

COMBINAÇÃO DE TRÊS MÉTODOS DA MECÂNICA DA FRATURA
PARA ESTIMAR A TENACIDADE EM MATERIAIS SEMI FRÁGEIS

Fernando Luiz de Carvalho e Silva

Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy
Ribeiro - UENF
Campos dos Goytacazes - RJ
Dezembro-2017

COMBINAÇÃO DE TRÊS MÉTODOS DA MECÂNICA DA FRATURA PARA ESTIMAR A TENACIDADE EM MATERIAIS SEMI FRÁGEIS

Fernando Luiz de Carvalho e Silva

"Tese de doutorado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências necessárias à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais."

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho

Campos dos Goytacazes - RJ
Dezembro-2017

Carvalho e Silva, Fernando Luiz de
COMBINAÇÃO DE TRÊS MÉTODOS DA MECÂNICA DA FRATURA PARA ESTIMAR A TENACIDADE EM MATERIAIS SEMI FRÁGEIS / Fernando Luiz de Carvalho e Silva. – Campos dos Goytacazes - RJ, Dezembro-2017.

xxxviii, 203 f. : il.

Tese (Doutorado) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais– Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro - UENF. Laboratório de Materiais Avançados. Dezembro-2017.

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho

COMBINAÇÃO DE TRÊS MÉTODOS DA MECÂNICA DA FRATURA PARA ESTIMAR A TENACIDADE EM MATERIAIS SEMI FRÁGEIS

Fernando Luiz de Carvalho e Silva

Tese de doutorado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências necessárias à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Trabalho aprovado em 15 de dezembro de 2017

Comissão Examinadora:

Prof. Eduardo Atem de Carvalho

Ph.D. Engenharia Mecânica (UENF) - Orientador

Prof. Herval Ramos Paes Jr.

D.Sc. Engenharia Metalúrgica e de Materiais (UENF)

Prof. Rancés Castillo Lara

D.Sc. Ciências Técnicas (UENF)

Prof. Rogerio Atem de Carvalho

D.Sc. Engenharia de Produção (IF Fluminense)

Campos dos Goytacazes - RJ
Dezembro-2017

*Este trabalho é dedicado às crianças atuais e adultas que,
quando pequenas, sonham se tornar cientistas.*

Agradecimentos

Esta tese é consequência de estudo, dedicação, respeito ao conhecimento, à educação, e ao trabalho, tudo isso por parte de diversas pessoas, a quem preciso agradecer:

Primeiramente aos grandes mestres do passado e atuais, engenheiros e cientistas que formaram as bases do conhecimento nas quais hoje, humildemente tentamos colaborar.

Ao professor Eduardo Atem de Carvalho, de quem obtive uma orientação equilibrada e rica, além da maior parte do conhecimento aqui utilizado, pelos exemplos que tentarei sempre assimilar, que me levaram a concluir este trabalho.

Agradeço aos professores do Laboratório de Ciência dos Materiais, em especial aos professores doutores Angelus Giusepe e Herval Ramos Paes Jr., por suas valorosas contribuições em minha formação.

Agradeço ao colega Carlan Ribeiro Rodrigues, pela montagem da máquina de corte dos corpos de prova, sem a qual este trabalho não seria possível.

Agradeço aos técnicos da UENF, em especial a Sílvia Gonçalves Mendes, Bruno de Souza Barcelos e Michel Picanço Oliveira, pela ajuda na montagem da máquina de corte, e apoio sempre precisei de ajuda.

Meus agradecimentos aos membros das bancas de avaliação ao longo de todo o doutorado pela paciência e pelas contribuições oferecidas.

“Se há algo em mim que pode ser chamado religioso é a ilimitada admiração pela estrutura do universo até onde nossa ciência pode revelá-la.

(Albert Einstein)

“Para mim, é muito melhor compreender o universo como ele realmente é do que persistir no engano, por mais satisfatório e tranquilizador que possa parecer.

(Carl Seagan)

Resumo

Materiais semi frágeis, apesar de não apresentarem plastificação, sofrem danos e perda da linearidade no final do regime elástico. A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) suporta o desenho e manutenção de componentes frágeis e semi frágeis na presença de trincas ou entalhes singulares. A fronteira entre entalhes singulares e não singulares varia em função do material e da geometria do componente. As equações atualmente disponíveis penalizam os projetos em função de critérios extremamente conservadores. Normas específicas para medir tenacidade à fratura utilizam técnicas que não consideram as características de materiais frágeis e semi frágeis. Esta pesquisa tem como objetivo descrever um processo capaz de estimar a tenacidade à fratura destes materiais de forma mais precisa e viável, unindo Teoria da Distância Crítica e Curva-R, e possibilitando o uso e a investigação científica deste tipo de materiais. Foram produzidos corpos de prova para flexão, com entalhes em U, quatro espessuras entre 0.3 e 3.2 mm; nas profundidades de 30%, 40% e 50% da altura do corpo de prova. Os resultados mostram que para o granito cinza andorinha foi possível estimar o tamanho de raio máximo para que o entalhe em U se comporte como uma trinca. Os valores de Tenacidade à Fratura foram estimados a partir de uma Equação que adapta a Tenacidade de entalhes em U. Foram desenvolvidos ensaios visando determinar a fronteira entre o comportamento de falha por resistência e falha por tenacidade. Foram realizados testes estatísticos comprovando os valores de tenacidade encontrados. Foi utilizada a distribuição de Weibull para verificar a presença de comportamento bimodal nos ensaios. Foi possível estimar valores de σ_{rup} de 15,19 MPa, E de 57,2 GPa, K_{Ic} de 0,834 MPa \sqrt{m} . Utilizando a metodologia da Curva-R foi possível identificar um intervalo de trabalho para a Tenacidade à Fratura entre o valor de K_{IN} 0,593 MPa \sqrt{m} até K_{max} de 1,061 MPa \sqrt{m} para entalhes de 50% de profundidade, possibilitando planejar experimentos e projetos de engenharia com maior precisão. A partir desta pesquisa pode-se afirmar que o Critério de Gómez pode ser aplicado para materiais semi frágeis e que é possível associar o uso da teoria da distância crítica e da Curva-R para estimar um intervalo de valores de K_{IC} ainda mais preciso tanto para pesquisa quanto para projeto.

Palavras-chaves: Mecânica da Fratura. Semi frágeis. Teoria da Distância Crítica.

Abstract

Quasi-brittle materials, despite not presenting plastification, suffer damage and loss of linearity at the end of the elastic regime. Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) supports the design and maintenance of fragile and quasi-brittle components in the presence of singular cracks or notches. The boundary between singular and non-singular notches varies depending on the material and the geometry of the component. The currently available equations penalize projects on the basis of extremely conservative criteria. Specific standards for measuring fracture toughness use techniques that do not consider the characteristics of brittle and quasi-brittle materials. This research aims to describe a process capable of estimating the fracture toughness of these materials in a more precise and viable way, combining Theory of Critical Distance and R-Curve, making it possible to use and scientific investigating this type of materials. Flexural test specimens were produced with U-grooves, four thicknesses between 0.3 and 3.2 mm; at depths of 30%, 40% and 50% of the height of the specimen. The results show that for the gray swallow granite it was possible to estimate the maximum radius size so that the U-groove behaves like a crack. The fracture toughness values were estimated from an Equation that adapts the Tenacity of U-notches. Tests were developed to determine the boundary between the failure behavior by resistance and failure by tenacity. Statistical tests were carried out, confirming the tenacity values found. The Weibull distribution was used to verify the presence of bimodal behavior in the assays. It was possible to estimate values of σ_{rup} of 15,19 MPa, 57,2 GPa, K_{Ic} of 0,834 MPa \sqrt{m} . Using the R-curve methodology it was possible to identify a working interval for the fracture toughness between the value of K_{IN} 0,593 MPa \sqrt{m} up to K_{max} of 1,061 MPa \sqrt{m} for 50% depth peaks, making it possible to plan experiments and engineering projects more accurately. From this research, it can be stated that the Gómez Criterion can be applied to semi-fragile materials and that it is possible to associate the use of the critical distance theory and the R-Curve to estimate a range of values of K_{IC} even more accurate for both research and design.

Key-words: Fracture toughness. Theory of Critical Distance. Quasi-brittle materials.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Zona de processamento de fratura onde se formam microtrincas que levam ao amolecimento do material. Fonte: Anderson (2008, p. 355).	7
Figura 2.2 – Distribuição homogênea das linhas de força no corpo . Fonte: adaptado de Pilkey (2008).	8
Figura 2.3 – Distribuição das linhas de força concentradas no corpo . Fonte: adaptado de Pilkey (2008).	8
Figura 2.4 – Esquema do CP de flexão com entalhe U conforme definição de Peterson. Fonte: Pilkey (2008)	10
Figura 2.5 – Esquema descrevendo a Zona de Processamento de Fratura em materiais semi frágeis. Fonte: adaptado de Kumar e Barai (2011)	12
Figura 2.6 – ZPF em metais (à esquerda) e em materiais semi frágeis (à direita). Fonte: Bažant (2002).	13
Figura 2.7 – Estágios de evolução da ZPF. Fonte: Kumar e Barai (2011)	14
Figura 2.8 – Exemplo de microestrutura contendo poros e grãos. Fonte: Adaptado de Tanaka et al. (2003).	15
Figura 2.9 – Furo elíptico de Inglis (1913) (esquerda) e distância crítica (r_c) a frente do entalhe, onde a tensão crítica (σ_c) causa a falha do material, antes da tensão na ponta do entalhe (direita). Fonte: adaptado de McNamara et al. (2015).	18
Figura 2.10–Flexão em quatro pontos . Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000).	19
Figura 2.11–Exemplos de Curva-R. Fonte: Kumar e Barai (2011, p.12).	23
Figura 2.12–Seção vertical, longitudinal de elemento prismático . Fonte: Beer et al. (2011, p. 234).	24
Figura 2.13–Padrão de CP SECRBB (adaptado de Ouchterlony e Sun (1983))	26
Figura 2.14–Modelo de Escoamento na ponta da trinca segundo Barenblatt (1962) (Fonte: adaptado de Anderson (2008))	31
Figura 2.15–Gráfico de Suavização da Resistência. Fonte: Chong, Li e Einstein (1989).	34
Figura 2.16–Esquema do entalhe em V (GOGOTSI, 2000)	38
Figura 2.17–Gráfico de Tensão x Deformação, utilizando strain gages, demonstrando comportamento não linear no final do regime elástico do material frágil (TANAKA et al., 2003)	40
Figura 2.18–Relação entre o variação de crescimento de trinca (Δa) e a <i>compliance</i> (λ) adimensionalizados. Fonte: Tanaka et al. (2003).	41
Figura 2.19–Esquema de entalhe (a_0) + trinca (ℓ) (Adaptado de Fett (2005))	43
Figura 2.20–Fator intensificador de tensão generalizado crítico adimensional como função de raio no fundo do entalhe adimensionalizado (indicados os valores médios e variação) (Adaptado de Gómez, Guinea e Elices (2006)).	46
Figura 2.21–Área da zona de processamento (R_c) - Adaptado de (BERTO; BARATI, 2011)	47

Figura 3.1 – Metodologia para determinação de K_{Ic} desta Tese.	51
Figura 3.2 – Placa de Granito Cinza Andorinha.	52
Figura 3.3 – Exemplos de características Petrográficas (NOGAMI, 2013).	53
Figura 3.4 – Corpo de Prova para ensaio de flexão (Fonte: do autor).	53
Figura 3.5 – Máquina Universal de Ensaios Instron modelo 5582 - LAMAV - UENF.	55
Figura 3.6 – Esquema de um <i>strain gage</i> (SG) para concreto da marca <i>Kyowa</i>	56
Figura 3.7 – Dispositivo condicionador e transdutor de sinal (Caixa P3) Fonte: Vishay Co.	57
Figura 3.8 – Esquema de ligação elétrica para <i>strain gage</i> usando técnica de três fios. Fonte: adaptado de National Instruments (2013).	57
Figura 3.9 – Máquina desenhada e construída na UENF	58
Figura 3.10–Projektor de perfil PANTEC.	59
Figura 3.11–Granito cortado no formato do CP para compressão, visando determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).	61
Figura 3.12–corpo de prova para determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).	61
Figura 3.13–CPL para determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).	62
Figura 3.14–CPL para determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).	62
Figura 3.15–Exemplificação do critério de exclusão, adaptado de Dong (2016).	67
Figura 3.16–corpo de prova para ensaio de flexão utilizando extensômetro (do autor).	68
Figura 3.17–Corpo de prova para flexão com entalhe.	71
Figura 3.18–Estratégia de integração entre diferentes técnicas para estimar K_{Ic}	72
Figura 3.19–Aplicação do critério de Gómez, Guinea e Elices (2006).	73
Figura 3.20–Aplicação do critério de Gómez, Guinea e Elices (2006)	75
Figura 4.1 – Gráfico de Carga (N) em função da extensão do barramento (δ) (mm) obtido do corpo de prova de granito liso (sem entalhe) durante o ensaio de flexão em quatro pontos. Fonte: o autor.	80
Figura 4.2 – Gráfico de Extensão vs. Tensão (até 500 kPa).	81
Figura 4.3 – Gráfico de Deformação vs. Tensão (até 10 $\mu\epsilon$).	82
Figura 4.4 – Gráfico de Deformação vs. Tensão do granito Cinza Andorinha sem entalhes.	82
Figura 4.5 – Comparação entre valores colhidos dos <i>strain gages</i> de aço e concreto de um CP liso (sem entalhes). Fonte: O autor.	83
Figura 4.6 – Análise da diferença entre as deformações dos <i>strain gages</i> de aço e con- creto. Fonte: O autor.	84
Figura 4.7 – Gráfico de linhas apresentando os valores de carregamento sincronizados com a deformação dos <i>strain gages</i> de aço e concreto (CP 226). Fonte: O Autor.	84
Figura 4.8 – Área do CP largo (003) utilizado para cálculo das propriedades mecânicas básicas do GCA. FONTE: o autor.	85
Figura 4.9 – Diagrama de Tensão x Deformação do granito cinza andorinha obtido por ensaio de compressão (CPL003).	85
Figura 4.10–Gráfico Extensão vs. Carga. Fonte: o autor	86

Figura 4.11–Gráfico boxplot apresentando <i>outliers</i> dos dados de Carga máxima em CPs sem entalhe. Fonte: o autor.	88
Figura 4.12– <i>Boxplot</i> referente a tensão de ruptura (σ_{rup}) em flexão de quatro pontos dos CPs em flexão de quatro pontos.	89
Figura 4.13–Gráfico demonstrando a relação entre o raio na ponta do entalhe e a Tenacidade à Fratura.	90
Figura 4.14–Curvas extendidas de K_{Ic} . Fonte: (Atem de Carvalho, forthcoming 2018a).	92
Figura 4.15–Análise da foto do entalhe produzido no CP109 pelo disco de T 0,3 mm utilizando o <i>software</i> desenvolvido durante esta pesquisa. Fonte: o autor.	93
Figura 4.16–Gráfico boxplot referente a distribuição do K_I do disco de T 0,3 mm	94
Figura 4.17–Teste ANOVA referente ao K_{IC} do disco de T 0,3 mm	95
Figura 4.18–Teste de Tukey referente ao K_{IC} do disco de espessura 0,332	95
Figura 4.19–Distribuição de Weibull para as três profundidades do disco 0,332 mm.	95
Figura 4.20–Razão K_{Uc}/K_{Ic} para as três profundidades de entalhe do disco de T 0,3 mm. Fonte: o autor.	97
Figura 4.21–Gráfico boxplot referente a distribuição do K_{IC} do disco de espessura 0,332 mm	98
Figura 4.22–Distribuição de Weibull para as três profundidades do disco 0,2 mm.	99
Figura 4.23– <i>Boxplot</i> referente à variação do FIT generalizado para entalhes em U	102
Figura 4.24–Probabilidade de resistência a fratura Weibull do disco de espessura 1,4 mm	102
Figura 4.25– <i>Boxplot</i> referente à variação do K^U do disco de espessura 1,4 mm.	105
Figura 4.26–Gráfico de K^U do disco de espessura 1,4 mm na distribuição Weibull.	105
Figura 4.27–Gráfico entre K_{Ic} estimado adimensional pelo K_{Ic} vs. Raio do fundo do entalhe adimensionado pelo comprimento característico para o disco de T 1,4 mm. Fonte: o autor	108
Figura 4.28– <i>Boxplot</i> referente à variação do K^U do disco de espessura 2,4 mm.	110
Figura 4.29–Resultado do teste ANOVA de K^U entre profundidades de entalhe do disco de espessura 2,4 mm.	110
Figura 4.30–Teste de Tukey para as três profundidades do disco de espessura 2,4 mm.	111
Figura 4.31–Gráfico de K^U do disco de espessura 2,4 mm na distribuição Weibull.	111
Figura 4.32–Gráfico apresentando a dispersão dos CPs entalhados usando o disco de T 2,4 mm. Fonte: o autor.	113
Figura 4.33– <i>Boxplot</i> referente à variação do K^U do disco de espessura 3,2 mm.	115
Figura 4.34–Teste ANOVA referente ao K^U do disco de espessura 3,2	115
Figura 4.35–Teste de Tukey referente ao K^U do disco de espessura 3,2	116
Figura 4.36–Gráfico de K^U do disco de espessura 3,2 mm na distribuição Weibull.	116
Figura 4.37–Foto do CP com fratura na superfície fora do entalhe criado. Fonte: o autor.	118
Figura 4.38–Gráfico relacionando Força em Newtons e Profundidade do entalhe. Fonte: o autor	119
Figura 4.39–Gráficos de Tensão vs. Deformação de vários CPs lisos instrumentados com SG Fonte: o autor	120

