$$

Onde  $S_g$  é a constante de calibração para o extensômetro, conhecida como fator de sensibilidade do extensômetro ou *Gage Factor*. A constante é sempre menor que a sensibilidade da liga metálica devido à configuração do *grid* em formato de fole ser menos sensível à deformação longitudinal do que aquele em linha reta (DALLY e RILEY, 2005).

Quando colados na superfície de estruturas de grande ou pequeno porte eles têm condições de mensurar finíssimas variações dimensionais que possam ocorrer; variações estas, conhecidas como deformações mecânicas. Determinando-se as deformações na estrutura, é possível estimar o grau de tensão a que ela foi submetida. Então, o conhecimento da amplitude da deformação é um fator de fundamental importância na determinação da força e preservação da segurança na execução de projetos científicos nas mais diferentes áreas do conhecimento (BECK e SILVA, 2008-b).

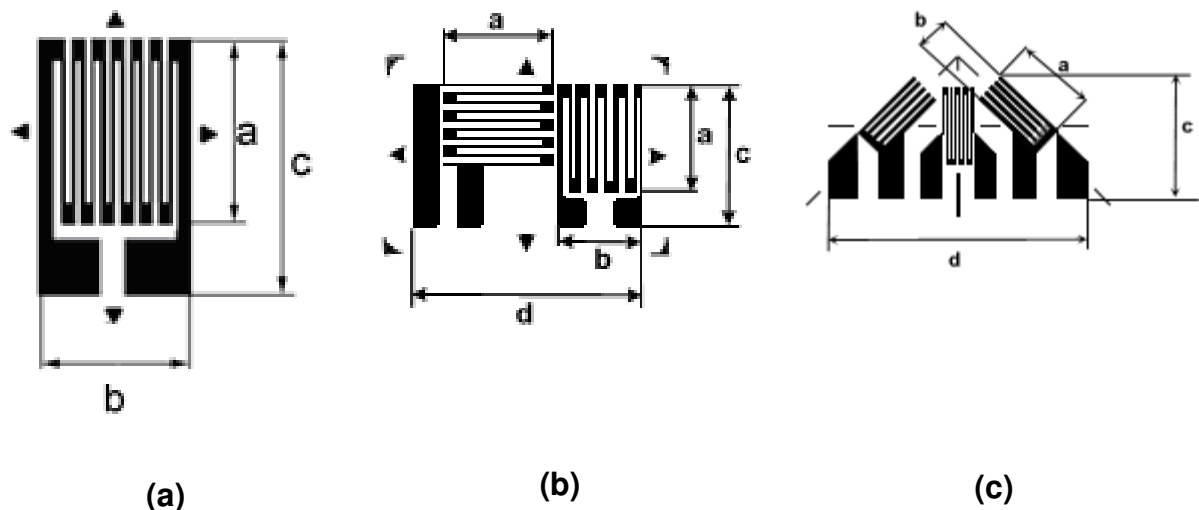
Em engenharia, os SG mais utilizados são os do tipo folha, os quais são encontrados em variadas dimensões, desde pequenos comprimentos tais como 0,2 mm, até grandes SG de 250 mm. As resistências elétricas típicas que tais SG

comerciais apresentam, possuem os seguintes valores:  $60\Omega$ ,  $120\Omega$ ,  $350\Omega$ ,  $500\Omega$  e  $1000\Omega$  (BECK e SILVA, 2008-b).

Uma das vantagens dos SG do tipo folha é sua pequena espessura. A espessura típica dos extensômetros comerciais do tipo folha é da ordem de 0,5 mm a depender da natureza do suporte e das características do encapsulamento. Outra vantagem é que os terminais de retorno dos fios constituintes dos grids podem ser espessados, reduzindo sua resistência e fazendo com que o grid seja menos sensível às deformações transversais (BECK e SILVA, 2008-b).

Também de grande importância é a porção eletricamente inativa e espessa, melhorando a área para colagem e aliviando tensões nos terminais do grid. O resultado disso é que grids de pequeno comprimento podem ser produzidos no formato de folha sem a perda da transmissão de deformação que ocorreria em grids de fios de mesmo comprimento, permitindo, ainda, maior intimidade de contato com a base (BECK e SILVA, 2008-b).

Exemplos de extensômetros podem ser vistos na Figura 6. Na Figura 6a, “a” e “b” são, respectivamente, o comprimento e largura do *grid* do extensômetro e “c” o comprimento do extensômetro. Nas Figuras 6b e 6c, “a” e “b” são o comprimento e a largura dos grids do extensômetro, e “c” e “d”, o comprimento e a largura do extensômetro, respectivamente.



**Figura 6: Alguns tipos de extensômetros: (a) uniaxial, (b) roseta dupla a  $90^\circ$  e (c) roseta tripla a  $90^\circ$  (<http://www.excelsensor.com.br>, em 02/12/2011).**

Para constituírem um extensômetro de resistência elétrica, os materiais devem apresentar um conjunto de características essenciais, tais como (BECK e SILVA, 2008-a):

- Alta sensibilidade à deformação;
- Alta resistividade elétrica;
- Baixa sensibilidade com variação de temperatura;
- Alta tensão de escoamento;
- Facilidade de manuseio;
- Boa resistência mecânica;
- Alta tenacidade;
- Boa soldabilidade;
- Baixa histerese;
- Boa resistência à corrosão;
- Baixa força eletromotriz térmica quando unido a outros materiais;
- Manutenção das características anteriores em ampla faixa de temperaturas.

DIAS (2004) dá diversas classificações para os ERE, que podem ser classificados, dentre outros aspectos, quanto:

- Ao Material de Base;
- Ao Material Resistivo;
- À Configuração.

Quanto ao material de base, os ERE podem ser de:

- Papel;
- Poliéster;
- Resina epóxi-fenólica.

Quanto ao material resistivo, podem ser metálicos ou semicondutores.

Já quanto à configuração, se apresentam como:

- Uniaxial;
- Biaxial;
- Múltiplos Eixos;
- Padronização Especial.

## ***CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS***

### **3.1 – Materiais e Equipamentos**

#### **3.1.1 – Granitos**

Foram utilizados dois tipos de granito, conhecidos comercialmente como granito cinza andorinha e granito marrom absoluto, este, doravante denominado granito chocolate. Assim escolhidos por apresentarem uma grande quantidade de defeitos intrínsecos à sua constituição, sendo normalmente os do granito andorinha de maiores dimensões que os do granito chocolate, o que poder-se-á ser visto nos resultados apresentados neste trabalho.

O granito andorinha utilizado foi comprado já nas dimensões desejadas (30 mm x 20 mm x 150 mm) na Marmoraria Campista em Campos – RJ. Trata-se de um tipo de granito comum do sudeste do Brasil, cujas jazidas abundam entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. O granito chocolate tem sua origem nas jazidas do estado do Espírito Santo e foi adquirido na mesma marmoraria, com as mesmas dimensões aproximadas, 30 mm x 20 mm x 150 mm.

As rochas saem das pedreiras em forma de placas retangulares de 3 – 5 cm de espessura e, ao chegarem às marmorarias, recebem o polimento em uma das faces e o corte desejado. Para este trabalho, tais placas foram cortadas em barras ainda na marmoraria, em formato de paralelepípedo, medindo cerca de 30 mm x 20 mm x 150 mm.

#### **3.1.2 – Geopolímeros<sup>1</sup>**

Baseado nos resultados encontrados por SILVA (2011), corpos com a proporção de 1:5 entre massa de agregado miúdo e massa total de sólidos foram preparados visando apresentar a menor quantidade de poros e a mínima quantidade de fissuras possíveis; o tempo de endurecimento deveria ser longo o bastante para que o geopolímero fosse adequadamente aplicado aos moldes fabricados, mas não tão longo para que ele permanecesse fluido por muito tempo após a aplicação.

O geopolímero possui dois componentes principais; um precursor (metacaulim), fonte de sílica e alumina, que forma a rede polimérica, e um ativador

---

<sup>1</sup> Excetuando as etapas de peneiramento e lavagem da areia e preparação dos moldes, os procedimentos que envolvem a fabricação do Geopolímero não foram realizadas diretamente pelo autor do presente estudo por tratar-se de trabalho desenvolvido por SILVA (2011). Assim, somente foram citados os materiais e equipamentos utilizados diretamente pelo autor.

alcalino (silicato de sódio –  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  e hidróxido de potássio –  $\text{KOH}$ ), que promovem a formação da rede. Dois tipos diferentes de silicato de sódio foram utilizados, um deles na forma de pó, de grau PA, e o segundo na forma de solução aquosa, com 52% de água, de grau técnico.

Outros componentes, considerados acessórios, foram adicionados: areia, como carga, água, e cimento Portland que é usado como fonte de  $\text{Ca}^{2+}$ . Embora não tenha sido utilizada aqui, ainda é possível fazer uso de wollastonita na composição, uma fibra mineral de metassilicato de cálcio fibroso, capaz de diminuir a retração do geopolímero (SILVA, 2011).

O cimento empregado para a fabricação da resina geopolimérica foi do tipo CPII E-32 (composto com escória granulada de alto forno).

O agregado miúdo utilizado foi a areia quartzosa, lavada e proveniente do rio Paraíba do Sul. Ela foi aquecida e seca em estufa durante um período de 24 horas, a uma temperatura de  $110\text{ }^\circ\text{C}$  e, em seguida, peneirada em peneira de 20 mesh.

A água para o preparo da resina geopolimérica foi proveniente da rede de abastecimento da UENF.

Assim, o material pôde então ser fabricado com base nos passos de SILVA (2011), que segue a preparação conforme os passos da NBR 7215 (1996):

- Introdução do metacaulim + cimento Portland;
- Introdução dos ingredientes ativadores e mistura durante 3 minutos;
- Introdução de 50% da areia e mistura por mais 3 minutos;
- Introdução do restante da areia e mistura por 3 minutos;
- Parada para raspagem, com o auxílio de uma espátula, da resina geopolimérica aderida às paredes;

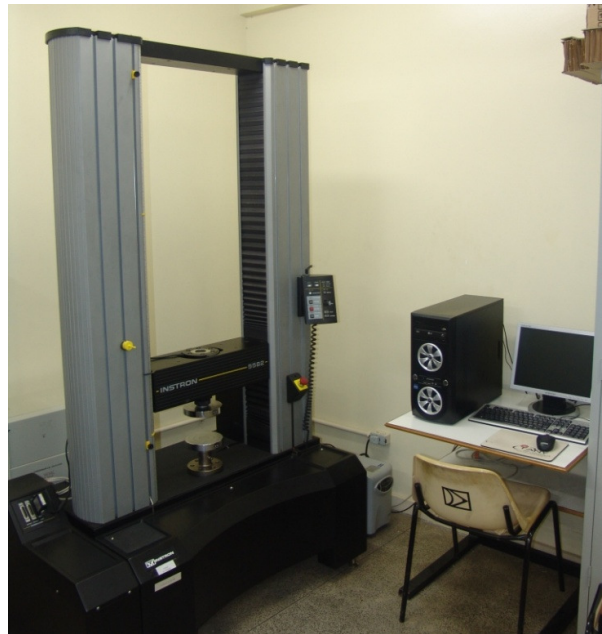
Feita a argamassa, esta foi colocada nos moldes para secagem preliminar e após cerca de 24 horas os corpos já possuem consistência suficiente para serem retirados dos moldes para passar por uma etapa de cura à temperatura ambiente, que dura 28 dias, nesta etapa ganham mais resistência, durabilidade, e acabam por sofrer certa dilatação, um processo capaz de aumentar seu endurecimento e coesão com o tempo.

Após a cura, fraturas intrínsecas – algumas microscópicas outras vistas a olho nu, são formadas nos corpos de geopolímeros. Fazendo com que, assim como os granitos estudados, este material apresentasse como uma alternativa de baixo custo

para testar a aplicabilidade da TDC em materiais com limites extremos de quantidade e variedade de tamanhos de trincas e fraturas.

### 3.1.3 – Equipamentos e Materiais Utilizados

- Máquina Universal de Ensaios (Figura 7):
  - Marca: INSTRON;
  - Modelo: 5582;
  - Capacidade/célula de carga: +/-100 KN.



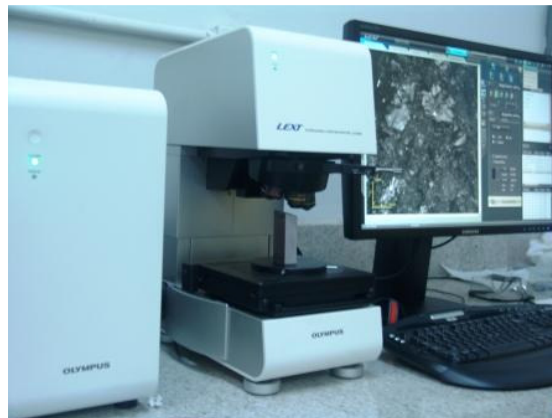
**Figura 7 Máquina universal de ensaios INSTRON.**

- Medidor de Perfis (Figura 8):
  - Marca: PANTEC;
  - Modelo: PJ 3150;
  - Precisão em x ou y:  $10^{-3}$ .



**Figura 8: Medidor de perfis PANTEC.**

- Microscópio Confocal a Laser (Figura 9)
  - Marca: Olympus;
  - Modelo: LEXT 3D MEASURING LASER MICROSCOPE OLS4000;



**Figura 9: Microscópio Confocal Olympus.**

- Extensômetros de Resistência Elétrica – ERE ou *Strain Gages* – SG
 

Neste trabalho foram utilizados SG coláveis do tipo folha, uniaxiais e de grandes dimensões, caracterizados por possuírem alto ganho para materiais frágeis e com aplicação para concreto, o que se faz necessário para se obter sinais confiáveis por se tratar de materiais que possuem baixo nível de deformação até a ruptura.

A codificação que descreve os tipos dos SG é descrita no exemplo abaixo:

PA – 06 – 120AA – 350 – SEN

PA: Campo que identifica os materiais constituintes da base do filme polimérico (PA – Poliamida com filme metálico de constantam);

06: Auto-compensação de temperatura em ppm/°F (06 – para o aço);

120AA: Comprimento ativo da grelha em 1/1000 de polegadas (125/1000 polegadas) e as duas letras que identificam a forma geométrica da grelha;

350: Resistência elétrica em Ohms;

SEN: Opcionais (B – ausência de opcionais, S – com pontos de solda nos terminais, L – com fios de cobre soldados nos terminais, EN – encapsulados, SEN – encapsulados com pontos de cobre e LEN – encapsulados com fios de cobre).

O fator de sensibilidade – FS (ou *Gage Factor* – *GF*) indica a relação entre a variação relativa da resistência elétrica e a variação de deformação do material constituinte do SG. O valor teórico normalmente é de 2,10. Este fator pode ser calculado teoricamente usando as equações obtidas por DALLY e RILEY (2005), e são dependentes das propriedades físicas dos constituintes do SG. O valor real apresenta pequenas variações em relação ao teórico, por isso o fator de sensibilidade é informado para cada lote produzido.

Estão descritos a seguir os SG utilizados.

- SG menor – Modelo Unidirecional Simples:
  - Marca: Excel Sensor Ind. & Com. Exp. LTDA;
  - Tipo: PA-06-250BA-120-L;
  - Lote: 990825;
  - *Gage Factor*: 2,11;
  - Dimensões (mm): a = 3,18, b = 3,18, c = 6,35, d = 3,18;
  - Utilizado no corpo liso 8 do granito chocolate, a título de verificar os dados obtidos em comparação com o SG maior.
- SG maior – Modelo Unidirecional para Concreto:
  - Marca: Excel Sensor Ind. & Com. Exp. LTDA;
  - Tipo: PA-06-1000BA-120-LEN;
  - Lote: 000508;
  - *Gage Factor*: 2,10;
  - Dimensões (mm): a = 35,4, b = 6,35, c = 31,8, d = 6,35;
  - Utilizado nos seguintes corpos de prova:
    - Granito andorinha: corpo liso 10, corpo entalhado em U profundo 12, corpo entalhado em arco de círculo menor 11 e corpo entalhado em arco de círculo maior 11;



- Granito chocolate: liso 4, entalhado em U profundo 20, corpo entalhado em arco de círculo menor 2 e corpo entalhado em arco de círculo maior 1;
  - Geopolímeros: corpos lisos 1 e 2, entalhado em U profundo 1, corpo entalhado em arco de círculo menor 1 e corpo entalhado em arco de círculo maior 3.
- 
- *Strain Gage Indicator and Recorder*
    - Marca: VISHAY Micro-measurements
    - Modelo: P3
  - Furadeira de mesa com morsa própria para fixação dos corpos de prova (Figura 10):
    - Marca: SCHULZ;
    - Modelo: FSB 5/8;
  - Brocas diamantadas
    - Marca: Braskosi
    - Broca maior: 1,574” de diâmetro;
    - Broca menor: 0,748” de diâmetro.



**Figura 10: Aparato utilizado no corte semicircular dos corpos de prova. À esquerda furadeira e broca de 1,574” após perfurar um dos corpos de granito e à direita detalhe do entalhe semicircular pronto.**



**Figura 11: Serra utilizada no corte dos corpos de prova em U profundo e suporte de madeira para fixar os corpos de prova.**

- Serra Makita (Figura 11):
  - Marca: DeWALT
  - Modelo: serra mármore DW861B.
  - Diâmetro do disco 4 3/8" (110 mm) Potência 1400 watts e 11.500 rpm
  - Suporte de madeira para fixação dos corpos de prova. Serve para ajudar a centralizar o corte e evitar que os corpos de rompam durante o processo.

- Mesa planificadora Mitutoyo (Figura 12):

Utilizada, em combinação com a análise das dimensões medidas em cada corpo, na verificação da existência de protuberâncias, de paralelismo e de simetria entre as faces dos corpos de prova para descarte de alguns corpos de prova e escolha dos melhores corpos a serem ensaiados com SG.

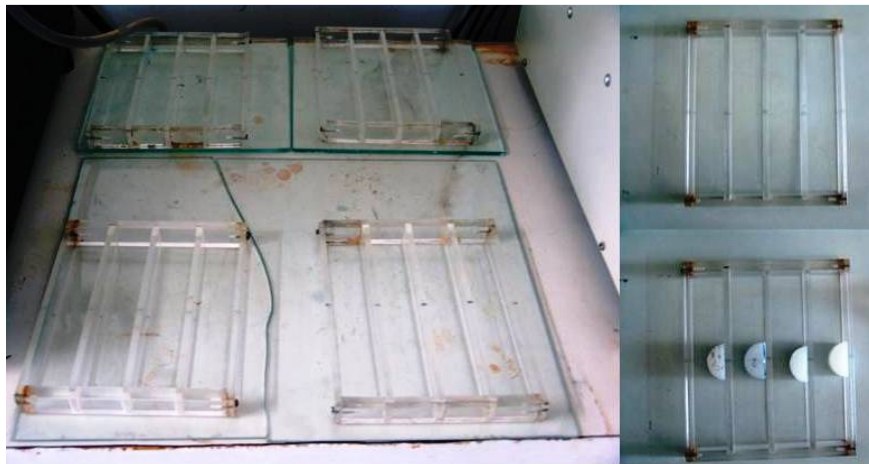


**Figura 12: Mesa Mitutoyo para verificação das imperfeições nas faces dos corpos de prova.**

- Moldes para conformação dos Geopolímeros (Figura 13):

Estes moldes foram projetados e confeccionados em acrílico, proveniente de placas de  $\pm 1$  cm de espessura, o qual foi apropriadamente cortado e colado (ou parafusado) nas quinas para apresentarem a forma e medidas necessárias de modo que os corpos de prova tivessem as mesmas dimensões dos corpos de granito quando secos.

Os entalhes em círculo dos corpos de geopolímeros foram feitos utilizando como molde dois bastões cilíndricos de silicone –  $\varnothing \pm 21$  mm e  $\varnothing \pm 30$  mm, os quais foram apropriadamente medidos e cortados para conferir os diâmetros desejados nos corpos de prova.



**Figura 13: Moldes de acrílico para a fabricação dos corpos de geopolímeros lisos (esquerda) e moldes de acrílico com o bastão de silicone cortado para a fabricação dos corpos de prova de geopolímeros em arco de círculo (direita).**

- Outros Materiais Utilizados (Figura 14):
  - Esquadro de metal Mitutoyo;
  - Paquímetro digital Mitutoyo (precisão  $\pm 0,01$  mm);
  - Lixas para metais;
  - Caneta marcadora;
  - Nível de bolha;
  - Fita adesiva transparente;
  - Cola tipo Loctite 496;
  - Fio de cobre encapado de 4 pontas de  $\pm 1,5$  m;
  - Multímetro digital DataLogger Modelo RS232;



**Figura 14: Materiais usados na preparação dos corpos de prova. Esquadro de metal, lixa, paquímetro, marcador e broca de Ø1,574”.**

## **3.2 – Métodos**

### **3.2.1 – Preparação dos Corpos de Prova**

Conforme descrição anterior, o granito foi comprado na forma de barras, apresentando bastante material particulado e algumas imperfeições superficiais. Este então foi lixado com o objetivo de retirar protuberâncias e desníveis (derivados da etapa de corte na marmoraria) e que poderiam prejudicar a fixação nos roletes da INSTRON durante os ensaios. Em seguida eles foram lavados e secos a temperatura ambiente<sup>2</sup>.

Os corpos constituídos de geopolímeros, após a etapa de cura, também apresentavam certas imperfeições nas faces, provenientes principalmente da formação de bolhas, de desníveis e/ou má conformação aos moldes; os quais foram tratados, quando não em excesso (o que provocava o descarte do corpo), com o lixamento dos corpos de prova.

Inicialmente foram 80 peças em formato de paralelepípedo, medindo aproximadamente 150 mm x 30 mm x 20 mm, para cada tipo de material (andorinha, chocolate e geopolímero), totalizando 240 peças. Sendo 20 corpos para cada tipo de geometria testada, ou seja, 20 lisos, 20 entalhados em U profundo, 20 entalhados em arco de círculo menor e 20 entalhados em arco de círculo maior, de cada material.

---

<sup>2</sup> A temperatura ambiente referida neste trabalho trata-se da temperatura no laboratório de ensaios mecânicos, ou seja, 20 °C.

Durante a feitura dos entalhes, vários corpos se quebraram e, devido a isto, optou-se por ir diminuindo as quantidades de corpos lisos ensaiados e transformá-los em entalhados. Isso se deve ao fato de os corpos lisos tenderem a apresentar maior confiabilidade nos resultados dos ensaios para pequenos números de amostras do que os que possuem algum tipo de entalhe.

Não obstante, após análise em mesa planificadora mitutoyo, constatou-se que alguns desses corpos apresentavam alto nível de assimetria e antiparalelismo entre as faces, o que fez com que fossem descartados para o ensaio. Essa etapa possibilitou também separar os melhores corpos para serem entalhados e para que fossem usados com o SG.

Em seguida, os corpos escolhidos foram entalhados em U profundo utilizando a serra da Figura 11 e em círculo menor e maior utilizando a furadeira com as brocas diamantadas da Figura 10. Ambos com baixas taxas de avanço para evitar o rompimento dos corpos e utilizando água como fluido refrigerante. Após o corte, alguns corpos apresentavam irregularidades quanto a profundidade e/ou protuberâncias na superfície do corte, o que foi sanado lixando a superfície com uma lixa para metais.

Após serem novamente limpos e secos, os corpos entalhados foram então medidos utilizando esquadro e paquímetro, assim como os corpos lisos. Em seguida, foram identificados e foram efetuadas marcas para localizar o seu centro, como descrito nas ilustrações do Apêndice A (Figura A.1, Figura A.2, Figura A.3 e Figura A.4). Também estão dispostos no Apêndice A as medidas dos corpos utilizados nos ensaios. Vale ressaltar que, para os casos dos corpos entalhados em U profundo, foi realizada ainda a etapa de medição do diâmetro do entalhe utilizando medidor de perfis, dos quais derivaram os raios identificados como  $\rho$  nas tabelas apresentadas no Apêndice A.

Todos os procedimentos de preparação dos corpos de prova descritos acima foram realizados nos laboratórios do LAMAV/UENF. Na Tabela 2 temos um resumo do número de CP ensaiados para cada material e geometria (lisos ou entalhados), após a preparação e escolha dos mesmos.

**Tabela 2: Resumo do número de CP ensaiados.**

Números de CP	Lisos	Entalhados		
		U Profundo	Arc. Círc. Menor	Arc. Círc. Maior
<b>CPGA</b>	10	12	11	11
<b>CPGC</b>	15	20	12	20
<b>CPGP</b>	20	20	19	20

### 3.2.2 – Preparação e Escolha dos Corpos para Ensaio com os SG

Os corpos que foram ensaiados com o uso de SG foram escolhidos com base na avaliação do paralelismo entre as faces e das medições realizadas. Prosseguiu-se então com a etapa de colagem dos mesmos. A forma de colagem dos SG foi baseada no padrão de DALLY e RILEY (2005), descrito como se segue: i) – lixamento da superfície de colagem; ii) – limpeza da superfície de colagem com álcool isopropílico; iii) prender uma fita adesiva transparente no SG; iv) desenhar eixos de referência na superfície do corpo de prova; v) posicionar e fixar o conjunto SG/fita adesiva sobre os eixos desenhados; vi) limpeza fina da superfície do corpo de prova com acetona para retirar gorduras residuais; vii) levantar a fita adesiva até a base do extensômetro e passar cola no mesmo; viii) fixar novamente no corpo de prova e pressionar por aproximadamente 30 segundos; ix) deixar secar por 24 h sobre leve compressão utilizando pregadores do tipo C-Clamps e uma borracha entre o SG e o C-Clamps para não afetar o CP; x) retirar a fita adesiva (Figura 15); xi) testar a resistência dos SG com um voltímetro para garantir que mantiveram suas características elétricas (Figura 15).



**Figura 15: Corpos após a secagem e antes da retirada das fitas (esquerda) e teste de resistência (120 Ohms) dos SG após terem sido colados aos corpos de prova (direita).**

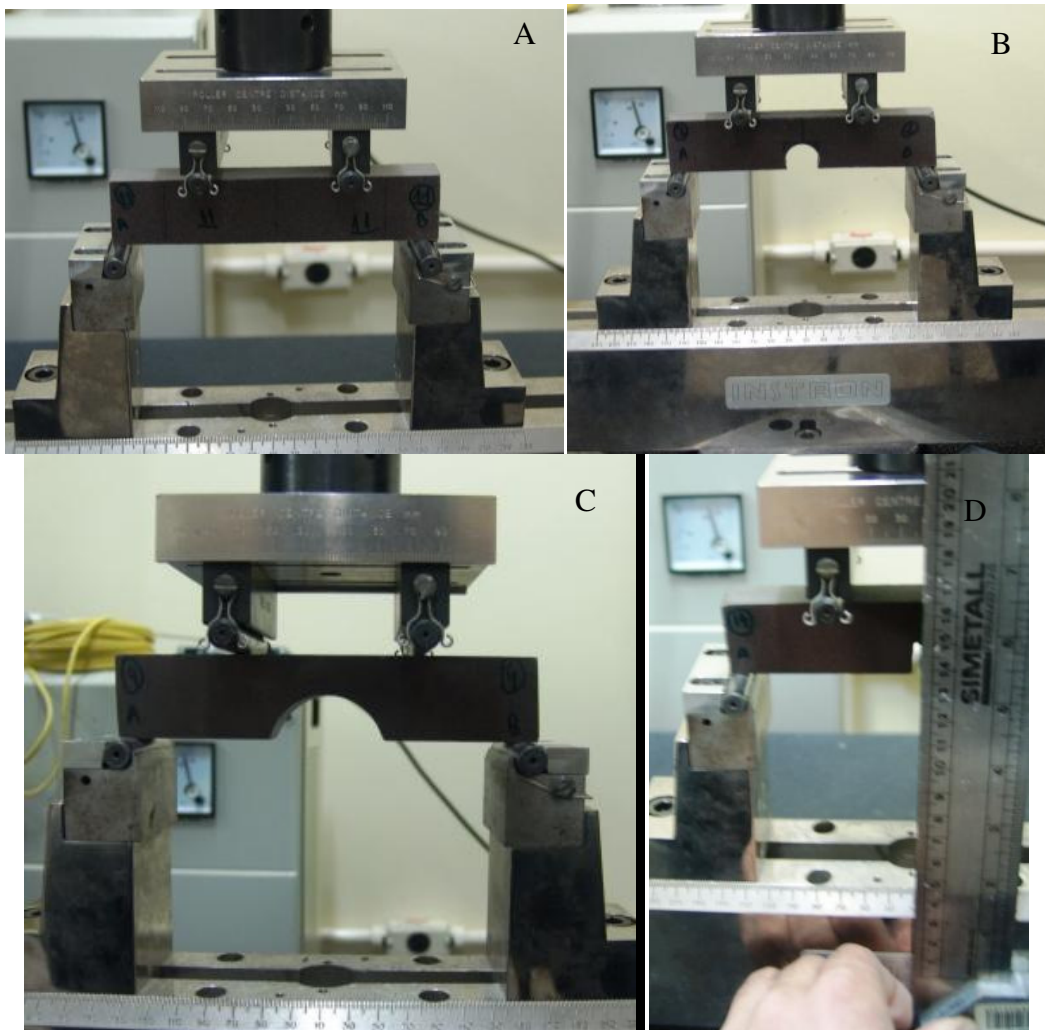
### **3.2.3 – Ensaio Mecânico de Flexão à 4 Pontos**

Os ensaios de flexão em 4 pontos foram realizados na INSTRON 5582 utilizando uma célula de carga de capacidade de  $\pm 100$  KN e, em sua maioria com taxa de flexão de 0,5mm/min, salvo quando expresso contrário, ou seja, nos corpos identificados com um asterisco após o ID do corpo, foi utilizado a taxa de flexão de 0,1 mm/min.

Para o ensaio em 4 pontos fez-se mandatório saber as distâncias entre os roletes (pontos de apoio) superiores e inferiores da máquina. Neste trabalho os roletes superiores foram separados a uma distância de 65 mm ( $l_1$ ) enquanto os inferiores distavam 140 mm de afastamento ( $l_2$ ).

#### **3.2.4.1 – Ensaio dos Corpos sem SG**

Prontos os corpos de prova, estes foram levados à INSTRON para ensaio em quatro pontos. Tomando cuidado para centralizar as marcas do centro do corpo com o centro dos roletes, principalmente no caso dos corpos entalhados, para não produzir processos de fratura tendenciosos que comprometeriam os testes. Isto foi feito com o auxílio de um esquadro e um nível de bolha (Figura 16). Outro fator a se tomar cuidado durante esta etapa foi o ponto de toque dos roletes ao corpo de prova, que deveria estar completamente liso e livre de protuberâncias e antiparalelismo entre as faces.



**Figura 16: CPGC sendo ensaiados na INSTRON. Liso (A), em círculo menor (B), maior (C) e em U profundo (D) sendo centralizado usando um esquadro.**

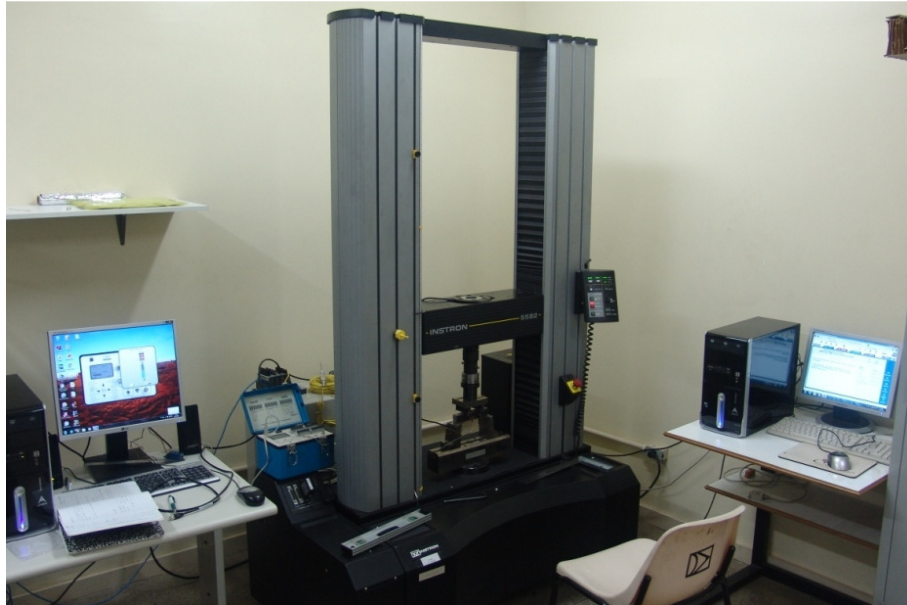
### **3.2.4.2 – Ensaio dos Corpos com SG<sup>3</sup>**

O aparato mostrado na Figura 17 foi montado para ensaiar os corpos de prova que possuíam SG. Para tal, o corpo após ser posicionado na máquina universal de ensaios INSTRON (Figura 18), era conectado por um fio até a entrada de um dos canais do SG *Indicator* (medidor de deformação), que por sua vez lia as variações de resistência enviadas pelo SG durante o ensaio e enviava via cabo USB

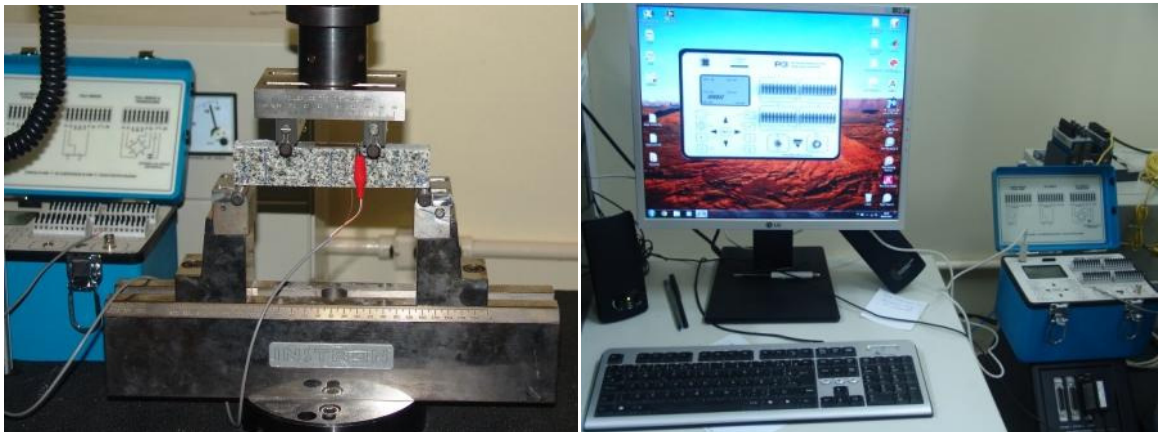
<sup>3</sup> Para os CPGP há dois CP ensaiados com SG, CP 1 (SG1) e 2 (SG2). Isto foi feito porque o CP 1 fraturou muito próximo ao rolete do lado A do CP. Assim, o segundo ensaio foi realizado para a retirada de dúvidas a respeito do correto posicionamento do CP na máquina e/ou possível pré-existente fratura no CP 1. Quando executado o segundo teste a fratura veio a ocorrer próxima ao rolete do lado B do CP 2, o que eliminou a hipótese de alinhamento tendencioso dos CP à máquina e, tendo apresentado resultados semelhantes, entre si e com os demais ensaios listados, também eliminou a hipótese de fratura pré-existente no CP.



para serem decodificados por um software instalado no computador (Figura 18). Enquanto isso, outro computador, este conectado à INSTRON, manipulava a máquina universal de ensaios e lia os resultados de tensão x deformação do ensaio flexural.



**Figura 17: Aparato para ensaio formado pelo conjunto máquina universal de ensaios INSTRON, corpo de prova com SG, SG *Indicator* e computadores para leitura dos dados.**



**Figura 18: Corpo de prova na INSTRON conectado via fio de cobre ao SG *Indicator* (esquerda) e SG *Indicator* ligado ao computador com o software de aquisição das deformações (direita).**

Vale lembrar neste ponto do trabalho que, antes dos ensaios de cada corpo de prova, com ou sem SG, as respectivas medidas médias de suas dimensões,  $h$  e

b, dispostas no Apêndice A eram inseridas na INSTRON, bem como a taxa de flexão desejada (0,1 ou 0,5 mm/min) para o ensaio.

Após os ensaios, um exemplar de CP de cada material e de cada geometria testada foi levado ao microscópio confocal para verificação de defeitos intrínsecos, principalmente microfraturas, e possíveis iniciadores do processo de fratura. Foram escolhidas melhores fotos, que representassem os defeitos típicos de cada material e as figuras encontram-se dispostas nos resultados e discussões (Figuras 41 a 44).

### 3.3 – Cálculos dos Resultados

Os dados obtidos a partir da INSTRON foram salvos em arquivos tipo .id\_flex, .is\_flex, .rlt, .pdf e .raw. Os arquivos .raw eram convertidos em arquivo .xls e trabalhados para calcular os dados que resultaram nas tabelas apontadas no Apêndice C. Já os arquivos gerados pelos ensaios com SG foram do tipo .txt, que também foram convertidos para .xls. Com os arquivos .xls foram obtidos os gráficos de deslocamento x força, apresentados nos resultados e no Apêndice B.

Os dados de força (N) e deslocamento (mm) gerados pela INSTRON foram convertidos em tensão de flexão –  $\sigma$  (MPa), e deformação –  $\varepsilon$  (adimensional), utilizando a Equação 3, e a equação:

$$\varepsilon = \frac{12h \cdot \Delta e}{(3 \cdot l_2^2 - 4 \cdot d^2)} \quad \text{Equação 22}$$

que pode ser obtida aplicando na equação 3 à lei de hooke e à equação da flexa para flexão em quatro pontos de GARCIA, et. al. (2000):

$$E = \frac{F \cdot a(3 \cdot l_2^2 - 4 \cdot d^2)}{4bh^3 \cdot \Delta e} \quad \text{Equação 23}$$

As alturas e larguras utilizadas dependerão de cada caso, sendo b aplicado como  $b_{med}$  e h como  $h_{med}$  para os corpos lisos,  $h_{med\ ABT}$  para os entalhados em U profundo e  $h_{med\ AB}$  para os entalhados em círculo menor e maior.

Os módulos de elasticidade, E, foram obtidos por meio do cálculo do coeficiente angular da reta da seção elástica de maior extensão linear no gráfico, sem mudança aparente de inclinação, para cada gráfico dos corpos de prova lisos. Já o módulo de elasticidade E, referido como médio,  $E_{médio}$ , é obtido pelo coeficiente angular da reta tangente à curva da seção elástica, contando toda extensão linear do gráfico, inclusive possíveis pequenas mudanças de inclinações ou casos em que o gráfico apresenta duas seções retas de inclinações diferentes.