Figura 4.40–Gráfico Tensão vs. Deformação do CPLiso4668, indicando a tangente referente ao regime elástico do material.	121
Figura 4.41–Gráfico Força vs. Deformação do CPLiso4668 focando nos momentos iniciais do ensaio. Fonte: o autor.	122
Figura 4.42– <i>Compliance</i> máxima entre os CPs lisos instrumentados com S.G. (Unidade: strain/N) Fonte: o autor.	122
Figura 4.43–Gráfico apresentando a Força de ruptura como consequência da profundidade do entalhe. Fonte: o autor.	123
Figura 4.44–Curva-R referente ao CP225 (Disco T 0.2 mm ; e $a_0 = 8.98$ mm). Fonte: o autor.	125
Figura 4.45–Curva de resistência ($K_R vs. \Delta a$). Fonte: o autor.	126
Figura 4.46–Curva de resistência ($K_R vs. a_{ef}$). Fonte: o autor.	126
Figura 4.47–Curva R (KR vs. Δa) do cp401 (Disco $T = 0,2$ mm ; $a_0 = 0,322$ mm). Fonte: o autor.	127
Figura 4.48–Relação entre raio no fundo do entalhe e profundidade do entalhe usando Discos de T 0,2 mm	128
Figura 4.49–Variáveis relacionadas a tenacidade relacionadas à profundidade do entalhe .	129
Figura 4.50–Comparação entre σ_{ref} e σ_n	130
Figura B.1 – Protocolos de ligação de fios dos <i>strain gages</i> na caixa Vishay P3.	183
Figura C.1 – Ensaio de corpo de prova que sofreu interferência eletromagnética.	185
Figura C.2 – Gráfico referente aos dados obtidos no ensaio de deriva de zero, na máquina de ensaios universais Instron 5582, utilizando a célula de carga de 100 kN .	188
Figura C.3 – Dados transformados para o domínio de frequência	188
Figura C.4 – Dados específicos de baixa frequência.	189
Figura C.5 – Gráfico referente aos dados obtidos no ensaio de deriva de zero, com o ar-condicionado desligado.	189
Figura C.6 – Gráfico à deriva de zero, com o ar-condicionado desligado, no domínio do tempo.	190
Figura C.7 – Gráfico de dados do domínio do tempo, interferência, somente maiores amplitudes.	190
Figura E.1 – Interface do <i>software</i> utilizado para estimar a região linear do gráfico de Tensão vs Deformação do CP liso (sem entalhe) CP4668. Fonte: o autor. . .	195
Figura E.2 – Foto do CP 201 da serra T 2,4 mm com o retículo de calibração. Fonte: o autor.	196
Figura E.3 – Foto da medição do raio do CP 201 da serra T 2,4 mm. Fonte: o autor. . . .	197
Figura B.1 – Chart para cálculo de K_t para uma barra retangular com entalhe em U submetida a flexão. Fonte: Pilkey (2008).	201

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Discos de abrasão utilizados nesta pesquisa	54
Tabela 3.2 – Características do SG utilizado.	56
Tabela 4.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de CPs lisos com <i>strain gage</i>	87
Tabela 4.2 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs sem entalhes.	88
Tabela 4.3 – Valores aproximados dos raio na ponta do entalhe (ρ) obtidos para cada disco de abrasão utilizada.	89
Tabela 4.4 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs com entalhe de 9 mm com vários raios no fundo do entalhe.	90
Tabela 4.5 – Cálculo da validade dos raios de fundo do entalhe para assumir o comportamento de trinca.	91
Tabela 4.6 – Resumo dos valores calculados de K_I do disco de espessura 0,3 mm.	94
Tabela 4.7 – Resumo da análise utilizando a distribuição de Weibull para o disco 0,3 mm.	96
Tabela 4.8 – Resumo dos valores de K^U obtidos nos ensaios de CPs com entalhes produzidos com pelo disco de T 0,3 mm.	96
Tabela 4.9 – Resumo dos valores de K_{IC} obtidos nos ensaios de CPs cortados com o disco de espessura 0,2 mm nas três profundidades de entalhe (a_0) estudadas.	98
Tabela 4.10–Resumo da análise utilizando a distribuição de Weibull para as três profundidades do disco 0,2 mm.	99
Tabela 4.11–Resumo dos valores de K_C^U obtidos nos ensaios de CPs com entalhes produzidos com pelo disco de T 0,2 mm.	100
Tabela 4.12–Resumo dos valores obtidos nos ensaios dos discos mais finos (0.2 e 0.3 mm).	100
Tabela 4.13–Resumo dos valores obtidos nos ensaios dos discos (1.4, 2.4 e 3.2 mm).	101
Tabela 4.14–Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs com entalhes.	101
Tabela 4.15–Valores aproximado em milímetros dos raios (ρ) obtidos para cada disco utilizado.	103
Tabela 4.16–Valores da K^U dos CPs entalhados com o disco de espessura 1,4 mm	104
Tabela 4.17–Análise distribuição de Weibull do K^U nas três profundidades do disco de espessura 1,4 mm.	106
Tabela 4.18–Valores obtidos de K_{IC} dos CPs com entalhes de 9; 12 e 15 mm com o disco de T 1,4 mm.	107
Tabela 4.19–Valores da K^U dos CPs entalhados pelo disco de T 2,4 mm	109
Tabela 4.20–Análise do disco de 2,4 mm na distribuição de Weibull do K^U	111
Tabela 4.21–Valores de K_{IC} referente ao disco de T 2,4 mm.	112
Tabela 4.22–Valores do K^U dos CPs entalhados com o disco de T 3,2 mm	114
Tabela 4.23–Análise do disco de 3,2 mm na distribuição de Weibull do K^U	116
Tabela 4.24–Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs com entalhes.	117

Tabela 4.25–Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs para identificação do defeito intrínseco do GCA	118
Tabela 4.26–Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs lisos, sem entalhes.	120
Tabela 4.27–Resumo das características do CP com um entalhe de 9 mm produzidos com o disco de T 0,2 mm, utilizado para exemplificar a curva de resistência.	124
Tabela 4.28–Resumo das características dos CPs com entalhes produzidos com o disco de T 0,2 mm.	125
Tabela 4.29–Resumo dos valores de K_R obtidos nos ensaios de CPs com entalhes produzidos com pelo disco de T 0,2 mm.	128
Tabela A.1–Dimensões do Tirante de Aço	141
Tabela A.2–Exemplo de dados sobre deformação obtidos da caixa Vishay P3	142
Tabela A.3–Dimensões do CP de Compressão	143
Tabela A.4–Dimensões do CPL de Compressão (003)	143
Tabela A.5–Dados de carregamento do ensaio de compressão (CPL002)	143
Tabela A.6–Dados de carregamento do ensaio de compressão (CPL003)	144
Tabela A.7–Propriedades mecânicas do CP de Compressão	144
Tabela A.8–Dados de CPs lisos em flexão de 4 pontos	145
Tabela A.9–Distribuição Weibull dos CPs lisos em flexão de 4 pontos	146
Tabela A.10–Dados de CPs lisos em flexão 4 pontos com critério de Chauvenet	147
Tabela A.11–Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,20 mm $a_0 \approx 9$ mm	148
Tabela A.12–Distribuição de Weibull com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 9$ mm	149
Tabela A.13–Análise da serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 9$ mm	149
Tabela A.14–Dados dos CPs entalhados com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 12$ mm	150
Tabela A.15–Distribuição de Weibull com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 12$ mm	151
Tabela A.16–Análise da serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 12$ mm	151
Tabela A.17–Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 15$ mm	152
Tabela A.18–Distribuição de Weibull com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 15$ mm	153
Tabela A.19–Análise da serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 15$ mm	153
Tabela A.20–Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)	154
Tabela A.21–Distribuição de Weibull da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)	155
Tabela A.22–Análise da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)	155
Tabela A.23–Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)	156
Tabela A.24–Distribuição de Weibull serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)	157
Tabela A.25–Análise da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)	157
Tabela A.26–Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)	158
Tabela A.27–Distribuição de Weibull da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)	159
Tabela A.28–Análise da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)	159
Tabela A.29–Dados de CPs entalhados ($T = 1,4$ mm; $a = 9$ mm)	160
Tabela A.30–Distribuição de Weibull com a serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm	161
Tabela A.31–Análise da serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm	161

Tabela A.32–Dados de CPs entalhados ($T = 1,4$ mm; $a = 12$ mm)	162
Tabela A.33–Distribuição de Weibull com a serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm	163
Tabela A.34–Análise da serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm	163
Tabela A.35–Dados de CPs entalhados ($T = 1,4$ mm; $a = 15$ mm)	164
Tabela A.36–Distribuição de Weibull com a serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm	165
Tabela A.37–Análise da serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm	165
Tabela A.38–Dados de CPs entalhados ($T = 2,4$ mm; $a = 9$ mm)	166
Tabela A.39–Distribuição de Weibull com a serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm	167
Tabela A.40–Análise da serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm	167
Tabela A.41–Dados de CPs entalhados ($\rho = 2,4$ mm; $a = 12$ mm)	168
Tabela A.42–Distribuição de Weibull com a serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm	169
Tabela A.43–Análise da serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm	169
Tabela A.44–Dados de CPs entalhados ($\rho = 2,4$ mm; $a = 15$ mm)	170
Tabela A.45–Distribuição de Weibull com a serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm	171
Tabela A.46–Análise da serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm	171
Tabela A.47–Dados de CPs entalhados ($T = 3,2$ mm; $a = 9$ mm)	172
Tabela A.48–Distribuição de Weibull com a serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 9$ mm	173
Tabela A.49–Análise da serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 9$ mm	173
Tabela A.50–Dados de CPs entalhados ($T = 3,2$ mm; $a = 12$ mm)	174
Tabela A.51–Distribuição de Weibull com a serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 12$ mm	175
Tabela A.52–Análise da serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 12$ mm	175
Tabela A.53–Dados de CPs entalhados ($T = 3,2$ mm; $a = 15$ mm)	176
Tabela A.54–Distribuição de Weibull com a serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 15$ mm	177
Tabela A.55–Análise da serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 15$ mm	177
Tabela A.56–Resumo dos valores obtidos nos ensaios visando produzir a curva-R.	178
Tabela A.57–Dados referentes aos ensaios de busca pelo Raio Crítico	179
Tabela A.58–Dados referentes ao experimento para verificação da profundidade real do entalhe	180
Tabela A.59–Dados referentes ao experimento para verificação do defeito intrínseco do material	181
Tabela A.60–Curva-R do CP225 (serra $a_0 = 8,98$ mm)	182
Tabela C.1 – Especificação do teste de deriva de zero criado na máquina Instron 5584.	186
Tabela A.1 – Tabela do Critério de Chauvenet (DALLY; RILEY, 2005)	200
Tabela C.1 – Tamanho do Lote por C.V. para a Confiabilidade de 90 %.	202
Tabela C.2 – Tamanho do Lote por C.V. para a Confiabilidade de 95 %.	203

Siglas

ANOVA	análise de variância	94, 106, 110, 111, 115
ASTM	American Society of Testing and Materials	24
c.v.	coeficiente de variação	50, 55, 64, 71, 86, 88, 101, 102, 106, 107, 109, 131, 202, 203
CG	<i>clip gage</i>	32, 33, 186
CMOD	<i>crack mouth opening displacement</i>	33, 42
CP	corpo de prova	1, xii, xxi, xxviii, 26, 27, 28, 37, 54, 66, 69, 70, 71, 73, 142, 143, 144, 184
CPL	corpo de prova de formato largo	xii, 80, 85, 143
csv	<i>Comma Separated Values</i>	55
CT	<i>compact type</i>	24, 34

CTODc	deslocamento crítico da ponta da trinca inicial	35, 36
CZM	<i>cohesive zone model</i>	16
d.p.	desvio padrão	55
DABT	deslocamento da abertura da boca da trinca	42
DAF	diagrama de avaliação de falha	49
DCB	<i>double cantilever beam</i>	33
DED	densidade de energia de deformação	39, 47, 48
DEN	<i>double-edge-notched plate</i>	32, 33
DPC	deslocamento no ponto de carga	33
E-Uns	entalhe em U não singulares	45
EPD	estado plano de deformações	6, 10, 29, 39
EPT	estado plano de tensões	10, 13, 31, 39
ERE	extensômetro de resistência elétrica	18, 56, 80
ETT	estado triaxial de tensões	6
E-U	entalhe em U	3, 45, 49
F3P	flexão em três pontos	22, 38, 44
F4P	flexão em quatro pontos	xxvii, 20, 21, 22, 34, 38, 41, 49, 65, 69, 80
FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i>	187, 188, 191
FIT	fator intensificador de tensão	28, 40, 45, 49
FITE	fator intensificador de tensão de entalhe	39
FITG	fator intensificador de tensão generalizado	39, 45

GCA	Granito Cinza Andorinha	xi, 3, 51, 53, 58, 64, 65, 74, 78, 80, 84, 85, 91, 98, 117, 125, 131, 132
GF	<i>gage factor</i>	68
i.e.	<i>id est</i>	26, 43, 45
ICM	<i>intrinsic crack model</i>	40
IFF	Instituto Federal Fluminense	57
IS	<i>indentation strength</i>	38
LAMAV - UENF	Laboratório de Materiais Avançados	viii, 54, 57, 58, 61, 70
LPD	<i>load point displacement</i>	33
LVDT	<i>linear-variable differential transformer</i>	32
MEF	método de elementos finitos	40, 42, 43, 49
MF	mecânica da fratura	5, 92, 131
MFD	mecânica da fratura dinâmica	5
MFEP	mecânica da fratura elasto-plástica	5, 6, 49
MFLE	mecânica da fratura linear elástica	5, 6, 10, 11, 29, 34, 45, 48, 49
MFNL	mecânica da fratura não linear	5, 6
ML	método da linha	<i>see</i> TDC, 49
mm	unidade de comprimento	1

MP	método do ponto	17, 18
MSF	materiais semi frágeis	35, 45
MTDI	modelo do tamanho de defeito intrínseco	40, 43
MZC	modelo de zona coesiva	16
NA	não aproveitado	94
outlier	valor fora da curva	88
RPM	rotações por minuto	58, 74
S	desvio padrão	71
SECRBB	<i>Straight Edge Crack Round Bar in Bending</i>	xxi, xxviii, xxxi, 26, 27, 28
SED	<i>Strain Energy Density</i>	48
SEN-B	Flexão com Entalhe em Única Face	53, 54
SEPB	<i>Single Edge Pre-cracked Beam</i>	37, 38
SEVNB	<i>Single Edge V-Notched Beam</i>	37, 38
SG	<i>strain gage</i>	viii, xi, 3, 4, 18, 28, 41, 56, 57, 59, 62, 63, 64, 67, 68, 71, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 119, 124, 131, 183, 184, 192, 193

SMS	mensagens de texto	190
TDC	Teoria da Distância Crítica	3, 17, 44, 49, 91, 113, 131
TFR	transformada de Fourier rápida	187
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro	1, viii, xv, 54, 57, 58, 61, 70
VC	volume de controle	47
VER	volume elementar representativo	15, 17
ZC	zona crítica	39
ZNL	zona não-linear	13
ZP	zona plástica	10
ZPF	zona de processamento de fratura	6, 11, 12, 13, 14, 22, 29, 32, 33, 34, 36, 37, 46, 47, 51, 121

Símbolos

"valor-P"	valor de P (chance de ocorrer ao acaso)	110
λ	<i>compliance</i>	vii, 20, 40, 42, 43, 75, 76, 119, 121, 122, 123
δ	extensão do barramento	viii, 55, 80, 86, 187
ρ	raio na ponta do entalhe	xi, xxiii, 6, 11, 24, 25, 32, 38, 44, 45, 47, 48, 49, 53, 59, 69, 70, 71, 72, 89, 90, 91, 93, 100, 101, 102, 106, 107, 108, 113, 127, 128

σ	tensão	6, 10, 11, 17, 18, 20, 24, 29, 31, 45, 64, 66, 82, 85, 87, 90
ℓ	comprimento da trinca	11
β	distância do plano de fratura ao contorno da superfície fraturada	16
δ	deslocamento	19, 20, 21, 24, 25, 80
ν	flecha ou (deslocamento em y) durante a flexão	22
δ	incremento na deflexão (flecha) durante a flexão	22
ε	deformação	24, 40, 41, 42, 64, 68, 69, 82, 85, 87
δ	alongamento da superfície do elemento	24
ρ	raio do arco de curvatura de flexão	24
θ	ângulo do arco de flexão	24
α	parâmetro da curva R	36
β	parâmetro da curva R	36
ℓ	comprimento da trinca	43
ν	coeficiente de Poisson	46, 48, 60, 62, 64, 85, 143, 144
α	ângulo de abertura do entalhe em V	47
β	ângulos de entalhe	48
α	significância estatística	50
$\alpha - ouch$	razão entre a trinca e a dimensão do corpo	27
$\alpha - reg$	estimador do coeficiente linear	95, 99, 105, 111, 116

σ_0	resistência característica do material	16, 17
ρ_0	raio mínimo (crítico)	24, 25
α_0	razão entre o entalhe inicial e a dimensão do corpo	27
λ_0	<i>compliance</i> do espécime sem entalhe	75, 76, 119, 122
σ_0	tensão característica	78, 102
Δ_C	flexibilidade devido ao crescimento de trinca	21
δ_{CMOD}	deslocamento da abertura em corpo CMOD	26, 28
λ_E	<i>compliance</i> no final do regime elástico	87
δ_F	deslocamento ideal referente a carga	26, 28
λ_F	<i>compliance</i> do corpo mediante a carga F	28
σ_{IN}	tensão no início da extensão da trinca	42, 126
σ_{LR}	tensão limite de resistência	19
σ_N	tensão nominal	16, 37, 44, 45
σ_P	resistência comprovada	21
δ_P	incremento na deflexão (flecha) comprovado	22
δ_{Qi}	deslocamento no ponto secante 5%	33
λ_U	<i>compliance</i> último na ruptura	87
λ_{ad}	flexibilidade elástica (<i>compliance</i>) adimensional	42, 76
σ_c	tensão crítica	18, 91
ℓ_{ch}	comprimento característico do material	15, 16, 17, 45, 91, 107, 125
σ_{esc}	tensão de escoamento	19, 30, 54
σ_f	resistência a fratura	27, 28, 40, 47
σ_{flex}	tensão de flexão	47
σ_{fm}	tensão de flexão	19
σ_i	tensão no instante i	63, 74
ε_{long}	deformação longitudinal	62, 64
λ_{lp}	<i>compliance</i> no limite de proporcionalidade	121
σ_m	tensão média	45

σ_{max}	tensão normal máxima	8, 9, 16, 43, 44, 70
σ_{max}	tensão máxima	39, 42, 43
σ_n	tensão baseada na área líquida (<i>net</i>)	x, 9, 39, 129, 130
σ_{net}	tensão baseada na área líquida (<i>net</i>)	73
σ_{nom}	tensão nominal no corpo	8
σ_{nom}	tensão nominal no corpo	8, 9, 41
σ_{ref}	tensão de referência ou remota	x, 7, 87, 129, 130
σ_{rup}	tensão de ruptura	ix, 45, 49, 65, 66, 69, 71, 73, 77, 78, 86, 88, 89, 90, 101, 106, 110
ε_{rup}	deformação no momento da ruptura do CP	75, 87
λ_{rup}	<i>compliance</i> na ruptura	121, 122
δ_{sep}	distância entre as superfícies da trinca	16
σ_t	resistência à tração	30, 32, 46, 48
ε_{trans}	deformação transversal	62, 64
σ_u	tensão última em materiais frágeis e semi frágeis	17, 24, 25
ε_x	deformação no eixo longitudinal	24
σ_{yy}	tensão elástica em y	18
σ_z	tensão em Z	10
Δa	variação de crescimento de trinca	vii, 25, 35, 40, 126, 127

Δa	extensão da trinca	42
$1 - \alpha$	significância estatística	50
A	seção remanescente, resistente	26
A_0	Área da seção transversal	7
A_0	área da seção transversal do corpo de prova	63, 64
B	profundidade do entalhe	26
B	profundidade do corpo de prova	54
C	flexibilidade elástica	20, 21, 25, 33
C_0	flexibilidade do material sem trinca	21
C_{par}	flexibilidade parasita do sistema	21
D	diâmetro do CP SECRBB	26, 27, 28
E	módulo de elasticidade	16, 20, 21, 28, 33, 47, 48, 60, 62, 64, 85, 87, 143, 144
E'	módulo de elasticidade efetivo	20
$E_{b,3P}$	módulo de elasticidade da flexão em três pontos	22
$E_{b,4P}$	módulo de elasticidade da flexão em quatro pontos	21, 22
E_f	módulo de elasticidade em flexão	18, 121
F	força aplicada	xix, 26, 27, 28
$F(a/W)$	fator de ajuste de geometria	6
$F(a/h)$	fator de ajuste de geometria	41, 70
F_0	fator de magnificação do contorno da falha ou entalhe	29
F_Q	força no ponto secante 5%	28
F_{Qi}	força no ponto secante 5%	33
G	taxa de liberação de energia de Griffith	16, 35, 36
G_c	taxa de liberação de energia crítica de Griffith	23, 49
G_f	energia de fratura	36
H	aresta da largura do corpo para a área da seção transversal	7

H	altura do corpo	9, 58
I	momento de inércia	20, 21
IQR	intervalo entre quartis	67
I_z	momento de inércia	19
K	fator intensificador de tensão	6, 7, 11, 16, 41, 125
K_{IC}^*	tenacidade à fratura estimada	129
K_{IC}^S	tenacidade à fratura na ponta da trinca efetiva	35, 36
K^U	FIT generalizado para entalhes em U	ix, xi, xxxv, 3, 39, 44, 45, 46, 72, 91, 96, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 113, 114, 115, 116, 131
K_0^U	FIT generalizado característico para entalhes em U	95, 99, 105, 106, 111
K_0^U	FIT generalizado característico para entalhes em U	111

K_C^U	FIT generalizado crítico para entalhes em U	xi, 45, 46, 92, 99, 106, 116, 128, 129
K^V	FIT generalizado para entalhes em V	45
K_σ	FIT devido a tensão	31, 32
K_A	tenacidade à fratura aparente	xxiii, 24, 25, 35
$K_A(\rho)$	tenacidade à fratura aparente em função de ρ	24, 25
K_C	tenacidade à fratura	1, 2, 3, 16, 23, 39, 44, 90, 93, 107
K_C	Tenacidade à Fratura	5, 6, 10, 28, 29, 33, 36, 90
K_I	fator de intensificador, modo I de abertura de trinca	ix, xi, 11, 27, 29, 30, 39, 40, 42, 46, 51, 70, 93, 94, 95, 96, 97

K_{IC}	tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca	ix, xi, 3, 10, 11, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 32, 34, 37, 38, 39, 40, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 51, 53, 72, 80, 89, 91, 92, 94, 95, 97, 98, 101, 103, 106, 107, 108, 111, 112, 113, 116, 118, 124, 128, 129, 131
K_{IN}	tenacidade à fratura na iniciação da trinca	42, 80
K_{IN}	tenacidade à fratura na iniciação da trinca	126, 129
K_{MAX}	fator intensificador de tensão formal	42, 80, 124, 125, 129
K_Q	estimativa inicial de tenacidade à fratura	28, 54

K_{Qm}	tenacidade à fratura aparente	33
K_R	fator de intensificação de tensão estimado por <i>compliance</i>	xii, 42, 128
K_c	tenacidade à fratura em função do tamanho do entalhe	43
K_{cN}	tenacidade à fratura efetiva devida ao entalhe	49
K_{lp}	FIT devido à zona de processamento	32
K_m	tenacidade à fratura aproximada sem pré-trinca	33
K_t	fator concentrador de tensão	7, 8, 9, 39, 49, 72, 80, 101, 201
K_{tg}	fator concentrador de tensão bruto (<i>gross</i>)	9
K_{tn}	fator concentrador de tensão líquido (<i>net</i>)	9, 10, 39, 44, 45, 92
L	distância entre roletes de suporte para flexão	22
L	comprimento do elemento prismático	24
L	distância entre roletes de suporte	27
L_1	distância entre roletes do suporte inferior	69, 73
L_2	distância entre roletes superiores	69, 73
LI	limite inferior	66, 67
LS	limite superior	66, 67
L_1	distância entre roletes do suporte inferior	19, 66
L_2	distância entre roletes superiores	19, 66
M_f	momento fletor	19, 22
N	raio na ponta do entalhe	26
N	quantidade de espécimes no lote	77
N_{obs}	número de observações	186
P	força aplicada ao corpo	7, 80
P	incremento de carga	22
$PF(i)$	probabilidade de falha do espécime número i	77, 78
P_{MAX}	carga máxima	41, 42
P_P	carregamento máximo comprovado	21
P_i	carga aplicada no instante i	63

P_{max}	carga máxima aplicada	11, 33, 41, 44, 48, 55, 65, 66, 68, 69, 71, 73, 75, 86, 100, 101, 129
P_{rup}	carga de ruptura	45, 119, 123
P_{th}	carga teórica estimada	48
P_u	carregamento de falha	37, 47
Q_1	primeiro quartil	67
Q_2	segundo quartil	67
Q_3	terceiro quartil	67
QF	constante de Barenblatt para zona coesiva	16
R	raio na ponta do entalhe	45
R^2	coeficiente de determinação da regressão	77, 78, 85, 95, 99, 105, 111, 116
R_c	área da zona de processamento	vii, 46, 47, 48
S	distância entre roletes de suporte	26, 27
Si_3N_4	nitreto de silício	28

T	espessura do disco de abrasão	ix, x, xi, xii, 53, 89, 91, 92, 93, 94, 96, 99, 103, 106, 108, 111, 112, 113, 117, 122, 124, 125, 127, 128
T	espessura dos discos de corte	53
T_t	tempo total de duração do ensaio	186
$V(a/b)$	Equação empírica para correção de deslocamento	20
W	largura do corpo de prova	33, 43, 44, 48, 54, 66
W_c	energia de deformação crítica	48
Y_{LN}	distância entre a linha neutra e a superfície do CP	19
a	profundidade da trinca	6, 22, 23, 29, 30, 31, 33, 35, 41, 43, 48, 54, 59, 70, 101, 125
a	profundidade do entalhe	20, 58, 70, 75, 76

a	distância entre roletes (base e aplicador) na F4P	20, 21, 22
a	tamanho da trinca	21
a	profundidade máxima da trinca	26, 27
a/W	comprimento adimensional da trinca	25, 33
a/h	comprimento adimensional da trinca	42
a_0	profundidade inicial do entalhe	xi, 49, 71, 94, 96, 97, 107, 112, 116, 122, 123, 125, 126, 129
a_0	profundidade inicial do entalhe	26, 27, 33, 42, 43, 44, 49, 70, 100, 101, 110, 123, 124, 126
a_c	tamanho da trinca crítico	36
a_{ef}	tamanho efetivo da trinca	23, 31, 32, 33, 34, 36, 42, 51, 75, 76, 123, 124
a_{eq}	entalhe equivalente ou efetivo	29, 33
a_{min}	tamanho mínimo para a trinca ou entalhe	27, 28
b	altura do corpo de prova	20
b	largura do corpo de prova	21, 22

b	profundidade do corpo de prova	37, 66, 69, 70, 71, 73
$\hat{\beta}$	estimador da taxa de transformação	95, 99, 105, 111, 116
β_0	estimador do coeficiente linear	78
β_1	estimador da taxa de transformação	78
c	profundidade do entalhe	25
c_n	coeficiente arbitrário	37
d	comprimento resistente do corpo	9
d	dimensão característica da estrutura ou espécime	37
d	altura da seção resistente	69
d	seção resistente do corpo de prova	73
$f - \text{deriva}$	frequência calculada de eventos	186
f_s	frequência de amostragem	186
g	compliance adimensional para SECRBB	28
h	aresta da espessura do corpo para a área da seção transversal	7
h	espessura do corpo	9
h	altura do corpo de prova	19, 41, 66, 69, 70, 71, 75, 76
h	altura do corpo	21
h	altura do corpo de prova	21, 22
i	espécime de ordem i	77
k	rigidez (stiffness)	20
k	coeficiente do <i>outlier</i> de Tukey	67
l_p	tamanho da zona de processamento	31, 32, 33
m	módulo de Weibull	78, 95, 99, 102, 105, 106, 111, 116

n	tamanho do lote	50
r_0	distância acima do fundo do entalhe	47
r_{IY}	comprimento da zona plástica	30
r_Y	comprimento da zona plástica	30
r_c	distância crítica	17, 18
t	profundidade do entalhe	40, 42, 43
w	largura do corpo de prova	19
y	distância da linha neutra até a superfície	24
caixa P3	dispositivo condicionador e transdutor de sinal (Vishay P3)	viii, 55, 56, 57, 63, 68, 69, 71, 73
curva-P-delta	curva de carga-deslocamento	36
curva-P-CMOD	curva de carregamento-CMOD	36
curva-R	curva de resistência	3, 23, 40, 131
curva-R	curva de resistência	xii, 34, 35, 36, 40, 43, 44, 72, 75, 80, 119, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 131
F-bend-a0-W	função de geometria para a trinca de canto inicial	44
F-bend-a-W	função de geometria para uma trinca de canto	43
K^N	tenacidade a fratura aparente	49
K-hat	fator intensificador de tensão estimado	44
K-apar	fator intensificador de tensão aparente	43

P	carga aplicada	9, 19, 20, 21, 25, 40, 42, 48, 55, 64, 66, 86, 187
R	raio na ponta do entalhe	11, 36, 43
R	raio do furo	18, 39
raw	dados brutos	55, 73, 186
Rc-ouyang	valor crítico de resistência	35
R-ouyang	taxa de energia de propagação da trinca	35
R-Project	software livre <i>R-Project</i>	xxxv, 59
sigma-bend-max	tensão máxima em flexão	44
sigma-bend	tensão em flexão	43
Y'_s	função de ajuste da geometria do SECRBB	27