Os gráficos de tensão x deformação obtidos durante a flexão dos CP constam no Apêndice B. Para os corpos lisos a tensão máxima de ruptura é a própria tensão nominal, mas para o caso dos corpos entalhados, a tensão máxima de ruptura foi obtida com a multiplicação de  $K_t$  – o fator de concentração de tensão do entalhe, pela tensão nominal no ponto de ruptura.

Para os casos de entalhes em U profundo, o  $K_t$  foi calculado utilizando as equações desenvolvidas por PILKEY et al. (2008)<sup>4</sup>:

$$K_t = C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{P}{h}\right) + C_3 \cdot \left(\frac{P}{h}\right)^2 + C_4 \cdot \left(\frac{P}{h}\right)^3 \quad \text{Equação 24}$$

onde:

$$C_1 = 2,966 + 0,502\left(\frac{P}{\rho}\right) - 0,009\left(\frac{P}{\rho}\right)^2 \quad \text{Equação 25}$$

$$C_2 = -6,475 - 1,126\left(\frac{P}{\rho}\right) + 0,019\left(\frac{P}{\rho}\right)^2 \quad \text{Equação 26}$$

$$C_3 = 8,023 + 1,253\left(\frac{P}{\rho}\right) - 0,020\left(\frac{P}{\rho}\right)^2 \quad \text{Equação 27}$$

$$C_4 = -3,572 - 0,634\left(\frac{P}{\rho}\right) + 0,010\left(\frac{P}{\rho}\right)^2 \quad \text{Equação 28}$$

para  $2,0 < P/\rho < 20,0$ . Em que P e  $\rho$  são, respectivamente, profundidade do entalhe e raio de curvatura da ponta do entalhe.

No caso dos entalhes em círculo, o trabalho de TEIXEIRA, et al. (2011) foi utilizado como referência para o cálculo do fator concentrador de tensão:

$$K_t = C_1 \cdot \left(\frac{D}{2P}\right)^4 + C_2 \cdot \left(\frac{D}{2P}\right)^3 + C_3 \cdot \left(\frac{D}{2P}\right)^2 + C_4 \cdot \left(\frac{D}{2P}\right) + C_5 \quad \text{Equação 29}$$

onde:

$$C_1 = -0,0333\left(\frac{P}{h}\right)^3 + 0,0200\left(\frac{P}{h}\right)^2 - 0,0047\left(\frac{P}{h}\right) + 0,0034 \quad \text{Equação 30}$$

<sup>4</sup> Em alguns casos obtivemos valores extrapolados de  $K_t$  devido as dimensões de certos corpos de prova terem ultrapassado as dimensões apresentadas no gráfico do Anexo A, o que aparentemente não prejudicou os resultados já que os valores encontrados apresentaram-se bem ajustados ao modelo.

$$C_2 = 0,1700 \left( \frac{P}{h} \right)^2 - 0,0362 \left( \frac{P}{h} \right) - 0,0536 \quad \text{Equação 31}$$

$$C_3 = 1,3000 \left( \frac{P}{h} \right)^3 - 1,7950 \left( \frac{P}{h} \right)^2 + 0,0915 \left( \frac{P}{h} \right) + 0,4153 \quad \text{Equação 32}$$

$$C_4 = -1,2875 \left( \frac{P}{h} \right)^2 + 3,3428 \left( \frac{P}{h} \right) - 1,8390 \quad \text{Equação 33}$$

$$C_5 = -6,2333 \left( \frac{P}{h} \right)^3 + 12,5350 \left( \frac{P}{h} \right)^2 - 10,1702 \left( \frac{P}{h} \right) + 4,3175 \quad \text{Equação 34}$$

para  $0,2 \leq P/h \leq 0,5$  e  $1,0 \leq (D/2)/P \leq 5,0$ .

Vale lembrar que nos cálculos foram utilizados sempre os valores de D (corda do entalhe circular) como  $D_{med}$ , P como  $P_{med}$  e h como  $h_{med}$  ABT para os entalhados em U profundo e  $h_{med}$  AB para os entalhados em círculo menor e maior.

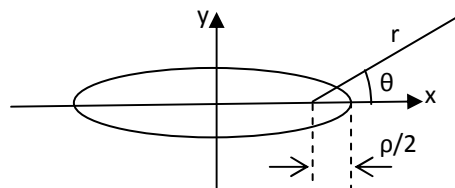
CREAGER (1967), *apud* CARVALHO (1992), desenvolveu equações para obtenção do fator de intensidade de tensões ou tenacidade à fratura, em corpos entalhados com entalhes não singulares, sob carregamento em Modos I, II e III. No presente trabalho considerou-se ocorrer apenas o Modo I e foram calculadas usando:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ 1 - \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \frac{\rho}{2r} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad \text{Equação 35}$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ 1 + \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \frac{\rho}{2r} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad \text{Equação 36}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \frac{\rho}{2r} \cdot \text{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad \text{Equação 37}$$

onde r é a distância da ponta da trinca às tensões que atuam num elemento localizado r e  $\theta$  da ponta da trinca;  $\rho$  é o raio do entalhe, que são descritos graficamente na Figura 19.



**Figura 19: Representação gráfica de r. Desenho baseado em CARVALHO (1992), p. 73.**

Fazendo  $\theta = 0$  e  $r = \rho/2$ , trabalhando matematicamente a equação 35 e, como as tensões cisalhantes e possíveis tensões no eixo x, oriundas de movimentos torcionais devidos às pequenas imperfeições nos CP, foram desconsideradas, pode ser obtido para o cálculo do  $K_{IC}$  dos corpos entalhados:

$$K_{IC} = \frac{\sigma_y \cdot \sqrt{\pi\rho}}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} \cdot \sqrt{\pi\rho}}{2} \quad \text{Equação 38}$$

Em que utilizou-se  $\rho$  para os corpos em U profundo e  $D/2$  para os entalhados em círculo,  $\sigma_{m\acute{a}x}$  é a tensão máxima de ruptura do corpo entalhado.

Com estes dados, o parâmetro L pôde então ser calculado utilizando a equação 10, onde  $K_c$  passou a ser  $K_{IC}$  e  $\sigma_o$  é a tensão característica obtida com o ensaio dos corpos lisos. Para o cálculo das tensões previstas pela TDC, foram utilizadas as Equações 16 e 17, para o MP e o ML, respectivamente.

Para o caso dos ensaios utilizando SG, arquivos .txt com dados de tempo (s) x deformação durante a flexão eram obtidos e são mostrados na forma de gráficos no Apêndice D. Com eles, também foi possível concatenar, utilizando o tempo de ensaio<sup>5</sup> como unidade de amarração, os dados de deformação lidos pelo *SG Indicator* contra os dados de tensão obtidos da INSTRON.

---

<sup>5</sup> Para haver equivalência entre os dados de tempo lidos pelo *SG Indicator* e os dados de tempo lidos pela INSTRON, o ensaio era realizado iniciando a leitura dos dois *software* ao mesmo tempo.

## ***CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES***

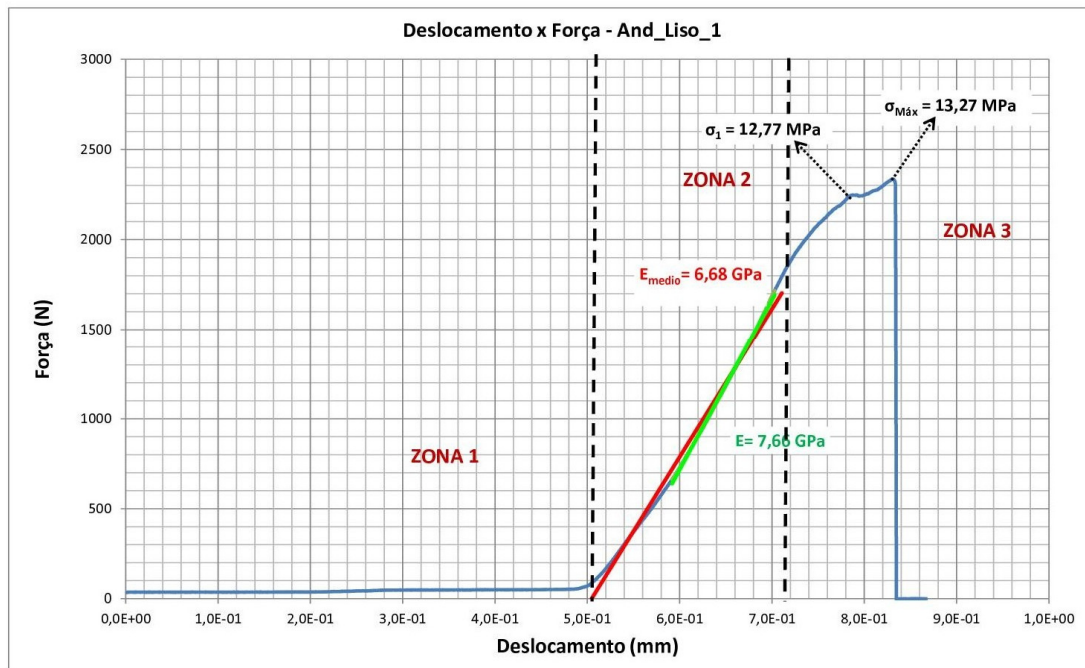
### **4.1 – Análise dos Patamares de Fratura das Curvas Tensão x Deformação**

De forma geral, os patamares de fratura não linear formados pelos três materiais estudados apresentaram certas semelhanças, por isso, não serão discutidos aqui todos os gráficos gerados, mas serão apresentados ao menos um exemplar para cada comportamento observado.

Inicialmente, vale salientar a dificuldade em se determinar um módulo de elasticidade,  $E$ , que represente fidedignamente o material estudado. Este parâmetro foi calculado para todos os corpos lisos buscando o mais longo segmento de reta que representasse o comportamento linear elástico no gráfico deformação x tensão. No entanto, foi observado que valores mais confiáveis são obtidos selecionando a seção reta mais próxima do fim do patamar elástico e início da fratura.

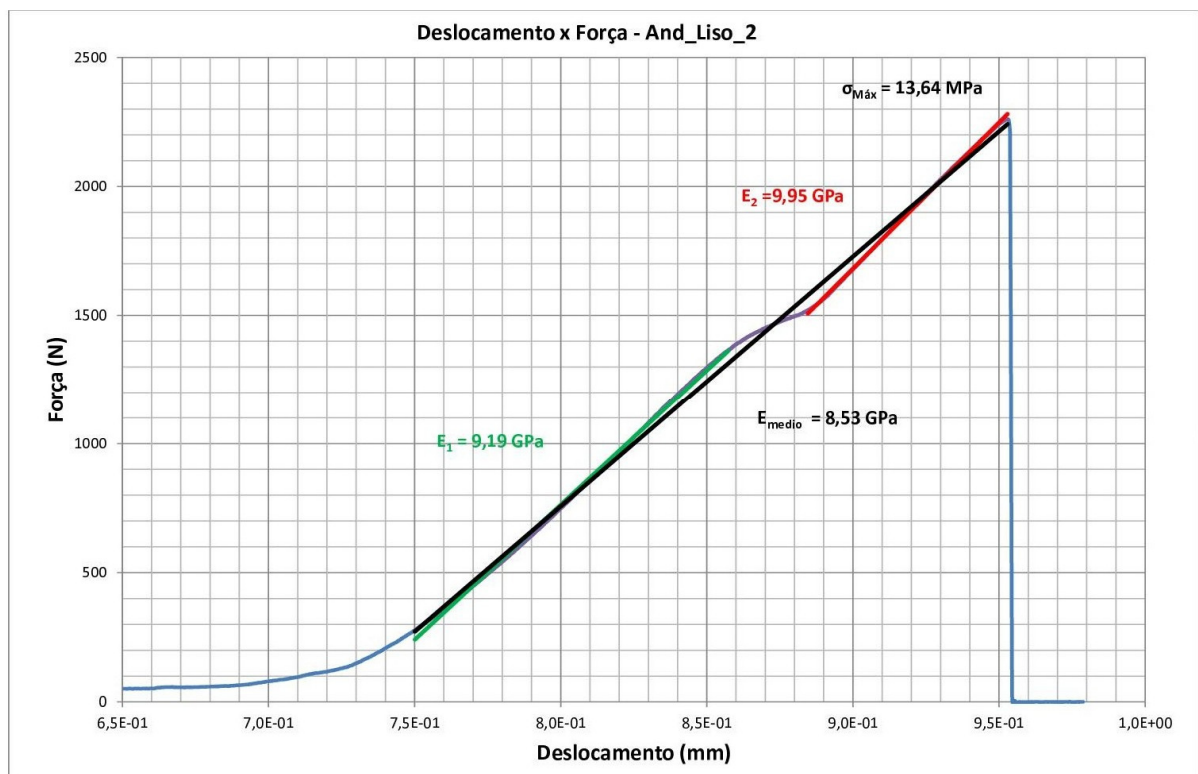
Não obstante, pela própria definição, o módulo de elasticidade de um material é calculado para materiais lineares, homogêneos e isotrópicos, definição esta que os materiais testados aqui não atendem integralmente. A dispersão dos valores aqui encontrados também dão uma ideia de como os materiais estudados possuem um módulo de elasticidade flexural de difícil determinação. Apesar dessas dificuldades, o parâmetro foi calculado, já que foram usadas no trabalho duas teorias dependentes dessa grandeza, a MFLE e a TDC. Também, a comparação dos valores de  $E$  aqui obtidos com os de outros trabalhos que utilizem metodologias parecidas pode ajudar como avaliação da confiabilidade dos resultados encontrados nos mesmos.

Na zona 1 da Figura 20 observa-se simplesmente do ajuste inicial do corpo de prova à máquina de ensaios. A zona 2 é a região linear elástica do ensaio do CP e a zona 3 a formação do patamar não linear. Na zona 2 é possível observar claramente a variação do coeficiente angular da reta, isso é comum para materiais com muitos defeitos associados à sua estrutura. Portanto, essas alterações na taxa de curvatura são comuns para materiais que não são idealmente frágeis. O corpo está integralmente intacto até o fim da zona 2, quando começa a formação do patamar não elástico (zona 3). A fratura é dita iniciar-se na zona 3 e propagar-se até atingir o primeiro pico, quando ocorre o colapso do material. Um gráfico com comportamento idêntico foi observado para o CPGC liso 1.



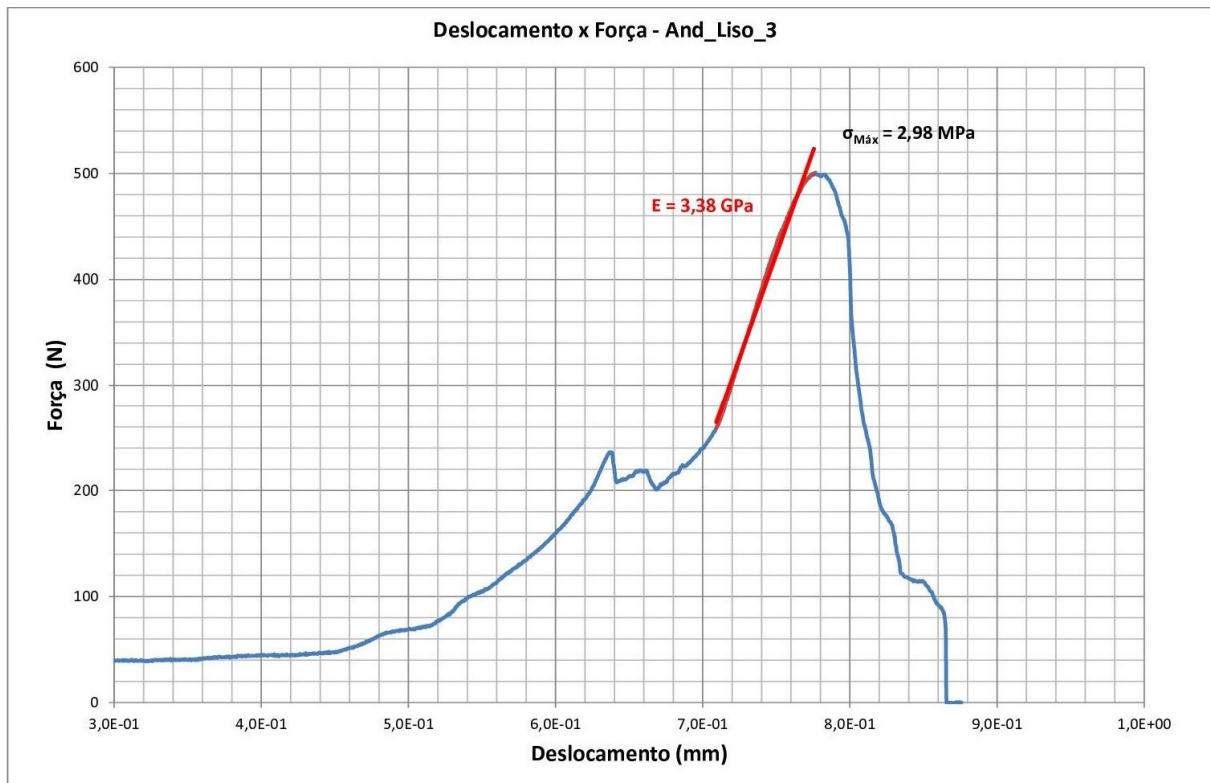
**Figura 20: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 1.**

A Figura 21 mostra outro exemplo de mudança da taxa de curvatura devido à anisotropia do material para o CPGA liso 2.



**Figura 21: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 2.**

O comportamento atípico encontrado na Figura 22 é devido às fraturas localizadas no corpo de prova. Isso ocorre, por exemplo, quando pequenas irregularidades (protuberâncias ou antiparalelismo) na superfície no corpo causam um desajuste do CP aos cutelos. O baixo valor de tensão encontrado pode estar associado a este efeito, o que pode ter gerado movimentos torcionais durante o ensaio.



**Figura 22: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 3.**

A Figura 23, para o CPGA liso 5, representa o comportamento típico encontrado para os CPGA lisos. Como esperado, observa-se para estes corpos um patamar não elástico bem curto ou aparentemente inexistente na escala utilizada.

O comportamento de mudança brusca de inclinação seguido de retorno à região linear elástica, como observado na Figura 24, ocorre normalmente em CP que sofreram fratura devido às imperfeições ou calombos nos CP exatamente na fixação com os roletes.



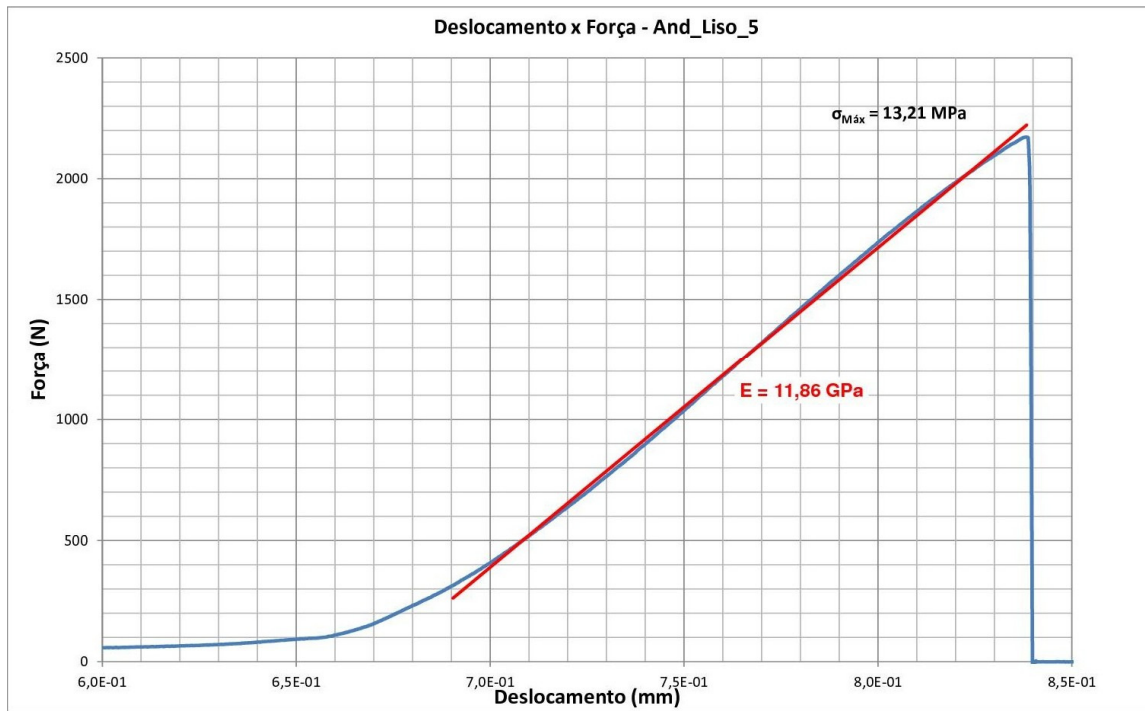


Figura 23: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 5.

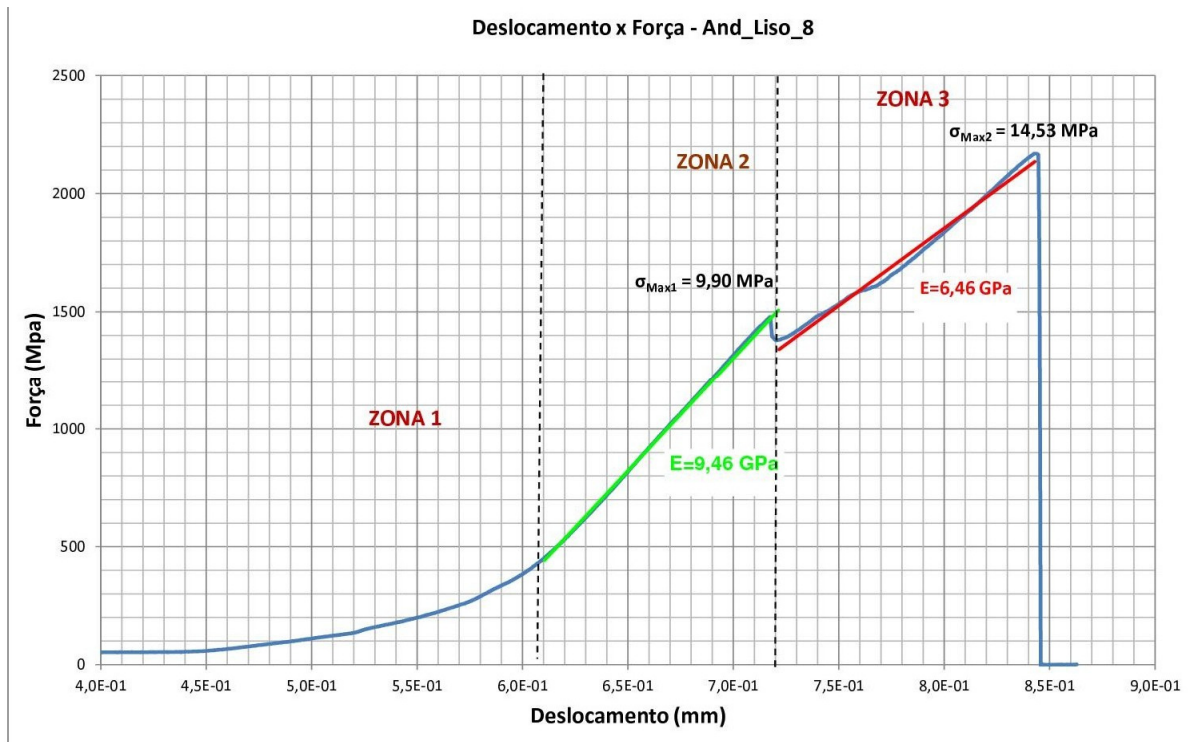
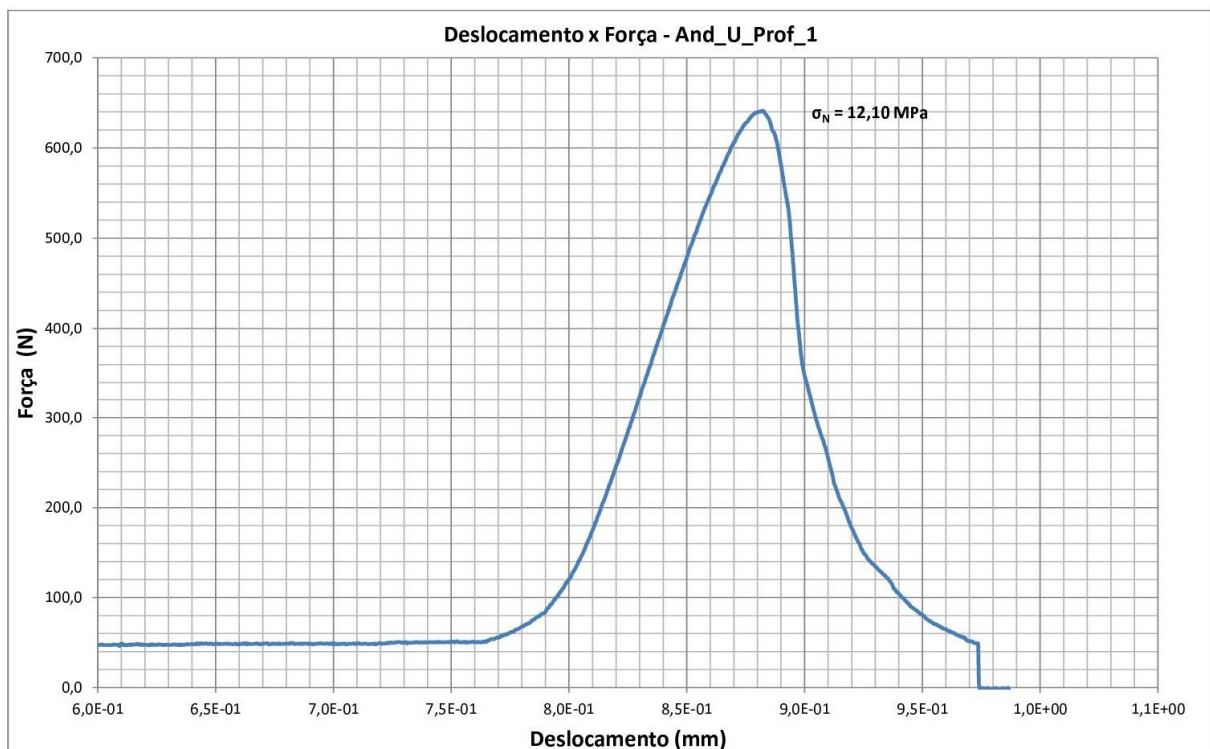


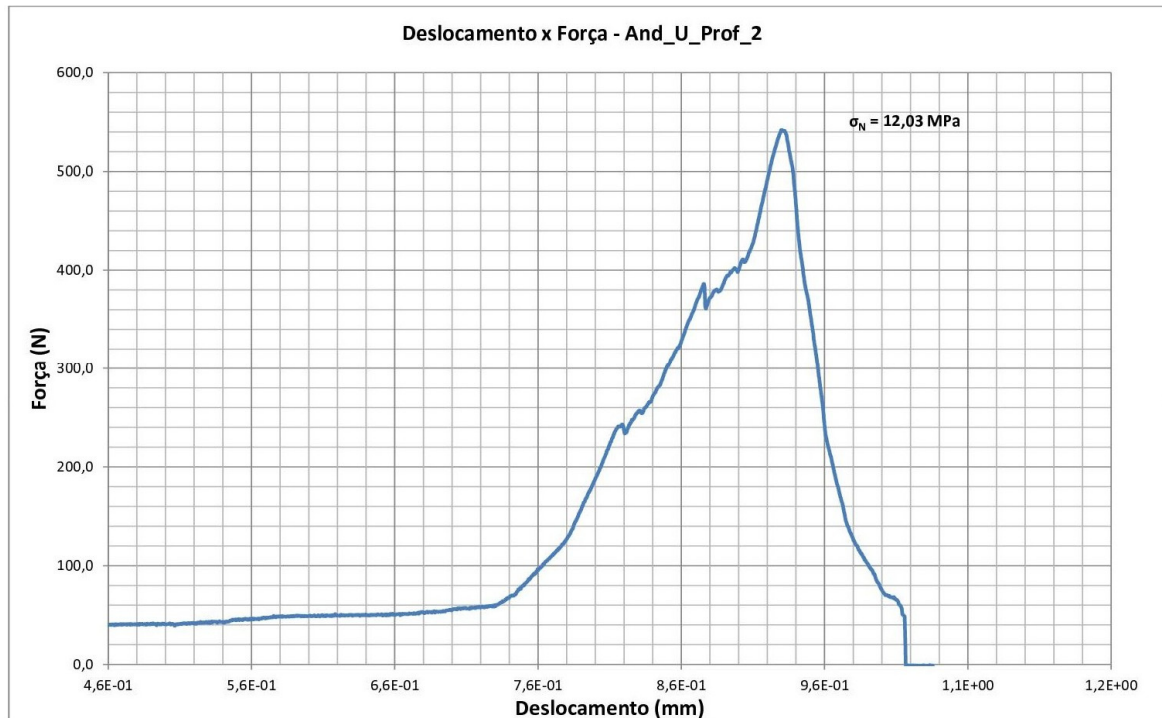
Figura 24: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA liso 8.

A partir da análise do comportamento apresentado pelos corpos entalhados, Figura 25, pode-se observar o fenômeno da formação de um patamar arredondado de fratura (pico suavemente arredondado) na região de mecânica da fratura não linear. Esse efeito é devido à interação entalhe/trinca x material (frágil), de forma que o entalhe tende a acabar com a linearidade (aguçamento do pico) nos CP lisos. O mesmo comportamento foi apresentado pelos gráficos dos CPGA em U profundo que foram suprimidos do trabalho por economia de espaço, já que apresentaram comportamento parecido aos já apresentados.



**Figura 25: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado em U profundo 1.**

Para o comportamento observado no CPGA entalhado em U profundo da Figura 26, o CP sofre fratura localizada nos roletes, ressaltando que, se o defeito (irregularidade próximo ao rolete) é grande, este efeito tende a ser maior. Isto também aconteceu para CPGA em U profundo 7 e 10. O mesmo processo de alteração na seção linear elástica (fratura localizada) ocorreu para os CPGA entalhados em círculo menor 1, 7 e 9; e para os CPGA entalhados em círculo maior 1 e 2. Encontrou-se outros exemplos de casos em que se observa processos de fratura localizada nos CP, são eles os CPGC liso 5, 6, 10 e 14; os CPGP liso 6, 12 e 17; o CPGP em U profundo 16; e os CPGP em círculo maior 15, 17 e 20.



**Figura 26: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado em U profundo 2.**

A Figura 25 e a Figura 27, típicas de CP entalhados em U profundo e círculo menor, respectivamente, mostram patamares de fratura arredondados semelhantes entre si, ou seja, sem suavização do arredondamento na região de fratura devido à alteração da geometria do entalhe, ao contrário do que era esperado na medida em que se aumentasse o raio de círculo do entalhe. O mesmo pode ser observado comparando tais patamares com o da Figura 29, típica dos CPGA em círculo maior.

A Figura 28 mostra uma curva completa, inclusive os ajustes do CP à máquina, com comportamento típico para um CPGA entalhado em círculo menor que, no entanto, possuiu uma tensão de ruptura abaixo do esperado. Isso pode ser explicado pela possível presença de fraturas de grandes dimensões (maiores que os defeitos normais) que pode ter sido criada naturalmente no processo de constituição da rocha ou introduzida durante preparo do CP. Comportamento este que também foi observado com o CPGP entalhado em U profundo 1 (SG1).

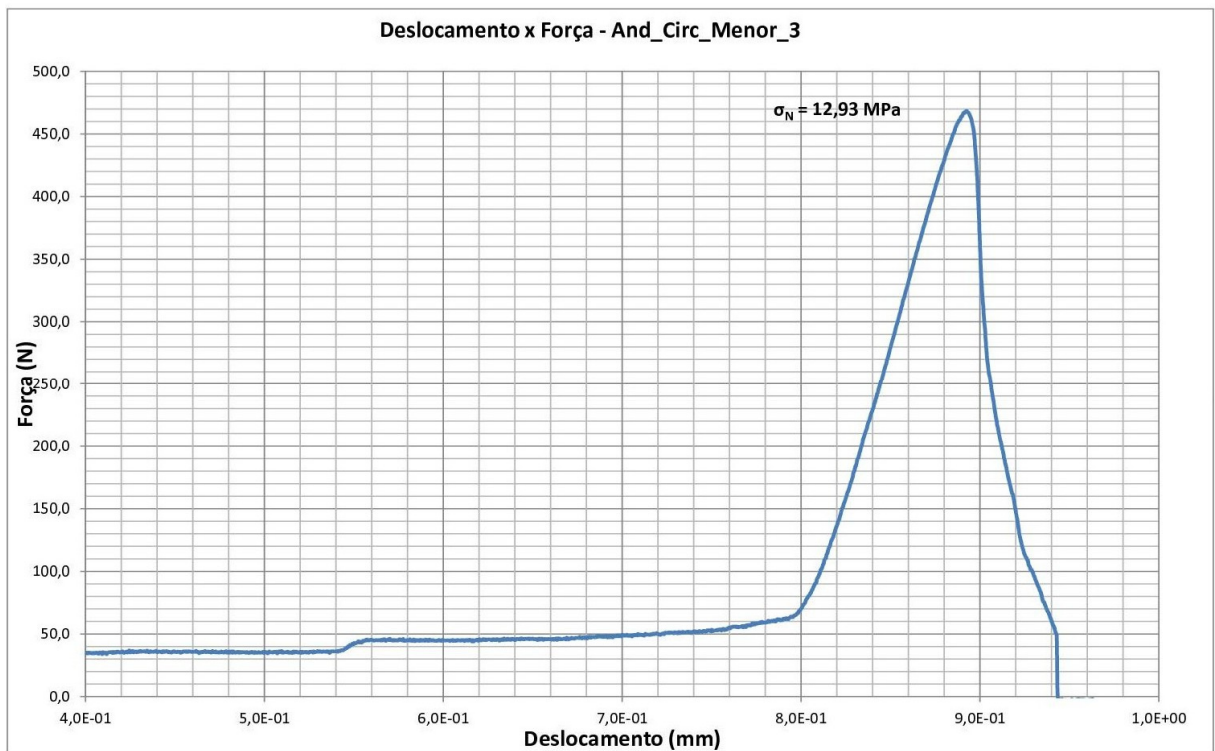


Figura 27: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo menor 3.

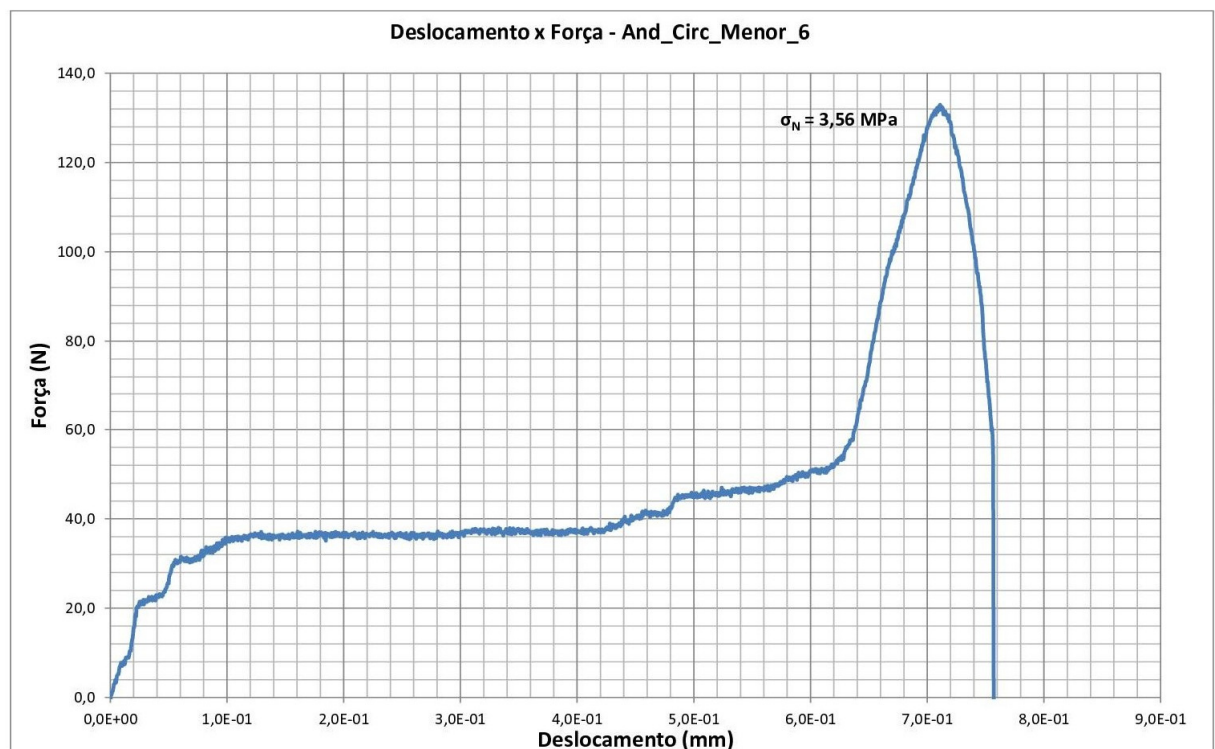
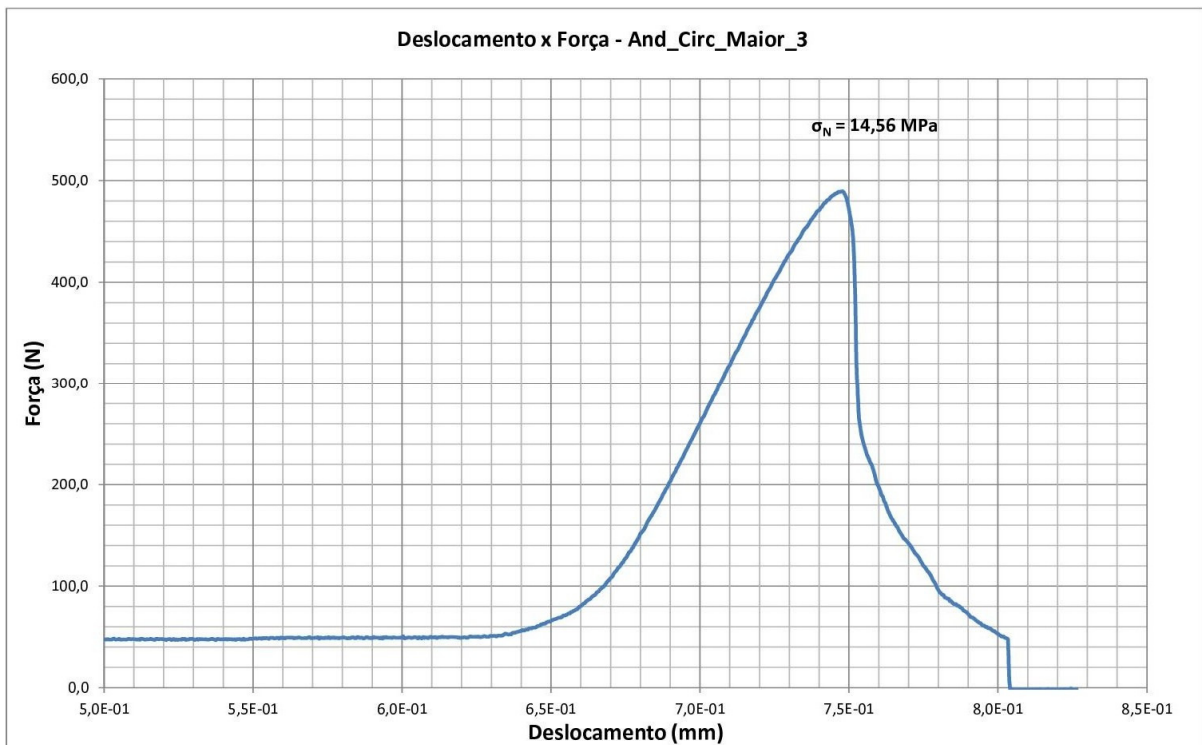


Figura 28: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo menor 6.