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.1.1	Importância Científica	2
1.1.2	Importância Tecnológica	2
1.1.3	Importância Econômica	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivos específicos	3
1.3	Organização do trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Mecânica da Fratura	5
2.2	Singularidade	7
2.3	Fator concentrador de tensões	7
2.4	Estado de tensões na ponta da trinca	10
2.5	Influência do raio na ponta do entalhe	11
2.6	Propriedades mecânicas em materiais semi frágeis	11
2.7	Materiais semi frágeis	12
2.8	Zona de processamento de fratura	12
2.9	Defeito intrínseco	15
2.10	Efeito de tamanho	15
2.11	Volume elementar representativo	16
2.12	Modelo de zona coesiva em materiais frágeis	16
2.13	Comprimento característico	16
2.14	Teoria da Distância crítica	17
2.15	Flexão em quatro pontos	18
2.16	Flexibilidade elástica - <i>Compliance</i>	20
2.17	Norma ASTM E-855	21
2.18	Curva de Resistência (Curva-R)	23
2.19	Cálculo da deformação em flexão	23
2.20	Curva de suavização de tensão	24
2.21	Bibliografia	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	Materiais	52
3.1.1	Granitos	52
3.1.2	Corpos de prova (CPs)	53
3.2	Equipamentos	54

3.2.1	Máquina de ensaios	54
3.2.2	Extensometria de resistência elétrica	56
3.2.3	Dispositivo condicionador de sinal (Vishay P3)	56
3.2.4	Equipamentos para produção de entalhes	57
3.2.5	Projeto de perfil	59
3.2.6	Software livre <i>R-Project</i> (R-Project)	60
3.3	Métodos	60
3.3.1	Descrição do CP para compressão	60
3.3.2	Cálculo da área da seção transversal do CP	61
3.3.3	Preparo do CP para compressão	62
3.3.4	Aplicação de <i>strain gage</i> no CPL de compressão	62
3.3.5	Ensaio de Compressão	63
3.3.6	Obtenção das Propriedades Mecânicas	63
3.3.7	Preparo dos CPs de flexão lisos para ensaio de flexão	64
3.3.8	Ensaio de flexão dos CPs lisos	65
3.3.9	Processamento dos dados obtidos da máquina de ensaios	66
3.3.10	Critério de Exclusão	66
3.3.11	Ensaio de flexão do CP liso instrumentado	67
3.3.12	Corte dos entalhes	70
3.3.13	Medição dos CPs com entalhe	70
3.3.14	Ensaio e processamento de CPs com entalhe	71
3.3.15	Ensaio dos CPs com entalhe e SG	72
3.3.16	Aproximação do K_{IC}	72
3.3.17	Tenacidade a fratura aparente	73
3.3.18	Processamento dos CPs com entalhe e SG	74
3.3.19	Determinação da curva-R	74
3.3.20	Cálculo do módulo de Weibull	77
3.3.21	Identificação do tamanho de defeito intrínseco	78
3.3.22	Erro de estimativa	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1	Avaliação do comportamento mecânico do GCA	80
4.2	Verificação dos <i>strain gages</i>	83
4.3	Determinação de propriedades	85
4.4	Determinação da tensão de ruptura	86
4.5	Estimativa da Tenacidade	89
4.6	Avaliação da Tenacidade do entalhe em U - K^U	92
4.7	Tenacidade dos discos finos	92
4.8	Tenacidade dos discos finos	93
4.8.1	Discos com espessura 0,3 mm	93
4.8.2	Disco com espessura 0,2 mm	97

4.8.3	Análise do K^U dos discos 1,4; 2,4 e 3,2 mm	100
4.9	Tenacidade aparente de entalhes em U	101
4.10	Tenacidade Aparente dos discos espessos	103
4.10.1	Discos com espessura 1,4 mm	103
4.10.2	Disco com espessura 2,4 mm	108
4.10.3	Disco com espessura 3,2 mm	113
4.11	Determinação do tamanho de defeito intrínseco	117
4.12	Cálculo da curva-R	119
4.13	Curva-R em várias profundidades de entalhe	125
4.14	Comparação de resultados	127
	Conclusão Geral	131
4.15	Trabalhos futuros	131
	REFERÊNCIAS	133
	 APÊNDICES	 140
	APÊNDICE A – DADOS DOS EXPERIMENTOS	141
A.1	Avaliação do Tirante de aço	141
A.2	Exemplo de dados sobre deformação obtidos da caixa Vishay P3	142
A.3	Dados dos CPs de Compressão	143
A.4	Dados dos CPs de flexão	145
A.4.1	Dados de CPs lisos em flexão de 4 pontos	145
A.4.2	Dados de CPs lisos em flexão 4 pontos com critério de Chauvenet	147
A.4.3	Dados dos CPs entalhados com a serra de 0,20 mm	148
A.4.4	Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm	154
A.4.4.1	Dados dos CPs com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)	154
A.4.4.2	Dados dos CPs com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)	156
A.4.4.3	Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)	158
A.4.5	Dados dos CPs da serra com $T = 1,4$ mm	160
A.4.6	Dados dos CPs entalhe com $T = 2,4$ mm	166
A.4.7	Dados dos CPs entalhe com $T = 3,2$ mm	172
A.4.8	Dados dos CPs utilizados para produção da Curva-R	178
A.4.9	Dados dos CPs referentes aos ensaios de busca pelo Raio crítico	179
A.4.10	Dados dos CPs utilizados para verificação da profundidade do entalhe	180
A.4.11	Dados dos CPs utilizados na apuração do defeito intrínseco do material	181
A.5	Curva-R	182
A.5.1	Curva-R (serra $T = 0,2$ mm; $a_0 \approx 9$ mm)	182
	APÊNDICE B – AQUECIMENTO DOS EQUIPAMENTOS E DO CP	183

	APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO	185
C.1	Definição do ensaio	185
C.2	Metodologia	185
C.3	Processamento dos dados	187
C.4	Resultados obtidos e análise	187
C.5	Interferências detectadas	190
C.6	Conclusões	191
	APÊNDICE D – COLAR STRAIN GAGE	192
	APÊNDICE E – SOFTWARES DESENVOLVIDOS DURANTE ESTA	
	TESE	194
E.1	Cálculo de estatísticos para grandes lotes de dados	194
E.2	Importação e análise de ensaio	194
E.3	Análise do Regime elástico	195
E.4	Compila grupos de planilhas	196
E.5	Mede raios no fundo do entalhe	196
E.6	Rotinas para cálculo de $K_{t,gross}$	197
	ANEXOS	199
	ANEXO A – DADOS DE TERCEIROS	200
A.1	Tabela de Chauvenet	200
	ANEXO B – ALGO - CHART PILKEY PARA CÁLCULO DE KT DO	
	ENTALHE EM U	201
	ANEXO C – ANEXO C - ESTIMATIVA DE TAMANHOS DE LOTE	
	POR CONFIABILIDADE E C.V.	202
C.1	Tabelas utilizadas para a estimativa de tamanho de lote	202

1 Introdução

A tenacidade à fratura (K_C) é uma propriedade de qualquer material sólido que indica a magnitude da resistência à fratura ou sua capacidade para resistir à propagação de trincas.

Materiais semi frágeis possuem um comportamento peculiar, distinto de materiais dúcteis e de frágeis, em relação à tenacidade à fratura. Este tipo de materiais não apresenta plastificação, mas apresenta acúmulo de danos com amolecimento (*softening*) ou perda progressiva da resistência mecânica.

Tanto para a indústria quanto para a pesquisa científica é interessante a determinação desta propriedade (K_C) com maior precisão, visando penalizar menos o material utilizado e definir componentes dimensionados para sua real resistência. Além disso, no setor industrial, viabiliza a competitividade, eficiência e inovação. Sob o ponto de vista científico é necessário evoluir com o conhecimento acerca dos processos de fraturamento, juntando evidências e eliminando dúvidas sobre o mesmo.

No entanto, cabe observar que a propriedade Tenacidade à Fratura é naturalmente associada a uma grande dispersão estatística, sendo observados coeficientes de variação considerados altos.

Modelos matemáticos comumente utilizados para calcular resistência mecânica e distribuição de tensões foram definidos baseados no comportamento idealizado para corpos de geometria constante e simples. Corpos que apresentam detalhes em seu formato, como por exemplo cantos vivos, furos, ou entalhes, apresentam comportamento distinto, não sendo possível estimar com precisão seu comportamento pelos mesmos modelos.

Induzir uma pré-trinca de fadiga em materiais frágeis ou semi frágeis, conforme determinado nas normas é quase impossível, levando a grande perda de tempo, material, e a resultados não reprodutíveis.

Além disso, defeitos iniciais como fissuras e trincas, ou rugosidade na estrutura macroscópica do material, ou vazios em sua microestrutura, causam distorções no campo de tensões, normalmente amplificando as tensões internas localmente no material.

Na presença de tais defeitos ou características, a tensão concentrada localizada nestes acidentes da geometria pode antecipar a falha da estrutura ou componente.

A análise de tensões, seja para projeto ou manutenção de componente ou estrutura, precisa considerar então, não somente a resistência dos materiais, mas também as características de sua superfície, geometria, além da frequência e condições de uso.

A resistência calculada pode também apresentar grande imprecisão, seja por dificuldade na medição dos fenômenos através de experimentação instrumentada, ou na obtenção das propriedades dos materiais, além de falta de compreensão mais profunda dos processos de falha.

No entanto, o trabalho em projeto e manutenção podem abordar o problema desprezando esta incerteza, em função de que tais diferenças concorrerem a favor da segurança dos componentes e estruturas. Desta forma o trabalho do engenheiro pode ser considerado seguro, apesar de penalizar os materiais e estruturas.

Assim, manter-se uma lacuna de incerteza pode dar margem à falhas por falta de compreensão melhor dos fenômenos envolvidos. Desta forma, a pesquisa científica, diferentemente do trabalho prático em engenharia, busca avançar com a fronteira do conhecimento tornando tais modelos mais precisos, através de investigação, testes e proposição de novos modelos e processos que possam trazer segurança, economia e desempenho.

Além disso,

1.1 Justificativa

A determinação de tenacidade à fratura conforme prevista em normas (ASTM-E399 (1990), ASTM-E855 (2000), ASTM-E1820 (2011), entre outras) apresenta métodos bem descritos para materiais dúcteis como o aço, para materiais cerâmicos (ASTM-C1421, 2016), porém materiais frágeis e semi frágeis podem não se aplicar a tais normas, tornando o domínio do uso deste tipo de material e a aplicação de técnicas de projeto mais práticos e seguros.

1.1.1 Importância Científica

A determinação de valores mais precisos de K_C para materiais semi frágeis viabiliza a compreensão desta propriedade e o entendimento do comportamento do material. Apesar de todo o conhecimento já desenvolvido sobre K_C em diversas situações ainda são usadas regressões numéricas, o que significa que não se tem o domínio sobre os fenômenos e sobre as leis que os regem. Trabalhos experimentais precisam ser realizados para produzir dados que possibilitem encontrar explicações mais claras sobre os fenômenos observados.

1.1.2 Importância Tecnológica

As técnicas e normas para determinação de K_C trazem dependência da criação de trinca de fadiga, o que exige maquinário específico, caro e/ou de difícil acesso. A determinação de K_C usando entalhes é um caminho alternativo utilizando tecnologia mais disponível e barata.

1.1.3 Importância Econômica

A falta de conhecimento sobre a K_C deu origem a diversos desastres com elevado custo tanto financeiro quanto em vidas humanas (ANDERSON, 2008, p.). Sem conhecer limites reais e modelos matemáticos precisos torna-se mais difícil prever o comportamento mecânico dos materiais e aliar segurança e viabilidade econômica em projetos de engenharia. Sendo assim, o

conhecimento sobre tais limites torna-se uma vantagem competitiva, viabilizando projetos mais eficientes sem perder segurança.

1.2 Objetivos

Propor e avaliar uma estratégia alternativa para determinação da tenacidade à fratura (K_C) em materiais semi frágeis, que seja viável, prática, economicamente acessível, a partir de experimentos com entalhe em U.

1.2.1 Objetivos específicos

- Investigar as propriedades mecânicas do Granito Cinza Andorinha (GCA) ;
- Avaliar o comportamento mecânico em fratura do GCA na presença de diferentes profundidades de entalhe em U ;
- Investigar a validade e aplicabilidade da utilização de FIT generalizado para entalhes em U (K^U) para a determinação indireta de K_C em um material semi-frágil (GCA) ;
- Investigar a aplicação da Teoria da Distância Crítica (TDC) para o material semi-frágil estudado ;
- Avaliar o raio do entalhe crítico do material e o comportamento em fratura de alguns raios maiores e menores que o crítico, segundo a TDC ;
- Avaliar a adequação do uso de *strain gage* (SG) para determinação de *compliance* e da curva de resistência (curva-R) do GCA ;
- Investigar e aplicar a curva de resistência para o GCA para obter valores mais precisos de K_C para um material semi-frágil.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 partes. Esta primeira parte introduz o contexto do estudo, esclarece a importância desta pesquisa, apresenta objetivos a serem atingidos e justificativas. O segundo capítulo faz uma revisão da teoria associada e dos trabalhos realizados, descrevendo o estado da arte da pesquisa na área. O terceiro capítulo apresenta a metodologia de trabalho numérico-experimental proposta como alternativa, visando viabilizar a determinação de K_{IC} para materiais semi frágeis.

No quarto capítulo é apresentado um critério para determinação de tenacidade à fratura aparente para materiais semi frágeis, visando aproximar a obtenção dos valores da propriedade do material com um custo e tempo menores. Ainda neste capítulo é apresentada a técnica da Curva-R para materiais semi frágeis, visando refinar os valores de K_C obtidos.

Finalmente, na quinta parte os trabalhos são unidos e é realizada uma discussão sobre as investigações realizadas.

Além destes capítulos são apresentados alguns apêndices e anexos que colaboram para a compreensão do trabalho, complementando os tópicos que os referenciam e permitem a reprodução da pesquisa e dos modelos numéricos apresentados.

No Apêndice A são apresentados os dados brutos tabelados relativos aos experimentos principais desta pesquisa.

No Apêndice B é descrito um procedimento para aquecimento da máquina de ensaios universais, com o objetivo de orientar outros usuários para obter os melhores benefícios da máquina.

No Apêndice C apresenta uma investigação sobre a incerteza e a calibração da máquina de ensaios universais utilizada nesta Tese.

No Apêndice D é apresentado um tutorial para a colagem de *strain gage* (SG). Este procedimento foi realizado e refinado ao longo da pesquisa.

O Apêndice E descreve o *software* desenvolvido durante esta Tese.

2 Revisão Bibliográfica

A determinação de propriedades mecânicas de materiais frágeis e semi frágeis enfrenta dificuldades para conhecer a zona de processamento próxima a ponta de uma trinca ou entalhe. Como consequência os valores de Tenacidade à Fratura (K_C) calculados são subestimados, apresentando valores inferiores aos valores reais desta propriedade do material.

Ocorre também que a mecânica da fratura linear elástica se desenvolve em torno do conceito da singularidade na ponta da trinca, para a qual suas equações originais foram desenvolvidas. No caso de entalhes em U não existe esta singularidade, razão para qual este esforço de pesquisa foi desenvolvido.

2.1 Mecânica da Fratura

A mecânica da fratura (MF) vem sendo desenvolvida para estudar o comportamento mecânico de materiais na presença de descontinuidades internas e/ou superficiais, em solicitações semi-estáticas, ou seja, monotônicas e tão lentas que possam ser consideradas estáticas. A MF se divide em mecânica da fratura linear elástica (MFLE), mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP) e mecânica da fratura não linear (MFNL) (ANDERSON, 2008, p.17), que tratam deste modo de falha em carregamento estático. KOBAYASHI, Yamamoto e Niinomi (1993) fazem uma descrição da mecânica da fratura dinâmica (MFD) que trata de tenacidade a fratura sob carregamento dinâmico.

Inglis (1913) publicou um trabalho onde faz a análise de tensões em buracos elípticos e descontinuidades semelhantes a trincas.

Griffith (1920) analisou a diferença entre os processos de resistência à tensão mecânica e à presença de trincas em vidros. Sua modelagem para fratura em materiais frágeis levou em consideração o trabalho para criação de superfícies e a energia potencial acumulada no corpo até a fratura.

Westergaard (1939) desenvolveu a modelagem do campo de tensões biaxial.

Irwin; Orowan (1948, 1949 apud COTTERELL, 2002), em trabalhos independentes desenvolveram o conceito de fratura semifrágil e verificaram uma deformação considerada plástica na superfície de uma fissura em materiais menos frágeis.

Irwin (1955) e Orowan (1955) estenderam os trabalhos de Griffith (1920), possibilitando lidar com plasticidade limitada próxima a ponta da trinca na maioria dos materiais de engenharia.

Dentre os modelos matemáticos descritos e utilizados neste trabalho, tem especial des-

taque a Equação 2.1 criada por Irwin (1957).

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F(a/W) , \quad (2.1)$$

onde:

K	fator intensificador de tensão
σ	tensão
a	profundidade da trinca
$F(a/W)$	fator de ajuste de geometria

Esta Equação (2.1) relaciona a resistência ao crescimento de trinca (K), o comprimento da trinca (a), e a tensão imposta ao material (σ).

Creager e Paris (1967) criam um modelo físico para avaliar trincas e entalhes, considerando o volume do entalhe, ao invés de considerar o plano da descontinuidade. A distribuição de tensões é considerada neste volume. Durante esta investigação, os autores verificam condições para prever a estabilidade da trinca ou entalhe baseando-se na derivada primeira da razão entre volume e a raiz da tensão. Valores próximos tendendo a zero preveem uma taxa baixa e estabilidade, enquanto valores crescentes preveem crescimento e instabilidade.

Ao analisar as trincas, os pesquisadores perceberam a necessidade de adaptar as equações de Irwin (1957), que foram originalmente definidas para problemas onde havia uma singularidade, ou seja raio na ponta do entalhe (ρ) nulo.

Estas equações foram reescritas para um novo sistema de coordenadas dentro do entalhe, mais profundo, capazes de descrever trincas arredondadas, visando modelar suas observações do material sofrendo corrosão.

A MFLE foi criada originalmente avaliando a falha em materiais frágeis, onde a deformação plástica é negligenciável, e descreve, portanto, o comportamento de falha governado pela fratura frágil em materiais com Tenacidade à Fratura (K_{IC}) relativamente baixos. Outra condição exigida para a validade da MFLE é o estado plano de deformações (EPD), associado ao estado triaxial de tensões (ETT).

Para materiais dúcteis, onde ocorre significativa deformação plástica, faz-se necessário utilizar o ferramental teórico da mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP).

No intervalo de validade entre estes dois compartimentos teóricos encontra-se a mecânica da fratura não linear (MFNL) que trata de materiais semi frágeis, e apresentam amolecimento (*softening*) no final do seu regime elástico, devido ao crescimento de micro-trincas na zona de processamento de fratura (ZPF) (Figura 2.1).

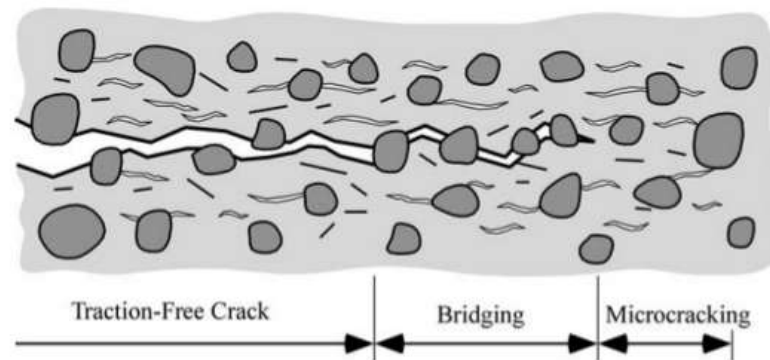


Figura 2.1 – Zona de processamento de fratura onde se formam microtrincas que levam ao amolecimento do material. Fonte: Anderson (2008, p. 355).

2.2 Singularidade

As teorias básicas de projeto em engenharia consideram que os componentes apresentam uma distribuição homogênea dos campos de tensões ou geometria regular. No entanto, em geometrias não regulares, a distribuição de tensões não acompanha modelos simplificados, expondo o componente a tensões amplificadas diferentes e a outros mecanismos de falha. Os primeiros modelos descritos por Inglis (1913) se aplicavam à fator concentrador de tensão (K_t) por eventos na geometria.

Griffith (1920) propõe um critério para descrever falhas em materiais frágeis baseado no balanço entre a energia potencial do material e a energia necessária à sua falha.

Irwin (1957), baseando-se no trabalho de Westergaard (1939), definiu um modelo onde campo de tensões em torno da ponta da trinca se comportava sempre singularmente. O termo K (fator intensificador de tensão) descreve esta singularidade.

2.3 Fator concentrador de tensões

Em componentes com geometria homogênea pode-se calcular uma tensão de referência ou remota (σ_{ref}) que se distribui igualmente e é calculada pela razão entre a força aplicada ao corpo (P) pela Área da seção transversal (A_0) homogênea do corpo (Equação 2.2 e Equação 2.3).

$$\sigma = \sigma_{ref} = P/A_0, \quad (2.2)$$

$$A_0 = H \cdot h, \quad (2.3)$$

onde:

- σ_{ref} tensão de referência ou remota
- P força aplicada ao corpo
- A_0 Área da seção transversal
- H aresta da largura do corpo para a área da seção transversal
- h aresta da espessura do corpo para a área da seção transversal

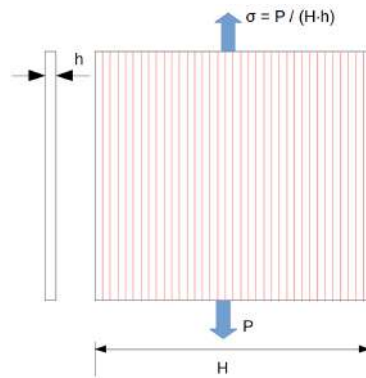


Figura 2.2 – Distribuição homogênea das linhas de força no corpo . Fonte: adaptado de Pilkey (2008).

Segundo Pilkey (2008), a presença de distorções na geometria do corpo, como cantos, pontas ou concavidades, acarreta na redistribuição dos campos de tensão internos, causando aumento da tensão nas proximidades destes eventos (Figura 2.3).

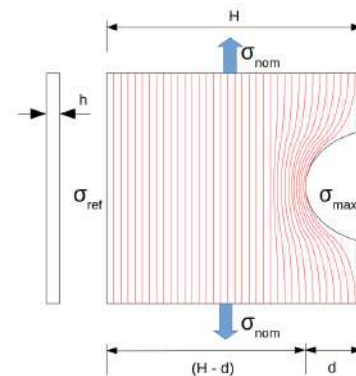


Figura 2.3 – Distribuição das linhas de força concentradas no corpo . Fonte: adaptado de Pilkey (2008).

As linhas de tensão se concentram formando regiões de tensão normal máxima (σ_{max}), maiores que a tensão nominal no corpo (σ_{nom}). O fator concentrador de tensão (K_t) representa o aumento da tensão produzida por estas alterações e pode ser calculado pela razão (Equação 2.4)

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \tag{2.4}$$

onde:

K_t fator concentrador de tensão
 σ_{max} tensão normal máxima
 σ_{nom} tensão nominal no corpo

Pilkey (2008) descreve duas formas de K_t . O fator concentrador de tensão bruto (*gross*) (K_{tg}) é calculado utilizando seção transversal total remota, ou seja, afastada da alteração na geometria, conforme descrito nas Equações 2.5 e 2.6.

$$\sigma = \frac{P}{H \cdot h} = \sigma , \quad (2.5)$$

$$K_{tg} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{\sigma_{max} H h}{P} , \quad (2.6)$$

onde:

K_{tg} fator concentrador de tensão bruto (*gross*)
 σ_{max} tensão normal máxima
 σ_{nom} tensão nominal no corpo
 H altura do corpo
 h espessura do corpo
 P carga aplicada

A tensão baseada na área líquida (*net*) (σ_n) é baseada na seção remanescente, ou seja, baseado na área ou seção restante do componente, conforme a Equação 2.7. De forma semelhante, o fator concentrador de tensão líquido (*net*) (K_{tn}) modela, portanto, a tensão pelo segmento resistente no corpo, conforme apresentado na Equação 2.8.

$$\sigma_n = \frac{P}{(H - d)h} , \quad (2.7)$$

$$K_{tn} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} = K_{tg} \frac{H - d}{H} , \quad (2.8)$$

onde:

σ_n tensão baseada na área líquida (*net*)
 P carga aplicada
 H altura do corpo
 h espessura do corpo
 d comprimento resistente do corpo
 K_{tn} fator concentrador de tensão líquido (*net*)
 σ_{max} tensão normal máxima
 K_{tg} fator concentrador de tensão bruto (*gross*)

Cabe observar que o fator d/H (Equação 2.3) descreve a razão entre o comprimento resistente do corpo (d) e o altura do corpo (H). Como d será sempre uma fração de H , a razão d/H se comporta entre 0 e 1 e adimensionaliza o efeito da profundidade do entalhe sobre a dimensão afetada do CP.

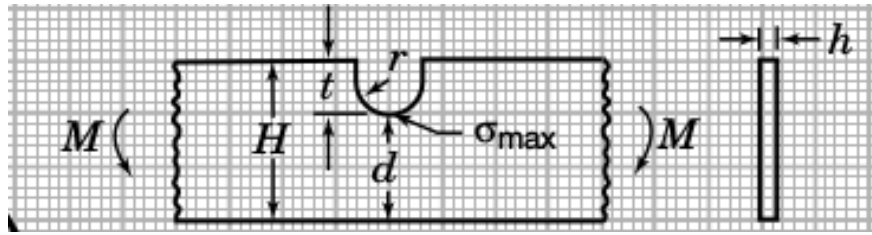


Figura 2.4 – Esquema do CP de flexão com entalhe U conforme definição de Peterson. Fonte: Pilkey (2008)

Os valores de K_{tn} para flexão em corpos de prova em barra fina contendo entalhes em U são ajustados por equações empíricas descritas por Pilkey (2008, p. 110), para valores nos intervalos entre ($2.0 < t/r < 20.0$), conforme descrito abaixo:

$$C_1 = 2,966 + 0,502(t/r) - 0,009(t/r)^2, \quad (2.9a)$$

$$C_2 = -6,475 - 1,126(t/r) + 0,019(t/r)^2, \quad (2.9b)$$

$$C_3 = 8,023 + 1,253(t/r) - 0,020(t/r)^2, \quad (2.9c)$$

$$C_4 = -3,572 - 0,634(t/r) + 0,010(t/r)^2, \quad (2.9d)$$

$$K_{tn} = C_1 + C_2 \left(\frac{t}{H} \right) + C_3 \left(\frac{t}{h} \right)^2 + C_4 \left(\frac{t}{H} \right)^3 \quad (2.9e)$$

2.4 Estado de tensões na ponta da trinca

O EPD, requisito para utilização da MFLE, ocorre quando uma das deformações principais for nula. Este estado é característico de componentes com seção transversal larga, isto é, a tensão irá se manifestar nas três direções principais.

Segundo Hertzberg (1996, p.342), quando o espécime ou componente é espesso na direção paralela a frente da trinca, uma tensão em Z (σ_z) maior é gerada, restringindo a deformação plástica nesta direção. O tamanho da ZP no EPD é menor que no EPT. O valor da K_C aumenta com a quantidade de energia armazenada, e sendo assim, a quantidade de energia armazenada por deformação plástica do EPD é maior que no EPT.

Quando uma placa é espessa o grau de plastificação agindo na ponta da trinca é pequeno, prevalecendo as condições de tensão plana. Nestas condições a capacidade de armazenar energia por plastificação é maior, logo K_{IC} é menor. No entanto, quando existe material suficiente

para armazenar energia na forma de deformação plástica, prevalecendo as condições do estado plano de deformação na ponta da trinca,

Mecânica da fratura linear elástica (MFLE) que descreve o fenômeno da fratura no estado plano de tensões, principalmente para materiais frágeis.

2.5 Influência do raio na ponta do entalhe

Damani, Gstrein e Danzer (1996) estuda a influência de raio na ponta do entalhe (ρ) para a tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca e defende a hipótese de que exista um ρ crítico abaixo do qual se pode estimar o valor de K_{IC} verdadeiro do material.

Segundo Fett (2005) o raio na ponta do entalhe (R) perdem influência quando o comprimento da trinca (ℓ) se torna uma vez e meio maior que R ($\ell > 1.5R$).

2.6 Propriedades mecânicas em materiais semi frágeis

Apesar dos cálculos de fator intensificador de tensão (K) terem bastante precisão para materiais dúcteis, para materiais semi frágeis como rochas e concreto, entre outros, os valores obtidos para esta propriedade penalizam o material por serem estimados valores maiores do que os valores reais.

Chong, Li e Einstein (1989) descrevem a não linearidade no final do regime elástico de materiais semi frágeis como a consequência da formação de microtrincas na zona de processamento, e chamam este fenômeno de *softening*, tornando os valores de resistência obtidos pela MFLE muito distantes da realidade. Mesmo os valores obtidos em laboratório são também diferentes dos valores observados *in situ*.

O objetivo de obter o parâmetro tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca é poder estimar a carga máxima suportada por componentes. Para tanto, a Equação 3.11 pode ser tratada para a obter a carga máxima aplicada, conforme (Equação 2.10)

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{\pi a} \cdot F(a/W)}, \quad (2.10)$$

e como a tensão pode ser calculada por (Equação 2.11)

$$P_{max} = \sigma \cdot A_0, \quad (2.11)$$

e conseqüentemente, acoplando a Equação 2.12

$$P_{max} = \frac{K_I}{\sqrt{\pi a} \cdot F(a/W)} \cdot A_0, \quad (2.12)$$

No entanto, este cálculo do K_I não é preciso, em função da não linearidade dos materiais semi frágeis e do crescimento da zona de processamento de fratura (ZPF) durante a sollicitação do material.

2.7 Materiais semi frágeis

Segundo Bažant e Planas (1998, p.5), materiais semi frágeis como o concreto, rochas, cerâmicos, compósitos, gelo e alguns polímeros tem seus processos de falha afetados diretamente pela ZPF que é uma zona não linear caracterizada por amolecimento (*softening*) progressivo, onde a tensão decresce com deformação crescente. Esta zona é cercada por outra zona não linear caracterizada por endurecimento (*hardening*) e plastificação (BAŽANT; PLANAS, op. cit., p.104).

2.8 Zona de processamento de fratura

A zona de processamento de fratura (ZPF), definida originalmente por Glucklich (1963), é descrita por Bažant (2002) como uma região localizada na ponta da trinca ou a frente de um entalhe, onde se acumulam danos no material (Figura 2.5) em função da formação e acúmulo de micro-trincas, e que deterioram a resistência do mesmo.