**Figura 29: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo maior 3.**

A curva da Figura 30 é típica de um CP que já estava fraturado antes do ensaio – provavelmente devido ao processo de fabricação do mesmo, embora não apresentasse fraturas visualizáveis a olho nu, oferecendo assim, ainda alguma resistência até que o CP se rompesse completamente. O mesmo comportamento foi observado para o CPGA em arco de círculo maior 9 e para o CPGP entalhado em círculo menor 11.

A Figura 31 e a Figura 32 representam curvas típicas para o caso de CPGC lisos. É importante notar que não foram observados anomalias nos gráficos para os CPGC com entalhes, serão apresentados, portanto, apenas um exemplo típico de comportamento para cada tipo de entalhe, Figura 33 a Figura 35. Esta ausência de patamares atípicos, aliada a maior incidência de anomalias nos CP lisos, caso não seja simples coincidência, demonstra que tais efeitos de formação de patamares ainda são uma incógnita para os materiais testados e que outros fatores podem estar associados ao processo de fratura destes CP.

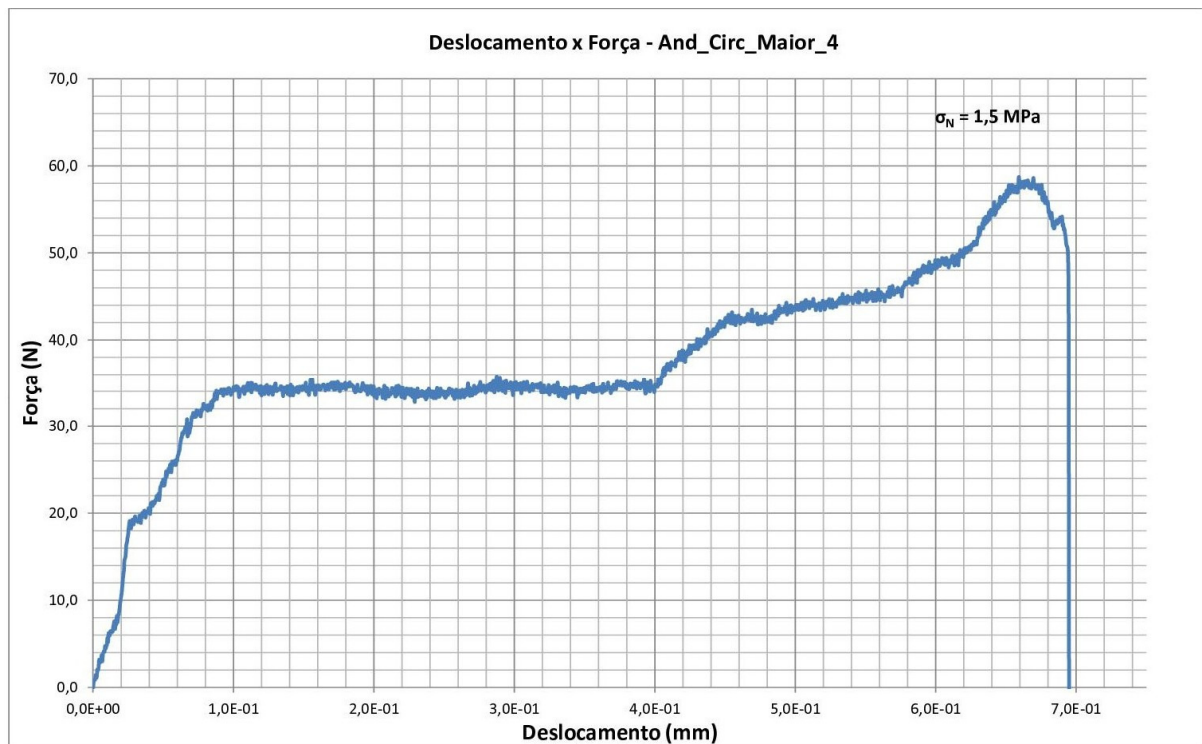


Figura 30: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGA entalhado círculo maior 4.

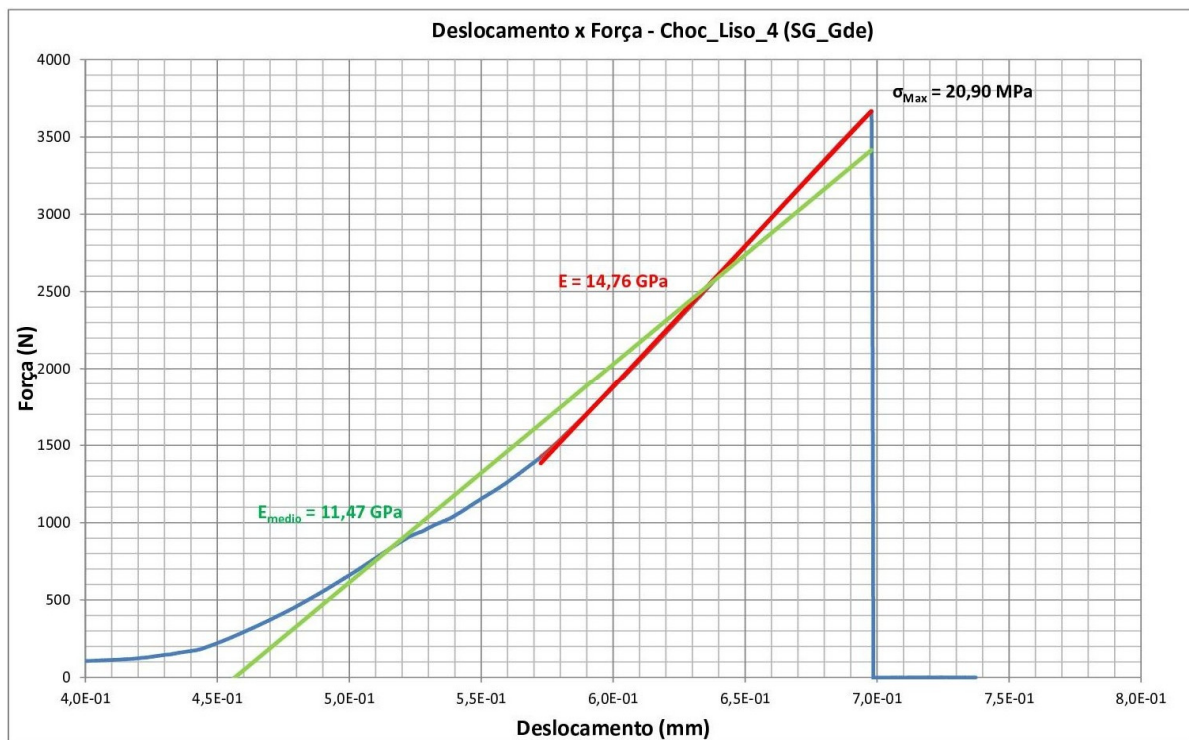


Figura 31: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC liso 4 (com SG grande).

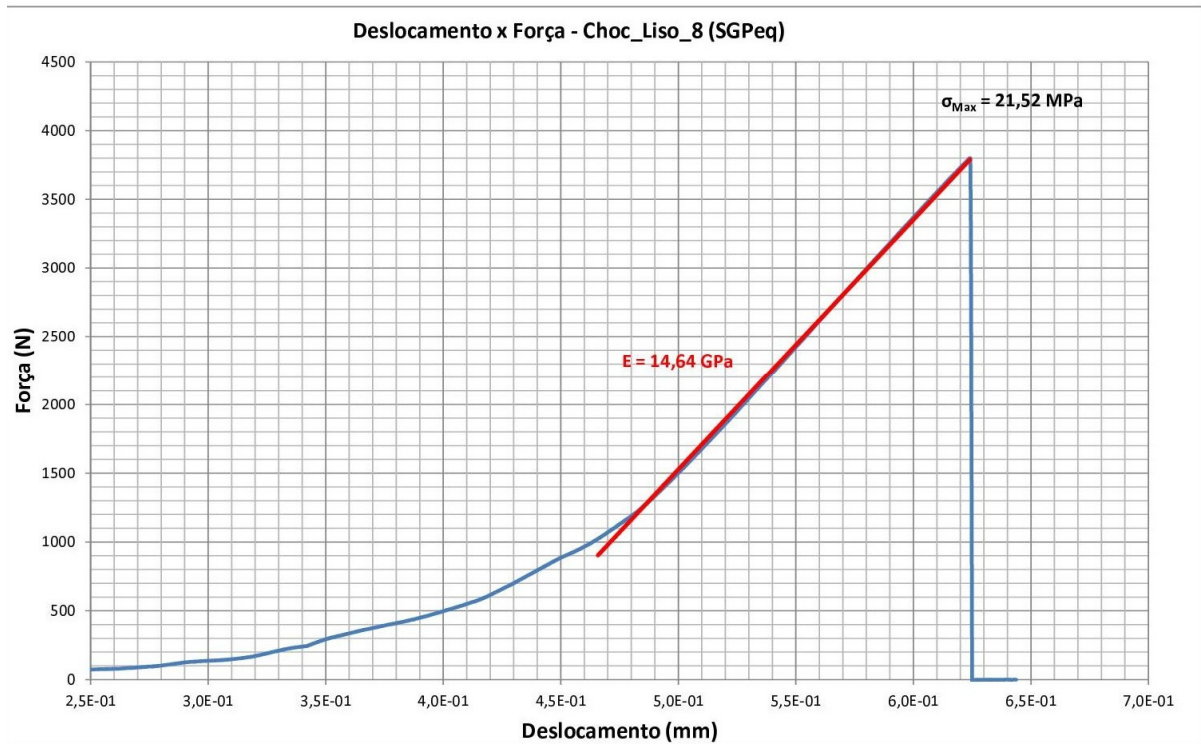


Figura 32: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC liso 8 (com SG pequeno).

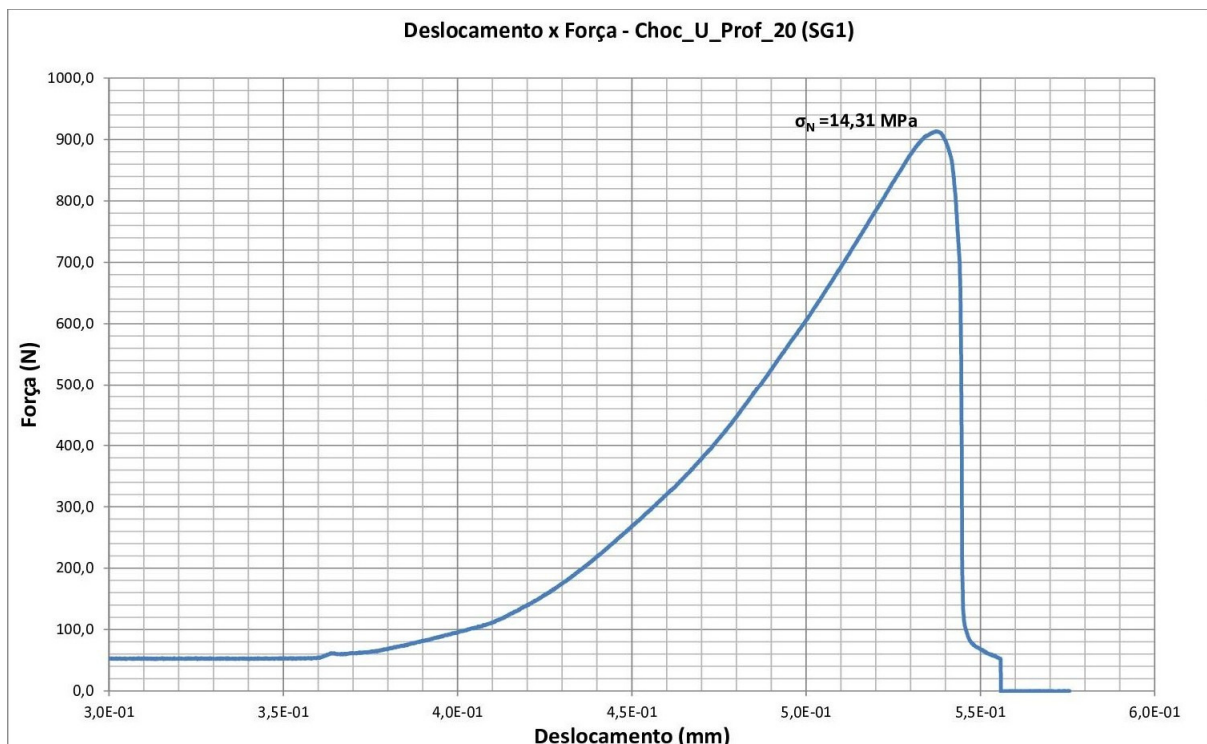


Figura 33: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC entalhado em U profundo 20 (SG1).

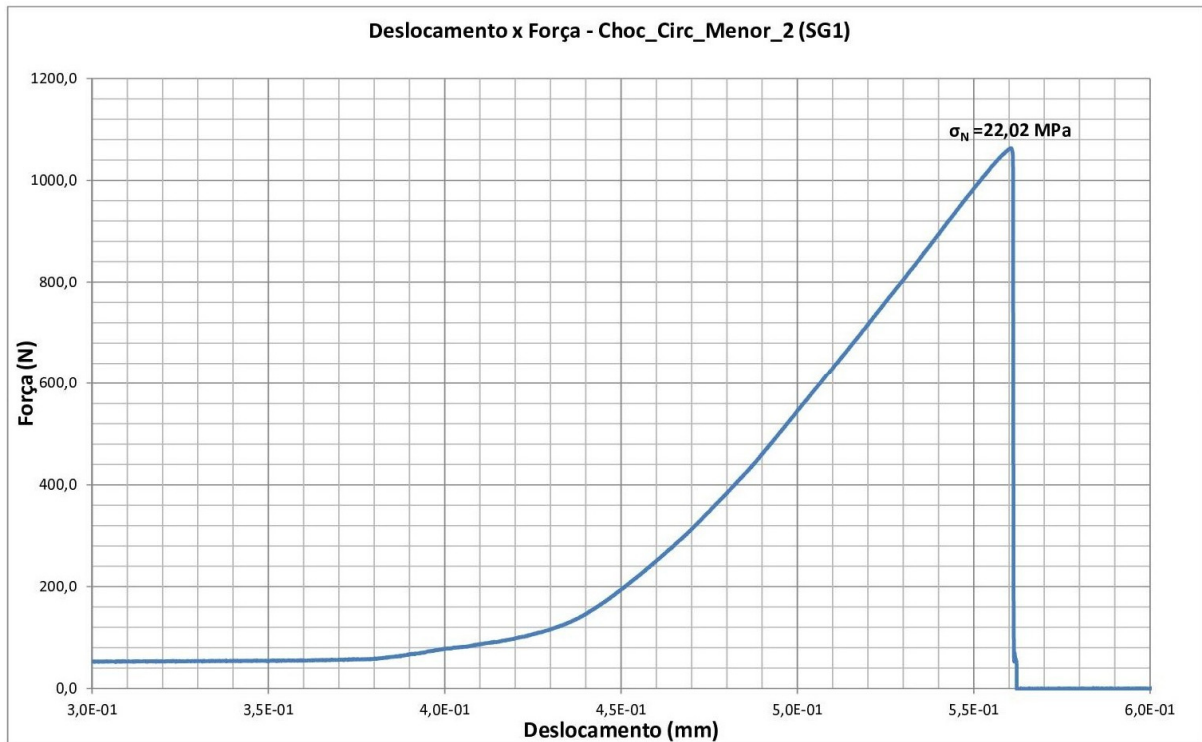


Figura 34: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC entalhado em círculo menor 2 (SG1).

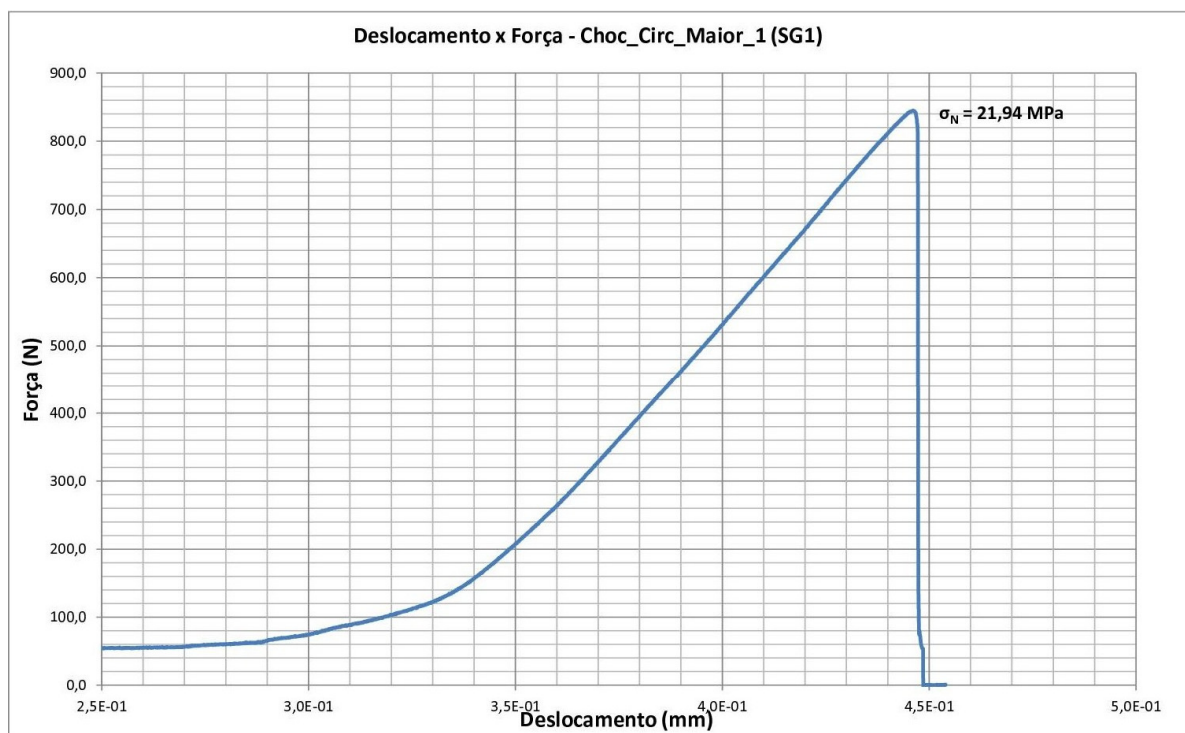
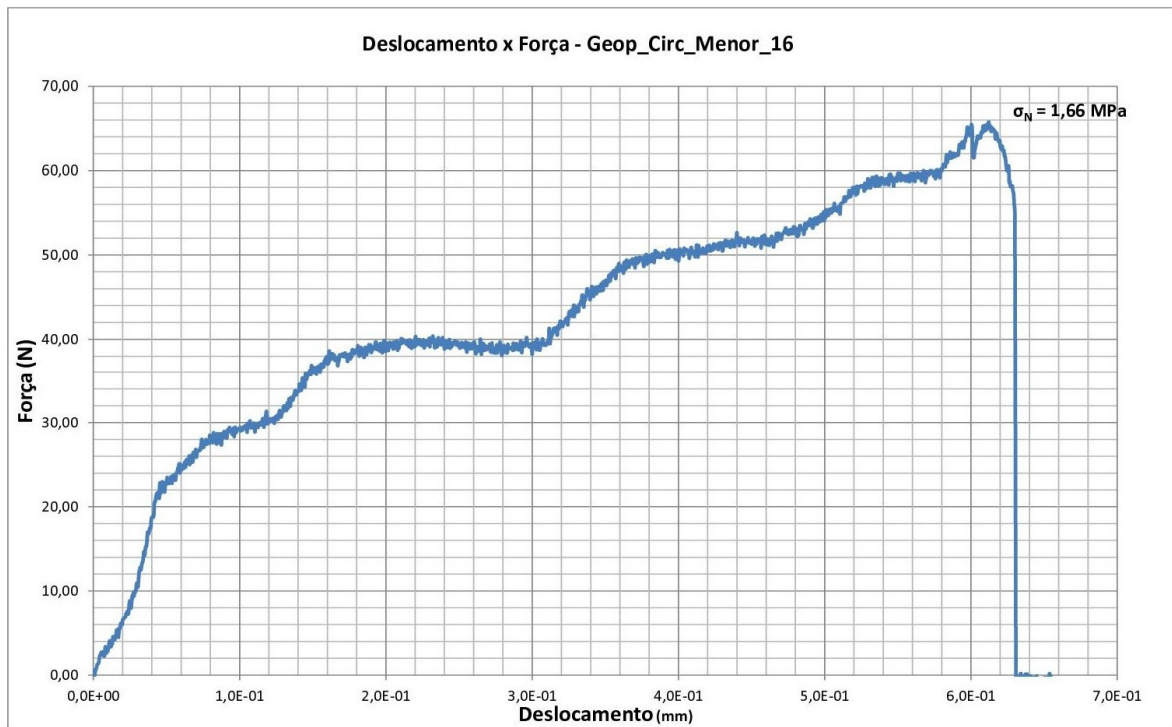


Figura 35: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGC entalhado em círculo maior 1 (SG1).



A Figura 36 apresentou comportamento tão atípico que não se conseguiu associar aos comportamentos padrões conhecidos. Possivelmente, algum componente de torção dominante, proveniente de desalinhamento dos roletes devido às pequenas imperfeições nos CP, pode ter ocasionado tal fenômeno no patamar formado.



**Figura 36: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em círculo menor 16.**

A seguir, Figura 37 à Figura 40, observam-se os gráficos com comportamentos típicos para os CPGP com as quatro geometrias testadas. As análises dos patamares formados são similares às feitas até aqui para os demais materiais testados.

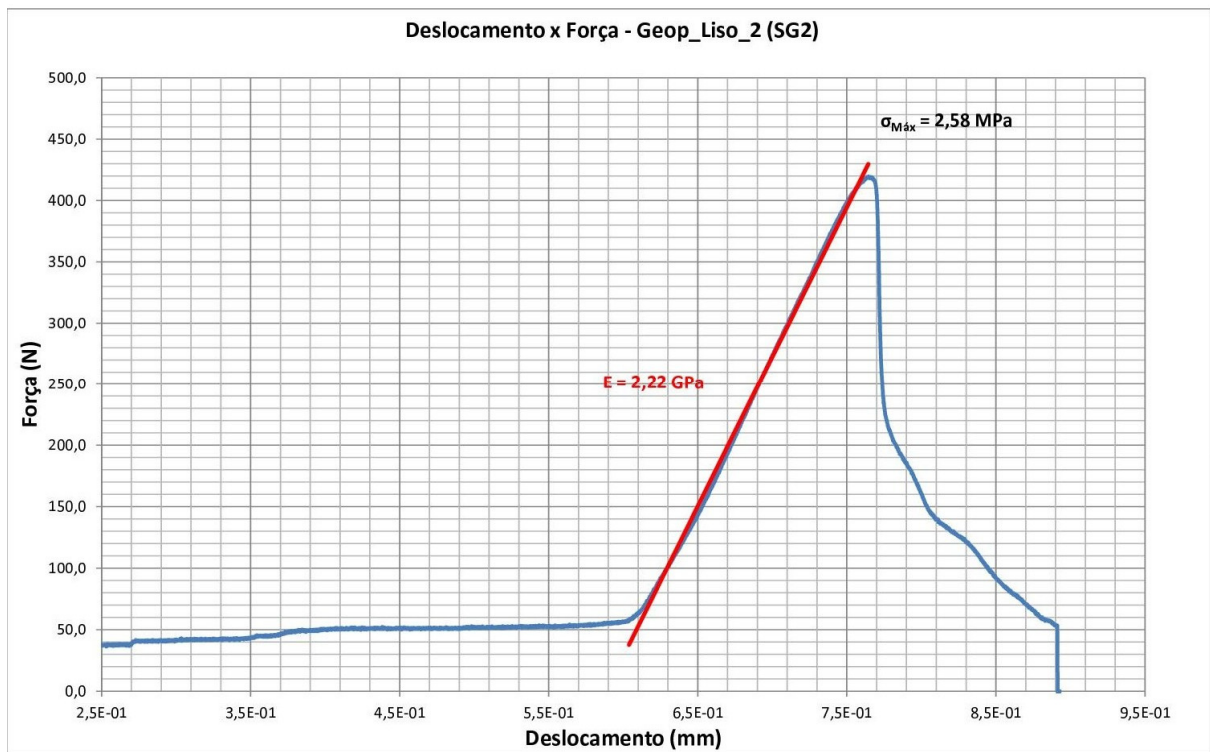


Figura 37: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP liso 2 (SG2).

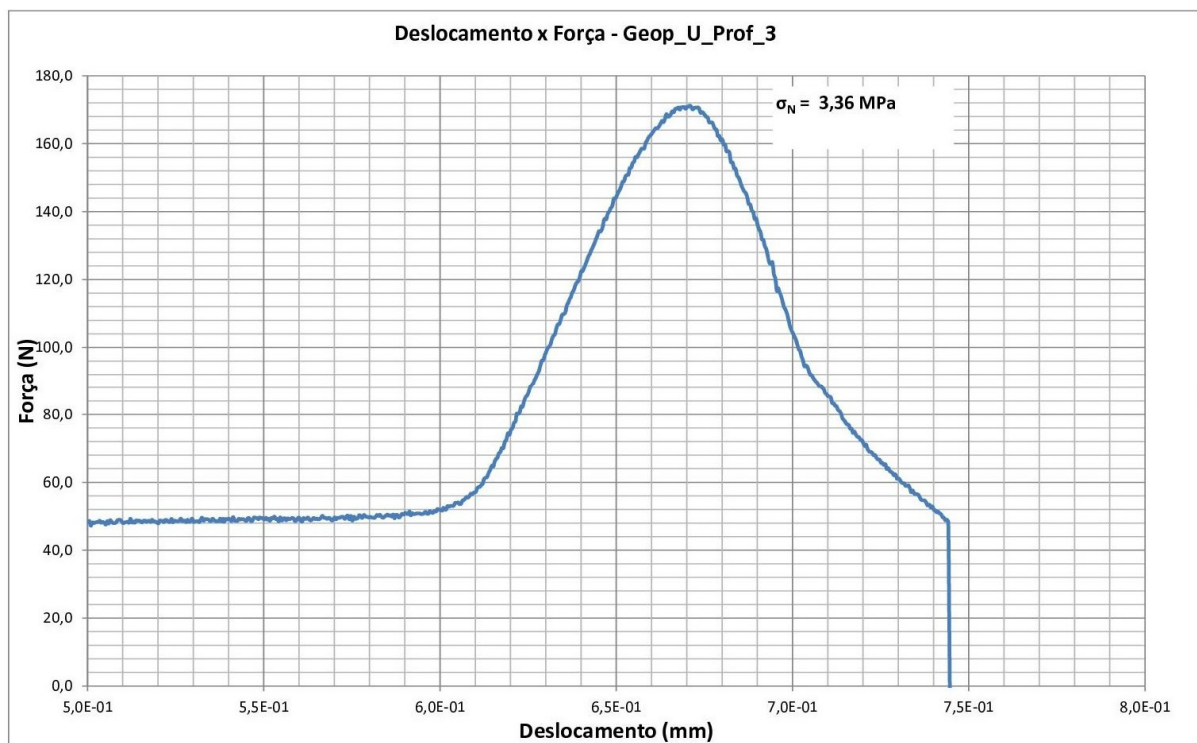


Figura 38: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em U profundo 3.

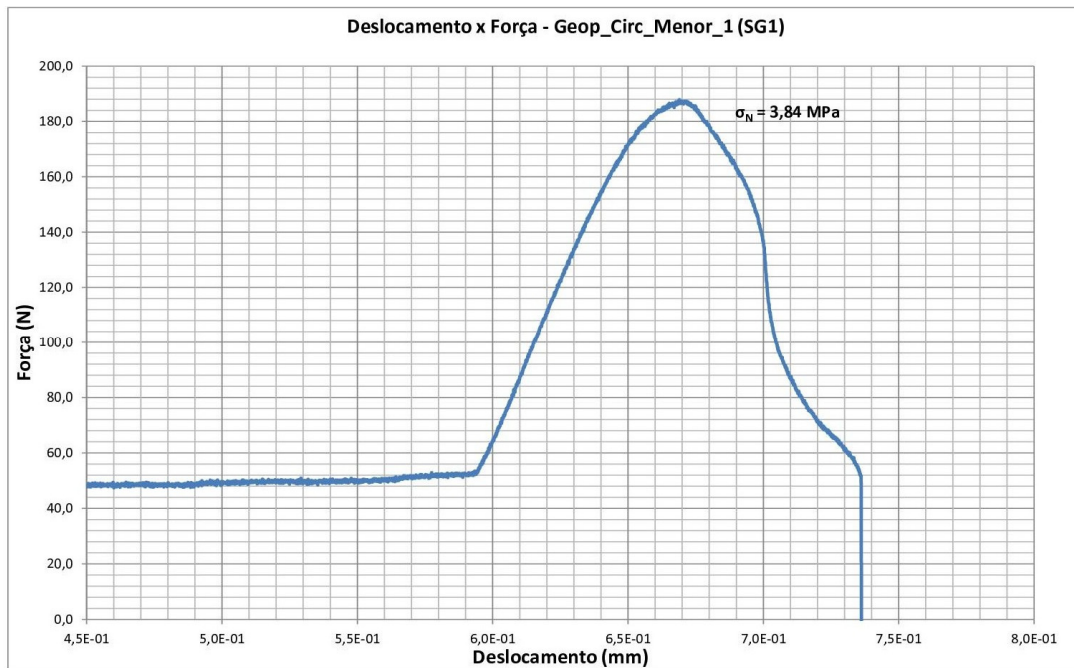


Figura 39: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em círculo menor 1 (SG1).

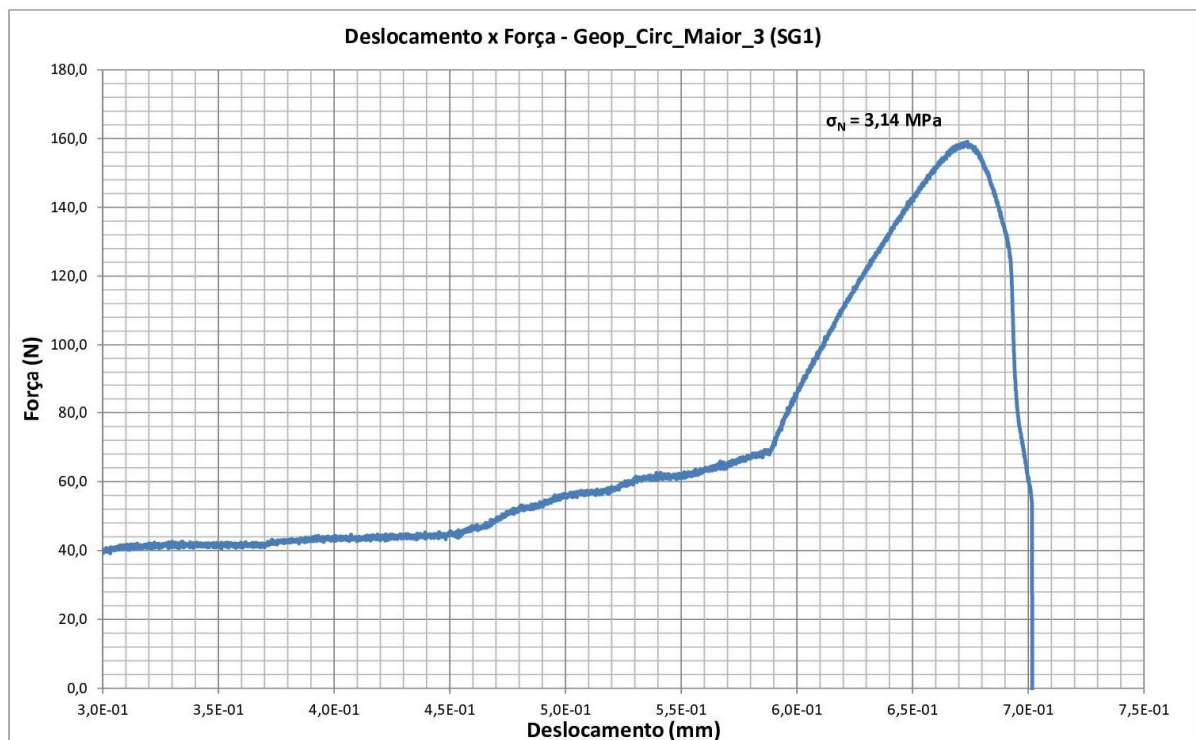


Figura 40: Gráfico de Deslocamento x Força obtido a partir da INSTRON para CPGP entalhado em círculo maior 3 (SG1).

## 4.2 – Análise dos Resultados de Cargas, deformações, $\sigma_{Máx}$ , $K_t$ , $K_{IC}$ , L e TDC

Na Tabelas C.1, C.5 e C.9, foram listados os E calculados automaticamente pela INSTRON somente a título de comparação com os resultados encontrados, estes resultados não são confiáveis por considerarem pontos em que o corpo não entrou de fato na região elástica.

A taxa de flexão para os corpos com um asterisco foi de 0,1 mm/min, enquanto para os demais foi de 0,5 mm/min. Isto foi feito com o objetivo de verificar a influência da variação da taxa de flexão nos resultados dos ensaios.

Em alguns casos temos nas tabelas duas tensões e deformações máximas – referenciadas como 1 e 2, como nos corpos 1 e 8 da Tabela C.1. O que não significa que temos duas tensões máximas, mas que tivemos dois picos de tensão e ambas foram listadas a título de avaliação dos patamares formados.

Nota-se também que os maiores valores de tensão não estão associados às maiores deformações nos CP, tanto para os CP lisos como para os entalhados. Este resultado sugere que os defeitos intrínsecos desses materiais são dominantes no processo de fratura e afetam essas propriedades dos materiais.

Os resultados relativos à carga e deformação máxima, guardaram certa semelhança nos resultados para os três tipos de materiais estudados, por este motivo serão discutidos conjuntamente (Tabelas 3, 4 e 5). Analisando os resultados das deformações medidas nos corpos com SG, observa-se, conforme o esperado, que as deformações máximas apresentam valores próximos entre si. O valor da deformação para o entalhe em U profundo foi o menor, o que também é coerente, uma vez que este entalhe se aproxima de uma trinca e apresenta uma zona de processamento de fratura responsável pela não linearidade nos comportamentos observados nos gráficos deformação x carga. Também foi observado que os valores obtidos para as cargas de ruptura se comportam como o previsto, sendo maior nos CP liso e mantendo uma proporção entre 3 e 4 vezes a carga observada nos CP entalhados. Estes valores se confirmam observando-se na Tabela 3, 4 e 5 às médias dos lotes para os CPGA, CPGC e CPGP que foram ensaiados.

### 4.2.1 – Resultados para os CPGA

O valor de tensão característica de espécie plana encontrado nos ensaios para os CPGA, 12,71 MPa, difere significativamente da tensão de flexão à 4 pontos

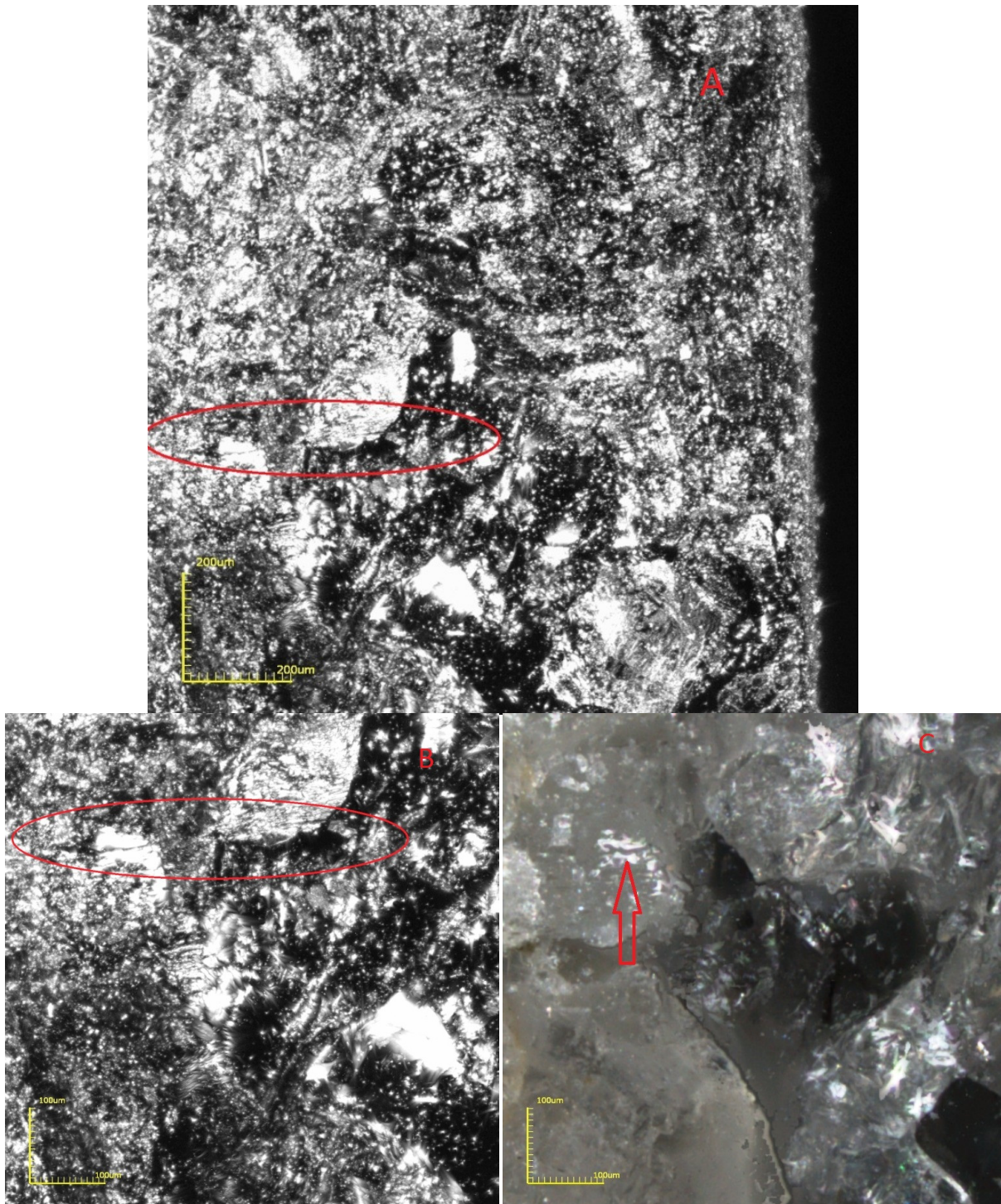
encontrada na literatura, que foi de 21,73 MPa segundo o Catálogo de Rochas Ornamentais do Rio de Janeiro (DRM-RJ, 2003), o que é considerado normal dada a natureza heterogênea do material.

Para o CPGA os  $K_{IC}$  encontrados variaram relativamente pouco, independentemente da geometria do CP, embora a dispersão nos resultados tenha variado consideravelmente (variações nos DP e CV encontrados).

Para os valores de L apresentados na Tabela 3, tanto o U profundo quanto o arco de círculo menor têm valores médios iguais, variando pouco para o arco de círculo maior. Outro resultado interessante é observado comparando os valores de L encontrados, com os tamanhos típicos de defeitos encontrados para o CPGA nas fotos da Figura 41. Na Figura 41 tem-se a micrografia do CPGA liso 10, tirada na face que sofreu o processo de fratura, onde vê-se uma trinca passante cortando vários grãos de quartzo da matriz rochosa, medindo aproximadamente 400  $\mu\text{m}$  e que se assume ser intrínseca à constituição do granito, ou seja, não gerada pelo processo de fabricação dos CP. Nota-se que os L encontrados são da mesma ordem de grandeza do comprimento das trincas (grosseiramente de  $\pm 0,4$  mm). No entanto, para o estabelecimento de alguma relação verdadeiramente criteriosa sobre este fato, um estudo em maior escala (com medição dos defeitos típicos de grandes quantidades de CP) devem ser executados.

Os  $K_I$  determinados para os CP entalhados em U profundo estão compatíveis com os encontrados na literatura pesquisada, PILKEY, et al. (2008), bem como para o caso dos CP entalhados em arco de círculo, encontrados em CARVALHO (2005). A pouca variação nos DP e CV refletem a preparação criteriosa nos entalhes dos CP. Diminuindo, como se esperava, à medida em que os entalhes se tornam menos afiados.

A tensão máxima média encontrada para o U profundo, 12,39 MPa, próxima ao valor de tensão característica média, 12,71 MPa, revela que o entalhe se comportou de fato como entalhe e não como trinca. Inesperadamente, as tensões máximas dos círculos apresentaram um valor muito abaixo dos lisos e do U profundo, demandando a necessidade de um estudo posterior mais detalhado sobre o comportamento da geometria desses CP. Essa variação da tensão nominal não se repete quando se calcula a tensão nominal predita utilizando-se o MP e o ML, que dão valores muito próximos entre si, o que nos sugere certa robustez no cálculo usando a TDC.



**Figura 41: Fotos em microscópio confocal de defeitos nos CPGA liso 10. Sendo A com aumento de 216x (escala 200 µm x 200 µm); e B e C (colorida) com aumento de 426x (escala 100 µm x 100 µm).**

Tabela 3: Resumo dos resultados encontrados para os CPGA.

Parâmetro	CP	Média	DP	CV
$\sigma_o$ (MPa)	LISO	12,71	1,79	14%
Carga Máxima Média (N)	LISO	2080	305	15%
	U Prof	620	82	13%
	Circ. Menor	484	172	36%
	Circ. Maior	411	237	58%
Carga Máxima dos CP com SG (N)	LISO (CP 10)	2289	-	-
	U Prof CP (CP 12)	650	-	-
	Circ. Menor (CP 11)	709	-	-
	Circ. Maior (CP 11)	na	na	na
Deformação máxima Dos CP com SG ( $\mu\epsilon$ )	LISO	354	-	-
	U Prof	299	-	-
	Circ. Menor	385	-	-
	Circ. Maior	na	na	na
$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	U Prof	0,35	0,06	18%
	Circ. Menor	0,34	0,12	35%
	Circ. Maior	0,38	0,22	58%
L (mm)	U Prof	0,25	0,09	36%
	Circ. Menor	0,25	0,14	55%
	Circ. Maior	0,36	0,26	71%
$K_t$	U Prof	3,27	0,10	3%
	Circ. Menor	1,35	0,03	2%
	Circ. Maior	1,19	0,01	1%
$\sigma_N$ (MPa)	U Prof	3,78	0,64	17%
	Circ. Menor	2,91	1,01	35%
	Circ. Maior	2,57	1,48	58%
$\sigma_{Máx}$ (MPa)	U Prof	12,39	0,64	5%
	Circ. Menor	3,94	1,01	26%
	Circ. Maior	3,06	1,48	49%
$\sigma_{N MP}$ (MPa)	U Prof	4,33	0,04	1%
	Circ. Menor	4,32	0,05	1%
	Circ. Maior	4,35	0,09	2%
$\sigma_{N ML}$ (MPa)	U Prof	4,42	0,08	2%
	Circ. Menor	4,47	0,09	2%
	Circ. Maior	4,47	0,17	4%

#### 4.2.2 – Resultados para os CPGC

Não foram encontrados na literatura valores típicos de tensão de flexão à 4 pontos para o granito chocolate (ou granito marrom absoluto), motivo pelo qual não foi possível compará-lo a valores típicos.

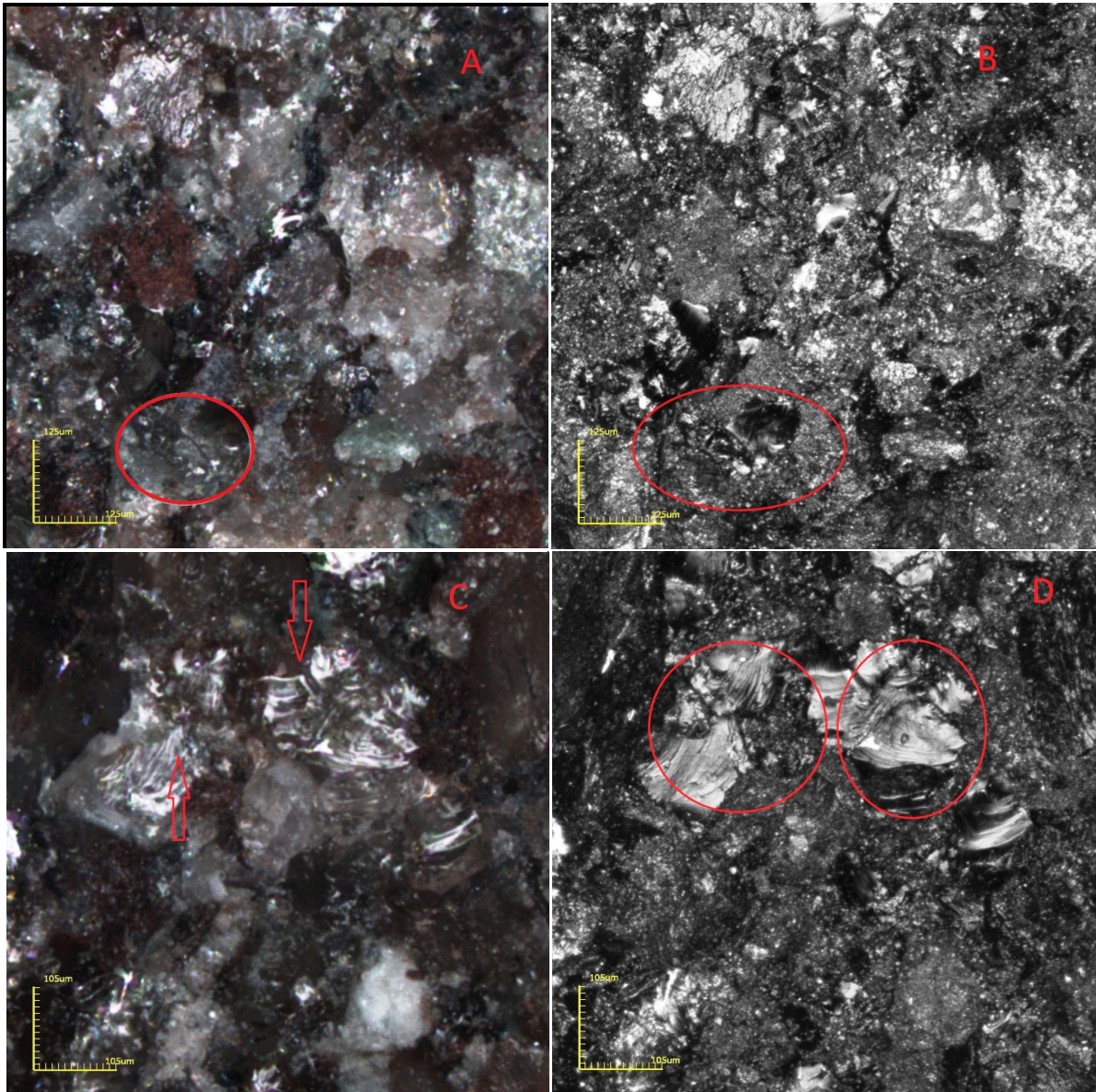
Os CPGC apresentaram valores de  $K_{IC}$  maiores que os CPGA (Tabela 4). Também houve, comparado aos CPGA, menor CV e dispersão entre os três tipos de corpos entalhados.

As micrografias da Figura 42 mostram microfraturas intrínsecas à constituição da rocha, grosseiramente entre 150  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , que não chegam a exceder muito o tamanho dos grãos de quartzo, sendo, portanto, pouco menores que as apresentadas nos CPGA. Assim, numa comparação com os valores de L obtidos para os CPGC, eles apresentaram maior DP e CV que no caso dos CPGA, mas também guardaram certa relação com os comprimentos de trincas, o que pode ser constatado observando as fotografias das rochas feitas em microscópio (Figura 42).

Os  $K_t$  tiveram praticamente a mesma margem de valores que os CPGA, com pouca dispersão entre os dados.

A análise comparativa realizada anteriormente para os CPGA, sobre as tensões máximas empíricas e as previstas pela TDC, pode ser estendida aos CPGC.





**Figura 42: Fotos em microscópio confocal de defeitos nos CPGC. A (colorida) e B – CPGC em círculo maior 8 com aumento de 345x (escala 125  $\mu\text{m}$  x 125  $\mu\text{m}$ ); e C (colorida) e D CPGC liso 13 com aumento de 420x (escala 105  $\mu\text{m}$  x 105  $\mu\text{m}$ ).**

Tabela 4: Resumo dos resultados encontrados para os CPGC.

Parâmetro	CP	Média	DP	CV
$\sigma_o$ (MPa)	LISO	21,82	1,43	7%
Carga Máxima Média (N)	LISO	3867	272	7%
	U Prof	941	68	7%
	Circ. Menor	1091	71	7%
	Circ. Maior	971	129	13%
Carga Máxima dos CP com SG (N)	LISO (CP 4)	3664	-	-
	U Prof (CP 20)	914	-	-
	Circ. Menor (CP 2)	1063	-	-
	Circ. Maior (CP 1)	845	-	-
Deformação máxima Dos CP com SG ( $\mu\epsilon$ )	LISO	547	-	-
	U Prof	434	-	-
	Circ. Menor	451	-	-
	Circ. Maior	447	-	-
$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	U Prof	0,49	0,04	8%
	Circ. Menor	0,70	0,05	7%
	Circ. Maior	0,80	0,10	13%
L (mm)	U Prof	0,16	0,02	15%
	Circ. Menor	0,33	0,04	14%
	Circ. Maior	0,43	0,10	24%
$K_t$	U Prof	3,21	0,12	4%
	Circ. Menor	1,37	0,01	1%
	Circ. Maior	1,19	0,01	1%
$\sigma_N$ (MPa)	U Prof	5,13	0,35	7%
	Circ. Menor	5,95	0,37	6%
	Circ. Maior	5,40	0,67	12%
$\sigma_{Máx}$ (MPa)	U Prof	16,48	1,48	9%
	Circ. Menor	8,16	0,53	6%
	Circ. Maior	6,40	0,82	13%
$\sigma_{N MP}$ (MPa)	U Prof	7,38	0,02	0%
	Circ. Menor	7,47	0,03	0%
	Circ. Maior	7,51	0,12	2%
$\sigma_{N ML}$ (MPa)	U Prof	7,48	0,04	1%
	Circ. Menor	7,66	0,06	1%
	Circ. Maior	7,73	0,12	2%

### 4.2.3 – Resultados para os CPGP

Devido às propriedades dos geopolímeros variarem intensamente de acordo com a mudança composicional (relação massa de agregado miúdo x massa total de sólidos e constituintes adicionais) não há valores de propriedades físicas de referência prontas na literatura para comparação com os aqui obtidos.

No entanto, observando os valores da Tabela 5, percebe-se que os resultados dos CPGP apresentaram as menores variações do valor de  $K_{IC}$  em comparação com os demais materiais testados, o que resulta de menores valores de tensão máxima.

Os valores de  $L$  encontrados apresentaram maior DP e CV que os casos anteriores, CPGA e CPGC, indicando maior variação do ponto de incidência da tensão de ruptura, como previsto pela TDC. Observa-se também neste caso que  $L$  também é da ordem dos comprimentos de trincas vistas nas Figura 43 e 44, que variam, grosseiramente entre 0,15 – 0,4 mm. Percebe-se nas micrografias das Figuras 21 e 22 que as trincas são intragranulares, ambas em grandes grãos de quartzo, geradas provavelmente durante o processo de fabricação do geopolímero.

Observa-se na Tabela 5 que os valores de  $K_t$  permaneceram praticamente inalterados, são bem parecidos com os calculados nos casos anteriores.

Para os CPGP não tivemos variação substancial entre os valores de tensão normal calculados a partir dos ensaios empíricos e os preditos pela TDC, indicando um maior ajuste do método ao material geopolímero que para os granitos.

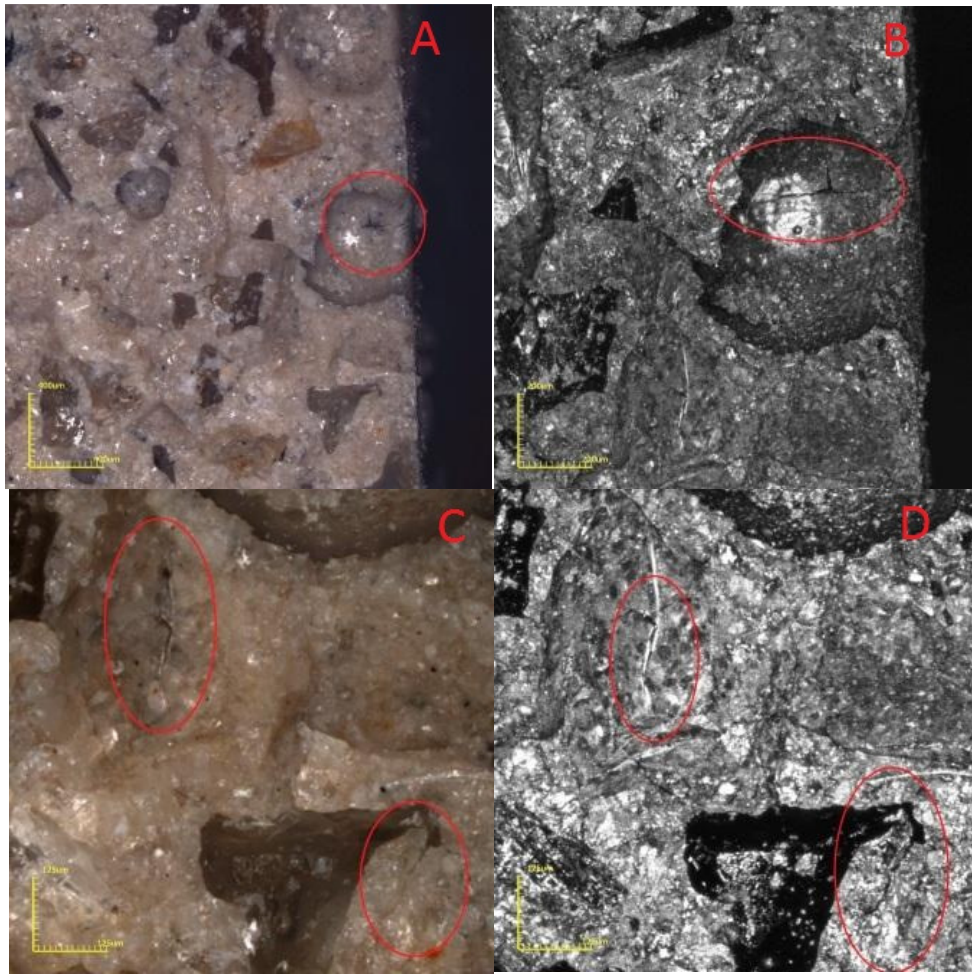


Figura 43: Fotos em microscópio confocal de defeitos no CPGP liso 19. A - 108x de aumento e escala de 400  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$ . B - 216x de aumento e escala de 200  $\mu\text{m}$  x 200  $\mu\text{m}$ . C (colorida) e D - 328x de aumento e escala de 125  $\mu\text{m}$  x 125  $\mu\text{m}$ .

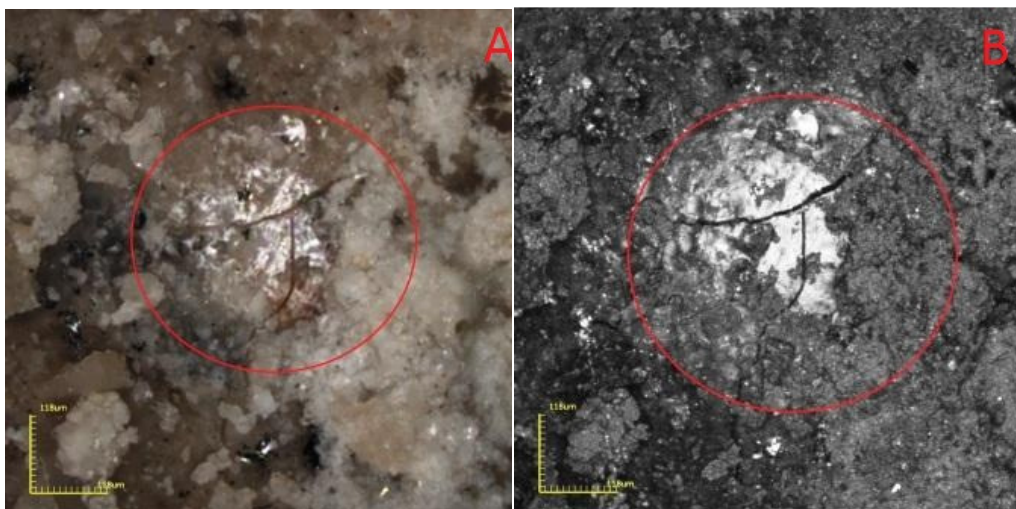


Figura 44: Fotos em microscópio confocal de defeitos no CPGP em U profundo 2, A (colorida) e B (preto e branco) com 367x de aumento e escala de 118  $\mu\text{m}$  x 118  $\mu\text{m}$ .

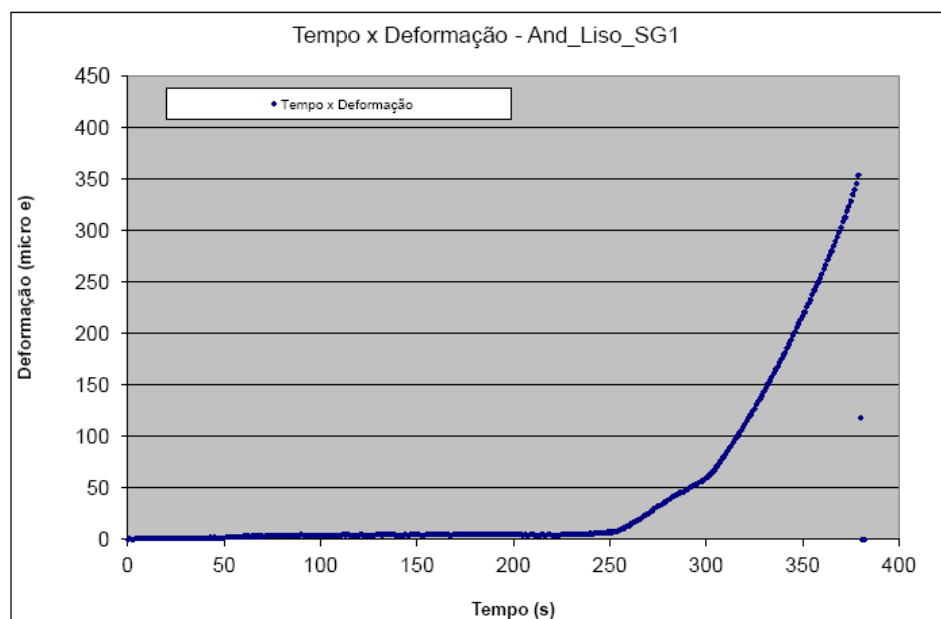
Tabela 5: Resumo dos resultados encontrados para os CPGP.

Parâmetro	CP	Média	DP	CV
$\sigma_o$ (MPa)	LISO	3,13	0,65	21%
Carga Máxima Média (N)	LISO	517	111	21%
	U Prof	179	26	14%
	Circ. Menor	161	65	40%
	Circ. Maior	180	28	16%
Carga Máxima dos CP com SG (N)	LISO (CP 1)	406	-	-
	U Prof (CP 1)	147	-	-
	Circ. Menor (CP 1)	188	-	-
	Circ. Maior (CP 3)	159	-	-
Deformação máxima Dos CP com SG ( $\mu\epsilon$ )	LISO (CP 1)	389	-	-
	U Prof (CP 1)	490	-	-
	Circ. Menor (CP 1)	594	-	-
	Circ. Maior (CP 3)	544	-	-
$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	U Prof	0,10	0,01	14%
	Circ. Menor	0,11	0,04	39%
	Circ. Maior	0,15	0,02	16%
L (mm)	U Prof	0,33	0,09	28%
	Circ. Menor	0,49	0,30	62%
	Circ. Maior	0,71	0,22	31%
$K_t$	U Prof	3,15	0,10	3%
	Circ. Menor	1,33	0,03	2%
	Circ. Maior	1,26	0,01	1%
$\sigma_N$ (MPa)	U Prof	1,07	0,14	13%
	Circ. Menor	0,95	0,36	38%
	Circ. Maior	1,08	0,17	16%
$\sigma_{Máx}$ (MPa)	U Prof	3,37	0,49	14%
	Circ. Menor	1,26	0,50	39%
	Circ. Maior	1,35	0,22	16%
$\sigma_{N MP}$ (MPa)	U Prof	1,07	0,01	1%
	Circ. Menor	1,08	0,03	2%
	Circ. Maior	1,10	0,02	2%
$\sigma_{N ML}$ (MPa)	U Prof	1,10	0,02	2%
	Circ. Menor	1,12	0,05	4%
	Circ. Maior	1,16	0,04	3%

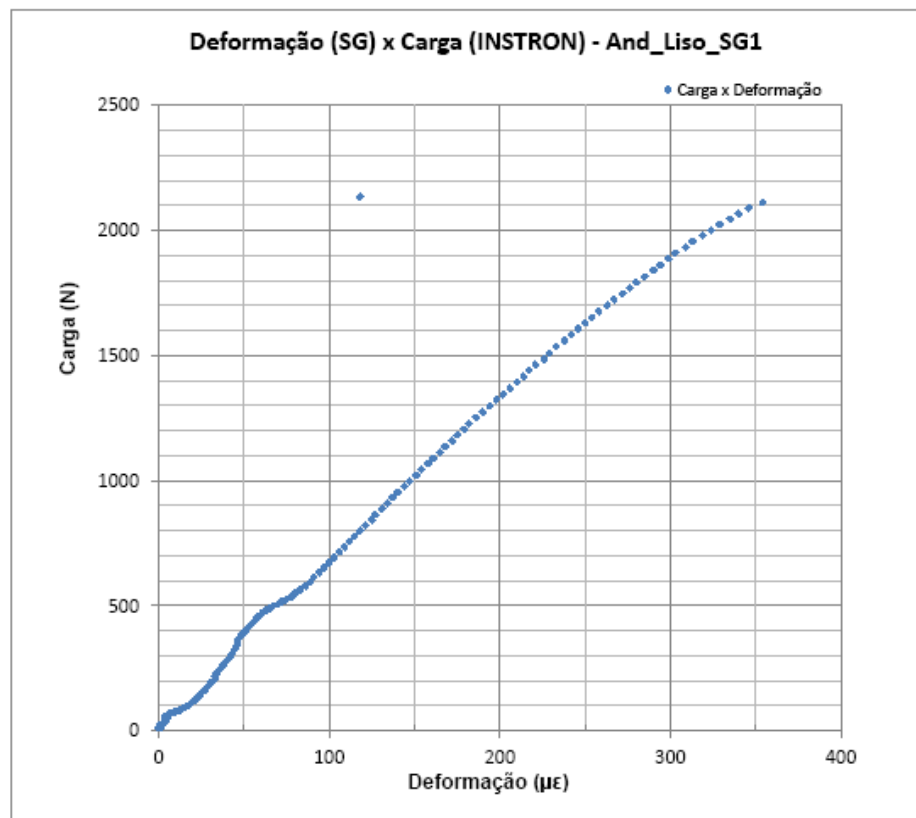
### 4.3 – Discussão sobre os Resultados dos ensaios com SG ( $\epsilon$ x t e $F_{(INSTRON)} \times \epsilon_{(SG)}$ )

De forma a aproveitar e complementar o estudo detalhado dos patamares de deslocamento x carga realizado para os materiais e geometrias apresentadas, foram colados SG no centro da superfície de compressão de cada um dos espécimes testados e avaliado seu comportamento durante os ensaios. Os resultados estão apresentados na forma de gráficos de  $\epsilon_{(SG)} \times t$  e  $F_{(INSTRON)} \times \epsilon_{(SG)}$  e são discutidos a seguir.

A Figura 45, para o ensaio do CPGA liso 11, mostra uma queda brusca da deformação logo após a ruptura do CP, praticamente sem variações na deformação durante o processo de iniciação e propagação da fratura, fazendo com que não haja anomalias no comportamento linear apresentado na Figura 46.



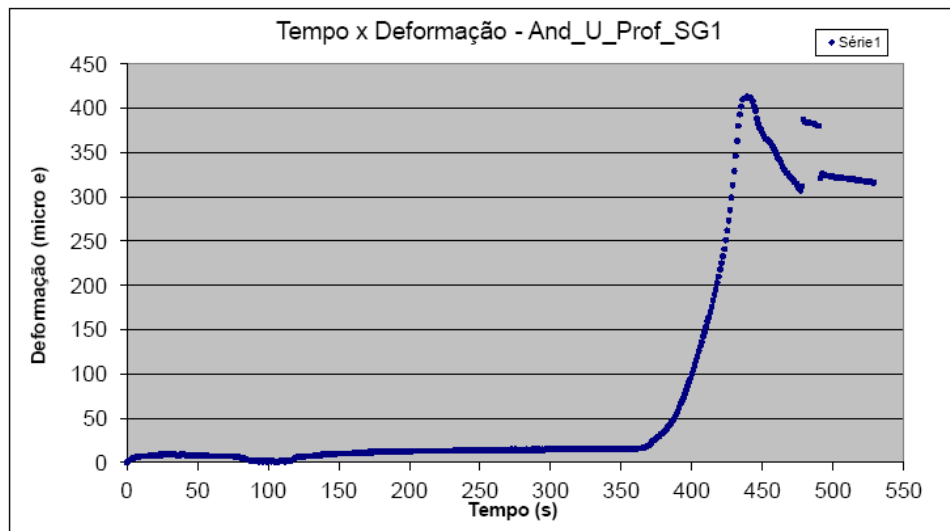
**Figura 45: Curva Tempo (s) x Deformação (*microstrain*) obtida do ensaio com SG para o CPGA Liso 11.**



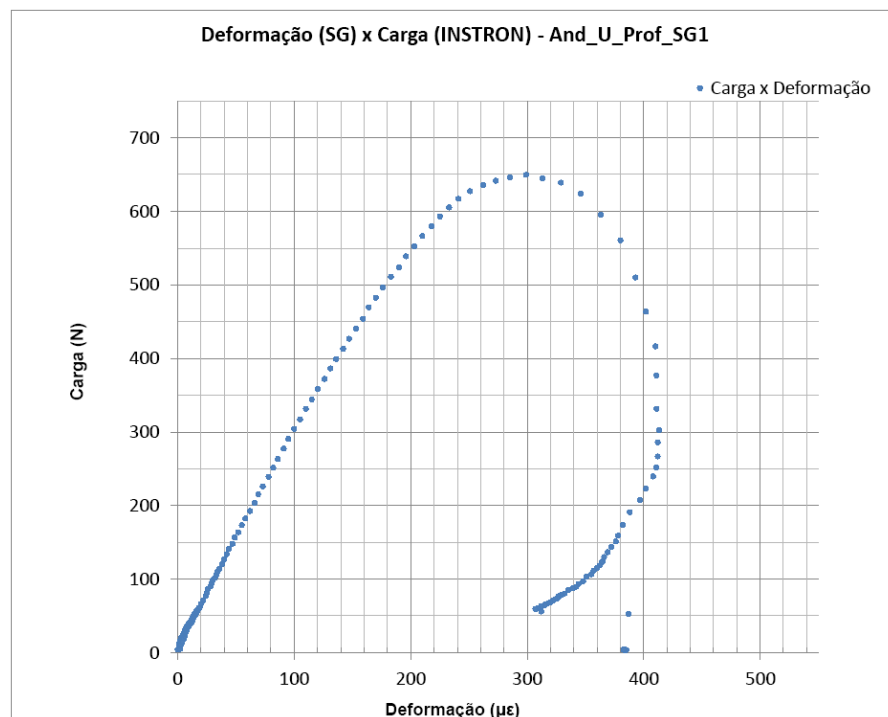
**Figura 46: Curva Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGA Liso 11.**

Na Figura 47, para o CPGA em U profundo 12, temos uma queda mais suave das deformações lidas pelo SG depois de atingida a tensão última. Isso provocou um “efeito em espiral”<sup>6</sup> observado nos pontos do gráfico da Figura 48. O desvio da linearidade acontece quando é atingida a carga máxima suportada pelo CP. Em um paralelo com o comportamento típico apresentado pelos CPGA liso, Figura 25, podemos observar que o patamar não elástico é mais arredondado que no caso do CP liso, sugerindo que a existência do patamar não elástico arredondado no gráfico tensão x deformação está associado ao comportamento espiral do gráfico  $F \times \epsilon_{(SG)}$ .

<sup>6</sup> As aspas se devem ao fato do termo ter sido cunhado aqui para referir-se a este comportamento, não sendo um comportamento com uma nomenclatura definida na literatura.



**Figura 47: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGA em U profundo 12.**

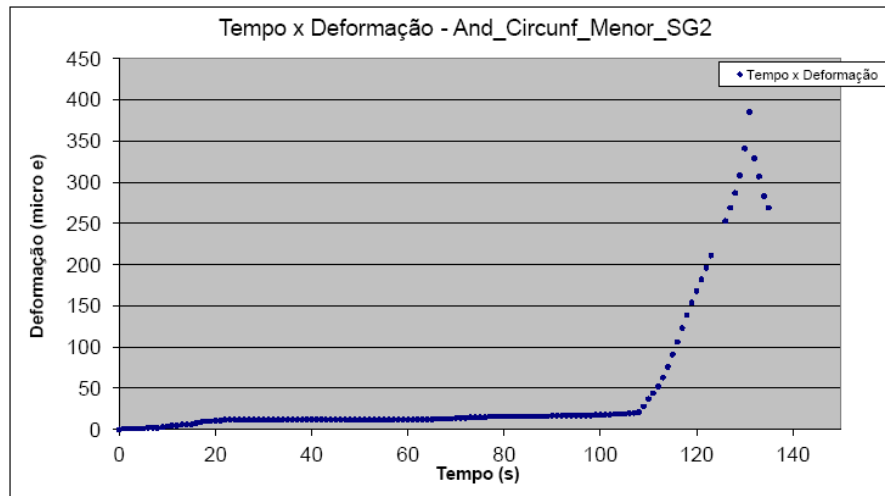


**Figura 48: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGA em U profundo 12.**

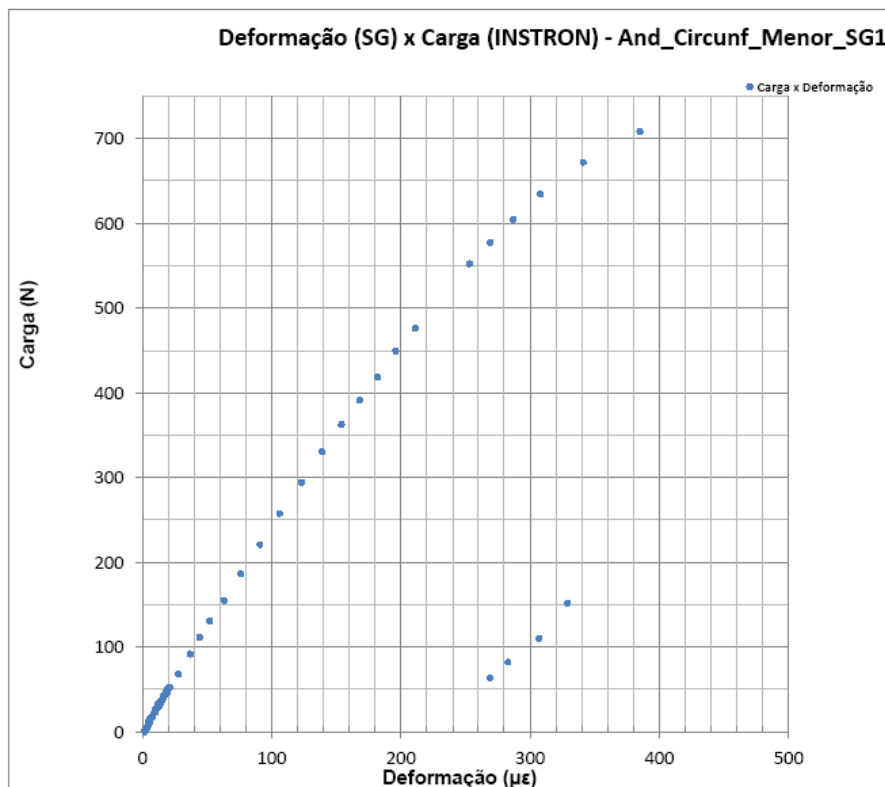
Na Figura 49 para o CPGA entalhado em círculo menor 11, também se observa um pico de deformação seguido de queda após iniciação da fratura, no entanto com pouca densidade de pontos lidos, o que sugere que o processo de fratura aconteceu muito rápido. Assim, a Figura 50 também ficou prejudicada, com poucos pontos representativos do processo de fratura. O gráfico de força x



deslocamento do CPGA entalhado em círculo menor 11 mostrou pico abrupto próximo à fratura, o que também pode indicar um curto processo de fratura.



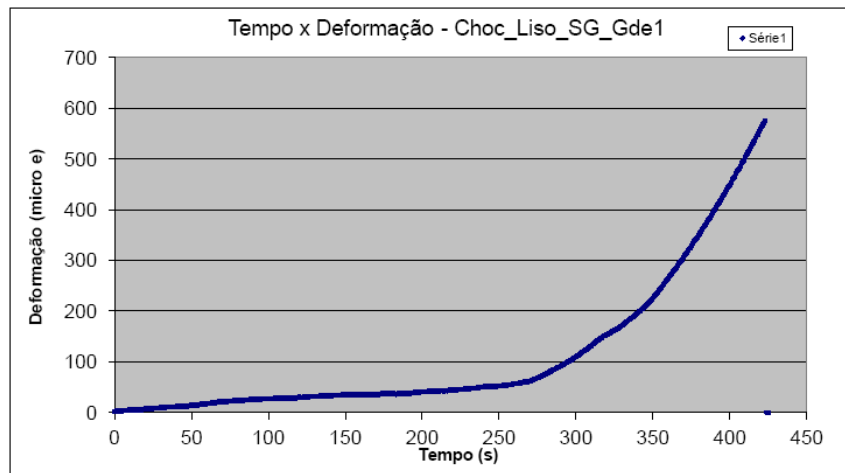
**Figura 49: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGA em círculo menor 11.**



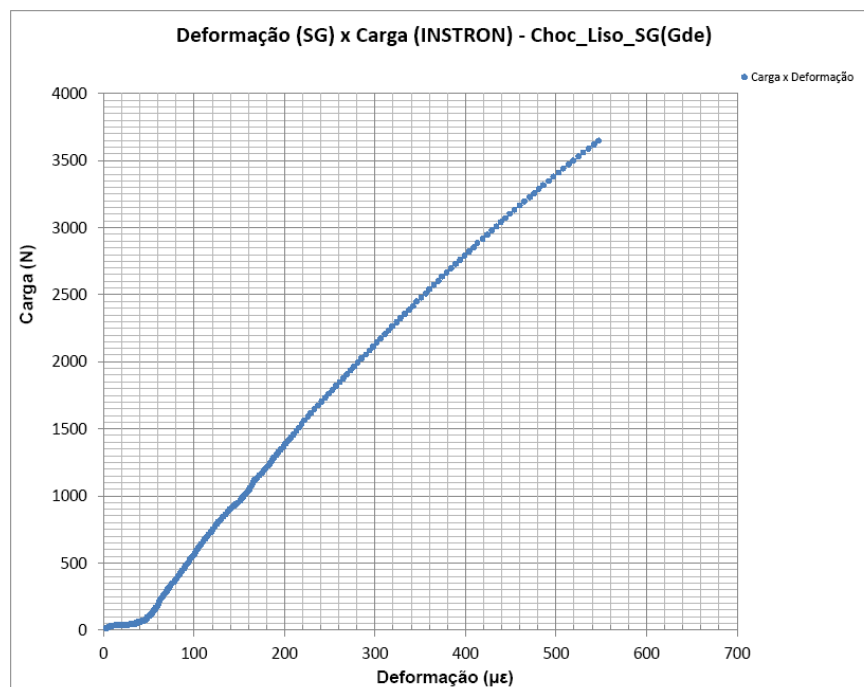
**Figura 50: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGA em círculo menor 11.**

Nos CP das Figuras 51 e 52, 53 e 54 ocorreu o mesmo processo que para o das Figuras 45 e 46. Analisando os arquivos gerados pelo SG *Indicator*, não foram

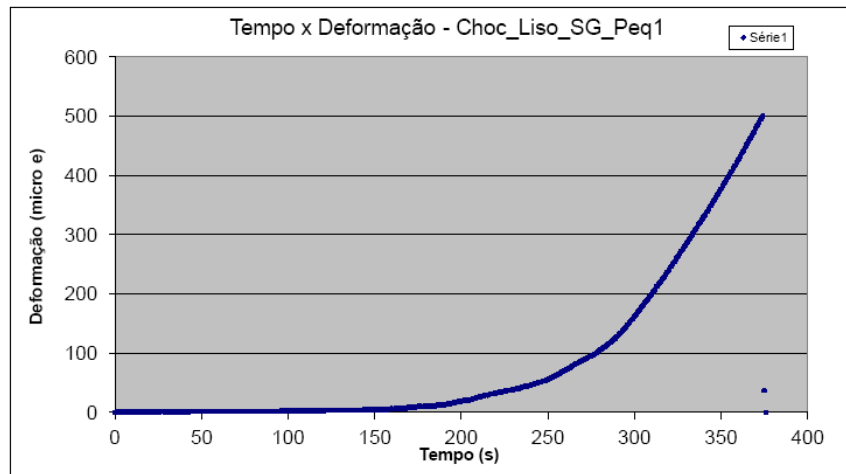
constatados diferenças na densidade e qualidade de dados obtidos para SG de diferentes tamanhos.