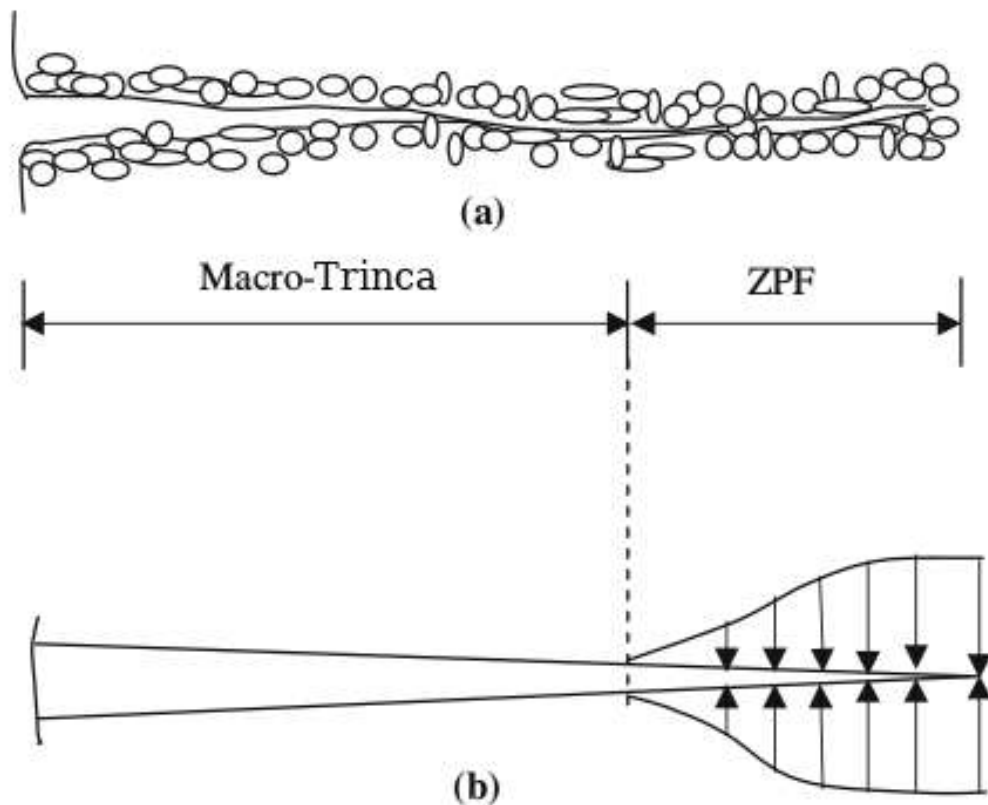


Figura 2.5 – Esquema descrevendo a Zona de Processamento de Fratura em materiais semi frágeis. Fonte: adaptado de Kumar e Barai (2011)

Em materiais dúcteis ocorre deformação plástica localizada em uma pequena região à frente da trinca, enquanto em materiais semi frágeis, esta zona ganha maiores proporções e é caracterizada pela formação de microtrincas, conforme apresentado na Figura 2.6

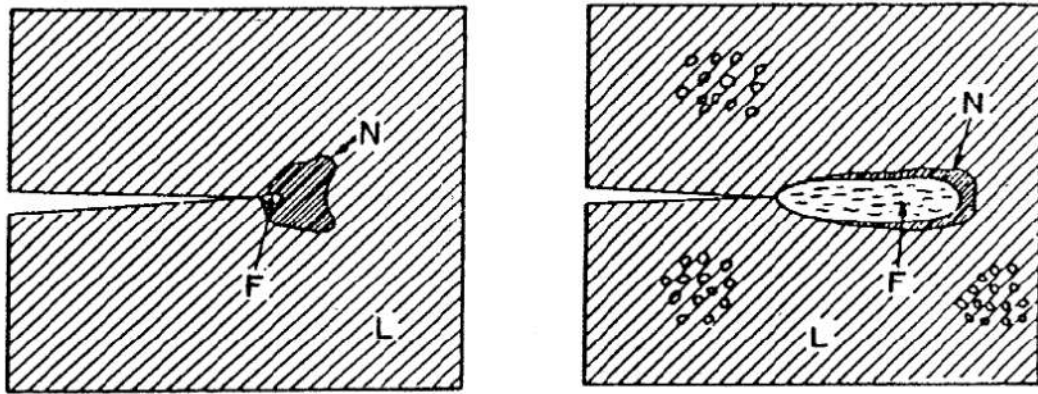


Figura 2.6 – ZPF em metais (à esquerda) e em materiais semi frágeis (à direita). Fonte: Bažant (2002).

Na Figura 2.6 o modelo da esquerda representa um material dúctil, onde pode-se esperar uma ZPF bem pequena na ponta da trinca, enquanto a zona não-linear (ZNL) é o fator que contribui definitivamente para a falha. Na ilustração da direita pode-se observar o modelo de materiais semi frágeis como concreto, rochas, compósitos, gelo, osso, papel, madeira e algumas cerâmicas. A falha nestes materiais tem pequena contribuição da ZNL e grande contribuição do crescimento da ZPF, conforme apresentado na Figura 2.6.

Segundo Tarokh et al. (2017), o tamanho da ZPF no EPT pode ser estimado conforme a Figura 2.13a.

$$W = \frac{W_{inf} D}{D_{0w} \left(1 + \frac{D}{D_{0w}} \right)}, \quad (2.13a)$$

$$\ell = \frac{\ell_{\infty} D}{D_{0\ell} \left(1 + \frac{D}{D_{0\ell}} \right)}, \quad (2.13b)$$

$$D_{0\ell} = 3 \cdot D_{0w}, \quad (2.13c)$$

$$\ell_{\infty} = 3 \cdot W_{\infty} \quad (2.13d)$$

Segundo Kumar e Barai (2011, p. 98), a ZPF de materiais semi frágeis se desenvolvem em estágios, conforme a Figura 2.7

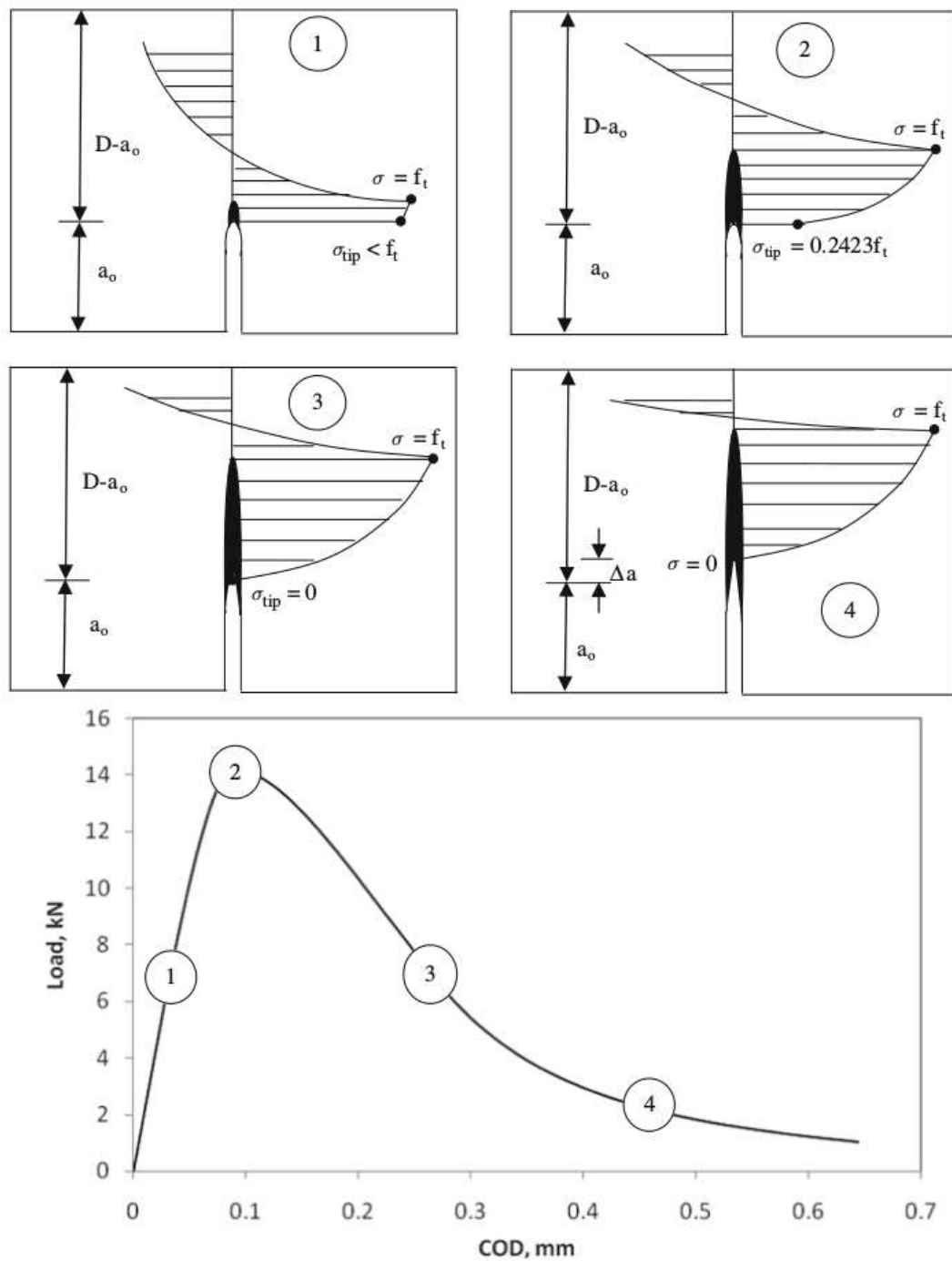


Figura 2.7 – Estágios de evolução da ZPF. Fonte: Kumar e Barai (2011)

Na Figura 2.7 é apresentada um corpo de prova com um entalhe de 30% da dimensão solicitada. Pode-se observar que, apesar do material não ser dúctil, durante o regime elástico ocorre um acúmulo de danos a partir do ponto 1. Com o aparecimento de danos na forma de microfissuras tem início a ZPF até atingir o pico de carregamento no ponto 2, onde ocorre a quebra do material. No entanto, em função das baixa velocidade comum em ensaios, e das forças coesivas ainda atuantes nos materiais semi frágeis, o elemento não se separa em duas partes imediatamente. O carregamento continua com a diminuição da seção resistente e da capacidade de transferir tensão para o corpo até o ponto 3. Deste ponto em diante o CP perde a

capacidade de transferir tensão da ZPF para o restante do corpo. No ponto 4 a trinca finalmente se propaga, apesar de seus efeitos já existirem desde o ponto 2.

2.9 Defeito intrínseco

Todo material possui uma microestrutura que é resultado de interação de suas substâncias constitutivas e das condições do meio onde se desenvolveu. Entretanto, diversos fatores levam a ocorrência de falhas, perturbações, limitações ao crescimento. Durante o seu preparo para uso, processos mecânicos e químicos também podem modificar sua estrutura macroscópica, bem como sua microestrutura. Como consequência, uma população de defeitos é formada e estes defeitos tornam-se elos frágeis na estrutura do material. Quando da solicitação em serviço, estes elos mais frágeis dão início a falhas na microestrutura que se movimentam e acumulam, produzindo efeitos macroscópicos e até a falha do material.

Tanaka et al. (2003) avalia o tamanho do defeito intrínseco utilizando uma cerâmica avançada que apresenta uma população de defeitos bem conhecida e comportada, procurando causar perturbações na geometria do corpo cada vez menores, de forma a testar por onde cada corpo testado falharia. Assim os autores conseguiram atingir um tamanho mínimo de defeito que não nucleou falhas no material (Figura 2.8).

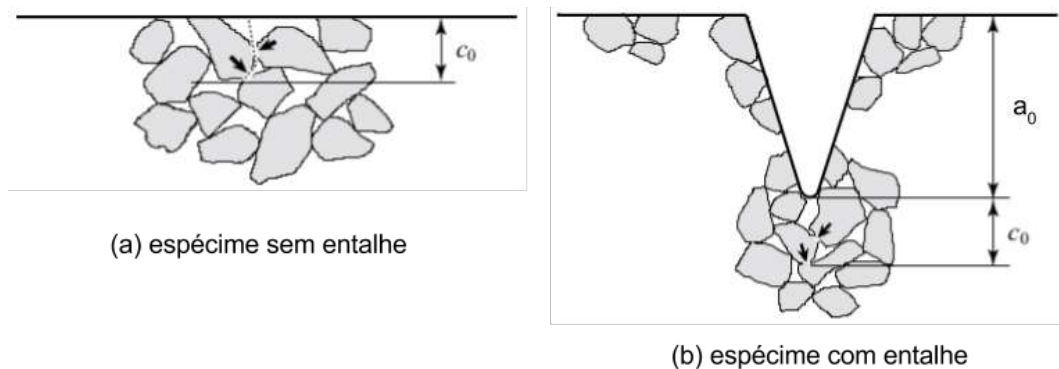


Figura 2.8 – Exemplo de microestrutura contendo poros e grãos. Fonte: Adaptado de Tanaka et al. (2003).

2.10 Efeito de tamanho

Bazant (1984) avalia que, como todo material possui uma população de defeitos, quanto maior o volume de um material, a quantidade de defeitos disponíveis para nuclear falhas se torna maior na medida em que o volume de um dado componente aumente. Como consequência, testes de resistência e as probabilidades de falha de componentes com volumes diferentes se tornam incompatíveis.

Weibull (1939) corrobora com a análise e também considera que a probabilidade de falha deve estar sujeita ao volume analisado.

2.11 Volume elementar representativo

Segundo Bažant (1984), o volume elementar representativo (VER) é o menor volume sobre o qual se pode avaliar as características mecânicas de um material. Para volumes menores que o VER as características específicas do material podem não se revelar. Esta foi a base para o desenvolvimento do comprimento característico do material.

2.12 Modelo de zona coesiva em materiais frágeis

Barenblatt (1959), Barenblatt (1962) demonstrou o equilíbrio entre as sollicitações remotas com as superfícies da fratura na região próxima a ponta da trinca. Avaliando a geometria e a elasticidade, o autor definiu a barenblatt-1 da Equação 2.14

$$\sigma_N = \frac{K}{\sqrt{\beta}} + QF, \quad (2.14)$$

onde:

σ_N tensão nominal

K fator intensificador de tensão

β distância do plano de fratura ao contorno da superfície fraturada

QF constante de Barenblatt para zona coesiva

O comportamento da trinca em materiais frágeis inclui forças de coesão na região típica do trincamento. Para Dugdale (1960) as forças de coesão se mantêm constantes, representando materiais elasto-perfeitamente plástico. Barenblatt (1962) assumiu que tais forças de ligamento decrescem suavemente em materiais frágeis.

Este modelo leva em consideração a energia coesiva (T), a resistência coesiva σ_{max} e a distância entre as superfícies da trinca (δ_{sep}). A energia coesiva é compatível com a energia de fraturamento (Γ).

O modelo de zona coesiva (CZM) vem sendo investigado por diversos pesquisadores, entre eles (GÓMEZ; GUINEA; ELICES, 2006).

2.13 Comprimento característico

O comprimento característico do material, descrito inicialmente por Irwin (1957), pode ser calculado segundo a Equação 2.15

$$\ell_{ch} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_0} \right)^2 = \frac{EG}{\sigma_u^2}, \quad (2.15)$$

onde:

- ℓ_{ch} comprimento característico do material
- K_C tenacidade à fratura
- σ_0 resistência característica do material
- E módulo de elasticidade
- G taxa de liberação de energia de Griffith

Segundo Hillerborg (1983) apud Bažant e Pijaudier-Cabot (1989), comprimento característico do material (ℓ_{ch}) representa um parâmetro de escala do material. De forma semelhante ao VER o ℓ_{ch} também descreve o material, podendo também ser utilizado para relativizar fenômenos geométricos do material. Vários critérios e teorias o utilizam como base, como por exemplo TDC (TAYLOR, 2010).

Sendo assim, o ℓ_{ch} se baseia em propriedades do material, sendo este também considerado uma propriedade do material. O ℓ_{ch} é utilizado também como um índice de fragilidade do material, onde quanto menor ℓ_{ch} mais frágil o material será, enquanto maiores valores de ℓ_{ch} indicam maior ductilidade.

A σ_0 pode ser assumida como sendo a tensão última em materiais frágeis e semi frágeis (σ_u) do material.

2.14 Teoria da Distância crítica

A Teoria da Distância Crítica (TDC) é na verdade um grupo de métodos que se baseiam no comprimento característico do material e na análise linear elástica. Esta técnica vem sendo utilizada em diversos tipos de materiais que apresentem comportamento frágil.