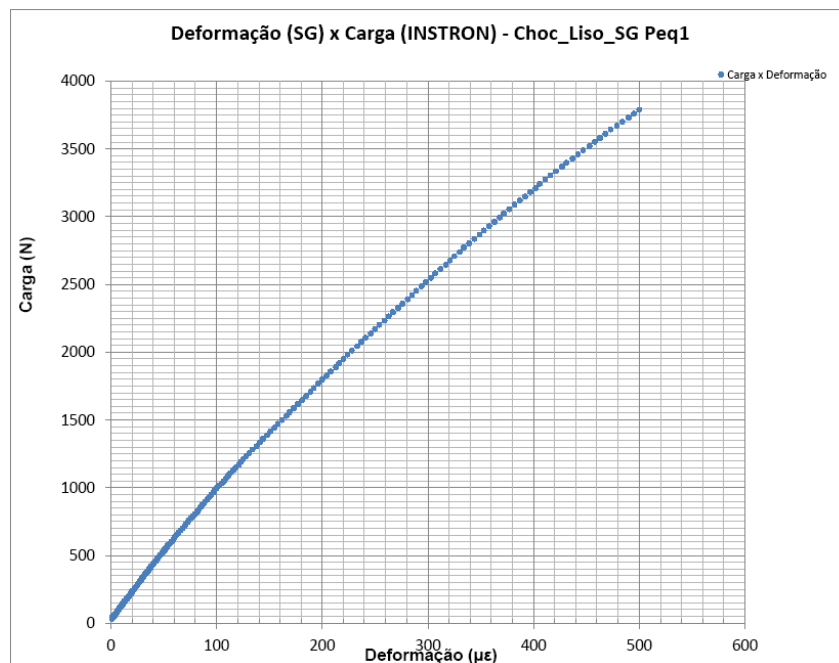
**Figura 51: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 4.**



**Figura 52: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 4.**

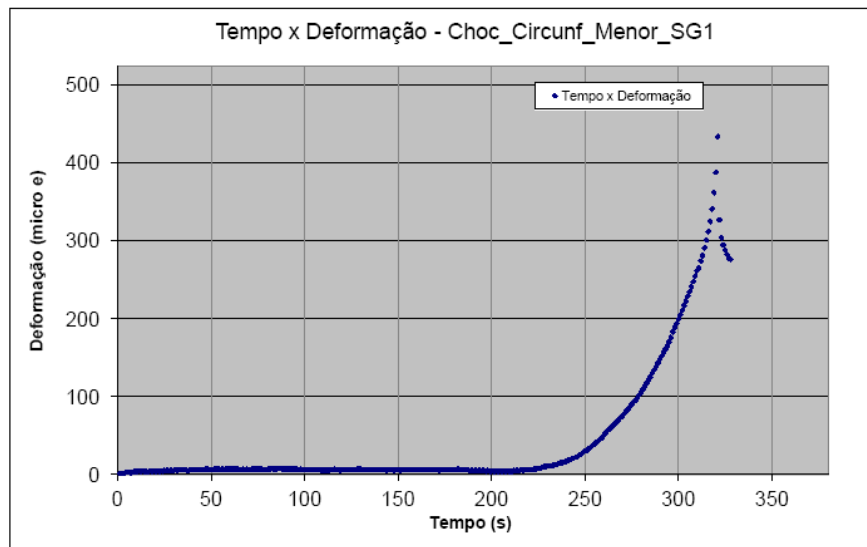


**Figura 53: Curva Tempo (s) x Deformação (*microstrain*) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 8.**

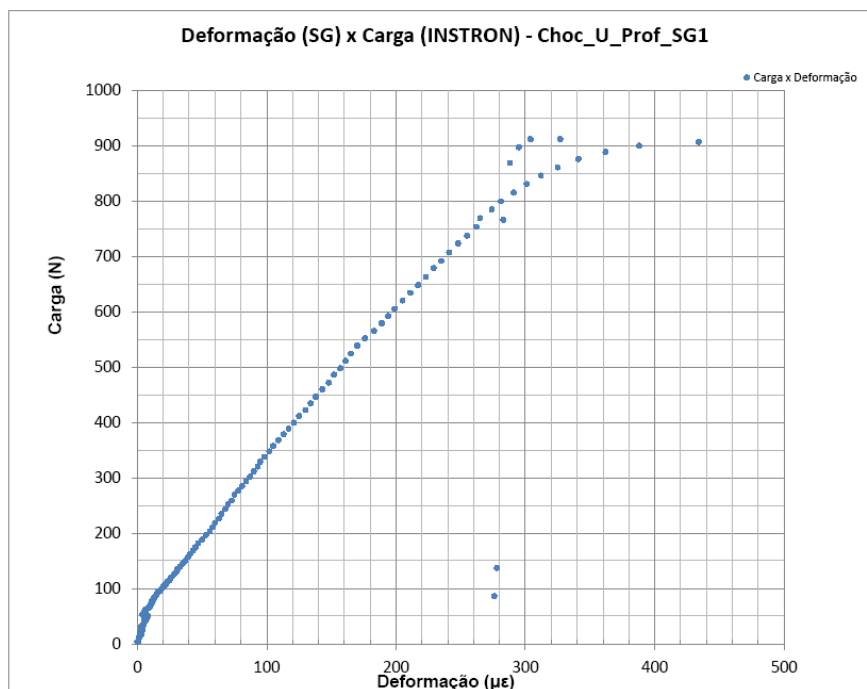


**Figura 54: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC liso 8.**

No caso da Figura 55 e da Figura 56 também tivemos baixa densidade de dados durante o processo de fratura, mas ainda é possível observar certo pico na Figura 55 e uma região não linear bem definida na Figura 56, o que está associado a um processo de fratura com um pico de tensão mais suave que nos CPGC lisos.

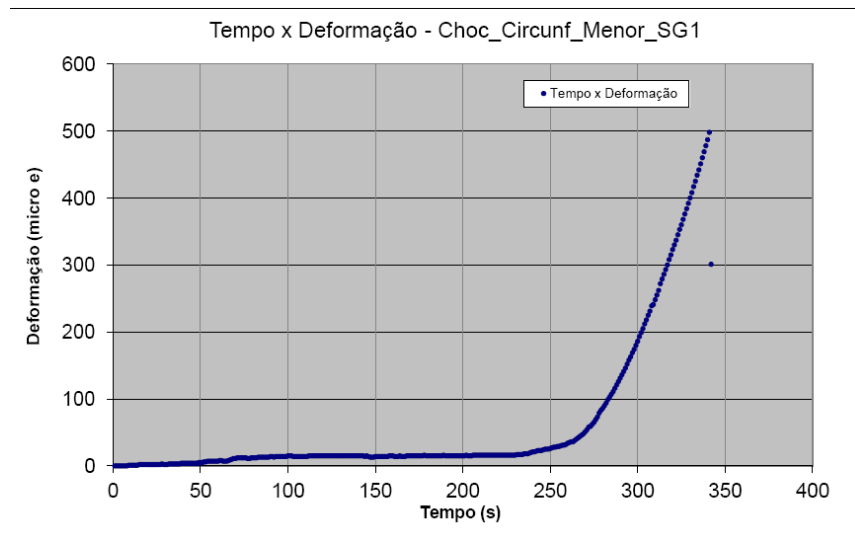


**Figura 55: Curva Tempo (s) x Deformação (*microstrain*) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em U profundo 20.**

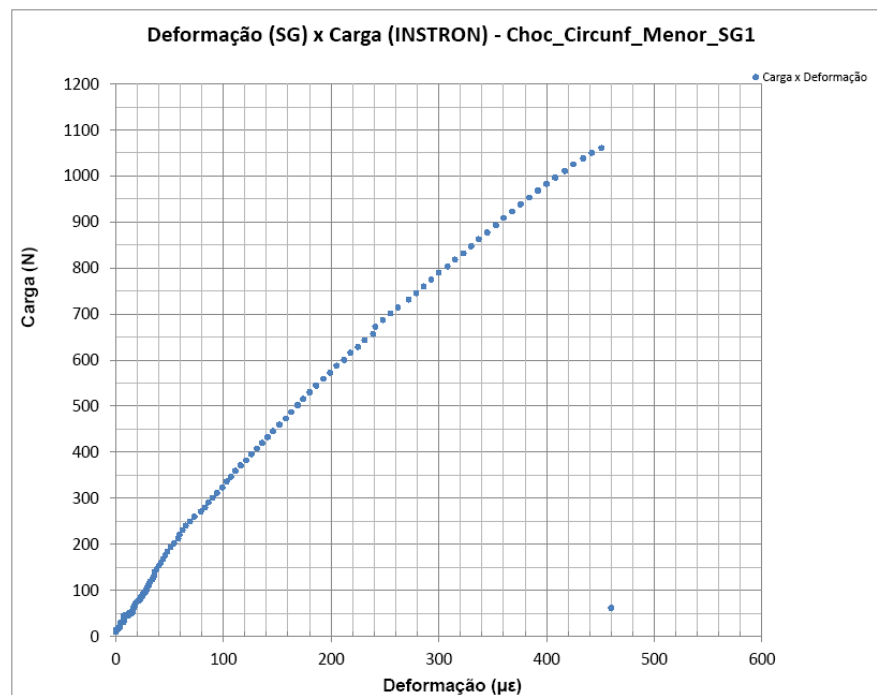


**Figura 56: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em U profundo 20.**

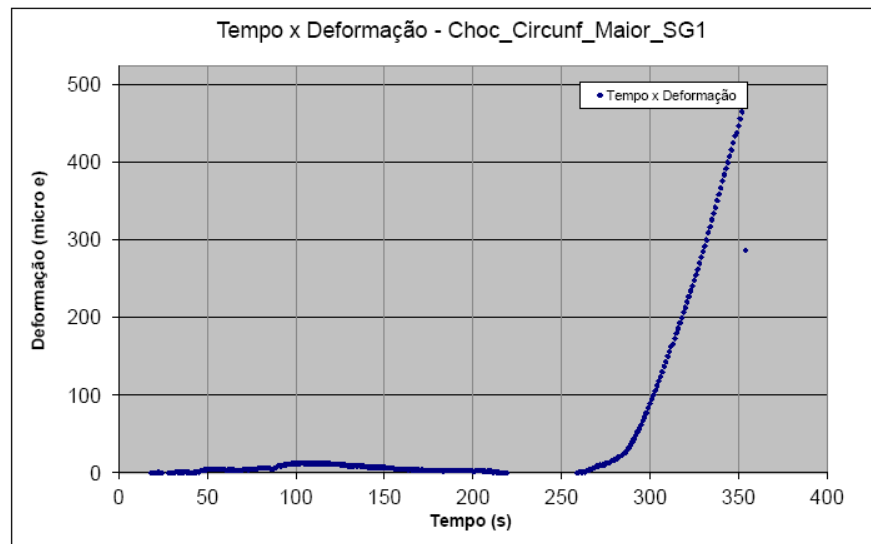
Nos CP da Figura 57 e Figura 58, e Figura 59 e Figura 60, entalhados respectivamente em círculo menor e maior, também não ocorreu a formação de patamar de fratura não linear. Isto também pode ser verificado comparando com seus gráficos típicos de deformação x força (INSTRON), que possuem picos de fratura bem afiados.



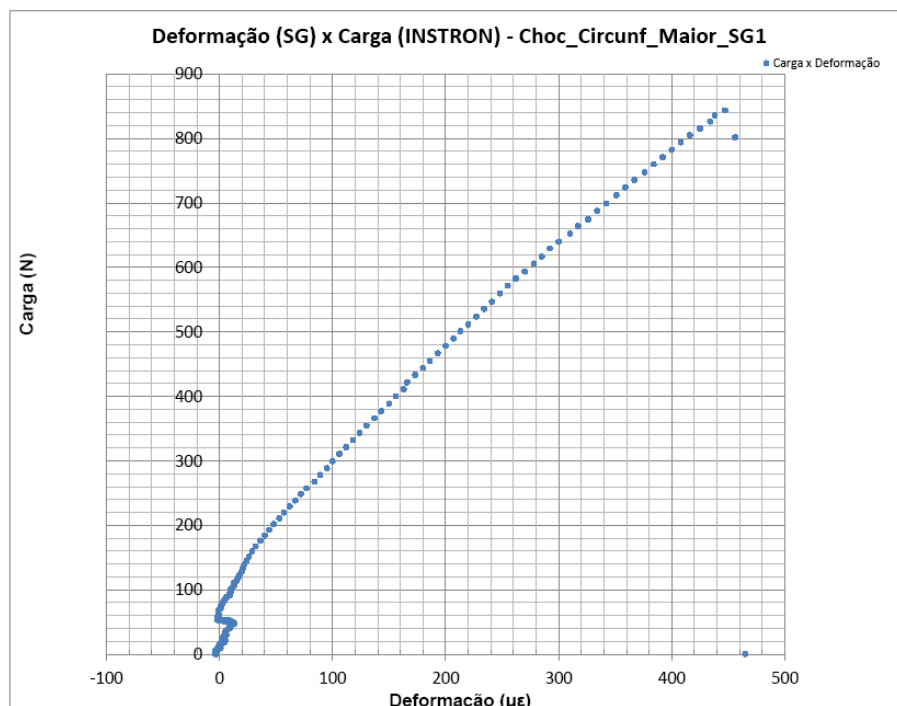
**Figura 57: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo menor 2.**



**Figura 58: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo menor 2.**



**Figura 59: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo maior 1.**



**Figura 60: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGC entalhado em círculo maior 1.**

A mesma abordagem explicada para a Figura 47 e Figura 48 pode ser dada para todos os casos ensaiados de geopolímeros, Figura 61 a Figura 70, nas quais tivemos a formação dos patamares não elástico bem definidos. Seus respectivos gráficos carga x deslocamento possuem região de fratura pouco afiados, de acordo, portanto, com o comportamento em espiral observado nos gráficos Carga x deformação (SG).

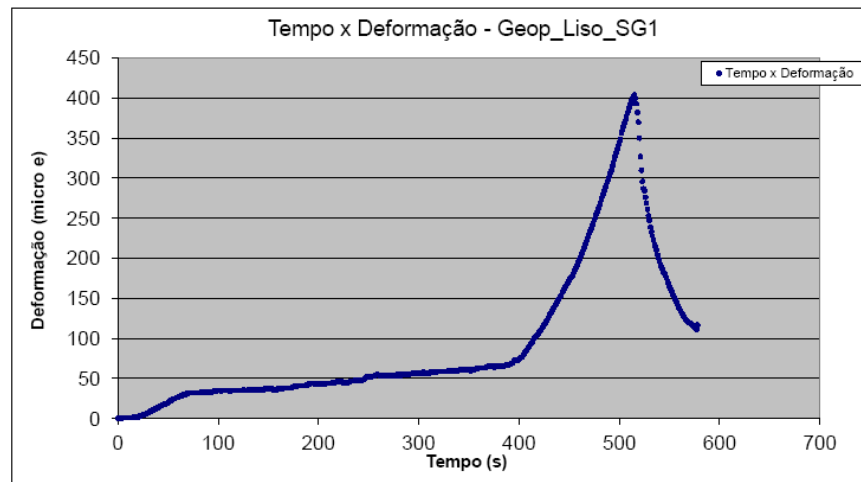
A pesquisa de casos similares na literatura, como o realizado por TANAKA, *et al.* (2002), que estudaram estes efeitos para carbetos de silício com 37% de porosidade, com entalhes afiados que variavam entre 0,1 a 2,8 mm e também sobre flexão à 4 pontos. Eles concluíram que os processos de fratura que se iniciavam a partir do entalhe aconteciam somente nos casos em que o entalhe era ligeiramente maior (0,4 mm) que o tamanho do grão, que eram de aproximadamente 0,1 – 0,2 mm. Neste estudo eles afirmam que o início da não linearidade na relação carga-deformação (SG) corresponde ao processo de iniciação das trincas que se formaram a partir do entalhe.

Portanto, a curvatura após início da fratura (surgimento deste “efeito espiral”, como descrito por TANAKA, *et al.*, 2002) observada no gráfico Força (INSTRON) x deformação (SG) está associado à extensão e suavidade do pico do patamar não linear formado no gráfico tensão x deformação obtido a partir da INSTRON, por conseguinte, à existência do processo de fratura não linear no CP. Sendo que, quanto mais suave a curva do patamar de fratura formado no gráfico tensão x deformação, mais definido se apresenta o comportamento em “espiral” do gráfico Carga (N) x deformação (SG).

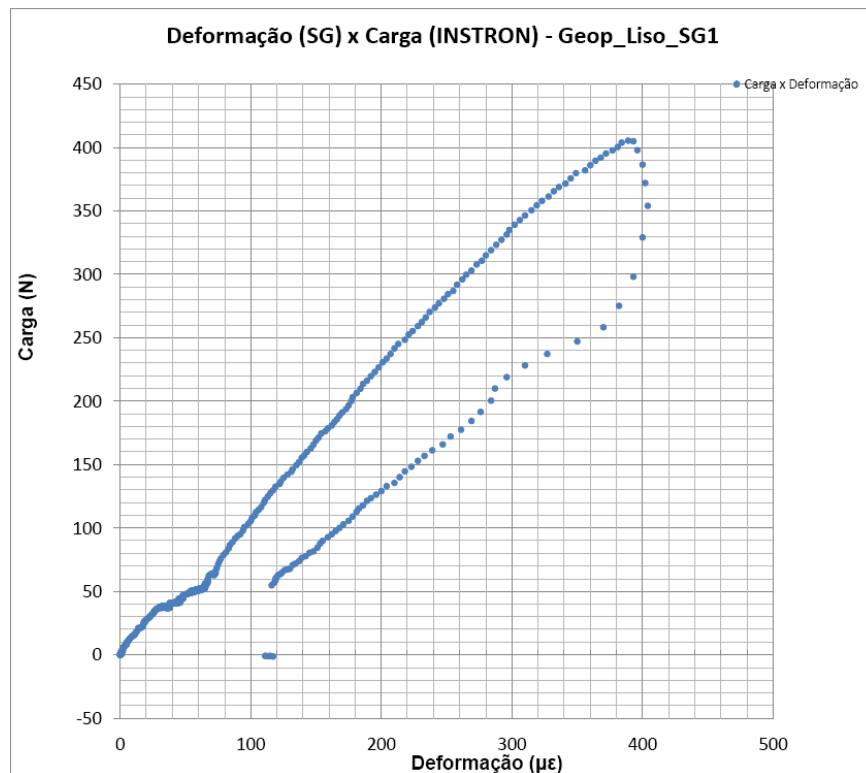
Pode-se perceber, portanto, que os mesmos efeitos observados por TANAKA (2002) aparecem nos granitos e geopolímeros aqui testados, mesmo trabalhando com entalhes não afiados. Por conseguinte, esta análise pode ajudar a identificar se a trinca de fato iniciou na face do CP submetida à tração ou foi resultante de mecanismos internos gerados pela ocorrência de defeitos intrínsecos (trincas ou microfraturas internas pré-existentes) nos materiais testados.

A formação ou não de patamares não elásticos (surgimento do “efeito espiral”) após o ponto de carga máxima, nos sugere que a formação do patamar pode não estar associada com a geometria do entalhe, mas sim com o ponto a partir do qual se inicia o processo de fratura.

Conclusivamente, outra utilidade essencial do uso de SG, analisando os gráficos de  $F$  (INSTRON) x  $\epsilon_{(SG)}$ , se relaciona a capacidade deste gráfico fornecer subsídios para a determinação do ponto onde a linearidade termina e se inicia a propagação da fratura na região não linear até rompimento completo do CP.



**Figura 61: Curva Tempo (s) x Deformação (*microstrain*) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 1.**



**Figura 62: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 1.**



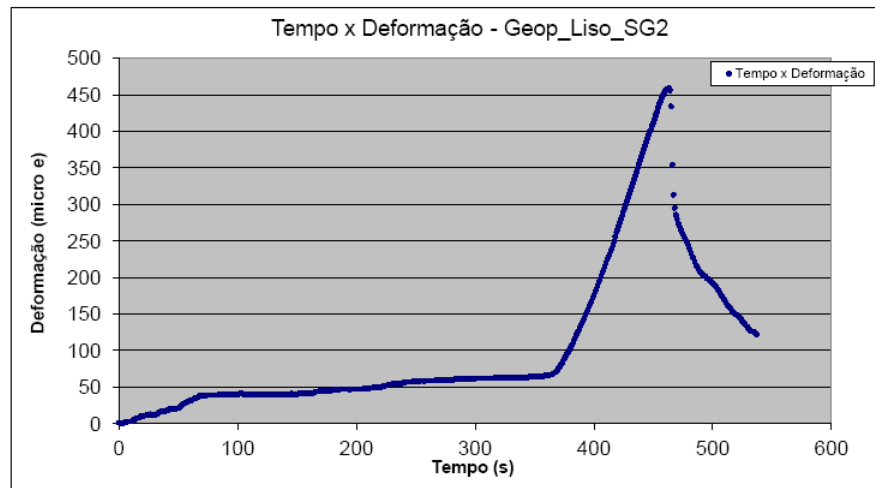


Figura 63: Curva Tempo (s) x Deformação (*microstrain*) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 2.

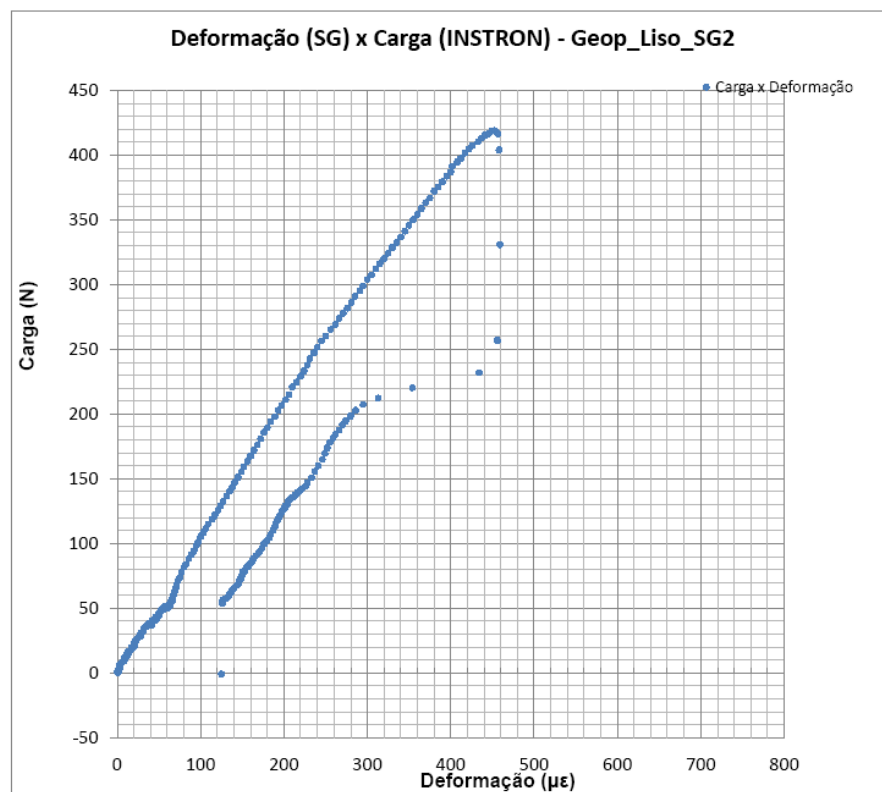
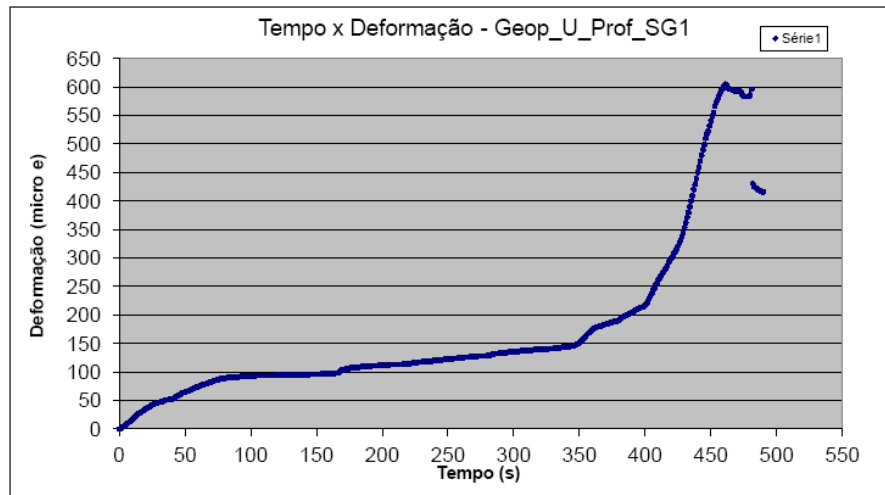
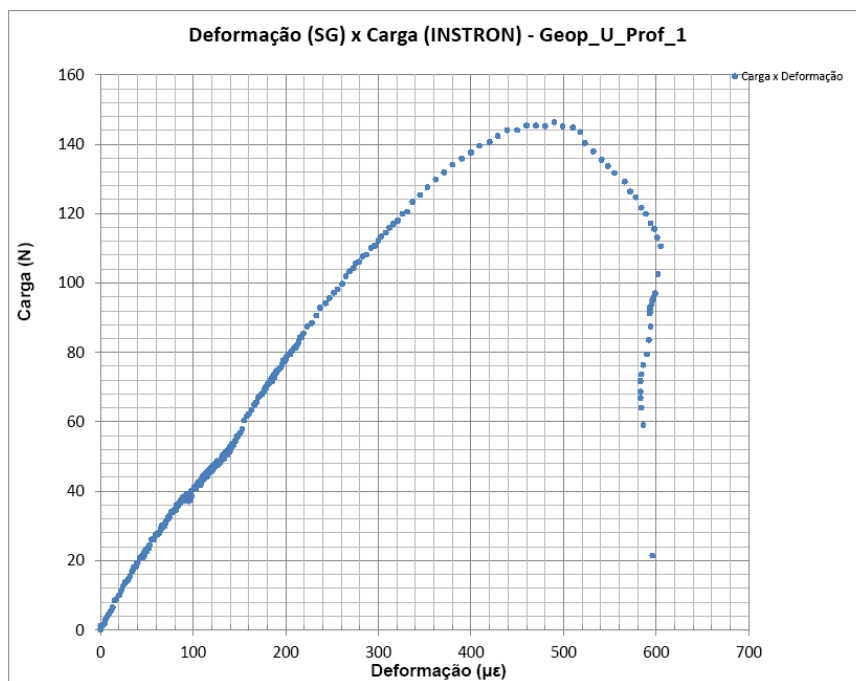


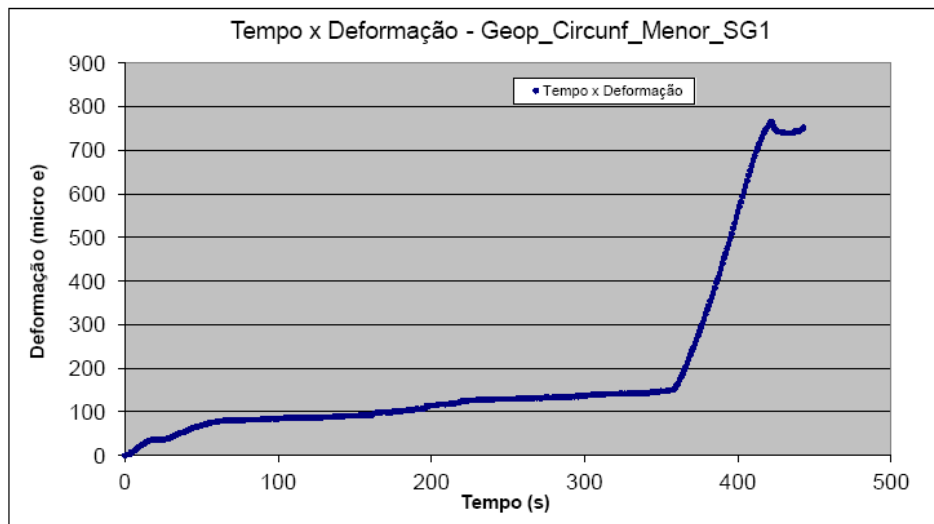
Figura 64: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP Liso 2.



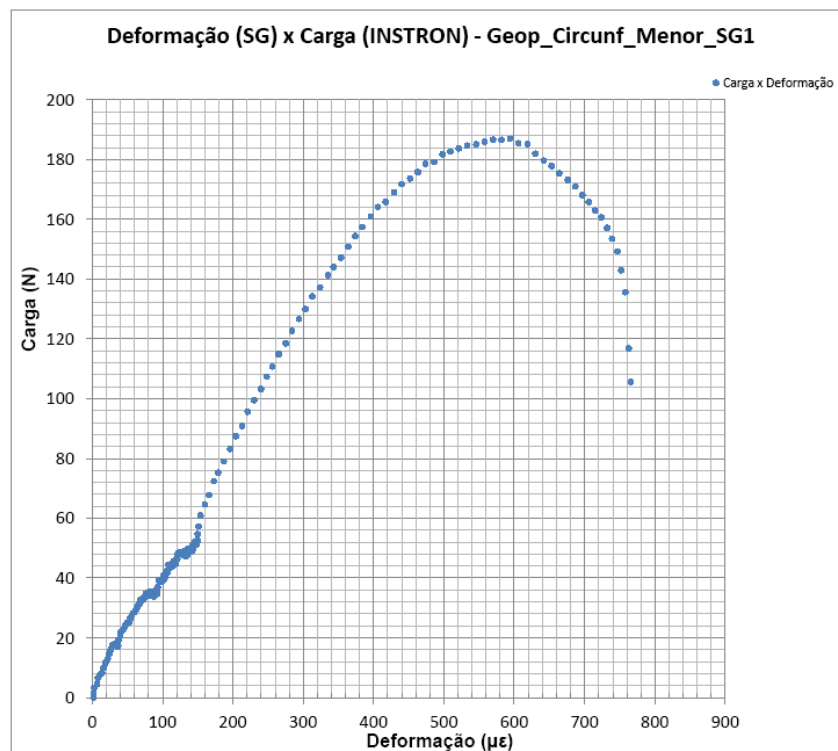
**Figura 65: Curva Tempo (s) x Deformação (*microstrain*) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em U profundo 1.**



**Figura 66: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em U profundo 1.**



**Figura 67: Curva Tempo (s) x Deformação (microstrain) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo menor 1.**



**Figura 68: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo menor 1**

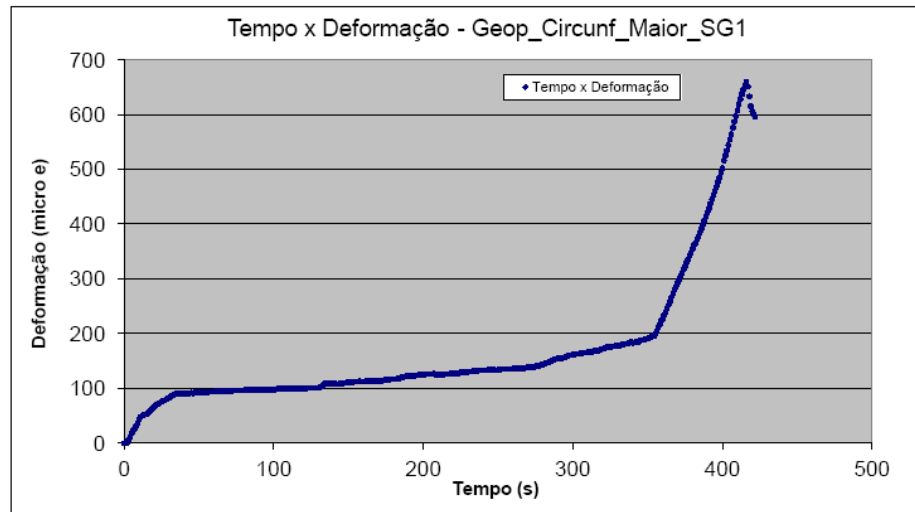


Figura 69: Curva Tempo (s) x Deformação (*microstrain*) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo maior 3.

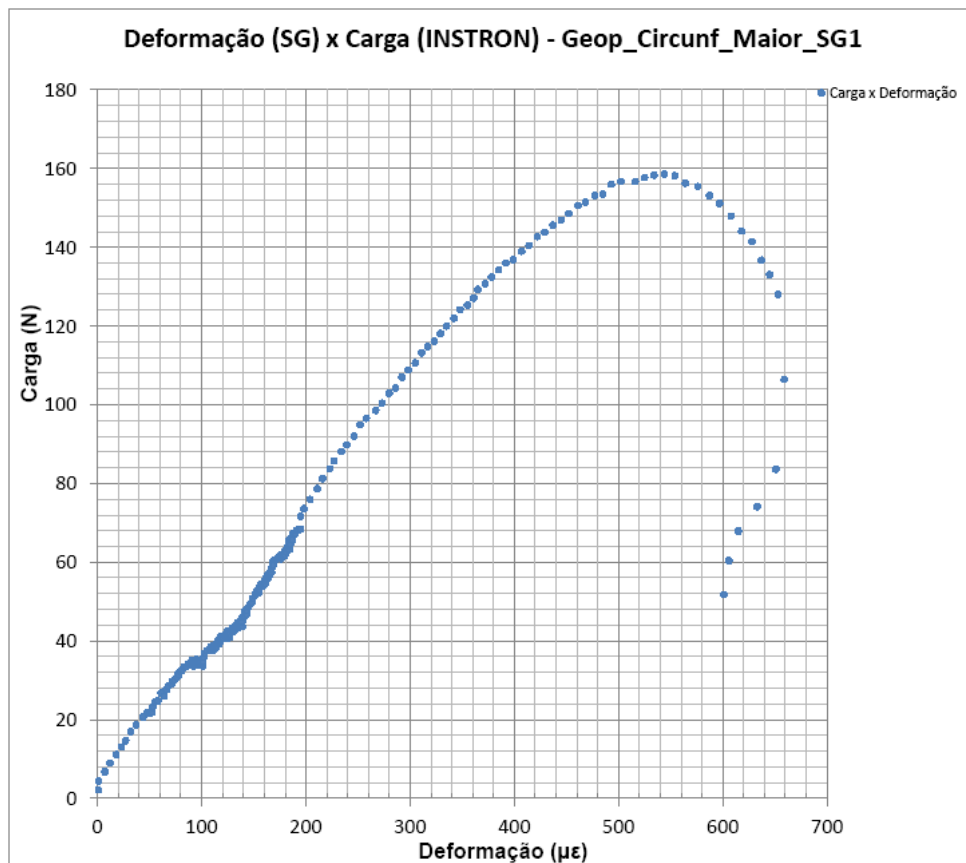


Figura 70: Deformação (SG) x Força de flexão (INSTRON) obtida do ensaio com SG para o CPGP entalhado em arco de círculo maior 3

## ***CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES***

Observou-se que o formato das curvas e a existência de patamares nas curvas deslocamento x carga dos três materiais estudados, apresentaram semelhanças entre si quando à forma, como seria esperado para tais materiais semi-frágeis.

Os resultados dos gráficos de deslocamento x carga também mostram que atenção especial deve ser dada à preparação dos corpos de prova, uma vez que mínimos defeitos na superfície do corpo de prova, ou microfraturas geradas pelo processo de fabricação dos entalhes, geram os gráficos atípicos aqui discutidos.

Os resultados relativos à carga e deformação máxima, guardaram certa semelhança nos resultados apresentados nos três tipos de materiais estudados. No caso das deformações medidas nos corpos com SG, as deformações máximas apresentaram valores próximos entre si, o que era esperado. O valor da deformação para o entalhe em U profundo foi o menor, pois o entalhe se aproxima de uma trinca e apresenta uma zona de processamento de fratura responsável pela não linearidade nos comportamentos observados nos gráficos deslocamento x carga. Também foi observado que os valores obtidos para as cargas de ruptura, é maior no CP liso e mantém uma proporção entre 3 e 4 vezes a carga observada nos CP entalhados.

O uso de SG e da análise dos gráficos tempo x deformação (SG) e F (INSTRON) x deformação (*Strain Gage*) pode fornecer informações valiosas sobre o processo de iniciação, propagação da fratura e de mecanismos associados à região não linear da fratura.

Também na análise dos resultados dos gráficos de Força (INSTRON) x deformação (*Strain Gage*), foi observado que mesmo os materiais sem entalhe apresentam um limite onde o material ainda se encontra íntegro, e este é abaixo da tensão máxima ou tensão de ruptura.

Não foi observado diferença nos resultados quando se variou a taxa de carregamento (velocidade) nas taxas de 0,1 mm/min e 0,5mm/min para os materiais testados. Também nenhuma alteração significativa quanto ao uso do SG menor em

relação ao SG maior, o que sugere que a distribuição de deformações na região compressiva não apresenta gradientes significativos.

A teoria da distância crítica funcionou razoavelmente bem para os materiais testados, apresentando erros de predição progressivamente maiores quanto menos agressivos os entalhes envolvidos, o que era teoricamente esperado.

Dentre os materiais testados, os corpos de prova de geopolímeros apresentaram os melhores valores de predição quando comparados aos valores de tensão empíricos.

Por fim, foi demonstrado aqui que, mesmo utilizando materiais com alto índice de anisotropia, a teoria da distância crítica pode ser utilizada com razoáveis percentuais de acerto para determinar propriedades mecânicas dos materiais com um grande número de defeitos e defeitos de tamanhos variáveis associados.

## ***CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES***

A partir dos resultados aqui obtidos, o autor sugere como desenvolvimento natural para esta pesquisa:

- Um trabalho estatístico de análise em microscópio das fraturas apresentadas em cada corpo de prova de modo a verificar se é possível correlacionar os comprimentos dos defeitos intrínsecos dos materiais testados com a dimensão crítica característica ( $L$ ) calculada para cada material.
- Testar materiais com população de defeitos mais homogênea a fim de avaliar melhor a aplicação da TDC e comparar com materiais como os aqui estudados.
- Executar outros tipos ensaios laboratoriais para caracterização detalhada das propriedades físicas dos materiais estudados e realizar estudo das tensões de ruptura, deformações, comprimentos de defeitos característicos e distâncias críticas obtidos nos ensaios empíricos para comparar com os resultados obtidos simulando corpos de prova em softwares que utilizem o MEF.
- Trabalhar com CP que apresentem melhor acabamento e controle geométrico mais apurado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIROCHAS.** [http://www.abirochas.com.br/rocha.php?rocha\\_id=93](http://www.abirochas.com.br/rocha.php?rocha_id=93). 24 de Janeiro de 2013
- ANDERSON, T. L.** Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications. CRC Press, 2005. - 3rd ed.
- BECK, J. C. P. e SILVA I. N. L.** Extensômetros de Resistência elétrica. Parte 3: Características de Resposta, parâmetros de escolha e exemplos de aplicação. Mecatrônica Atual - 2008-c - 02 de Dezembro de 2011. - [www.mecatronicaatual.com.br](http://www.mecatronicaatual.com.br).
- BEEK, J. C. P. e SILVA I. N. L.** Extensômetros de Resistência Elétrica - Parte 2: Tipos comerciais, codificação e desempenho. Mecatrônica Atual - 2008-b - 2011 de Dezembro de 02. <http://www.mecatronicaatual.com.br>.
- BEEK, J. C. P. e SILVA, I. N. L.** Extensômetros de Resistência Elétrica - Operação, Constituintes e Seleção. Mecatrônica Atual - 2008-a - 2011 de Dezembro de 02. <http://www.mecatronicaatual.com.br>.
- BRUSAMARELLO, V. et. al.** Extensometria - Célula de Carga. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da UCS, 2004.
- CALLISTER, JR. W. D.** Ciência e Engenharia de Materiais. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2000. 5ª Edição.
- CARVALHO, E. A.** Determinação de Fatores de Intensificação e Concentração de Tensões Para Entalhes do Tipo "V", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 1992.
- CARVALHO, E. A.** Stress concentration factors for an internally pressurized circular vessel containing a radial U-notch. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 82, n. 7, p. 517-521, jul. 2005.
- CARVALHO, E. A. et al.** Determinação de Fatores de Concentração de Tensão em Entalhes Circulares em Rochas Ornamentais. 11ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. ABENDI, 2009.
- CASTRO, J. T. P. e MEGGIOLARO M. A.** FADIGA - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço. 2009. Volume I - Iniciação de Trincas.
- DAILLY, J. W. e RILEY W. F.** Experimental Stress Analysis. New York: McGraw-Hill, 1991. 3rd Ed.: pp. 134-146.



**DIAS, E. R.** Aplicação de Strain Gages na Caracterização Mecânica dos Materiais. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 2004. TCC: pp. 75.

**DRM – RJ.** Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado do Rio de Janeiro. Niterói – RJ: Digifocus, 2003.

**DUARTE, E. T. V.** Análise Estatística e Metrológica de Propriedades Mecânicas em Materiais Frágeis. Campos dos Goytacazes - RJ: Dissertação de Mestrado, 2000. pp. 110.

**EXCEL SENSOR IND. E COM. EXP. LTDA.** <http://www.excelsensor.com.br>, em 02 de Dezembro de 2011.

**FELBECK, M. D. K. and ATKINS, A. G.** Strength and Fracture Engineering Solids. Prentice Hall, 1996. 2nd ed.

**FERRANTE, M.** Seleção de Materiais. São Carlos: EDUFSCar, 1996.

**GARCIA A., SPIM J. A. e SANTOS C. A.** Ensaio dos Materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 1ª Ed.: pp. 46-64, 102-117.

**HANNAH R. L. e REED S. E.,** Strain Gage Users Handbook. New York: Chapman & Hall, 1992. 1 st ed..

**HESPANHOL D. C. F.** Influência da Dispersão na Avaliação de Lotes Mínimos para a Determinação de Fatores Weibull. Dissertação de Mestrado. Campos dos Goytacazes - RJ : Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2009.

**PEDRA ARTIFICIAL.** 10 de Março de 2012. <http://www.pedraartificial.com.br/>.

**PILKEY D. W. e PILKEY D. F.,** Peterson's Stress Concentration Factors, Hoboken - New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2008 Third Edition, pp. 110.

**SILVA, M. L. S.** Ca, Na, K-PSS como revestimento anticorrosivo em aço. Dissertação (Mestrado) – LAMAV/UENF. 59 p. 2011.

**SUSMEL L. e TAYLOR D.** The Theory of Critical Distances to Predict Static Strength of Notched Brittle Subjected to Mixed-mode Loading. Science Direct: Eng Frac Mech. - Dublin, Ireland. 13 de Março de 2007. - pp. 534-550. - doi:10.1016/j.engfracmech.2007.03.035.

**TANAKA, K., AKINIWA, Y., KIMASHI, H. e KITA, Y.** R-curve behavior in fracture of notched porous ceramics. Science Direct: Eng Frac Mech. Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japão. 15 de Novembro 2002. pp. 1101 – 1113. PII: S00 13-7944 (02) 0025 9-X

**TAYLOR D.** Geometrical Effects in Fatigue: A Unifying Theoretical Model. International Journal of Fatigue. Dublin, Ireland: 15 de Janeiro de 1999. - 21. - pp. 413-420. - PII: S0142-1123(99)000007-9.

**TAYLOR D.** Predicting the Fracture Strength of Ceramic Materials Using the Theory of Critical Distances. Science Direct: Eng Frac Mech. - 13 de Janeiro de 2004. doi:10.1016/j.engfracmech.2004.01.002.

**TAYLOR D.** The Theory of Critical Distances. Science Direct: Eng Fract Mech. 3 de Abril de 2007. doi:10.1016/j.engfracmech.2007.04.007.

**TEIXEIRA, J. P. B., CARVALHO, E. A., SOUZA, L. R. E RODRIGUES, C. R.** Determinação de Fatores de Concentração de Tensões em Entalhes Circulares Presentes em Materiais Frágeis. 66º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo - SP

**TEIXEIRA W. e.t al.** Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 2ª Reimpressão: p. 568.

**TIMOSHENKO S. P. and GOODIER J. N.** Theory of Elasticity. McGraw-Hill, 1982. International Edition.

## ***APÊNDICE A: Medidas dos corpos de prova.***

Os corpos foram divididos em frente (face polida) e costas; e lados A (lado direito da face frontal do corpo) e B (lado esquerdo da face frontal do corpo) e medidos em suas dimensões em vários pontos de interesse, os dados obtidos encontram-se nas tabelas a seguir. A simbologia pode ser encontrada na nomenclatura presente no pré-texto e possíveis dúvidas sobre seus significados podem ser sanadas nas figuras que são apresentadas ao final deste apêndice (Figura A.1, Figura A.2, Figura A.3 e Figura A.4).

### **A.1 – Medidas dos CPGA lisos e para os três tipos de entalhe**

**Tabela A.1: Medidas dos CPGA sem entalhes (mm)**

ID	Largura (b)				Altura (h)			
	$b_A$	$b_{Ct}$	$b_B$	$b_{med}$	$h_A$	$h_{Ct}$	$h_B$	$h_{med}$
1	20,41	20,44	20,52	<b>20,46</b>	30,74	31,05	31,53	<b>31,11</b>
2	20,05	20,16	20,18	<b>20,13</b>	29,76	30,13	31,40	<b>30,43</b>
3	20,49	20,46	20,39	<b>20,45</b>	29,42	30,36	31,50	<b>30,43</b>
4	20,59	20,64	20,51	<b>20,58</b>	30,52	30,06	30,35	<b>30,31</b>
5	20,30	20,48	20,49	<b>20,42</b>	29,66	30,19	30,46	<b>30,10</b>
6	20,61	20,72	20,66	<b>20,66</b>	29,68	29,94	31,42	<b>30,35</b>
7	19,73	19,64	19,57	<b>19,65</b>	31,33	30,51	30,58	<b>30,81</b>
8	18,61	18,51	18,49	<b>18,54</b>	29,99	30,13	30,18	<b>30,10</b>
9	18,87	18,89	18,92	<b>18,89</b>	30,00	29,92	30,02	<b>29,98</b>
10 (SG1)*	<b>19,90</b>	<b>20,00</b>	<b>20,30</b>	<b>20,07</b>	<b>30,01</b>	<b>30,26</b>	<b>30,72</b>	<b>30,33</b>
<b>Máx.</b>	<b>20,61</b>	<b>20,72</b>	<b>20,66</b>	<b>20,66</b>	<b>31,33</b>	<b>31,05</b>	<b>31,53</b>	<b>31,11</b>
<b>Mín.</b>	<b>18,61</b>	<b>18,51</b>	<b>18,49</b>	<b>18,54</b>	<b>29,42</b>	<b>29,92</b>	<b>30,02</b>	<b>29,98</b>
<b>Amp.</b>	<b>2,00</b>	<b>2,21</b>	<b>2,17</b>	<b>2,13</b>	<b>1,91</b>	<b>1,13</b>	<b>1,51</b>	<b>1,13</b>
<b>Média</b>	<b>19,96</b>	<b>19,99</b>	<b>20,00</b>	<b>19,98</b>	<b>30,11</b>	<b>30,26</b>	<b>30,82</b>	<b>30,39</b>
<b>DP</b>	<b>0,7066</b>	<b>0,7580</b>	<b>0,7537</b>	<b>0,7359</b>	<b>0,5846</b>	<b>0,3322</b>	<b>0,5898</b>	<b>0,3393</b>

Tabela A.2: Medidas dos CPGA entalhados em U profundo (mm).

ID	Lado	h	b		Vista	Entalhe							$\rho$
			cima- $b_{cm}$	$b_{med}$		$h_T$		$h_{medABT}$	$h_c$		P		
						$h_{Tf}$	$h_{Tmed}$		$h_{cf}$	$h_{c med}$	$P_f$	$P_{med}$	
baixo- $b_{bx}$		$h_{Tc}$		$h_{cc}$		$P_c$							
1	A	30,13	18,46	18,44	frente	30,02	30,08	30,11	18,04	17,98	11,98	12,11	1,006
	B	30,14	18,42		costas	30,14			17,91		12,23		
2	A	30,27	21,14	21,17	frente	30,06	30,17	30,20	15,17	15,47	14,89	14,71	1,024
	B	30,19	21,19		costas	30,28			15,76		14,52		
3	A	30,06	20,05	20,05	frente	29,94	29,98	30,01	16,47	16,58	13,47	13,40	1,005
	B	30,02	20,04		costas	30,02			16,69		13,33		
4	A	30,03	20,30	20,29	frente	29,92	29,92	29,97	15,79	15,81	14,13	14,11	0,973
	B	30,01	20,28		costas	29,91			15,83		14,08		
5	A	29,60	20,14	20,14	frente	29,19	29,39	29,47	16,58	17,09	12,61	12,30	1,064
	B	29,52	20,13		costas	29,58			17,59		11,99		
6	A	30,72	19,82	19,81	frente	30,17	30,43	30,60	17,40	17,39	12,77	13,04	0,980
	B	30,81	19,79		costas	30,69			17,38		13,31		
7	A	30,55	21,59	21,64	frente	30,50	30,52	30,57	15,61	15,97	14,89	14,55	1,090
	B	30,68	21,69		costas	30,53			16,32		14,21		
8	A	30,01	20,59	20,58	frente	29,90	29,94	30,00	17,26	17,33	12,64	12,62	0,998
	B	30,10	20,57		costas	29,98			17,39		12,59		
9	A	30,61	21,34	21,31	frente	30,50	30,51	30,57	16,57	16,59	13,93	13,93	1,004
	B	30,64	21,27		costas	30,52			16,60		13,92		
10	A	30,39	21,18	21,22	frente	30,19	30,22	30,29	15,42	15,33	14,77	14,90	1,081
	B	30,32	21,25		costas	30,25			15,23		15,02		
11	A	30,82	17,73	17,77	frente	30,57	30,69	30,78	17,90	17,86	12,67	12,84	1,037
	B	30,92	17,81		costas	30,81			17,81		13,00		
12 (SG1)*	A	30,44	21,22	21,26	frente	30,37	30,34	30,39	16,54	16,89	13,83	13,45	0,981
	B	30,45	21,29		costa	30,31			17,24		13,07		
Máx		30,92	21,69	21,64		30,81	30,69	30,78	18,04	17,98	15,02	14,90	1,090
Mín		29,52	17,73	17,77		29,19	29,39	29,47	15,17	15,33	11,98	12,11	0,973
Amp		1,40	3,96	3,87		1,62	1,31	1,31	2,87	2,65	3,04	2,79	0,117
Média		30,31	20,30	20,30		30,18	30,18	30,25	16,69	16,69	13,49	13,49	1,020
DP		0,3696	1,1643	1,1901		0,3638	0,3543	0,3633	0,9045	0,8936	0,9514	0,9478	0,040

Tabela A.3: Medidas dos CPGA entalhados em arco de círculo menor (mm).

ID	Altura (h)										Profundidade Entalhe (P)			Largura (b)			Corda			
	Lado A			Lado B			h <sub>med AB</sub>	Centro			P <sub>f</sub>	P <sub>c</sub>	P <sub>med</sub>	b <sub>cm</sub>	b <sub>bx</sub>	b <sub>med</sub>	D <sub>f</sub>	D <sub>ct</sub>	D <sub>c</sub>	D <sub>med</sub>
	h <sub>Af</sub>	h <sub>Ac</sub>	h <sub>A med</sub>	h <sub>Bf</sub>	h <sub>Bc</sub>	h <sub>B med</sub>		h <sub>Cf</sub>	h <sub>Cc</sub>	h <sub>C(med)</sub>										
1	29,68	30,02	29,85	29,72	30,00	29,86	<b>29,86</b>	14,02	14,80	14,41	15,68	15,21	<b>15,45</b>	20,63	20,55	<b>20,59</b>	18,89	na	18,08	<b>18,49</b>
2	29,76	30,00	29,88	29,52	29,81	29,67	<b>29,77</b>	13,96	14,44	14,20	15,68	15,47	<b>15,57</b>	20,37	20,23	<b>20,30</b>	18,87	na	18,30	<b>18,59</b>
3	29,59	30,00	29,80	29,65	29,83	29,74	<b>29,77</b>	14,03	14,36	14,20	15,59	15,56	<b>15,57</b>	20,27	20,15	<b>20,21</b>	18,99	na	18,53	<b>18,76</b>
4	31,07	31,34	31,21	30,83	31,04	30,94	<b>31,07</b>	16,69	17,53	17,11	14,26	13,66	<b>13,96</b>	19,67	19,73	<b>19,70</b>	18,95	na	18,51	<b>18,73</b>
5	29,82	30,15	29,99	29,77	29,96	29,87	<b>29,93</b>	15,41	16,06	15,74	14,39	14,00	<b>14,19</b>	20,61	20,55	<b>20,58</b>	18,87	na	18,63	<b>18,75</b>
6	29,66	30,01	29,84	29,78	30,15	29,97	<b>29,90</b>	14,13	14,65	14,39	15,59	15,43	<b>15,51</b>	20,34	20,23	<b>20,29</b>	19,01	na	18,84	<b>18,93</b>
7	30,80	31,01	30,91	30,98	31,46	31,22	<b>31,06</b>	14,61	15,46	15,04	16,28	15,78	<b>16,03</b>	19,63	19,62	<b>19,63</b>	18,95	na	18,55	<b>18,75</b>
8	29,56	30,07	29,82	29,47	29,75	29,61	<b>29,71</b>	14,86	15,57	15,22	14,66	14,34	<b>14,50</b>	20,66	20,49	<b>20,58</b>	18,87	na	18,82	<b>18,85</b>
9	30,58	30,80	30,69	31,05	30,94	31,00	<b>30,84</b>	16,09	16,70	16,40	14,73	14,17	<b>14,45</b>	20,49	20,39	<b>20,44</b>	18,87	na	18,58	<b>18,73</b>
10	31,94	31,25	31,60	31,96	31,48	31,72	<b>31,66</b>	16,35	16,60	16,48	15,60	14,77	<b>15,18</b>	19,91	19,76	<b>19,84</b>	18,76	na	18,65	<b>18,71</b>
11 (SG2)*	<b>30,43</b>	<b>30,53</b>	<b>30,48</b>	<b>30,42</b>	<b>30,58</b>	<b>30,50</b>	<b>30,49</b>	<b>15,65</b>	<b>16,21</b>	<b>15,93</b>	<b>14,78</b>	<b>14,35</b>	<b>14,56</b>	<b>20,37</b>	<b>20,35</b>	<b>20,36</b>	<b>18,96</b>	<b>na</b>	<b>18,52</b>	<b>18,74</b>
Máx	<b>31,94</b>	<b>31,34</b>	<b>31,60</b>	<b>31,96</b>	<b>31,48</b>	<b>31,72</b>	<b>31,66</b>	<b>16,69</b>	<b>17,53</b>	<b>17,11</b>	<b>16,28</b>	<b>15,78</b>	<b>16,03</b>	<b>20,66</b>	<b>20,55</b>	<b>20,59</b>	<b>19,01</b>	<b>na</b>	<b>18,84</b>	<b>18,93</b>
Mín	<b>29,56</b>	<b>30,00</b>	<b>29,80</b>	<b>29,47</b>	<b>29,75</b>	<b>29,61</b>	<b>29,71</b>	<b>13,96</b>	<b>14,36</b>	<b>14,20</b>	<b>14,26</b>	<b>13,66</b>	<b>13,96</b>	<b>19,63</b>	<b>19,62</b>	<b>19,63</b>	<b>18,76</b>	<b>na</b>	<b>18,08</b>	<b>18,49</b>
Amp	<b>2,38</b>	<b>1,34</b>	<b>1,80</b>	<b>2,49</b>	<b>1,73</b>	<b>2,11</b>	<b>1,95</b>	<b>2,73</b>	<b>3,17</b>	<b>2,92</b>	<b>2,02</b>	<b>2,12</b>	<b>2,07</b>	<b>1,03</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	<b>0,25</b>	<b>na</b>	<b>0,76</b>	<b>0,44</b>
Med	<b>30,26</b>	<b>30,47</b>	<b>30,37</b>	<b>30,29</b>	<b>30,45</b>	<b>30,37</b>	<b>30,37</b>	<b>15,07</b>	<b>15,67</b>	<b>15,37</b>	<b>15,20</b>	<b>14,79</b>	<b>15,00</b>	<b>20,27</b>	<b>20,19</b>	<b>20,23</b>	<b>18,91</b>	<b>na</b>	<b>18,55</b>	<b>18,73</b>
DP	<b>0,7733</b>	<b>0,5374</b>	<b>0,6467</b>	<b>0,8174</b>	<b>0,6710</b>	<b>0,7364</b>	<b>0,6857</b>	<b>1,0154</b>	<b>1,0445</b>	<b>1,0254</b>	<b>0,6590</b>	<b>0,7274</b>	<b>0,6850</b>	<b>0,3701</b>	<b>0,3378</b>	<b>0,3526</b>	<b>0,0717</b>	<b>na</b>	<b>0,2146</b>	<b>0,1160</b>

Tabela A.4: Medidas dos CPGA entalhados em arco de círculo maior (mm).

ID	Altura (h)							Profundidade Entalhe (P)			Largura (b)			Corda						
	Lado A			Lado B			h <sub>med AB</sub>											Centro		
	h <sub>Af</sub>	h <sub>Ac</sub>	h <sub>A med</sub>	h <sub>Bf</sub>	h <sub>Bc</sub>	h <sub>B med</sub>		h <sub>Cf</sub>	h <sub>Cc</sub>	h <sub>C med</sub>	P <sub>f</sub>	P <sub>c</sub>	P <sub>med</sub>	b <sub>cm</sub>	b <sub>bx</sub>	b <sub>med</sub>	D <sub>f</sub>	D <sub>ct</sub>	D <sub>c</sub>	D <sub>med</sub>
1	29,69	29,92	29,81	29,93	30,18	30,06	<b>29,93</b>	14,66	15,84	15,25	15,15	14,21	<b>14,68</b>	19,89	19,76	<b>19,83</b>	38,29	38,88	38,32	<b>38,50</b>
2	29,73	29,16	29,45	29,82	29,31	29,57	<b>29,51</b>	14,37	14,93	14,65	15,41	14,31	<b>14,86</b>	19,93	19,92	<b>19,93</b>	38,43	38,60	38,25	<b>38,43</b>
3	29,96	30,13	30,05	29,75	30,17	29,96	<b>30,00</b>	13,32	14,32	13,82	16,54	15,83	<b>16,18</b>	19,79	19,81	<b>19,80</b>	38,52	38,32	38,99	<b>38,61</b>
4	29,10	30,08	29,59	30,02	30,56	30,29	<b>29,94</b>	14,21	15,27	14,74	15,35	15,05	<b>15,20</b>	20,27	20,27	<b>20,27</b>	38,36	38,51	38,73	<b>38,53</b>
5	29,81	30,16	29,99	29,65	29,89	29,77	<b>29,88</b>	14,05	14,95	14,50	15,68	15,08	<b>15,38</b>	19,94	19,76	<b>19,85</b>	38,65	38,66	38,76	<b>38,69</b>
6	31,02	31,13	31,08	30,35	30,62	30,49	<b>30,78</b>	15,42	16,70	16,06	15,27	14,18	<b>14,72</b>	19,48	19,53	<b>19,51</b>	38,77	38,77	38,28	<b>38,61</b>
7	29,90	30,16	30,03	29,56	29,95	29,76	<b>29,89</b>	14,45	15,50	14,98	15,28	14,56	<b>14,92</b>	20,31	20,16	<b>20,24</b>	38,58	38,62	38,76	<b>38,65</b>
8	29,25	29,81	29,53	29,25	29,70	29,48	<b>29,50</b>	13,99	14,51	14,25	15,26	15,25	<b>15,25</b>	19,97	20,15	<b>20,06</b>	38,32	38,76	38,74	<b>38,61</b>
9	29,64	29,72	29,68	29,59	29,94	29,77	<b>29,72</b>	14,03	14,47	14,25	15,59	15,36	<b>15,47</b>	20,19	20,30	<b>20,25</b>	38,47	38,61	39,41	<b>38,83</b>
10	29,37	30,03	29,70	29,42	30,11	29,77	<b>29,73</b>	13,02	14,27	13,65	16,38	15,80	<b>16,09</b>	20,91	20,91	<b>20,91</b>	38,92	38,34	39,03	<b>38,76</b>
11 (SG1)*	<b>29,49</b>	<b>29,61</b>	<b>29,55</b>	<b>29,61</b>	<b>29,77</b>	<b>29,69</b>	<b>29,62</b>	<b>13,72</b>	<b>14,88</b>	<b>14,30</b>	<b>15,83</b>	<b>14,81</b>	<b>15,32</b>	<b>20,13</b>	<b>20,09</b>	<b>20,11</b>	<b>38,58</b>	<b>39,02</b>	<b>38,88</b>	<b>38,83</b>
Máx	<b>31,02</b>	<b>31,13</b>	<b>31,08</b>	<b>30,35</b>	<b>30,62</b>	<b>30,49</b>	<b>30,78</b>	<b>15,42</b>	<b>16,70</b>	<b>16,06</b>	<b>16,54</b>	<b>15,83</b>	<b>16,18</b>	<b>20,91</b>	<b>20,91</b>	<b>20,91</b>	<b>38,92</b>	<b>39,02</b>	<b>39,41</b>	<b>38,83</b>
Mín	<b>29,10</b>	<b>29,16</b>	<b>29,45</b>	<b>29,25</b>	<b>29,31</b>	<b>29,48</b>	<b>29,50</b>	<b>13,02</b>	<b>14,27</b>	<b>13,65</b>	<b>15,15</b>	<b>14,18</b>	<b>14,68</b>	<b>19,48</b>	<b>19,53</b>	<b>19,51</b>	<b>38,29</b>	<b>38,32</b>	<b>38,25</b>	<b>38,43</b>
Amp	<b>1,92</b>	<b>1,97</b>	<b>1,63</b>	<b>1,10</b>	<b>1,31</b>	<b>1,01</b>	<b>1,28</b>	<b>2,40</b>	<b>2,43</b>	<b>2,42</b>	<b>1,39</b>	<b>1,66</b>	<b>1,50</b>	<b>1,43</b>	<b>1,38</b>	<b>1,41</b>	<b>0,63</b>	<b>0,70</b>	<b>1,16</b>	<b>0,40</b>
Med	<b>29,72</b>	<b>29,99</b>	<b>29,86</b>	<b>29,72</b>	<b>30,02</b>	<b>29,87</b>	<b>29,86</b>	<b>14,11</b>	<b>15,06</b>	<b>14,59</b>	<b>15,61</b>	<b>14,95</b>	<b>15,28</b>	<b>20,07</b>	<b>20,06</b>	<b>20,07</b>	<b>38,54</b>	<b>38,64</b>	<b>38,74</b>	<b>38,64</b>
DP	<b>0,5075</b>	<b>0,4827</b>	<b>0,4545</b>	<b>0,3020</b>	<b>0,3748</b>	<b>0,3039</b>	<b>0,3501</b>	<b>0,6481</b>	<b>0,7362</b>	<b>0,6768</b>	<b>0,4654</b>	<b>0,5931</b>	<b>0,5007</b>	<b>0,3642</b>	<b>0,3723</b>	<b>0,3642</b>	<b>0,1932</b>	<b>0,2111</b>	<b>0,3527</b>	<b>0,1301</b>

## A.2 – Medidas dos CPGC lisos e para os três tipos de entalhe

Tabela A.5: Medidas dos CPGC sem entalhes (mm).

ID	Largura (b)				Altura (h)			
	b <sub>A</sub>	b <sub>Ct</sub>	b <sub>B</sub>	b <sub>med</sub>	h <sub>A</sub>	h <sub>Ct</sub>	h <sub>B</sub>	h <sub>med</sub>
1*	21,56	21,57	21,89	<b>21,67</b>	30,17	30,17	30,09	<b>30,14</b>
2*	20,29	20,22	20,17	<b>20,23</b>	31,22	31,50	32,29	<b>31,67</b>
3*	20,13	20,23	20,31	<b>20,22</b>	31,88	31,41	31,02	<b>31,44</b>
4 (SG_Gde)*	<b>20,35</b>	<b>20,32</b>	<b>20,08</b>	<b>20,25</b>	<b>30,82</b>	<b>31,33</b>	<b>31,47</b>	<b>31,21</b>
5	20,15	20,22	20,33	<b>20,23</b>	31,90	31,25	31,19	<b>31,45</b>
6	20,18	20,20	20,33	<b>20,24</b>	32,15	31,47	31,20	<b>31,61</b>
7	20,10	20,21	20,33	<b>20,21</b>	30,80	30,88	30,41	<b>30,70</b>
8 (SG_Peq)*	<b>20,49</b>	<b>20,35</b>	<b>20,10</b>	<b>20,31</b>	<b>30,77</b>	<b>31,30</b>	<b>31,73</b>	<b>31,27</b>
9	20,35	20,23	20,15	<b>20,24</b>	31,30	31,34	32,24	<b>31,63</b>
10	20,34	20,17	20,09	<b>20,20</b>	30,70	31,12	31,30	<b>31,04</b>
11	20,07	20,16	20,34	<b>20,19</b>	32,18	31,32	31,52	<b>31,67</b>
12	20,05	20,14	20,37	<b>20,19</b>	32,35	31,65	31,82	<b>31,94</b>
13	20,34	20,20	20,10	<b>20,21</b>	30,67	30,70	30,86	<b>30,74</b>
14	20,26	20,17	20,07	<b>20,17</b>	31,72	31,01	32,25	<b>31,66</b>
15	20,09	20,21	20,26	<b>20,19</b>	32,13	31,71	31,53	<b>31,79</b>
Máx.	<b>21,56</b>	<b>21,57</b>	<b>21,89</b>	<b>21,67</b>	<b>32,35</b>	<b>31,71</b>	<b>32,29</b>	<b>31,94</b>
Mín.	<b>20,05</b>	<b>20,14</b>	<b>20,07</b>	<b>20,17</b>	<b>30,17</b>	<b>30,17</b>	<b>30,09</b>	<b>30,14</b>
Amp.	<b>1,51</b>	<b>1,43</b>	<b>1,82</b>	<b>1,51</b>	<b>2,18</b>	<b>1,54</b>	<b>2,20</b>	<b>1,80</b>
Média	<b>20,32</b>	<b>20,31</b>	<b>20,33</b>	<b>20,32</b>	<b>31,38</b>	<b>31,21</b>	<b>31,39</b>	<b>31,33</b>
DP	<b>0,3679</b>	<b>0,3538</b>	<b>0,4466</b>	<b>0,3768</b>	<b>0,6998</b>	<b>0,3952</b>	<b>0,6418</b>	<b>0,4908</b>

Tabela A.6: Medidas dos CPGC entalhados em U profundo (mm).

ID	Lado	h	b		Entalhe								
					Vista	h <sub>T</sub>		h <sub>med</sub> ABT	h <sub>c</sub>		P		ρ
			h <sub>Tf</sub>	h <sub>T</sub> (med)		h <sub>cf</sub>	h <sub>c</sub> med		P <sub>f</sub>	P <sub>med</sub>			
			baixo- b <sub>bx</sub>			b <sub>med</sub>			h <sub>Tc</sub>		h <sub>cc</sub>	P <sub>c</sub>	
1	A	29,55	22,25	22,24	frente	29,62	29,46	29,52	15,88	15,82	13,74	13,64	1,101
	B	29,60	22,22		costas	29,29			15,76		13,53		
2*	A	30,98	21,55	21,54	frente	30,89	30,90	30,94	16,48	17,15	14,41	13,75	1,133
	B	30,97	21,53		costas	30,90			17,81		13,09		
3*	A	31,31	21,84	21,93	frente	31,00	31,07	31,17	17,25	17,09	13,75	13,99	1,143
	B	31,21	22,02		costas	31,14			16,92		14,22		
4	A	30,03	22,28	22,30	frente	29,70	29,80	29,90	16,96	16,89	12,74	12,91	1,085
	B	29,98	22,32		costas	29,89			16,81		13,08		
5	A	31,29	21,97	21,97	frente	31,02	31,09	31,18	17,88	17,41	13,14	13,68	1,024
	B	31,25	21,97		costas	31,16			16,94		14,22		
6	A	31,09	22,00	22,01	frente	30,92	30,97	31,03	18,47	18,31	12,45	12,67	1,062
	B	31,08	22,01		costas	31,02			18,14		12,88		
7	A	30,17	21,55	21,56	frente	30,06	30,02	30,10	17,62	18,14	12,44	11,88	1,042
	B	30,18	21,56		costas	29,97			18,66		11,31		
8	A	31,16	21,57	21,57	frente	31,02	31,04	31,11	17,60	17,69	13,42	13,36	1,179
	B	31,20	21,56		costas	31,06			17,77		13,29		
9	A	30,03	22,35	22,37	frente	30,01	29,95	29,99	17,94	17,86	12,07	12,09	1,029
	B	30,05	22,39		costas	29,88			17,78		12,10		
10	A	30,35	22,05	21,98	frente	30,29	30,24	30,29	17,01	16,43	13,28	13,81	1,159
	B	30,35	21,90		costas	30,18			15,85		14,33		
11	A	31,20	21,46	21,46	frente	31,03	31,12	31,17	17,23	17,16	13,80	13,96	1,238
	B	31,26	21,46		costas	31,20			17,09		14,11		
12	A	31,44	21,88	21,89	frente	31,32	31,45	31,45	18,78	18,19	12,54	13,26	1,125
	B	31,48	21,89		costas	31,57			17,60		13,97		
13	A	30,49	21,95	21,96	frente	30,40	30,43	30,46	17,48	17,56	12,92	12,87	1,003
	B	30,49	21,96		costas	30,45			17,63		12,82		
14	A	30,32	22,04	22,03	frente	30,26	30,34	30,34	17,30	16,89	12,96	13,45	1,328
	B	30,37	22,01		costas	30,41			16,48		13,93		
15	A	31,65	21,90	21,91	frente	31,53	31,45	31,54	16,70	17,56	14,83	13,89	1,350
	B	31,61	21,92		costas	31,37			18,42		12,95		
16	A	30,77	22,05	22,04	frente	30,67	30,71	30,75	17,56	17,56	13,11	13,15	1,073
	B	30,79	22,03		costas	30,75			17,56		13,19		
17	A	30,43	21,86	21,86	frente	31,35	31,33	30,88	17,71	17,41	13,64	13,92	1,116
	B	30,43	21,85		costas	31,31			17,11		14,20		
18	A	31,42	21,93	21,94	frente	31,25	31,39	31,40	17,54	17,52	13,71	13,88	1,026
	B	31,40	21,95		costas	31,53			17,49		14,04		
19	A	30,94	21,56	21,56	frente	30,76	30,79	30,88	17,24	17,30	13,52	13,50	1,074
	B	31,00	21,55		costas	30,82			17,35		13,47		
20 (SG1)*	A	30,00	21,90	21,87	frente	29,87	29,82	29,74	17,42	18,12	12,45	11,70	1,094
	B	29,33	21,84		costas	29,76			18,81		10,95		
Máx		31,65	22,39	22,37		31,57	31,45	31,54	18,81	18,31	14,83	13,99	1,350
Mín		29,33	21,46	21,46		29,29	29,46	29,52	15,76	15,82	10,95	11,70	1,003
Amp		2,32	0,93	0,91		2,28	2,00	2,03	3,05	2,49	3,88	2,29	0,347
Média		30,72	21,90	21,90		30,67	30,67	30,69	17,40	17,40	13,27	13,27	1,119
DP		0,6165	0,2530	0,2546		0,6160	0,6190	0,6076	0,7257	0,6104	0,8271	0,7088	0,0951



Tabela A.7: Medidas dos CPGC entalhados em arco de círculo menor (mm).

ID	Altura (h)										Profundidade Entalhe (P)			Largura (b)			Corda			
	Lado A			Lado B			Centro			h <sub>med AB</sub>	P <sub>f</sub>	P <sub>c</sub>	P <sub>med</sub>	b <sub>cm</sub>	b <sub>bx</sub>	b <sub>med</sub>	D <sub>f</sub>	D <sub>ct</sub>	D <sub>c</sub>	D <sub>med</sub>
	h <sub>Af</sub>	h <sub>Ac</sub>	h <sub>A med</sub>	h <sub>Bf</sub>	h <sub>Bc</sub>	h <sub>B med</sub>	h <sub>Cf</sub>	h <sub>Cc</sub>	h <sub>C(med)</sub>											
1	30,13	30,30	30,22	30,05	30,34	30,20	15,80	16,97	16,39	30,21	14,29	13,35	13,82	22,27	22,21	22,24	18,98	na	18,58	18,78
2 (SG1)*	29,84	29,79	29,82	29,97	29,86	29,92	15,47	15,98	15,73	29,87	14,44	13,85	14,14	22,05	21,86	21,96	19,02	na	18,79	18,91
3	30,64	30,71	30,68	30,56	30,71	30,64	16,31	17,00	16,66	30,66	14,29	13,71	14,00	22,40	22,25	22,33	18,94	na	18,77	18,86
4	30,07	30,25	30,16	30,00	30,20	30,10	15,06	16,10	15,58	30,13	14,98	14,13	14,55	21,92	21,88	21,90	19,05	na	18,67	18,86
5	30,74	30,79	30,77	30,58	30,76	30,67	15,49	16,03	15,76	30,72	15,17	14,75	14,96	22,34	22,28	22,31	19,03	na	18,70	18,87
6	30,51	30,56	30,54	30,60	30,66	30,63	15,80	16,92	16,36	30,58	14,76	13,69	14,22	22,25	22,23	22,24	19,01	na	18,78	18,90
7	30,54	30,11	30,33	30,47	30,02	30,25	16,12	16,01	16,07	30,29	14,39	14,06	14,22	22,38	22,32	22,35	18,69	na	18,47	18,58
8	30,01	30,25	30,13	30,14	30,32	30,23	15,54	16,55	16,05	30,18	14,54	13,74	14,14	22,05	22,14	22,10	19,10	na	18,84	18,97
9	31,10	31,20	31,15	31,15	31,38	31,27	16,16	16,46	16,31	31,21	14,97	14,83	14,90	21,92	21,85	21,89	18,98	na	18,98	18,98
10	31,25	31,31	31,28	31,28	31,33	31,31	15,80	17,01	16,41	31,29	15,47	14,31	14,89	21,76	21,96	21,86	18,95	na	18,83	18,89
11	31,31	31,53	31,42	31,75	31,60	31,68	16,19	16,69	16,44	31,55	15,34	14,88	15,11	21,71	21,67	21,69	19,00	na	18,78	18,89
12	30,33	30,08	30,21	30,43	30,08	30,26	15,78	16,32	16,05	30,23	14,60	13,76	14,18	22,01	21,93	21,97	19,00	na	18,89	18,95
Máx	31,31	31,53	31,42	31,75	31,60	31,68	16,31	17,01	16,66	31,55	15,47	14,88	15,11	22,40	22,32	22,35	19,10	na	18,98	18,98
Min	29,84	29,79	29,82	29,97	29,86	29,92	15,06	15,98	15,58	29,87	14,29	13,35	13,82	21,71	21,67	21,69	18,69	na	18,47	18,58
Amp	1,47	1,74	1,61	1,78	1,74	1,76	1,25	1,03	1,08	1,68	1,18	1,53	1,29	0,69	0,65	0,66	0,41	na	0,51	0,40
Med	30,54	30,57	30,56	30,58	30,61	30,59	15,79	16,50	16,15	30,57	14,77	14,09	14,43	22,09	22,05	22,07	18,98	na	18,76	18,87
DP	0,4923	0,5454	0,5101	0,5561	0,5755	0,5532	0,3648	0,4125	0,3323	0,5296	0,4105	0,5037	0,4325	0,2377	0,2140	0,2204	0,1008	na	0,1370	0,1057

Tabela A.8: Medidas dos CPGC entalhados em arco de círculo maior (mm).