O método do ponto (MP) se baseia na ocorrência da falha quando a tensão (σ) atinge a resistência característica do material (σ_0) à uma certa distância do fundo do entalhe, a distância crítica (r_c) (Equação 2.16), conforme demonstrado na Figura 2.9

$$r_c = \frac{\ell}{2} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_0} \right)^2, \quad (2.16)$$

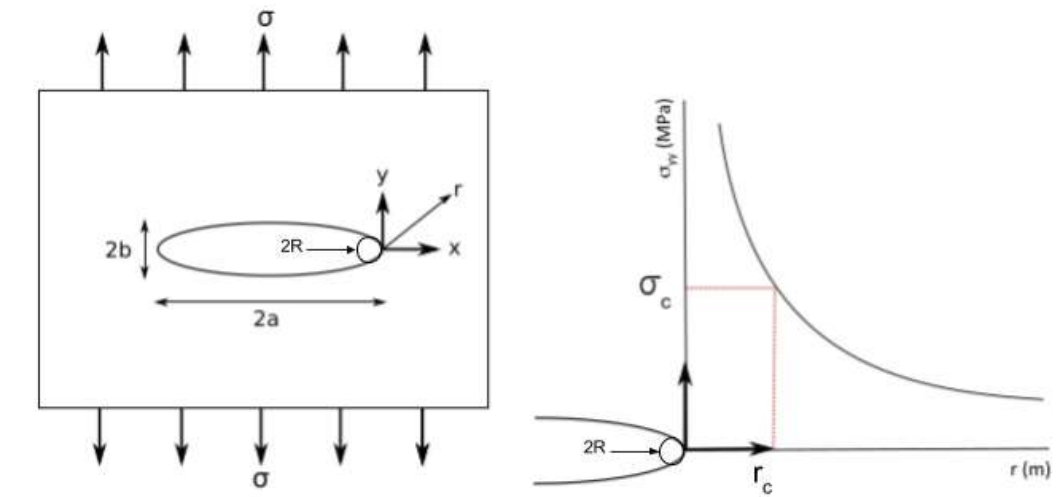


Figura 2.9 – Furo elíptico de Inglis (1913) (esquerda) e distância crítica (r_c) a frente do entalhe, onde a tensão crítica (σ_c) causa a falha do material, antes da tensão na ponta do entalhe (direita). Fonte: adaptado de McNamara et al. (2015).

Neste caso, quando a tensão remota (σ) é aplicada normal ao furo, a tensão elástica em y (σ_{yy}) pode ser calculada segundo a Equação 2.17 (INGLIS, 1913).

$$\sigma_{yy} = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot \frac{2R + 2r}{\sqrt{(R + 2r)^3}}, \quad (2.17)$$

Quando o raio do furo (R) tende a zero a equação pode ser simplificada, O MP pode estimar tensão crítica (σ_c) pela Equação 2.18

$$\sigma_c = \sigma(x) = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot x}}, \quad (2.18)$$

onde x é a distância da ponta do entalhe. Sendo assim, segundo o MP pode-se tornar mais específica pela Equação 2.19

$$\sigma_c = \sigma(r_c) = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r_c}}, \quad (2.19)$$

Os valores de σ_c e r_c tem como vantagem serem independentes da geometria e dimensões do corpo.

2.15 Flexão em quatro pontos

O ensaio de flexão em quatro pontos solicita principalmente as superfícies do material, tendo como principal vantagem poder trabalhar com materiais frágeis e semi frágeis. Este ensaio possibilita também a aplicação do extensômetro de resistência elétrica (ERE), como por exemplo o *strain gage* (SG), na face superior do material testado. A partir deste ensaio são possíveis colher como resultados :

- módulo de elasticidade em flexão (E_f)
- tensão limite de resistência (σ_{LR})
- tensão de escoamento (σ_{esc})

Neste ensaio considera-se o modelo da seção 2.15 conforme descrito por Garcia, Spim e Santos (2000);

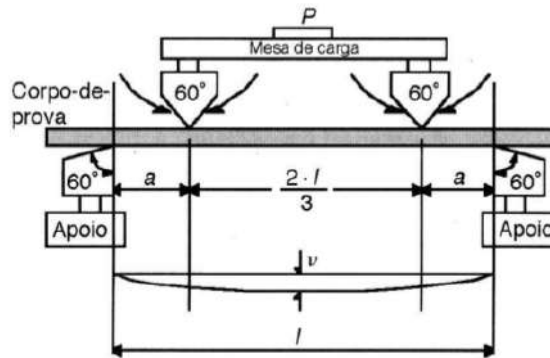


Figura 2.10 – Flexão em quatro pontos . Fonte: Garcia, Spim e Santos (2000).

A tensão de flexão (σ_{fm}) pode ser calculada pela Equação 2.23:

$$M_f = \frac{P}{2} \cdot \frac{L_1}{2} - \frac{L_2}{2} = \frac{P(L_1 - L_2)}{4}, \quad (2.20)$$

$$I_z = \frac{w \cdot h^3}{12}, \quad (2.21)$$

$$Y_{LN} = \frac{h}{2}, \quad (2.22)$$

$$\sigma_{fm} = \frac{M_f}{I_z} \cdot Y_{LN} = \frac{3P(L_1 - L_2)}{2w \cdot h^2}, \quad (2.23)$$

onde:

- M_f momento fletor
- I_z momento de inércia
- Y_{LN} distância entre a linha neutra e a superfície do CP
- P carga aplicada
- L_1 distância entre roletes do suporte inferior
- L_2 distância entre roletes superiores
- h altura do corpo de prova
- w largura do corpo de prova
- σ_{fm} tensão de flexão

Segundo Tada, Paris e Irwin (2000, p.56) o deslocamento (δ) pode ser calculado pela Equação 2.24a e 2.24c

$$\delta = \frac{4\sigma a}{E'} V(a/b) , \quad (2.24a)$$

$$E' = E/(1 - (\nu^2)) \text{ (E.P.D.)} , \quad (2.24b)$$

$$V(a/b) = 0,8 - 1,7(a/b) + 2,4(a/b)^2 + \frac{0,66}{(1 - (a/b)^2)} , \quad (2.24c)$$

onde:

δ	deslocamento
a	profundidade do entalhe
b	altura do corpo de prova
σ	tensão
E'	módulo de elasticidade efetivo
$V(a/b)$	Equação empírica para correção de deslocamento

2.16 Flexibilidade elástica - *Compliance*

Flexibilidade elástica (C ou λ), e seu recíproco a rigidez (stiffness) (k), descrevem a reação de um material à aplicação de uma carga aplicada (P), sendo normalmente descrito pelas Equações 2.25a, 2.25b e 2.25c (FETT; MUNZ; THUN, 1998).

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{2 \cdot a^3}{3 \cdot E \cdot I} , \quad (2.25a)$$

$$a = \frac{L_1 - L_2}{2} , \quad (2.25b)$$

$$k = \frac{P}{\delta} , \quad (2.25c)$$

onde:

C	flexibilidade elástica
E	módulo de elasticidade
a	distância entre roletes (base e aplicador) na F4P
I	momento de inércia
k	rigidez (stiffness)
δ	deslocamento
P	carga aplicada

Segundo a teoria das vigas, tem-se ainda que (Equação 2.26 e 2.27)

$$\frac{\delta}{2} = \frac{P \cdot a^3}{3 \cdot E \cdot I} , \quad (2.26)$$

$$I = \frac{B \cdot h^3}{12}, \quad (2.27)$$

onde:

- δ deslocamento
- P carga aplicada
- a tamanho da trinca
- h altura do corpo
- E módulo de elasticidade
- I momento de inércia

Quando um corpo contendo um entalhe ou trinca é submetido à uma carga aplicada, o corpo apresenta um C inicial (C_0), referente ao comportamento do material na ausência de falhas, até que o corpo acumule energia crítica, criando ou ampliando as trincas, provocando mudança em sua C .

Fett, Munz e Thun (1998) descrevem três modos de flexibilidade elástica (C), descritas na Equação 2.28:

$$C = C_0 + C_{par} + \Delta C, \quad (2.28)$$

onde:

- C flexibilidade elástica
- C_0 flexibilidade do material sem trinca
- C_{par} flexibilidade parasita do sistema
- ΔC flexibilidade devido ao crescimento de trinca

Nesta Equação (2.28), a C considerada total, possui como componentes a C_0 , ΔC , em função da carga aplicada, e C_{par} que sumariza efeitos elásticos entre o corpo e o sistema que aplica a força.

2.17 Norma ASTM E-855

A norma ASTM-E855 (2000) descreve o procedimento para ensaios de flexão em três e quatro pontos. São indicadas Equações para a determinação do módulo de elasticidade da flexão em quatro pontos, resistência comprovada, conforme Equação 2.29

$$\sigma_P = \frac{3P_P \cdot a}{b \cdot h^2}, \quad (2.29)$$

onde:

- σ_P resistência comprovada
- P_P carregamento máximo comprovado
- a distância entre roletes (base e aplicador) na F4P
- b largura do corpo de prova
- h altura do corpo de prova

Segundo esta norma é indicado calcular o módulo de elasticidade da flexão em três pontos ($E_{b,3P}$) (Equação 2.30) e módulo de elasticidade da flexão em quatro pontos ($E_{b,4P}$), conforme também descrito por Garcia, Spim e Santos (2000),

$$E_{b,3p} = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \nu}, \quad (2.30)$$

$$E_{b,4p} = \frac{P \cdot a(3L^2 - 4a^2)}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \nu}, \quad (2.31)$$

onde:

- $E_{b,4P}$ módulo de elasticidade da flexão em quatro pontos
- P incremento de carga
- a distância entre roletes (base e aplicador) na F4P
- L distância entre roletes de suporte para flexão
- b largura do corpo de prova
- ν flecha ou (deslocamento em y) durante a flexão

Comparando as Equações 2.30 e 2.31 fica claro que o M_f é o fator que diferencia a flexão em quatro pontos ($a(3L^2 - 4a^2)$) da flexão em três pontos (L^3).

Garcia, Spim e Santos (2000) indica o cálculo da flecha ou (deslocamento em y) durante a flexão para a flexão em quatro pontos através da simples manipulação algébrica apresentada na Equação 2.32

$$\nu = \frac{P \cdot a(3L^2 - 4a^2)}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot E_{b,4p}}, \quad (2.32)$$

Nesta norma são encontradas ainda as Equações referentes ao cálculo da incremento na deflexão (flecha) comprovado (δ_P) (Equação 2.33)

$$\delta_P = \frac{0,0001 \cdot (3L^2 - 4a^2)}{12h}, \quad (2.33)$$

onde:

- δ incremento na deflexão (flecha) durante a flexão
- L distância entre roletes de suporte para flexão
- a distância entre roletes (base e aplicador) na F4P
- h altura do corpo de prova

2.18 Curva de Resistência (Curva-R)

Um dos aspectos importantes do estudo da fratura é a determinação do tamanho da trinca, visando entender seu crescimento, estimar seu tamanho crítico e a vida restante do componente trincado. No entanto, devido a natureza da maioria dos materiais semi frágeis como rochas, concreto e outros agregados, a identificação da profundidade da trinca torna-se mais difícil em função da presença de microtrincas na ZPF.

A técnica da curva-R, originalmente definida nos trabalhos de Irwin (1960), Irwin et al. (1961) e Krafft, Sullivan e Boyle (1961), apud Bažant, Kim e Pfeiffer (1986), da suporte para estimar a profundidade da trinca. Atualmente, a norma E-561 (ASTM, 2010) descreve procedimentos necessários para sua confecção e detalhes dos ensaios mecânicos necessários.

No entanto, seu uso para materiais semi frágeis foi investigado e adaptado por (SHAH; VELAZCO; VISALVANICH, 1980) e Shah e Wecharatana (1982) que trouxeram adaptações para este tipo de materiais. Um exemplo dos dois gráficos possível da Curva R é apresentado na Figura 2.11,

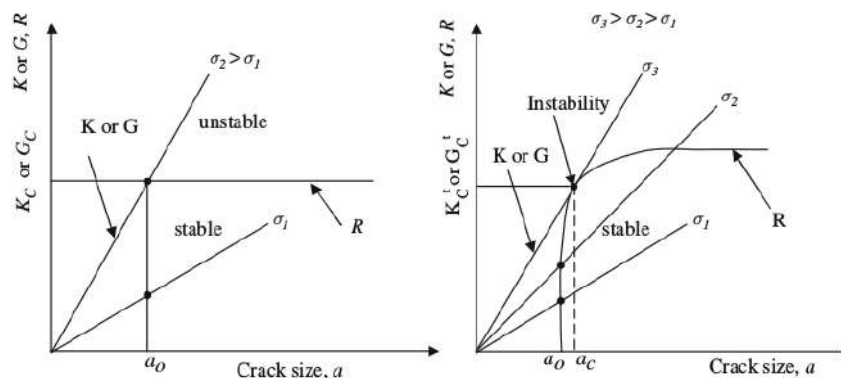


Figura 2.11 – Exemplos de Curva-R. Fonte: Kumar e Barai (2011, p.12).

Esta curva descreve a relação entre a resistência à propagação de trinca (K_C ou G_c) e a profundidade da trinca (a). Neste trabalho será apresentada uma adaptação desta técnica para estimar o tamanho efetivo da trinca (a_{ef}), visando calcular a tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca com maior precisão.

2.19 Cálculo da deformação em flexão

Segundo Beer et al. (2011), durante um ensaio de flexão pura um elemento prismático é deformado adquirindo o formato de um arco (Figura 2.12)

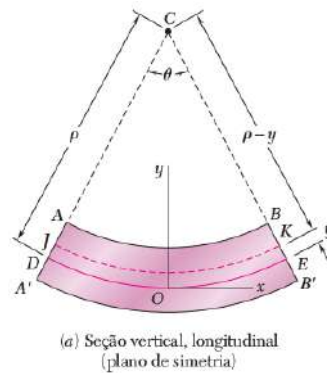


Figura 2.12 – Seção vertical, longitudinal de elemento prismático . Fonte: Beer et al. (2011, p. 234).

Segundo este autor, o deslocamento e a deformação podem ser calculados pelas Equações 2.34 e 2.35

$$\delta = (\rho + y)\theta - \rho\theta = y\theta , \quad (2.34)$$

$$\epsilon_x = \frac{\delta}{L} = \frac{y\theta}{\rho\theta} = \frac{y}{\rho} , \quad (2.35)$$

onde:

- δ alongamento da superfície do elemento
- L comprimento do elemento prismático
- ρ raio do arco de curvatura de flexão
- θ ângulo do arco de flexão
- y distância da linha neutra até a superfície
- ϵ_x deformação no eixo longitudinal

2.20 Curva de suavização de tensão

Em materiais semi frágeis como o concreto e rochas, ocorre um acúmulo de danos, conforme já discutido na seção 2.8. Durante o acúmulo de danos neste tipo de material ocorre uma diminuição da resistência do mesmo, causando o decréscimo da taxa entre tensão e deformação, o que aparece em um gráfico de Tensão vs. Deformação como uma curva decrescente.

2.21 Bibliografia

Mendez e Gasc (1977) avaliam trabalhos anteriores que relacionam o raio na ponta do entalhe (ρ) com a tenacidade à fratura aparente (K_A) e a existência de um valor de ρ mínimo (ρ_0), a partir do qual K_A se comporte como K_{IC} .