ID	Altura (h)										Profundidade Entalhe (P)			Largura (b)			Corda			
	Lado A			Lado B			Centro			h <sub>med AB</sub>	P <sub>f</sub>	P <sub>c</sub>	P <sub>med</sub>	b <sub>cm</sub>	b <sub>bx</sub>	b <sub>med</sub>	D <sub>f</sub>	D <sub>ct</sub>	D <sub>c</sub>	D <sub>med</sub>
	h <sub>Af</sub>	h <sub>Ac</sub>	h <sub>A med</sub>	h <sub>Bf</sub>	h <sub>Bc</sub>	h <sub>B med</sub>	h <sub>Cf</sub>	h <sub>Cc</sub>	h <sub>C(med)</sub>											
1 (SG1)*	29,83	30,15	29,99	29,94	30,14	30,04	14,07	14,13	14,10	30,02	15,82	16,02	15,92	21,83	21,77	21,80	39,50	39,68	39,87	39,68
2	30,73	31,08	30,91	30,81	30,91	30,86	16,38	16,12	16,25	30,88	14,39	14,88	14,63	21,81	21,50	21,66	38,87	38,81	39,14	38,94
3	29,85	29,67	29,76	29,82	29,93	29,88	14,44	14,53	14,49	29,82	15,40	15,27	15,33	21,48	21,60	21,54	39,29	39,30	39,32	39,30
4	30,29	30,23	30,26	30,46	30,54	30,50	14,24	14,34	14,29	30,38	16,14	16,05	16,09	21,94	21,91	21,93	39,41	39,65	39,60	39,55
5	29,43	29,89	29,66	29,57	29,81	29,69	13,96	14,66	14,31	29,68	15,54	15,19	15,37	22,31	22,25	22,28	39,34	39,19	39,06	39,20
6	30,11	29,98	30,05	30,19	30,26	30,23	14,84	14,86	14,85	30,14	15,31	15,26	15,29	21,46	21,48	21,47	39,67	39,31	39,00	39,33
7	30,71	30,67	30,69	30,55	30,48	30,52	14,45	14,78	14,62	30,60	16,18	15,80	15,99	22,22	22,16	22,19	39,66	39,57	39,71	39,65
8	30,01	30,20	30,11	30,02	30,17	30,10	13,62	13,76	13,69	30,10	16,40	16,43	16,41	22,06	22,05	22,06	39,45	39,78	39,51	39,58
9	29,96	29,87	29,92	29,76	29,99	29,88	13,75	13,51	13,63	29,90	16,11	16,42	16,27	22,33	22,31	22,32	39,10	39,67	39,74	39,50
10	30,50	30,65	30,58	30,38	30,71	30,55	15,24	15,41	15,33	30,56	15,20	15,27	15,24	22,01	22,15	22,08	39,14	39,13	39,34	39,20
11	30,38	30,62	30,50	30,44	30,57	30,51	15,01	15,40	15,21	30,50	15,40	15,20	15,30	21,41	21,44	21,43	39,08	39,14	39,15	39,12
12	29,81	29,85	29,83	29,77	29,82	29,80	14,40	14,55	14,48	29,81	15,39	15,29	15,34	21,79	21,76	21,78	39,41	39,43	39,71	39,52
13	30,50	31,66	31,08	30,41	30,61	30,51	15,06	15,53	15,30	30,80	15,40	15,61	15,50	21,97	21,98	21,98	39,58	39,22	39,53	39,44
14	30,88	31,12	31,00	30,88	31,22	31,05	16,20	16,13	16,17	31,03	14,68	15,04	14,86	22,18	22,04	22,11	39,03	38,83	39,38	39,08
15	30,86	30,96	30,91	30,91	31,13	31,02	15,00	14,94	14,97	30,97	15,89	16,11	16,00	22,04	22,01	22,03	39,65	39,62	39,66	39,64
16	30,96	31,13	31,05	30,94	31,19	31,07	14,12	14,37	14,25	31,06	16,83	16,79	16,81	21,34	21,34	21,34	40,27	40,15	40,34	40,25
17	30,27	30,44	30,36	30,34	30,40	30,37	14,18	14,52	14,35	30,36	16,13	15,90	16,01	21,47	21,53	21,50	39,68	39,29	39,81	39,59
18	30,36	30,66	30,51	30,45	30,67	30,56	14,80	14,74	14,77	30,54	15,61	15,93	15,77	21,86	21,86	21,86	39,54	39,56	39,25	39,45
19	30,58	30,68	30,63	30,54	30,79	30,67	14,39	14,47	14,43	30,65	16,17	16,27	16,22	21,82	21,99	21,91	39,81	39,91	40,27	40,00
20	30,33	30,44	30,39	30,32	30,53	30,43	15,32	15,36	15,34	30,41	15,01	15,13	15,07	21,94	21,95	21,95	39,15	38,85	39,08	39,03
Máx	30,96	31,66	31,08	30,94	31,22	31,07	16,38	16,13	16,25	31,06	16,83	16,79	16,81	22,33	22,31	22,32	40,27	40,15	40,34	40,25
Mín	29,43	29,67	29,66	29,57	29,81	29,69	13,62	13,51	13,63	29,68	14,39	14,88	14,63	21,34	21,34	21,34	38,87	38,81	39,00	38,94
Amp	1,53	1,99	1,42	1,37	1,41	1,38	2,76	2,62	2,62	1,38	2,44	1,92	2,18	0,99	0,97	0,98	1,40	1,34	1,34	1,31
Med	30,32	30,50	30,41	30,33	30,49	30,41	14,67	14,81	14,74	30,41	15,65	15,69	15,67	21,86	21,85	21,86	39,43	39,40	39,52	39,45
DP	0,4142	0,5253	0,4509	0,4059	0,4332	0,4167	0,7337	0,6902	0,7026	0,4266	0,5978	0,5495	0,5615	0,3004	0,2880	0,2899	0,3250	0,3632	0,3777	0,3224

### A.3 – Medidas dos CPGP lisos e para os três tipos de entalhe

Tabela A.9: Medidas dos CPGP sem entalhes (mm).

ID	Largura (b)				Altura (h)			
	b <sub>A</sub>	b <sub>Ct</sub>	b <sub>B</sub>	b <sub>med</sub>	h <sub>A</sub>	h <sub>Ct</sub>	h <sub>B</sub>	h <sub>med</sub>
<b>1 (SG1)*</b>	<b>19,92</b>	<b>20,03</b>	<b>20,47</b>	<b>20,14</b>	<b>30,62</b>	<b>30,54</b>	<b>30,48</b>	<b>30,55</b>
<b>2 (SG2)*</b>	<b>20,00</b>	<b>20,38</b>	<b>20,61</b>	<b>20,33</b>	<b>30,00</b>	<b>29,90</b>	<b>30,08</b>	<b>29,99</b>
<b>3</b>	20,21	19,70	19,76	<b>19,89</b>	31,29	31,07	30,70	<b>31,02</b>
<b>4</b>	20,73	20,53	21,18	<b>20,81</b>	29,71	29,39	29,53	<b>29,54</b>
<b>5</b>	20,26	20,74	20,92	<b>20,64</b>	29,61	29,68	29,90	<b>29,73</b>
<b>6</b>	20,47	20,47	20,48	<b>20,47</b>	29,96	29,71	29,73	<b>29,80</b>
<b>7</b>	20,41	20,28	20,43	<b>20,37</b>	31,24	31,22	31,52	<b>31,33</b>
<b>8</b>	21,25	21,05	20,50	<b>20,93</b>	29,57	29,33	29,60	<b>29,50</b>
<b>9</b>	21,27	20,55	20,52	<b>20,78</b>	30,07	30,16	30,05	<b>30,09</b>
<b>10</b>	19,84	19,42	19,80	<b>19,69</b>	30,92	30,72	30,94	<b>30,86</b>
<b>11</b>	21,26	20,86	20,88	<b>21,00</b>	30,36	30,31	30,38	<b>30,35</b>
<b>12</b>	20,08	19,87	19,88	<b>19,94</b>	30,49	30,47	29,94	<b>30,30</b>
<b>13</b>	20,29	20,41	20,44	<b>20,38</b>	31,52	31,33	31,62	<b>31,49</b>
<b>14</b>	21,24	21,21	21,36	<b>21,27</b>	30,79	31,02	30,87	<b>30,89</b>
<b>15</b>	20,98	20,32	20,52	<b>20,61</b>	30,36	30,36	30,28	<b>30,33</b>
<b>16</b>	20,28	20,34	20,75	<b>20,46</b>	31,01	30,72	30,58	<b>30,77</b>
<b>17</b>	21,19	21,24	21,27	<b>21,23</b>	29,81	29,73	29,72	<b>29,75</b>
<b>18</b>	20,87	20,20	20,10	<b>20,39</b>	30,05	30,08	30,17	<b>30,10</b>
<b>19</b>	19,38	19,71	20,38	<b>19,82</b>	30,13	30,01	29,96	<b>30,03</b>
<b>20</b>	20,25	19,92	19,65	<b>19,94</b>	30,66	30,60	30,57	<b>30,61</b>
<b>Máx.</b>	<b>21,27</b>	<b>21,21</b>	<b>21,36</b>	<b>21,27</b>	<b>31,52</b>	<b>31,33</b>	<b>31,62</b>	<b>31,49</b>
<b>Mín.</b>	<b>19,84</b>	<b>19,42</b>	<b>19,76</b>	<b>19,69</b>	<b>29,57</b>	<b>29,33</b>	<b>29,53</b>	<b>29,50</b>
<b>Amp.</b>	<b>1,43</b>	<b>1,79</b>	<b>1,60</b>	<b>1,58</b>	<b>1,95</b>	<b>2,00</b>	<b>2,09</b>	<b>1,99</b>
<b>Média</b>	<b>20,53</b>	<b>20,39</b>	<b>20,53</b>	<b>20,48</b>	<b>30,47</b>	<b>30,37</b>	<b>30,39</b>	<b>30,41</b>
<b>DP</b>	<b>0,5158</b>	<b>0,4718</b>	<b>0,4483</b>	<b>0,4296</b>	<b>0,6207</b>	<b>0,6358</b>	<b>0,6287</b>	<b>0,6149</b>

Tabela A.10: Medidas dos CPGP entalhados em U profundo (mm).

ID	Lado	h	b		Entalhe								
					Vista	h <sub>T</sub>		h <sub>med</sub> ABT	h <sub>C</sub>		P		ρ
			h <sub>Tf</sub>	h <sub>T</sub> (med)		h <sub>cf</sub>	h <sub>c</sub> med		Pf	Pmed			
			h <sub>Tc</sub>			h <sub>cc</sub>			Pc				
1 (SG1)*	A	30,05	20,46	20,38	frente	30,00	29,87	29,96	16,80	16,50	13,20	13,37	1,244
	B	30,06	20,29		costas	29,74			16,20		13,54		
2	A	31,40	21,32	21,54	frente	31,58	31,40	31,45	16,59	16,73	14,99	14,68	1,130
	B	31,59	21,75		costas	31,22			16,86		14,36		
3	A	31,14	20,51	20,56	frente	30,43	30,79	30,98	16,44	16,71	13,99	14,08	1,022
	B	31,20	20,61		costas	31,15			16,98		14,17		
4	A	30,30	20,54	20,60	frente	30,08	29,95	30,11	17,41	17,56	12,67	12,40	1,093
	B	30,24	20,65		costas	29,82			17,70		12,12		
5	A	31,23	21,86	21,83	frente	31,30	31,29	31,28	16,66	16,98	14,64	14,31	1,163
	B	31,30	21,79		costas	31,27			17,29		13,98		
6	A	30,53	19,04	19,20	frente	30,78	30,59	30,58	17,03	17,17	13,75	13,43	1,102
	B	30,60	19,35		costas	30,40			17,30		13,10		
7	A	30,16	19,73	19,78	frente	29,83	29,99	30,07	17,11	17,21	12,72	12,79	1,109
	B	30,15	19,82		costas	30,15			17,30		12,85		
8	A	31,38	20,15	20,23	frente	31,22	31,31	31,34	16,84	16,83	14,38	14,48	1,059
	B	31,34	20,30		costas	31,40			16,82		14,58		
9	A	30,27	21,54	21,53	frente	30,09	30,01	30,12	16,62	16,35	13,47	13,67	1,062
	B	30,17	21,52		costas	29,93			16,07		13,86		
10	A	31,60	20,50	19,85	frente	31,80	31,69	31,66	16,83	16,87	14,97	14,82	1,126
	B	31,67	19,20		costas	31,57			16,91		14,66		
11	A	30,79	19,01	19,04	frente	30,56	30,71	30,74	16,82	16,91	13,74	13,80	1,260
	B	30,75	19,07		costas	30,86			17,00		13,86		
12	A	28,87	21,11	21,25	frente	28,74	28,84	28,87	16,15	15,74	12,59	13,10	1,073
	B	28,94	21,38		costas	28,94			15,33		13,61		
13	A	30,29	20,40	20,19	frente	30,23	30,14	30,21	16,08	15,68	14,15	14,46	1,169
	B	30,28	19,97		costas	30,05			15,28		14,77		
14	A	30,46	19,24	19,21	frente	30,49	30,35	30,40	16,55	16,38	13,94	13,97	1,152
	B	30,46	19,18		costas	30,20			16,20		14,00		
15	A	30,29	20,08	20,10	frente	30,13	30,21	30,25	16,52	16,61	13,61	13,60	1,214
	B	30,30	20,12		costas	30,29			16,70		13,59		
16	A	29,61	20,67	20,97	frente	29,62	29,47	29,54	17,08	17,19	12,54	12,28	1,059
	B	29,61	21,26		costas	29,31			17,29		12,02		
17	A	30,08	20,17	20,11	frente	30,08	29,99	30,06	16,12	16,71	13,96	13,28	1,052
	B	30,17	20,05		costas	29,89			17,30		12,59		
18	A	29,81	21,64	21,64	frente	29,74	29,81	29,81	15,25	15,42	14,49	14,39	1,178
	B	29,83	21,63		costas	29,87			15,59		14,28		
19	A	29,92	19,80	19,91	frente	29,70	29,59	29,72	16,28	16,33	13,42	13,27	0,990
	B	29,78	20,02		costas	29,48			16,37		13,11		
20	A	30,13	20,28	20,33	frente	29,90	30,02	30,07	15,66	15,54	14,24	14,49	1,136
	B	30,12	20,37		costas	30,14			15,41		14,73		
Máx		30,79	21,86	21,64		30,86	30,71	30,74	17,30	17,19	14,77	14,49	1,26
Mín		28,87	19,01	19,04		28,74	28,84	28,87	15,25	15,42	12,02	12,28	0,99
Amp		1,92	2,85	2,60		2,12	1,87	1,87	2,05	1,77	2,75	2,21	0,27
Média		30,02	20,27	20,27		29,91	29,91	29,97	16,25	16,25	13,66	13,66	1,13
DP		0,5040	0,8143	0,8251		0,5209	0,5213	0,5180	0,6679	0,6198	0,7595	0,7061	0,0832

Tabela A.11: Medidas dos CPGP entalhados em arco de círculo menor (mm).

ID	Altura (h)										Profundidade Entalhe (P)			Largura (b)			Corda			
	Lado A			Lado B			Centro			h <sub>med AB</sub>	P <sub>f</sub>	P <sub>c</sub>	P <sub>med</sub>	b <sub>cm</sub>	b <sub>bx</sub>	b <sub>med</sub>	D <sub>f</sub>	D <sub>ct</sub>	D <sub>c</sub>	D <sub>med</sub>
	h <sub>Af</sub>	h <sub>Ac</sub>	h <sub>A med</sub>	h <sub>Bf</sub>	h <sub>Bc</sub>	h <sub>B med</sub>	h <sub>Cf</sub>	h <sub>Cc</sub>	h <sub>C(med)</sub>											
1 (SG1)*	30,85	30,51	30,68	31,02	30,44	30,73	16,58	15,83	16,21	30,71	14,36	14,65	14,50	20,73	21,11	20,92	21,22	na	21,14	21,18
2	29,25	29,46	29,36	29,21	29,45	29,33	14,78	15,09	14,94	29,34	14,45	14,37	14,41	19,89	19,79	19,84	21,07	na	21,15	21,11
3	31,55	31,15	31,35	31,45	31,08	31,27	17,85	17,27	17,56	31,31	13,65	13,85	13,75	21,19	21,04	21,12	19,73	na	20,80	20,27
4	30,20	30,32	30,26	30,07	30,35	30,21	16,50	15,97	16,24	30,24	13,64	14,37	14,00	20,95	20,52	20,74	20,94	na	21,02	20,98
5	30,01	30,04	30,03	30,10	30,02	30,06	15,03	14,53	14,78	30,04	15,03	15,50	15,26	20,07	19,43	19,75	20,98	na	21,25	21,12
6	30,80	30,74	30,77	30,85	30,88	30,87	16,35	16,00	16,18	30,82	14,48	14,81	14,64	20,90	20,98	20,94	20,82	na	20,80	20,81
7	31,71	32,08	31,90	31,93	32,19	32,06	16,79	16,95	16,87	31,98	15,03	15,19	15,11	19,92	19,77	19,85	21,21	na	21,07	21,14
8	30,30	30,26	30,28	30,35	30,07	30,21	14,77	15,07	14,92	30,25	15,56	15,10	15,33	21,09	21,53	21,31	21,25	na	21,14	21,20
9	30,63	30,59	30,61	30,51	30,53	30,52	16,11	15,77	15,94	30,57	14,46	14,79	14,63	20,29	20,42	20,36	21,20	na	21,21	21,21
10	30,92	30,48	30,70	30,53	30,49	30,51	14,73	15,15	14,94	30,61	16,00	15,34	15,67	20,50	20,58	20,54	21,15	na	21,27	21,21
11	29,95	30,23	30,09	30,00	30,28	30,14	14,62	14,43	14,53	30,12	15,36	15,83	15,59	20,09	19,91	20,00	21,12	na	21,13	21,13
12	30,55	30,46	30,51	30,72	30,67	30,70	16,29	16,01	16,15	30,60	14,35	14,56	14,45	20,02	19,93	19,98	21,33	na	21,10	21,22
13	30,19	29,95	30,07	30,33	30,02	30,18	13,85	14,27	14,06	30,12	16,41	15,72	16,06	20,88	20,47	20,68	21,10	na	21,33	21,22
14	30,11	30,00	30,06	30,13	30,13	30,13	15,48	15,27	15,38	30,09	14,64	14,80	14,72	20,17	20,22	20,20	21,29	na	21,01	21,15
15	29,98	29,85	29,92	29,99	29,98	29,99	14,17	13,32	13,75	29,95	15,82	16,60	16,21	21,09	20,66	20,88	21,19	na	21,02	21,11
16	30,24	30,04	30,14	30,12	29,84	29,98	14,67	14,94	14,81	30,06	15,51	15,00	15,26	20,52	20,08	20,30	21,37	na	20,96	21,17
17	29,94	30,18	30,06	30,67	30,10	30,39	13,94	13,95	13,95	30,22	16,37	16,19	16,28	21,15	21,30	21,23	21,13	na	21,13	21,13
18	30,13	30,41	30,27	30,14	30,24	30,19	14,96	14,49	14,73	30,23	15,18	15,84	15,51	21,36	21,45	21,41	21,27	na	21,11	21,19
19	30,76	30,61	30,69	30,81	30,62	30,72	15,65	16,50	16,08	30,70	15,14	14,12	14,63	20,43	20,65	20,54	21,14	na	20,96	21,05
Máx	31,71	32,08	31,90	31,93	32,19	32,06	17,85	17,27	17,56	31,98	16,41	16,60	16,21	21,19	21,53	21,31	21,33	na	21,33	21,22
Mín	29,25	29,46	29,36	29,21	29,45	29,33	13,85	13,32	13,75	29,34	13,64	13,85	13,75	19,89	19,43	19,75	19,73	na	20,80	20,27
Amp	2,46	2,62	2,54	2,72	2,74	2,73	4,00	3,95	3,82	2,64	2,78	2,75	2,46	1,30	2,10	1,56	1,60	na	0,53	0,95
Med	30,47	30,41	30,44	30,48	30,44	30,46	15,59	15,40	15,49	30,45	14,88	15,03	14,95	20,52	20,42	20,47	21,04	na	21,10	21,07
DP	0,6387	0,6147	0,6155	0,6596	0,6291	0,6317	1,1362	1,0304	1,0636	0,6214	0,8190	0,6926	0,7244	0,4760	0,5881	0,5132	0,3874	na	0,1523	0,2465

Tabela A.12: Medidas dos CPGP entalhados em arco de círculo maior (mm).

ID	Altura (h)										Profundidade Entalhe (P)			Largura (b)			Corda			
	Lado A			Lado B			Centro			$h_{med\ AB}$	$P_f$	$P_c$	$P_{med}$	$b_{cm}$	$b_{bx}$	$b_{med}$	$D_f$	$D_{ct}$	$D_c$	$D_{med}$
	$h_{Af}$	$h_{Ac}$	$h_{A\ med}$	$h_{Bf}$	$h_{Bc}$	$h_{B\ med}$	$h_{Cf}$	$h_{Cc}$	$h_{C(med)}$											
1	29,22	29,36	29,29	29,37	29,34	29,36	16,58	16,12	16,35	<b>29,32</b>	12,72	13,23	<b>12,97</b>	19,89	19,84	<b>19,87</b>	29,34	29,54	29,40	<b>29,43</b>
2	29,96	30,22	30,09	29,95	30,31	30,13	15,02	15,59	15,31	<b>30,11</b>	14,94	14,68	<b>14,81</b>	16,67	20,06	<b>18,37</b>	29,86	29,92	29,80	<b>29,86</b>
3 (SG1)*	<b>30,48</b>	<b>30,93</b>	<b>30,71</b>	<b>30,84</b>	<b>31,05</b>	<b>30,95</b>	<b>16,41</b>	<b>16,94</b>	<b>16,68</b>	<b>30,83</b>	<b>14,25</b>	<b>14,05</b>	<b>14,15</b>	<b>20,44</b>	<b>20,49</b>	<b>20,47</b>	<b>29,72</b>	<b>29,85</b>	<b>29,53</b>	<b>29,70</b>
4	31,90	31,86	31,88	31,70	31,73	31,72	16,34	17,01	16,68	<b>31,80</b>	15,46	14,79	<b>15,12</b>	20,16	19,91	<b>20,04</b>	30,08	30,13	30,14	<b>30,12</b>
5	30,71	30,51	30,61	30,93	30,88	30,91	16,03	15,53	15,78	<b>30,76</b>	14,79	15,17	<b>14,98</b>	20,29	20,27	<b>20,28</b>	29,81	30,11	29,81	<b>29,91</b>
6	30,36	30,65	30,51	30,47	30,66	30,57	15,52	15,92	15,72	<b>30,54</b>	14,90	14,74	<b>14,82</b>	19,35	19,44	<b>19,40</b>	29,96	30,03	29,87	<b>29,95</b>
7	32,00	32,23	32,12	32,01	31,90	31,96	16,95	17,12	17,04	<b>32,04</b>	15,06	14,95	<b>15,00</b>	20,58	21,19	<b>20,89</b>	30,28	29,97	29,94	<b>30,06</b>
8	30,94	30,75	30,85	31,31	30,88	31,10	16,72	16,67	16,70	<b>30,97</b>	14,41	14,15	<b>14,28</b>	20,02	20,05	<b>20,04</b>	29,57	30,00	29,97	<b>29,85</b>
9	29,92	30,01	29,97	29,98	30,23	30,11	13,15	13,96	13,56	<b>30,04</b>	16,80	16,16	<b>16,48</b>	20,32	20,54	<b>20,43</b>	30,05	30,07	29,75	<b>29,96</b>
10	29,07	29,14	29,11	29,30	29,28	29,29	15,20	15,29	15,25	<b>29,20</b>	13,99	13,92	<b>13,95</b>	20,47	20,41	<b>20,44</b>	28,83	29,47	29,24	<b>29,18</b>
11	30,28	30,48	30,38	30,33	30,33	30,33	15,50	15,80	15,65	<b>30,36</b>	14,81	14,61	<b>14,71</b>	20,12	19,82	<b>19,97</b>	30,04	29,76	29,81	<b>29,87</b>
12	30,76	30,82	30,79	31,26	31,13	31,20	15,40	14,68	15,04	<b>30,99</b>	15,61	16,30	<b>15,95</b>	20,60	20,33	<b>20,47</b>	29,90	30,12	30,09	<b>30,04</b>
13	30,65	30,44	30,55	30,89	30,57	30,73	16,01	15,84	15,93	<b>30,64</b>	14,76	14,67	<b>14,71</b>	19,85	19,88	<b>19,87</b>	29,72	30,01	29,96	<b>29,90</b>
14	29,89	30,02	29,96	30,43	30,01	30,22	15,03	14,79	14,91	<b>30,09</b>	15,13	15,23	<b>15,18</b>	20,51	20,49	<b>20,50</b>	30,07	29,95	29,86	<b>29,96</b>
15	29,80	30,10	29,95	29,89	30,09	29,99	14,72	13,83	14,28	<b>29,97</b>	15,13	16,27	<b>15,70</b>	19,97	19,96	<b>19,97</b>	29,75	29,80	29,88	<b>29,81</b>
16	29,96	30,33	30,15	29,98	30,35	30,17	15,73	16,12	15,93	<b>30,16</b>	14,24	14,22	<b>14,23</b>	20,53	20,63	<b>20,58</b>	29,84	29,81	29,15	<b>29,60</b>
17	29,80	30,08	29,94	30,01	30,09	30,05	14,08	13,92	14,00	<b>30,00</b>	15,83	16,17	<b>16,00</b>	20,63	20,51	<b>20,57</b>	30,11	30,07	30,14	<b>30,11</b>
18	30,19	30,26	30,23	30,19	30,42	30,31	14,73	14,70	14,72	<b>30,27</b>	15,46	15,64	<b>15,55</b>	21,05	20,28	<b>20,67</b>	29,89	29,93	29,72	<b>29,85</b>
19	31,88	31,86	31,87	31,93	31,74	31,84	16,35	16,39	16,37	<b>31,85</b>	15,56	15,41	<b>15,48</b>	20,64	20,97	<b>20,81</b>	29,54	29,92	29,66	<b>29,71</b>
20	31,15	30,30	30,73	31,32	31,46	31,39	16,03	15,86	15,95	<b>31,06</b>	15,21	15,02	<b>15,11</b>	20,33	20,03	<b>20,18</b>	30,00	30,12	29,93	<b>30,02</b>
Máx	<b>32,00</b>	<b>32,23</b>	<b>32,12</b>	<b>32,01</b>	<b>31,90</b>	<b>31,96</b>	<b>16,95</b>	<b>17,12</b>	<b>17,04</b>	<b>32,04</b>	<b>16,80</b>	<b>16,30</b>	<b>16,48</b>	<b>21,05</b>	<b>21,19</b>	<b>20,89</b>	<b>30,28</b>	<b>30,13</b>	<b>30,14</b>	<b>30,12</b>
Mín	<b>29,07</b>	<b>29,14</b>	<b>29,11</b>	<b>29,30</b>	<b>29,28</b>	<b>29,29</b>	<b>13,15</b>	<b>13,83</b>	<b>13,56</b>	<b>29,20</b>	<b>12,72</b>	<b>13,23</b>	<b>12,97</b>	<b>16,67</b>	<b>19,44</b>	<b>18,37</b>	<b>28,83</b>	<b>29,47</b>	<b>29,15</b>	<b>29,18</b>
Amp	<b>2,93</b>	<b>3,09</b>	<b>3,01</b>	<b>2,71</b>	<b>2,62</b>	<b>2,67</b>	<b>3,80</b>	<b>3,29</b>	<b>3,48</b>	<b>2,84</b>	<b>4,09</b>	<b>3,07</b>	<b>3,51</b>	<b>4,38</b>	<b>1,75</b>	<b>2,52</b>	<b>1,45</b>	<b>0,66</b>	<b>0,99</b>	<b>0,94</b>
Med	<b>30,45</b>	<b>30,52</b>	<b>30,48</b>	<b>30,60</b>	<b>30,62</b>	<b>30,61</b>	<b>15,58</b>	<b>15,60</b>	<b>15,59</b>	<b>30,55</b>	<b>14,95</b>	<b>14,97</b>	<b>14,96</b>	<b>20,12</b>	<b>20,26</b>	<b>20,19</b>	<b>29,82</b>	<b>29,93</b>	<b>29,78</b>	<b>29,84</b>
DP	<b>0,8248</b>	<b>0,7686</b>	<b>0,7843</b>	<b>0,8016</b>	<b>0,7337</b>	<b>0,7593</b>	<b>0,9478</b>	<b>1,0190</b>	<b>0,9566</b>	<b>0,7658</b>	<b>0,8257</b>	<b>0,8475</b>	<b>0,8086</b>	<b>0,8930</b>	<b>0,4178</b>	<b>0,5657</b>	<b>0,3219</b>	<b>0,1832</b>	<b>0,2727</b>	<b>0,2317</b>

#### A.4 – Ilustrações das medidas realizadas nos corpos

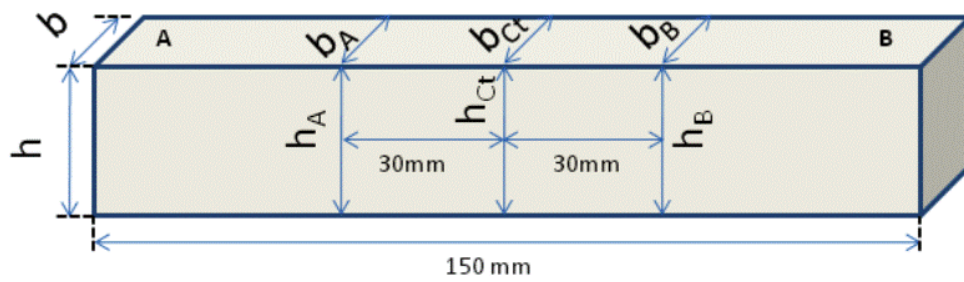
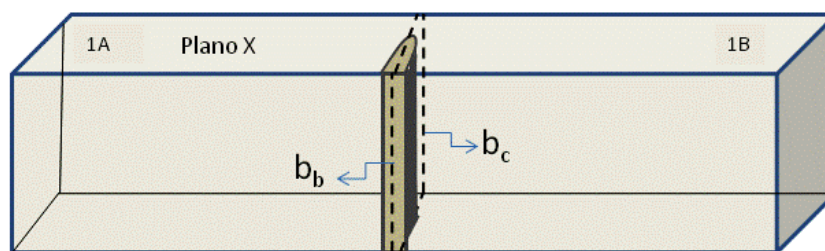


Figura A.1: Identificação das medidas realizadas nos corpos lisos.



Vista do Plano X

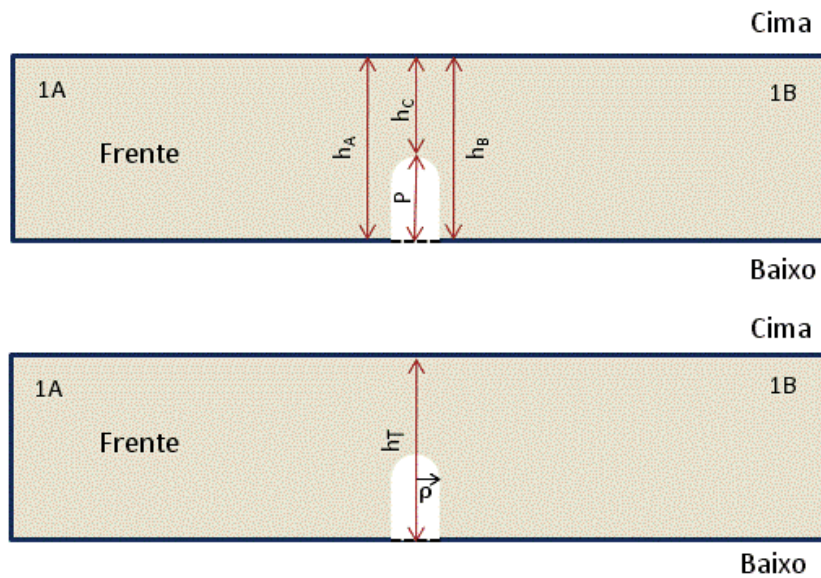
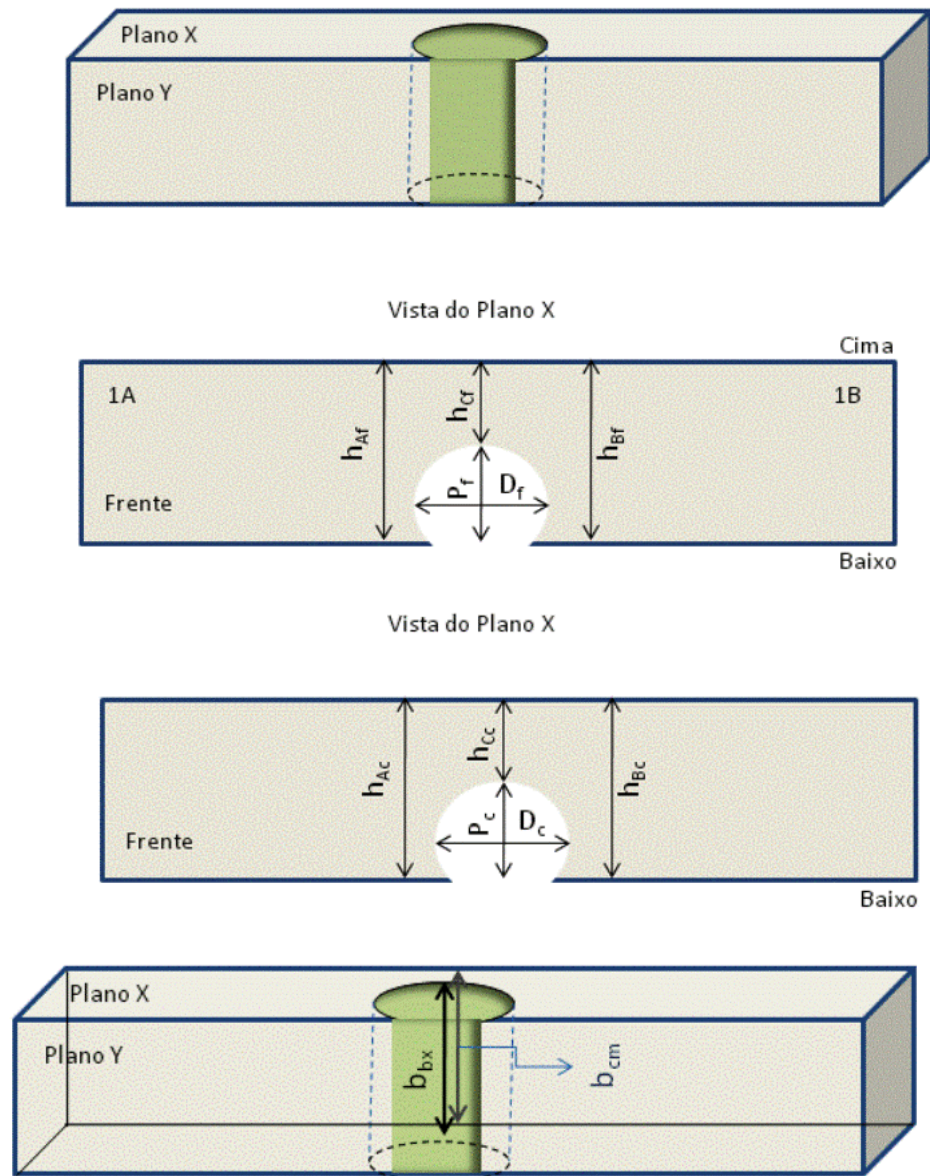
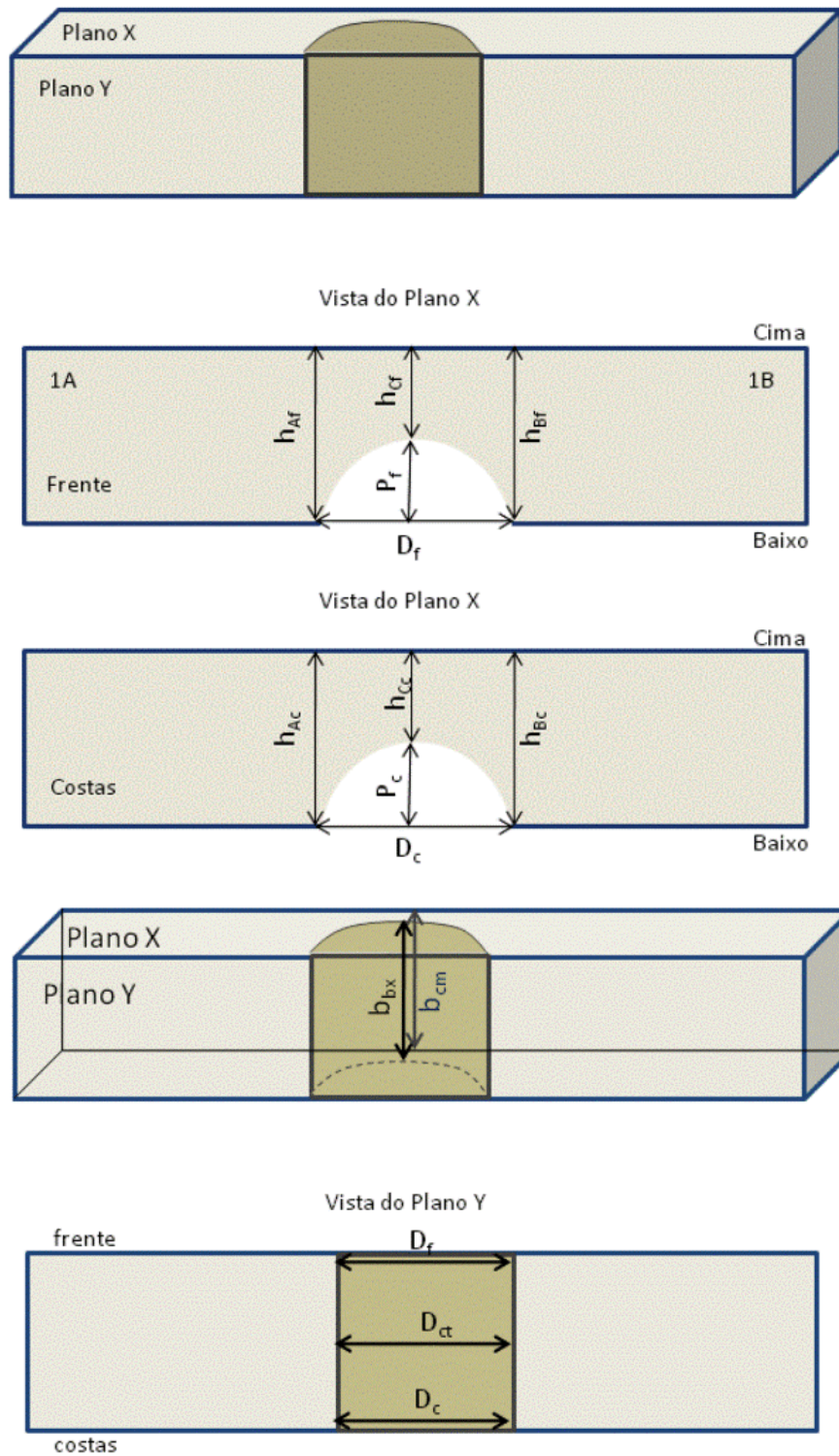


Figura A.2: Identificação das medidas realizadas nos corpos em U profundo.



**Figura A.3: Identificação das medidas realizadas nos corpos em arco de círculo menor.**

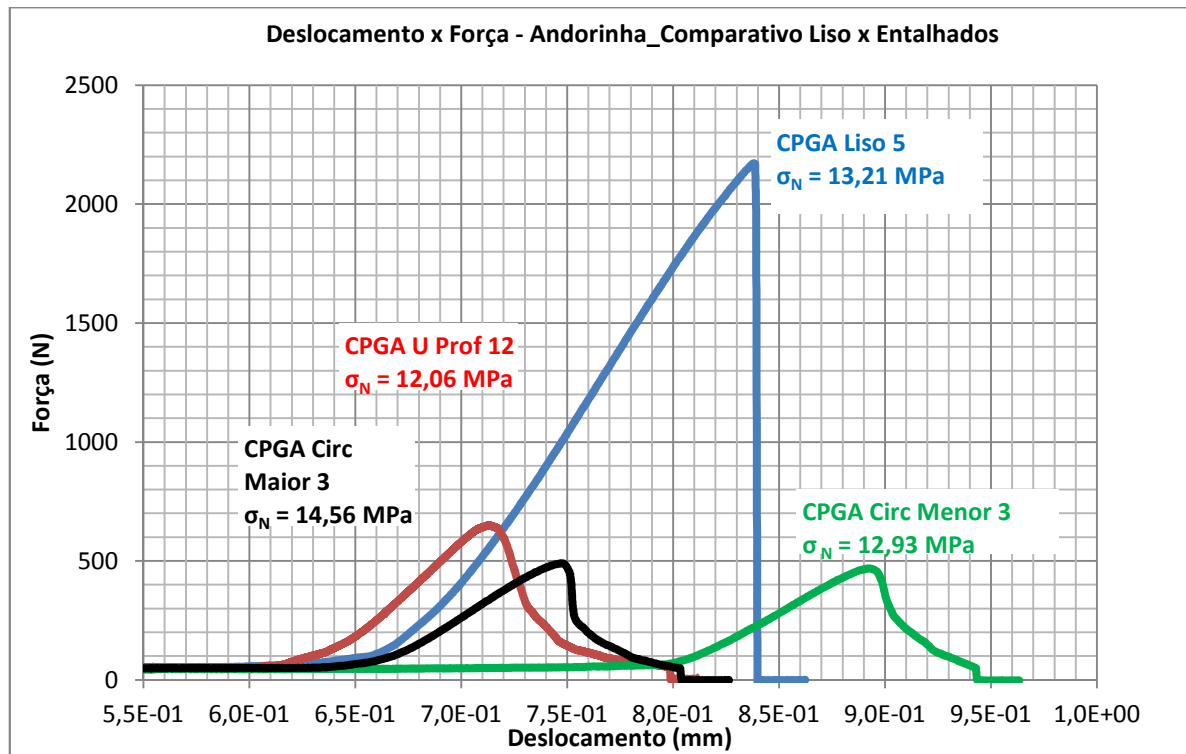




**Figura A.4: Identificação das medidas realizadas nos corpos em arco de círculo maior.**

## APÊNDICE B: Gráficos típicos de deformação x força obtidos a partir da INSTRON.

Segue-se neste apêndice compilação de gráficos típicos de deformação x força, obtidos a partir da INSTRON, comparando as três geometrias para cada material testado.



**Figura B.1: Gráfico comparativo do comportamento do deslocamento x força para os CPGA.**

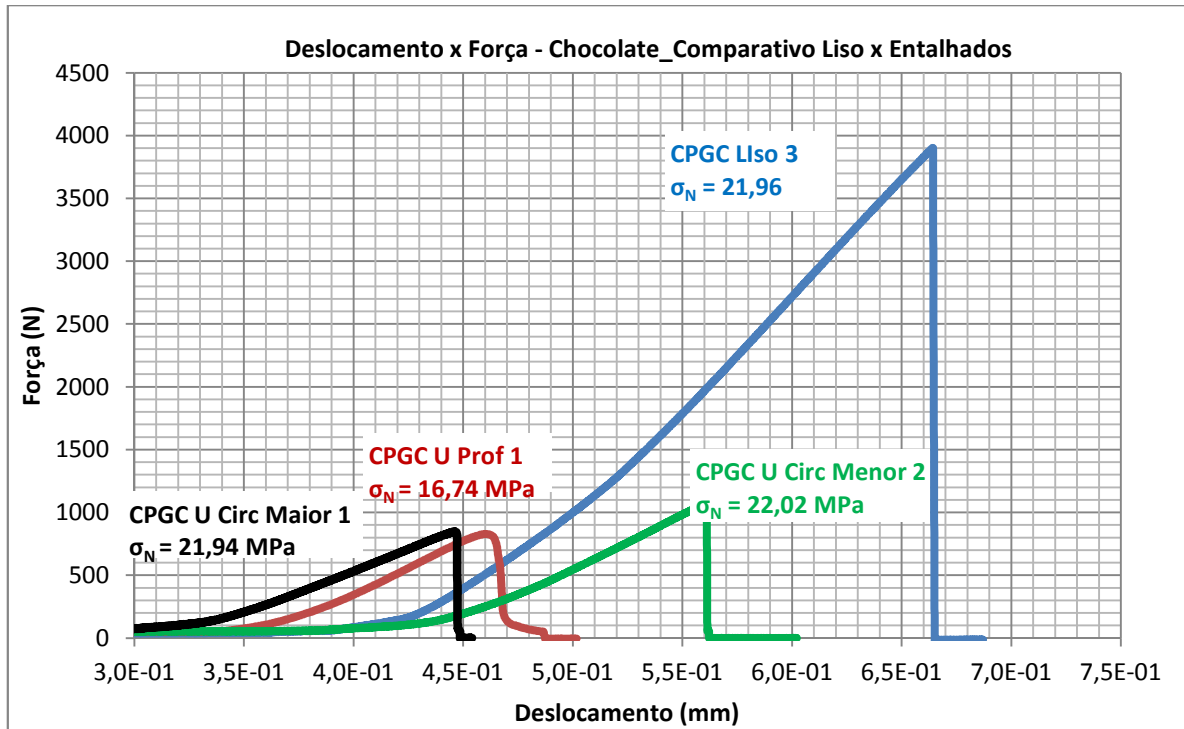


Figura B.2: Gráfico comparativo do comportamento do deslocamento x força para os CPGC.

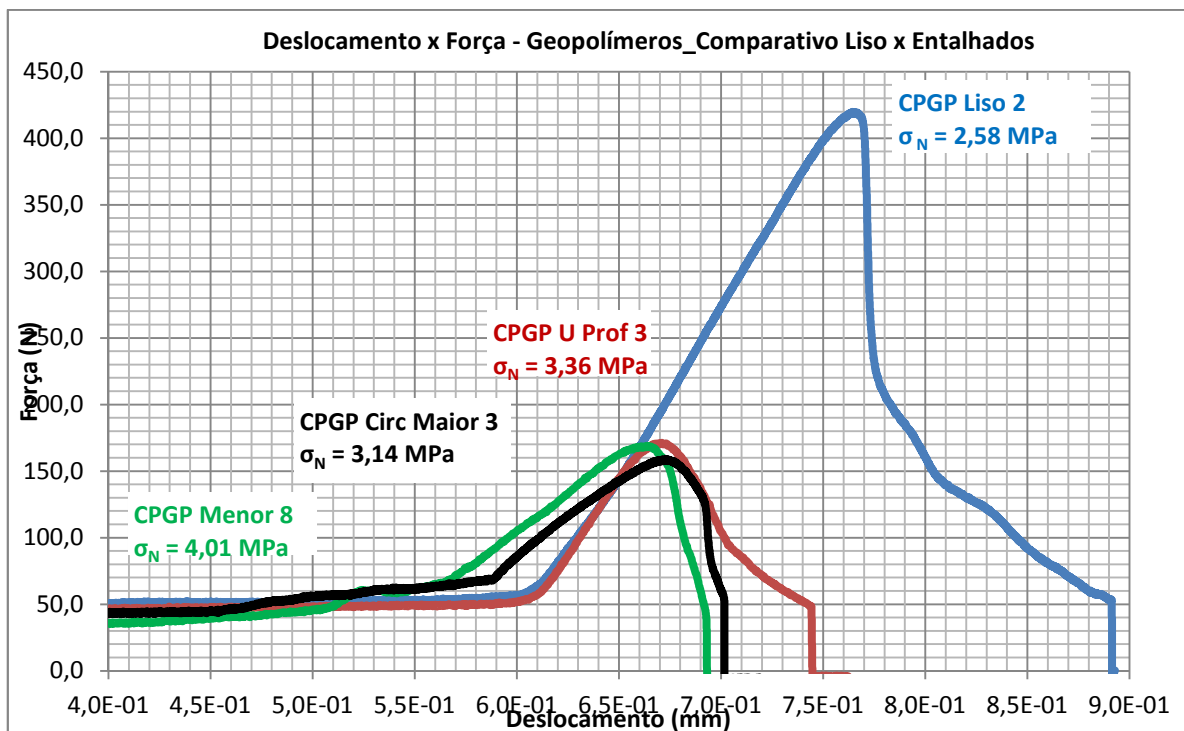


Figura B.3: Gráfico comparativo do comportamento do deslocamento x força para os CPGP.

## APÊNDICE C: Tabelas com a Apresentação dos Cálculos e Resultados da INSTRON.

### C.1 – Para os CPGA

**Tabela C.1: Resultados obtidos para os CPGA sem entalhes.**

Ensaio	Força Máxima (N)	Tensão Máx. Ruptura (MPa)			Módulo Elasticidade (GPa)		
		Deformação na Tensão Máx. Ruptura (adm)			Gráfico		Instron
		1	2	Média	1	Médio	
1	2336	12,77	13,27	13,02	7,66	6,88	8,58
		5,52569E-03	5,83043E-03	5,67806E-03			
2	2260	na	13,64	13,64	9,19	8,53	0,22
		na	6,54346E-03	6,54346E-03			
3 <sup>7</sup>	500	na	2,98	2,98	3,38	na	0,38
		na	5,32567E-03	5,32567E-03			
4	2181	na	12,98	12,98	9,53	na	1,08
		na	6,27595E-03	6,27595E-03			
5	2172	na	13,21	13,21	11,86	na	0,08
		na	5,69435E-03	5,69435E-03			
6	2158	na	12,76	12,76	10,18	10,18	0,08
		na	6,33829E-03	6,33829E-03			
7	1400	na	8,45	8,45	8,39	8,39	0,03
		na	6,53662E-03	6,53662E-03			
8	2169	9,90	14,53	12,21	9,46	6,46 <sup>8</sup>	6,81
		4,87356E-03	5,72603E-03	5,29980E-03			
9	1755	na	11,63	11,63	8,61	8,11	0,33
		na	5,84397E-03	5,84397E-03			
10 (SG1)*	2289	na	13,95	13,95	12,18	9,42	12,11
		na	4,42504E-03	4,42504E-03			
Máx	2336	12,77	14,53	13,95	12,18	10,18	12,11
		5,52569E-03	6,54346E-03	6,54346E-03			
Mín	1400	9,90	2,98	2,98	7,66	6,46	0,03
		4,87356E-03	4,42504E-03	4,42504E-03			
Amp	936	2,87	11,55	10,97	4,52	3,72	12,08
		6,52130E-04	2,11842E-03	2,11842E-03			
Média	2080	11,33	12,71	12,43	9,67	8,28	3,26
		5,19963E-03	5,91268E-03	5,84839E-03			
DP	305	2,03	1,79	1,65	1,52	1,31	4,64
		4,61126E-04	6,52625E-04	6,85496E-04			

<sup>7</sup> O corpo 3 apresentou rompimento anômalo quando comparado aos demais corpos de prova, aparentando ter sofrido torção durante o ensaio, isso foi devido a certo grau de antiparalelismo entre as faces. Por isso, foi desconsiderado das estatísticas.

<sup>8</sup> Exclusivamente para este corpo, o valor de E = 6,46 GPa se refere ao módulo da segunda zona apresentada e não ao valor médio.

Tabela C.2: Resultados obtidos para os CPGA entalhados em U Profundo.

Ensaio	Força Máxima (N)	$\sigma_N$ (MPa)	Tensão Máxima de Ruptura (MPa)	Kt	$\rho$ (m)	$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$P_{med}$ (mm)	L (mm)	MP (MPa)	ML (MPa)	ERRO (%)
											MP
											ML
1	641	4,32	14,64	3,39	1,006E-03	0,41	12,11	0,3337	4,37	4,50	1%
											4%
2	542	3,16	10,02	3,17	1,024E-03	0,28	14,71	0,1589	4,29	4,34	36%
											37%
3	635	3,96	12,99	3,28	1,005E-03	0,36	13,40	0,2624	4,33	4,43	9%
											12%
4	589	3,64	11,87	3,26	9,725E-04	0,33	14,11	0,2119	4,31	4,38	18%
											20%
5	719	4,62	15,02	3,25	1,064E-03	0,43	12,30	0,3712	4,39	4,53	5%
											2%
6	426	2,58	8,75	3,39	9,800E-04	0,24	13,04	0,1160	4,28	4,32	66%
											68%
7	648	3,61	11,30	3,13	1,090E-03	0,33	14,55	0,2153	4,31	4,38	19%
											21%
8	673	4,09	13,70	3,35	9,980E-04	0,38	12,62	0,2899	4,35	4,46	6%
											9%
9	620	3,50	11,48	3,28	1,004E-03	0,32	13,93	0,2048	4,31	4,38	23%
											25%
10	573	3,31	10,23	3,09	1,081E-03	0,30	14,90	0,1750	4,29	4,35	30%
											31%
11	727	4,86	16,23	3,34	1,037E-03	0,46	12,84	0,4227	4,40	4,55	9%
											6%
12 (SG1)*	650	3,72	12,42	3,34	9,805E-04	0,34	13,45	0,2342	4,32	4,41	16%
											18%
Máx	727	4,86	16,23	3,39	1,090E-03	0,46	14,90	0,4227	4,40	4,55	66%
											68%
Mín	426	2,58	8,75	3,09	9,725E-04	0,24	12,11	0,1160	4,28	4,32	1%
											2%
Amp	301	1,14	7,49	0,30	1,170E-04	0,22	2,79	0,3066	0,12	0,23	50%
											49%
Média	620	3,78	12,39	3,27	1,020E-03	0,35	13,49	0,2497	4,33	4,42	20%
											21%
DP	82	0,64	2,23	0,10	3,973E-05	0,06	0,95	0,0905	0,04	0,08	18%
											18%

Tabela C.3: Resultados obtidos para os CPGA entalhados em círculo menor.

Ensaio	Força Máxima (N)	$\sigma_N$ (MPa)	Tensão Máxima de Ruptura (Mpa)	Kt	D/2 (m)	$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$P_{med}$ (mm)	L (mm)	MP (MPa)	ML (MPa)	ERRO (%)
											MP
1	238	1,46	1,94	1,33	9,245E-03	0,17	15,45	0,0539	4,25	4,27	191%
											193%
2	544	3,40	4,49	1,32	9,295E-03	0,38	15,57	0,2845	4,33	4,41	27%
											30%
3	468	2,94	3,88	1,32	9,380E-03	0,33	15,57	0,2146	4,30	4,37	46%
											49%
4	364	2,15	3,01	1,40	9,365E-03	0,26	13,96	0,1313	4,28	4,33	99%
											101%
5	562	3,43	4,70	1,37	9,375E-03	0,40	14,19	0,3204	4,35	4,46	27%
											30%
6	133	0,82	1,08	1,32	9,465E-03	0,09	15,51	0,0172	4,24	4,25	417%
											418%
7	569	3,38	4,50	1,33	9,375E-03	0,39	16,03	0,2932	4,33	4,41	28%
											31%
8	547	3,39	4,58	1,35	9,425E-03	0,39	14,50	0,3055	4,34	4,44	28%
											31%
9	624	3,61	4,98	1,38	9,365E-03	0,43	14,45	0,3597	4,36	4,48	21%
											24%
10	570	3,22	4,41	1,37	9,355E-03	0,38	15,18	0,2817	4,33	4,42	34%
											37%
11 - SG2*	709	4,21	5,77	1,37	9,370E-03	0,49	14,56	0,4824	4,40	4,56	5%
											8%
Máx	709	0,82	5,77	1,40	9,465E-03	0,49	16,03	0,4824	4,40	4,56	417%
											418%
Mín	133	4,21	1,08	1,32	9,245E-03	0,09	13,96	0,0172	4,24	4,25	5%
											8%
Amp	576	3,39	4,69	0,08	2,200E-04	0,40	2,07	0,4652	0,16	0,31	413%
											410%
Média	484	2,91	3,94	1,35	9,365E-03	0,34	15,00	0,2495	4,32	4,40	84%
											86%
DP	172	1,01	1,39	0,03	5,784E-05	0,12	0,68	0,1364	0,05	0,09	122%
											122%

**Tabela C.4: Resultados obtidos para os CPGA entalhados em círculo maior.**

Ensaio	Força Máxima (N)	$\sigma_N$ (MPa)	Tensão Máxima de Ruptura (Mpa)	Kt	D/2 (m)	K <sub>ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	P <sub>med</sub> (mm)	L (mm)	MP (MPa)	ML (MPa)	ERRO (%)
											MP
											ML
1	645	4,09	4,87	1,19	1,925E-02	0,60	14,68	0,7057	4,47	4,69	9%
											15%
2	133	0,86	1,02	1,19	1,922E-02	0,13	14,86	0,0311	4,25	4,26	394%
											395%
3	489	3,09	3,65	1,18	1,931E-02	0,45	16,18	0,3984	4,36	4,48	41%
											45%
4	59	0,36	0,43	1,19	1,927E-02	0,05	15,20	0,0055	4,24	4,24	1077%
											1078%
5	527	3,35	3,99	1,19	1,935E-02	0,49	15,38	0,4758	4,39	4,53	31%
											35%
6	614	3,74	4,49	1,20	1,931E-02	0,55	14,72	0,6018	4,44	4,63	19%
											24%
7	571	3,55	4,22	1,19	1,933E-02	0,52	14,92	0,5337	4,41	4,58	24%
											29%
8	525	3,38	3,99	1,18	1,931E-02	0,49	15,25	0,4752	4,39	4,54	30%
											34%
9	34	0,21	0,25	1,18	1,942E-02	0,03	15,47	0,0018	4,24	4,24	1918%
											1918%
10	508	3,09	3,65	1,18	1,938E-02	0,45	16,09	0,3987	4,36	4,48	41%
											45%
11 <sup>9</sup> (SG1)*											
Máx	645,00	4,09	4,87	1,20	1,942E-02	0,60	16,18	0,7057	4,47	4,69	1918%
											1918%
Mín	34,00	0,21	0,25	1,18	1,922E-02	0,03	14,68	0,0018	4,24	4,24	9%
											15%
Amp	611,00	3,88	4,62	0,02	2,000E-04	0,57	1,50	0,7039	0,24	0,46	1908%
											1903%
Média	410,50	2,57	3,06	1,19	1,931E-02	0,38	15,27	0,3628	4,35	4,47	358%
											362%
DP	237,31	1,48	1,77	0,01	5,971E-05	0,22	0,53	0,2582	0,09	0,17	642%
											641%

<sup>9</sup> O corpo referenciado como 11 foi normalmente preparado para o ensaio com SG, mas já se apresentava fraturado, inviabilizando o ensaio, o que devido a aparente perfeição externa não foi possível ser constatado previamente. Como os corpos de prova sobressalentes haviam se esgotado o ensaio não pôde ser repetido.

## C.2 – Para os CPGC

Tabela C.5: Resultados obtidos para os CPGC sem entalhes.

Ensaio	Força Máxima (N)	Tensão Máx. Ruptura (MPa)			Módulo Elasticidade (GPa)		
		Deformação na Tensão Máx. Ruptura (adm)			Gráfico		Instron
		1	2	Média	1	Médio	
1*	3434	19,08	19,63	19,36	12,46	12,46	13,44
		4,08256E-03	4,14681E-03	4,11469E-03			
2*	3627	na	20,11	20,11	13,51	13,51	13,77
		na	5,98880E-03	5,98880E-03			
3*	3901	na	21,96	21,96	14,78	12,93	15,24
		na	4,71255E-03	4,71255E-03			
4 (SG Gde)*	3664	na	20,90	20,90	14,76	11,47	16,12
		na	4,91474E-03	4,91474E-03			
5	4058	6,86	22,82	14,84	14,73	na	14,29
		5,07475E-03	6,40889E-03	5,74182E-03			
6	3651	12,58	20,31	16,45	8,32	6,10	7,44
		6,68417E-03	7,68944E-03	7,18681E-03			
7	3774	na	22,29	22,29	12,88	na	1,88
		na	5,66288E-03	5,66288E-03			
8 (SG Peq)*	3799	na	21,52	21,52	14,64	14,64	16,30
		na	4,40396E-03	4,40396E-03			
9	3708	na	20,60	20,60	13,54	13,54	13,40
		na	4,18366E-03	4,18366E-03			
10	3939	11,51	22,77	17,14	15,99	na	14,87
		4,76316E-03	5,57440E-03	5,16878E-03			
11	4262	na	23,68	23,68	14,58	14,58	14,62
		na	5,10383E-03	5,10383E-03			
12	4430	na	24,19	24,19	14,36	12,29	14,24
		na	4,78750E-03	4,78750E-03			
13	3833	na	22,58	22,58	13,51	13,51	14,49
		na	4,50311E-03	4,50311E-03			
14	4215	12,47	23,45	17,96	10,18	13,45	14,66
		4,79636E-03	5,72462E-03	5,26049E-03			
15	3705	na	20,43	20,43	11,05	na	10,23
		na	5,29400E-03	5,29400E-03			
Máx	4430	19,08	24,19	24,19	15,99	14,64	16,30
		6,68417E-03	7,68944E-03	7,18681E-03			
Mín	3434	6,86	19,63	14,84	8,32	6,10	1,88
		4,08256E-03	4,14681E-03	4,11469E-03			
Amp	996	12,22	4,56	9,35	7,67	8,54	14,42
		2,60161E-03	3,54263E-03	3,07212E-03			
Média	3867	12,50	21,82	20,27	13,29	12,59	13,00
		5,08020E-03	5,27328E-03	5,13517E-03			
DP	272	4,36	1,43	2,69	2,05	2,35	3,81
		9,68132E-04	9,48636E-04	7,95363E-04			





**Tabela C.7: Resultados obtidos para os CPGC entalhados em arco de círculo menor.**

Ensaio	Força Máxima (N)	$\sigma_N$ (MPa)	Tensão Máxima de Ruptura (Mpa)	Kt	D/2 (m)	$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$P_{med}$ (mm)	L (mm)	MP (MPa)	ML (MPa)	ERRO (%)
											MP
											ML
1	1018	5,64	7,78	1,38	9,390E-03	0,67	13,82	0,2987	7,46	7,63	32%
											35%
2 (SG1)*	1063	6,11	8,31	1,36	9,455E-03	0,72	14,14	0,3428	7,48	7,68	22%
											26%
3	1173	6,28	8,73	1,39	9,430E-03	0,75	14,00	0,3773	7,50	7,72	19%
											23%
4	1013	5,73	7,79	1,36	9,430E-03	0,67	14,55	0,3007	7,45	7,62	30%
											33%
5	1075	5,74	7,81	1,36	9,435E-03	0,67	14,96	0,3019	7,44	7,61	30%
											33%
6	1268	6,86	9,47	1,38	9,450E-03	0,82	14,22	0,4447	7,54	7,79	10%
											14%
7	1067	5,86	8,03	1,37	9,290E-03	0,69	14,22	0,3144	7,46	7,64	27%
											30%
8	1048	5,86	8,03	1,37	9,485E-03	0,69	14,14	0,3210	7,47	7,65	27%
											31%
9	1067	5,63	7,71	1,37	9,490E-03	0,67	14,90	0,2965	7,44	7,61	32%
											35%
10	1129	5,94	8,14	1,37	9,445E-03	0,70	14,89	0,3284	7,46	7,64	26%
											29%
11	1070	5,57	7,63	1,37	9,445E-03	0,66	15,11	0,2888	7,44	7,59	33%
											36%
12	1104	6,19	8,48	1,37	9,475E-03	0,73	14,18	0,3578	7,49	7,69	21%
											24%
Máx	1268	6,86	9,47	1,39	9,490E-03	0,82	15,11	0,4447	7,54	7,79	33%
											36%
Mín	1013	5,57	7,63	1,36	9,290E-03	0,66	13,82	0,2888	7,44	7,59	10%
											14%
Amp	255	1,29	1,84	0,03	2,000E-04	0,16	1,29	0,1559	0,10	0,20	13%
											12%
Média	1091	5,95	8,16	1,37	9,435E-03	0,70	14,43	0,3311	7,47	7,66	26%
											29%
DP	71	0,37	0,53	0,01	5,313E-05	0,05	0,43	0,0448	0,03	0,06	7%
											7%

**Tabela C.8: Resultados obtidos para os CPGC entalhados em arco de círculo maior.**

Ensaio	Força Máxima (N)	$\sigma_N$ (MPa)	Tensão Máxima de Ruptura (Mpa)	Kt	D/2 (m)	$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	P <sub>med</sub> (mm)	L (mm)	MP (MPa)	ML (MPa)	ERRO (%)
											MP
											ML
1 (SG1)*	845	4,84	5,71	1,18	1,984E-02	0,71	15,92	0,3398	7,45	7,63	54% 58%
2	1138	6,20	7,43	1,20	1,947E-02	0,92	14,63	0,5649	7,60	7,91	23% 28%
3	933	5,48	6,47	1,18	1,965E-02	0,80	15,33	0,4314	7,51	7,74	37% 41%
4	944	5,25	6,20	1,18	1,978E-02	0,77	16,09	0,3997	7,48	7,69	43% 46%
5	895	5,13	6,05	1,18	1,960E-02	0,75	15,37	0,3771	7,48	7,68	46% 50%
6	1030	5,94	7,07	1,19	1,967E-02	0,88	15,29	0,5159	7,56	7,83	27% 32%
7	985	5,33	6,29	1,18	1,983E-02	0,78	15,99	0,4118	7,49	7,70	41% 44%
8	777	4,38	5,16	1,18	1,979E-02	0,64	16,41	0,2762	7,42	7,56	69% 72%
9	811	4,57	5,39	1,18	1,975E-02	0,67	16,27	0,3016	7,43	7,58	63% 66%
10	1107	6,04	7,19	1,19	1,960E-02	0,89	15,24	0,5317	7,57	7,85	25% 30%
11	1035	5,84	6,95	1,19	1,956E-02	0,86	15,30	0,4960	7,55	7,81	29% 34%
12	996	5,79	6,83	1,18	1,976E-02	0,85	15,34	0,4843	7,54	7,80	30% 35%
13	1165	6,29	7,49	1,19	1,972E-02	0,93	15,50	0,5801	7,59	7,89	21% 25%
14	1172	6,19	7,43	1,20	1,954E-02	0,92	14,86	0,5661	7,60	7,90	23% 28%
15	1010	5,37	6,39	1,19	1,982E-02	0,80	16,00	0,4250	7,50	7,71	40% 44%
16	873	4,77	5,63	1,18	2,013E-02	0,71	16,81	0,3348	7,44	7,61	56% 59%
17	934	5,30	6,25	1,18	1,980E-02	0,78	16,01	0,4065	7,49	7,70	41% 45%
18	1010	5,57	6,63	1,19	1,973E-02	0,83	15,77	0,4550	7,52	7,75	35% 39%
19	696	3,80	4,48	1,18	2,000E-02	0,56	16,22	0,2112	7,38	7,49	94% 97%
20	1054	5,84	6,95	1,19	1,952E-02	0,86	15,07	0,4949	7,55	7,82	29% 34%
Máx	1172	6,29	7,49	1,20	2,013E-02	0,93	16,81	0,5801	7,60	7,91	94% 97%
Mín	696	3,80	4,48	1,18	1,947E-02	0,56	14,63	0,2112	7,38	7,49	21% 25%
Amp	476	2,49	3,00	0,02	6,550E-04	0,37	2,18	0,3690	0,22	0,42	74% 72%
Média	971	5,40	6,40	1,19	1,973E-02	0,80	15,67	0,4302	7,51	7,73	41% 45%
DP	129	0,67	0,82	0,01	1,610E-04	0,10	0,56	0,1023	0,06	0,12	18% 18%

## C.3 – Para os CPGP

Tabela C.9: Resultados obtidos para os CPGP sem entalhes.

Ensaio	Força Máxima (N)	Tensão Máx. Ruptura (MPa)			Módulo Elasticidade (GPa)		Instron
		Deformação na Tensão Máx. Ruptura (adm)			Gráfico		
		1	2	Média	1	Médio	
1 (SG1)*	406	na	2,43	2,43	1,63	1,63	0,39
		na	5,86687E-03	5,86687E-03			
2 (SG2)*	420	na	2,58	2,58	2,22	2,22	0,36
		na	5,17259E-03	5,17259E-03			
3	463	na	2,72	2,72	2,51	1,42	0,49
		na	5,22970E-03	5,22970E-03			
4	430	na	2,67	2,67	2,51	2,51	0,36
		na	5,25281E-03	5,25281E-03			
5	399	na	2,47	2,47	1,83	2,28	0,79
		na	5,45908E-03	5,45908E-03			
6	386	2,39	3,09	2,74	2,64	2,01	1,66
		4,62556E-03	5,04050E-03	4,83303E-03			
7	442	na	2,49	2,49	2,85	2,10	0,71
		na	5,77402E-03	5,77402E-03			
8	546	na	3,37	3,37	2,69	2,69	0,36
		na	6,13690E-03	6,13690E-03			
9	579	na	3,46	3,46	3,48	3,48	0,42
		na	5,66688E-03	5,66688E-03			
10	525	na	3,15	3,15	2,55	2,55	0,42
		na	5,03201E-03	5,03201E-03			
11	524	na	3,05	3,05	3,01	3,01	2,78
		na	5,48284E-03	5,48284E-03			
12	546	1,51	3,42	2,465	3,52	1,69	2,75
		4,34937E-03	5,11926E-03	4,73432E-03			
13	490	na	2,73	2,73	1,95	1,95	0,04
		na	4,82712E-03	4,82712E-03			
14	530	na	2,94	2,94	2,13	2,13	0,42
		na	5,31573E-03	5,31573E-03			
15	540	na	3,21	3,21	2,97	2,97	0,39
		na	4,77657E-03	4,77657E-03			
16	546	na	3,17	3,17	3,17	3,17	0,16
		na	4,67565E-03	4,67565E-03			
17	893	1,23	5,35	3,29	3,56	4,30	0,89
		4,34965E-03	5,41258E-03	4,88112E-03			
18	536	na	3,27	3,27	3,25	3,25	3,06
		na	4,64735E-03	4,64735E-03			
19	499	na	3,14	3,14	3,83	3,83	0,29
		na	4,63411E-03	4,63411E-03			
20	643	na	3,93	3,93	3,04	3,04	1,23
		na	4,98794E-03	4,98794E-03			
Máx	893	2,39	5,35	3,93	6,06	4,30	3,06
		4,62556E-03	6,13690E-03	6,13690E-03			
Mín	386	1,23	2,43	2,43	1,63	1,42	0,04
		4,34937E-03	4,63411E-03	4,63411E-03			
Amp	507	1,16	2,92	1,50	4,43	2,88	3,02
		2,76190E-04	1,50279E-03	1,50279E-03			
Média	517	1,71	3,13	2,96	2,92	2,61	0,90
		4,44153E-03	5,22553E-03	5,16933E-03			
DP	111	0,61	0,65	0,41	0,93	0,76	0,93
		1,59378E-04	4,22471E-04	4,44938E-04			





**Tabela C.12: Resultados obtidos para os CPGP entalhados arco de círculo maior.**

Ensaio	Força Máxima (N)	Tensão Nominal (MPa)	Tensão Máxima de Ruptura (Mpa)	K <sub>t</sub>	D/2 (m)	K <sub>Ic</sub> (MPa.m <sup>1/2</sup> )	P <sub>med</sub> (mm)	L (mm)	MP (MPa)	ML (MPa)	ERRO (%)
											MP
											ML
1	202	1,33	1,69	1,27	1,472E-02	0,18	12,97	1,0713	1,14	1,23	14%
2	198	1,33	1,66	1,25	1,493E-02	0,18	14,81	1,0530	1,13	1,21	7%
3 (SG1)*	159	0,92	1,17	1,27	1,485E-02	0,13	14,15	0,5173	1,09	1,13	15%
4	202	1,12	1,42	1,27	1,506E-02	0,15	15,12	0,7775	1,11	1,16	9%
5	207	1,21	1,52	1,26	1,496E-02	0,17	14,98	0,8871	1,12	1,18	18%
6	207	1,29	1,63	1,26	1,498E-02	0,18	14,82	1,0096	1,13	1,20	23%
7	221	1,16	1,47	1,27	1,503E-02	0,16	15,00	0,8324	1,11	1,17	1%
8	198	1,16	1,47	1,27	1,493E-02	0,16	14,28	0,8266	1,11	1,18	4%
9	124	0,75	0,92	1,22	1,498E-02	0,10	16,48	0,3200	1,07	1,09	2%
10	177	1,143	1,43	1,25	1,459E-02	0,15	13,95	0,7560	1,11	1,17	42%
11	186	1,13	1,42	1,26	1,494E-02	0,15	14,71	0,7726	1,11	1,17	45%
12	191	1,09	1,36	1,25	1,502E-02	0,15	15,95	0,7115	1,10	1,15	3%
13	185	1,11	1,40	1,26	1,495E-02	0,15	14,71	0,7462	1,10	1,16	3%
14	180	1,09	1,35	1,24	1,498E-02	0,15	15,18	0,6983	1,10	1,15	2%
15	134	0,84	1,04	1,24	1,491E-02	0,11	15,70	0,4127	1,08	1,11	3%
16	182	1,09	1,37	1,26	1,480E-02	0,15	14,23	0,7124	1,10	1,16	1%
17	133	0,81	1,00	1,23	1,506E-02	0,11	16,00	0,3813	1,07	1,10	6%
18	136	0,81	1,00	1,24	1,493E-02	0,11	15,55	0,3842	1,07	1,10	32%
19	201	1,07	1,36	1,27	1,486E-02	0,15	15,48	0,7000	1,10	1,15	36%
20	181	1,05	1,32	1,26	1,501E-02	0,14	15,11	0,6704	1,10	1,15	33%
Máx	221	1,33	1,69	1,27	1,506E-02	0,18	16,48	1,0713	1,14	1,23	36%
Mín	124	0,75	0,92	1,22	1,459E-02	0,10	12,97	0,3200	1,07	1,09	0%
Amp	97	0,58	0,77	0,05	4,700E-04	0,08	3,51	0,7513	0,08	0,14	1%
Média	180	1,08	1,35	1,26	1,492E-02	0,15	14,96	0,7120	1,10	1,16	42%
DP	28	0,17	0,22	0,01	1,159E-04	0,02	0,81	0,2180	0,02	0,04	44%
											11%
											12%
											13%
											14%

# ANEXO A – $K_t$ para flexão de uma barra com entalhe em U profundo

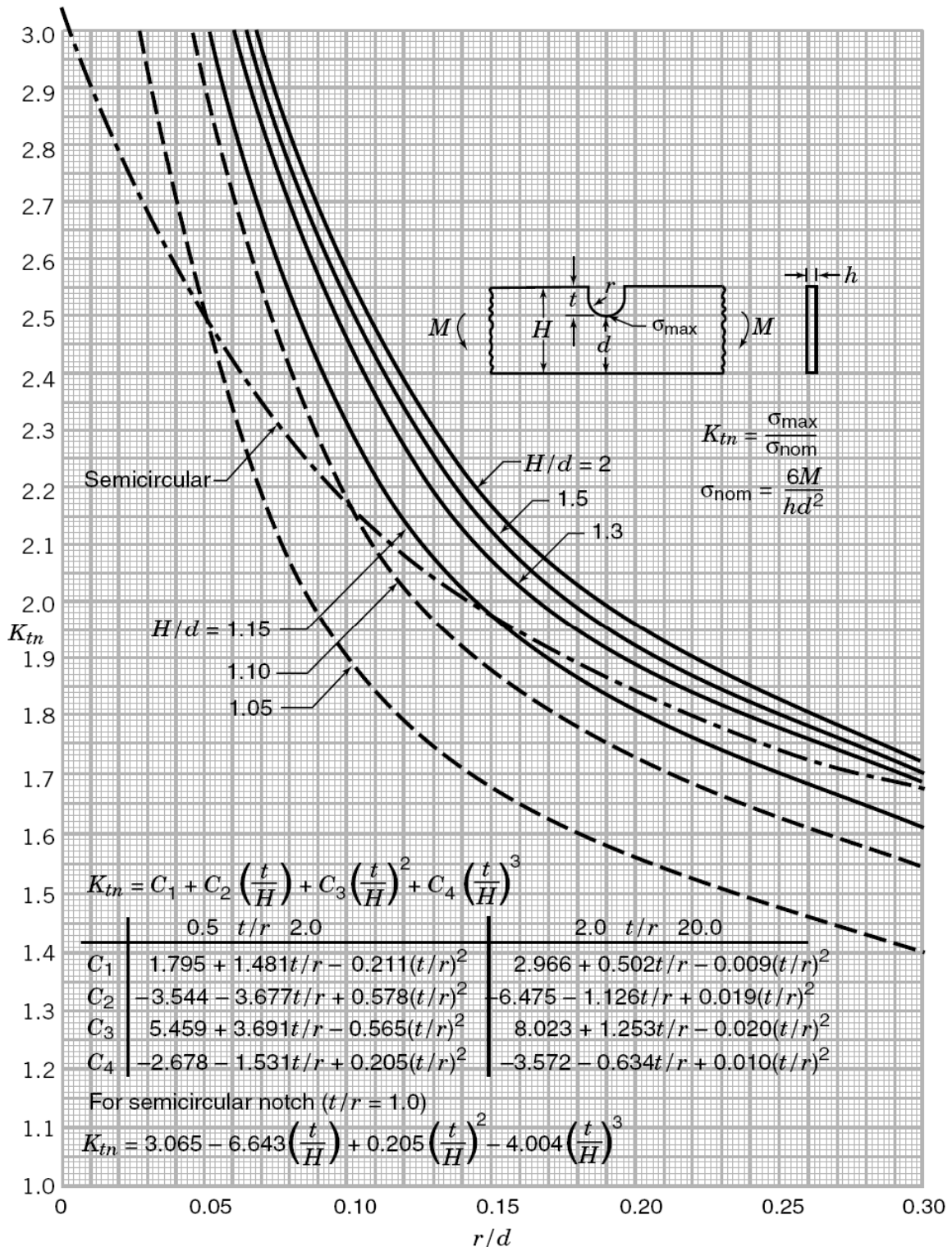


Figura AA.1: Chart para cálculo de  $K_t$  para uma barra entalhada em U profundo submetida à flexão (Retirado de PILKEY, et al., 2008, p.110).