Os autores desenvolvem uma relação matemática para descrever o comportamento da tenacidade à fratura aparente em função de $\rho - K_A(\rho)$, e um intervalo de validade para tenacidade à fratura aparente e para tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca. Vários aços foram testados no formato CT, usando norma ASTM. Foram propostas as Equações 2.36 e 2.37, onde ρ_0 e σ_u podem ser obtidos pela relação 2.38.

$$K_A(\rho) = \frac{K_{IC} + \sigma_u \sqrt{\pi(\rho - \rho_0)}}{1 + \sqrt{\frac{\rho - \rho_0}{c}}} \quad \text{para } \rho > \rho_0 \quad (2.36)$$

$$K_A(\rho) = K_{IC} \quad \text{para } \rho < \rho_0 \quad (2.37)$$

$$K_A \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\rho - \rho_0}{c}} \right\} = K_{IC} + \sigma_u \sqrt{\pi(\rho - \rho_0)} \quad (2.38)$$

onde:

- $K_A(\rho)$ tenacidade à fratura aparente em função de ρ
- ρ raio na ponta do entalhe
- ρ_0 raio mínimo (crítico)
- K_{IC} tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca
- σ_u tensão última em materiais frágeis e semi frágeis
- c profundidade do entalhe

Saxena e Hudak (1978) revisam as equações sobre flexibilidade elástica (C), que representa o deslocamento (δ) causado pelo variação de crescimento de trinca (Δa) em função de uma carga aplicada (P) Equação 2.39.

$$C = \frac{\delta}{P}, \quad (2.39)$$

onde:

- C flexibilidade elástica
- δ deslocamento
- P carga aplicada

Cabe esclarecer que a flexibilidade elástica não é aplicável em qualquer situação, e que o ponto de referência para a flexibilidade elástica não é necessariamente a ponta do entalhe. É necessário localizar o eixo de rotação do corpo de prova. Este eixo coincide com a ponta da trinca ou entalhe quando a razão a/W se aproxima de 1,0.

Este fenômeno é a base para a técnica da flexibilidade elástica, utilizada na normas ASTM-E399 (1990) e ASTM-E1820 (2011), que visa estimar o crescimento da trinca durante ensaios de K_{IC} . A variação da flexibilidade elástica enquanto uma carga aplicada é associada à variação de crescimento de trinca (Δa).

Para tanto, durante a execução do ensaio, deve ser monitorada variação das medições de flexibilidade elástica do espécime. A flexibilidade elástica pode ser expressa como uma função do comprimento adimensional da trinca (a/W), enquanto dentro do intervalo $0 \leq a/W \leq 0.975$.

A determinação de propriedades mecânicas de materiais frágeis utiliza, quando possível, várias técnicas e métodos comuns para materiais dúcteis. No entanto, as condições de uso de materiais frágeis podem exigir dimensões de CPs, quantidades, formatos e solicitações dificilmente aplicáveis para tais materiais, tornando o custo ou esforço impraticável.

Ouchterlony e Sun (1983) apresentam um método para prever K_{IC} para rochas, que diminui a dependência de CPs de grandes dimensões, com um mínimo de preparação do CP, menor custo e esforço de teste, apresentando valores acurados, i.e. próximos dos valores reais.

O corpo de prova principal utilizado é do padrão *Straight Edge Crack Round Bar in Bending* (SECRBB) (Figura 2.13).

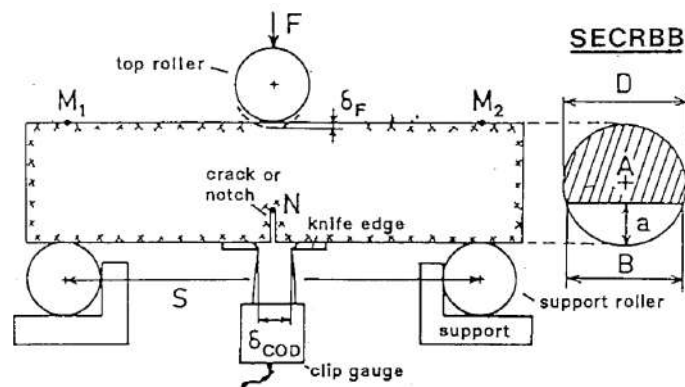


Figura 2.13 – Padrão de CP SECRBB (adaptado de Ouchterlony e Sun (1983))

Os parâmetros para o corpo de prova são:

onde:

D	diâmetro do CP SECRBB
S	distância entre roletes de suporte
a	profundidade máxima da trinca
A	seção remanescente, resistente
B	profundidade do entalhe
F	força aplicada
δ_F	deslocamento ideal referente a carga
δ_{CMOD}	deslocamento da abertura em corpo CMOD
N	raio na ponta do entalhe
M_1, M_2	distância entre os suportes
a_0	profundidade inicial do entalhe

Foram estabelecidos especificamente para este corpo de prova as seguintes Equações (2.40, 2.41 e 2.42):

$$\alpha = a/D \quad (2.40)$$

$$K_I = \frac{1}{4} \left(\frac{S}{D} \right) \cdot Y'_s \cdot \frac{F}{D^{1,5}} \quad (2.41)$$

$$Y'_s = 12,7527\alpha^{0,5} \frac{[1 + 19,646\alpha^{4,5}]}{(1 - \alpha)^{0,25}} \quad (2.42)$$

onde:

K_I fator de intensificador, modo I de abertura de trinca

Y'_s função de ajuste da geometria do SECRBB

α razão entre a trinca e a dimensão do corpo

a profundidade máxima da trinca

D diâmetro do CP SECRBB

S distância entre roletes de suporte

F força aplicada

Inicialmente cálculos de previsão e validação são feitos (Equações 2.43, 2.45, 2.44):

$$\frac{L}{D} = 3,33 \quad (2.43)$$

onde:

L distância entre roletes de suporte

D diâmetro do CP SECRBB

$$a_{min} \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_f} \right)^2 \quad (2.44)$$

onde:

a_{min} tamanho mínimo para a trinca ou entalhe

K_{IC} tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca

σ_f resistência a fratura

$$\alpha_0 = \frac{a_0}{D} \quad (2.45)$$

$$0 < \alpha < 0,6 \quad (2.46)$$

onde:

- α_0 razão entre o entalhe inicial e a dimensão do corpo
- a_0 profundidade inicial do entalhe
- D diâmetro do CP SECRBB

O *compliance* do material foi calculado através das Equações 2.47 ou 2.48:

$$\lambda_F = \frac{\delta_F}{F} \quad (2.47)$$

ou

$$g = \lambda_F \cdot E \cdot D \quad (2.48)$$

onde:

- λ_F *compliance* do corpo mediante a carga F
- δ_F deslocamento ideal referente a carga
- g *compliance* adimensional para SECRBB
- F força aplicada
- E módulo de elasticidade
- D diâmetro do CP SECRBB

Um *clip gauge* foi usado para monitorar a abertura da trinca durante os ensaios.

Os cálculos de K_{IC} foram feitos adaptando a norma ASTM-E399 (1990), gravando a relação entre F e δ_{CMOD} .

A carga F_Q correspondente a 2% do incremento aparente foi obtido pelo método secante à 5%. O valor K_Q foi calculado (Equação 2.41) e considerado uma boa estimativa para K_{IC} se:

1. a trinca e a seção resistente precisam ser maiores que a_{min} (Equação 2.44)
2. segundo a norma ASTM-E399 (1990), a razão $\frac{K_{max}}{K_{IC}} \leq 0,6$, no entanto para rochas são aceitáveis entre 0,6 e 0,95.
3. como requisito de linearidade: $F_{max} < 1,1 \cdot F_Q \cdot K_{IC}$

Por fim, para obter valores mais precisos, o autor utilizou a curva-R para corrigir os valores de K_{IC} .

Hoshide et al. (1984), observa a importância do domínio da tecnologia de cerâmicos, tendo em vista sua melhor performance em comparação com metais, para diversas aplicações na indústria. Sua investigação se concentrou em correlacionar a resistência à fratura com a severidade da população de defeitos inerentes, ou pré-existentes, em materiais frágeis.

Foram testados duas ligas de nitreto de silício sinterizado (Si_3N_4). A iniciação da falha foi avaliada através de microscopia. O fator intensificador de tensão foi calculado para falhas

iniciadas em defeitos nativos e comparado com a Tenacidade à Fratura do material. *Strain gage* foram utilizados para medir a deformação dos corpos de prova. Foi medida uma tensão máxima aproximadamente 15% maior que a tensão obtida no centro do corpo de prova. A resistência a fratura (σ_f) foi calculada a partir do valor de deformação medido, e multiplicando pelo módulo de elasticidade (E).

O teste de Tenacidade à Fratura utilizou dois formatos de corpos de prova retangulares. Um corpo de prova foi usinado no formato de viga com 2 mm de espessura e 7 mm de largura, enquanto o outro mediu 5 mm de espessura e 4 mm de largura. Os CPs receberam entalhes por penetração com indentador Vickers, foram recosido visando relaxamento das tensões provocadas pela indentação, e foram ensaiados em flexão de três e quatro pontos.

Os autores avaliaram a equação 2.49 e consideraram que o termo F_0 se comporta como um fator de magnificação do contorno da falha ou entalhe.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F_0 \quad (2.49)$$

onde:

- K_I fator de intensificador, modo I de abertura de trinca
- σ tensão
- a profundidade da trinca
- F_0 fator de magnificação do contorno da falha ou entalhe

Sendo assim, visando obter um valor para a influência do entalhe, foi calculado um entalhe equivalente ou efetivo (a_{eq}) Equação 2.50.

$$a_{eq} = a \cdot F_0^2 = \left(\frac{K_I}{\sigma} \right)^2 / \pi \quad (2.50)$$

onde:

- K_I fator de intensificador, modo I de abertura de trinca
- σ tensão
- a profundidade da trinca
- a_{eq} entalhe equivalente ou efetivo
- F_0 fator de magnificação do contorno da falha ou entalhe

Os valores de a_{eq} foram calculados a partir dos resultados de K_I dos ensaios utilizando a Equação 2.50. Os resultados apresentaram valores menores que os valores reais, indicando que as equações disponíveis não eram suficientemente precisas para obter as propriedades verdadeiras de materiais cerâmicos. Segundo os autores, novas técnicas precisam ser criadas para produzir valores mais precisos para as propriedades mecânicas associadas à fratura de materiais frágeis.

Labuz, Shah e Dowding (1985) discutem a zona de comportamento inelástico em materiais frágeis, chamada de zona de processamento de fratura (ZPF), definida por Bažant (1984), análoga à zona de plastificação na ponta do entalhe em materiais dúcteis. Esta adaptação depende da manutenção de um estado plano de deformações (EPD), conforme descrito na mecânica da fratura linear elástica. A propagação de trincas em rochas é caracterizada pela formação de microtrincas e intertravamento na região da ZPF, que se situa na frente da trinca ou entalhe, onde as deformações não atingiram um valor crítico.

Labuz, Shah e Dowding (1985) apresentam estes conceitos em um experimento de análise do crescimento de trincas em um granito do tipo Charcoal. Inicialmente são avaliadas as dimensões do corpo de prova. De forma estimar a limitação do crescimento da zona plástica à frente da trinca, foi utilizada a Equação 2.51 para avaliar as dimensões ideais da trinca para o granito.

$$a \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (2.51)$$

onde:

K_I fator de intensificador, modo I de abertura de trinca

σ_t resistência à tração

a profundidade da trinca

Cabe esclarecer que enquanto para materiais dúcteis esta mesma equação leva em conta o limite elástico, fixando a tensão com o referencial no escoamento (σ_{esc}), para materiais frágeis a referência é a tensão de ruptura, portanto utiliza-se σ_t . O comprimento da zona plástica (r_{IY}) pode ser calculado pela Equação 2.52 (IRWIN, 1960) ou pela Equação 2.53 (DUGDALE, 1960).

$$r_{IY} = \frac{1}{3 \cdot \pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \cong 0,11 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (2.52)$$

$$r_Y = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \cong 0,39 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (2.53)$$

onde:

K_{IC} tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca

σ_t resistência à tração

r_{IY} comprimento da zona plástica

r_Y comprimento da zona plástica

Entretanto, quando a zona plástica é dada por r_Y , a região não linear sob condições de deformação plana é ampliada por $3 \cdot \sigma_t$, aproximando do resultado apresentado por Irwin (1960).

A tensão de fechamento de trinca (σ_x), segundo Barenblatt (1962), é estimada como igual à tensão de escoamento (σ_{esc}), aplicada na ponta da trinca. O autor considerou então a zona da faixa de escoamento como parte do tamanho da trinca, como apresentado na Figura 2.14.

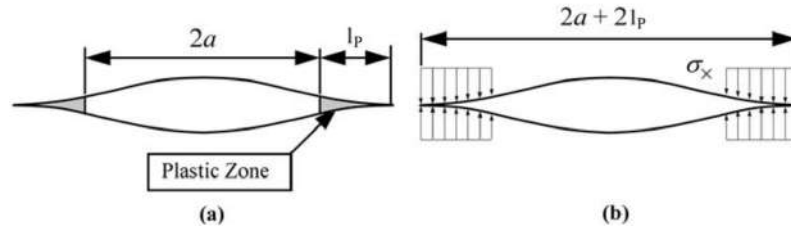


Figura 2.14 – Modelo de Escoamento na ponta da trinca segundo Barenblatt (1962) (Fonte: adaptado de Anderson (2008))

Sendo assim, considerando a trinca com um comprimento $2a$, e a zona de escoamento (neste caso processamento) com comprimento ρ , em uma placa infinita no estado plano de tensões, ativada por uma tensão trativa uniforme ($\sigma_{YS} = \sigma_x$), pode-se considerar que o tamanho efetivo da trinca (a_{ef}) seja conforme a Equação 2.54.

$$a_{ef} = a + l_p \quad (2.54)$$

onde:

- a_{ef} tamanho efetivo da trinca
- a profundidade da trinca
- l_p tamanho da zona de processamento

O fator intensificador devido à tensão aplicada torna-se (Equação 2.55)

$$K_\sigma = \sigma \sqrt{\pi \cdot a_{ef}} \quad (2.55)$$

onde:

- K_σ FIT devido a tensão
- σ tensão
- a_{ef} tamanho efetivo da trinca

Adaptando a formulação de Barenblatt (1962), o fator intensificador devido ao comprimento da zona de processamento se torna (Equação 2.56)

$$K_{l_p} = \frac{-2\sqrt{a_{ef}}}{\sqrt{\pi}} \sigma_t \int_{a_{ef}-l_p}^{a_{ef}} \frac{x - (a_{ef} - l_p)}{l_p \sqrt{(a_{ef})^2 - x^2}} dx \quad (2.56)$$

onde:

- K_{σ} FIT devido a tensão
- σ tensão
- a_{ef} tamanho efetivo da trinca
- x distância da ponta da trinca

Para eliminar a singularidade à frente da ponta do trinca (Equação 2.57)

$$K_{\sigma} + K_{l_p} = 0 \quad (2.57)$$

onde:

- K_{σ} FIT devido a tensão
- K_{l_p} FIT devido à zona de processamento

Após dedução, tornou-se possível calcular l_p (Equação 2.58)

$$l_p = \frac{9\pi}{32} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \cong 0,88 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (2.58)$$

onde:

- K_{IC} tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca
- σ_t resistência à tração
- l_p tamanho da zona de processamento

Este modelo foi aplicado para estimar o crescimento de trinca em compósitos de cimento, assumindo que existe uma singularidade (trinca com ρ tendendo a zero).

Foram realizados ensaios de tração em placas de granito, no formato *double-edge-notched plate* (DEN), controlados por deslocamento, instrumentados com *clip gage* (CG) e *linear-variable differential transformer* (LVDT).

Dado este desenvolvimento e adaptação teóricos, foi possível estimar um tamanho efetivo da trinca (a_{ef}), composto pelo espaço livre do entalhe ou trinca, mais uma região não linear afetada por processos de fechamento de trinca. Nesta região em frente a trinca, caracterizada por micro-trincas e inter-trancamento, foi chamada de zona de processamento de fratura (ZPF).

Foram utilizados dois *clip gage* (CG) para controlar o carregamento durante o ensaio e dois LVDT para monitorar o comportamento do corpo após o pico de carga máxima. Este comportamento foi utilizado para compreender a tensão de fechamento do corpo após a quebra.

A partir dos trabalhos de Dugdale (1960) e Barenblatt (1962), foi possível calcular o comprimento da ZPF, prevista para rochas como aproximadamente o dobro da zona plástica para metais.

Com base nos dados obtidos foi estimado que o tamanho da ZPF deveria acompanhar o tamanho do grão do material.

Como resultados dos trabalhos anteriores foi possível melhorar a sensibilidade dos modelos pelo reconhecimento do tamanho da zona de processamento (l_p) e pelo cálculo do tamanho efetivo da trinca (a_{ef}).

Sun e Ouchterlony (1986) investigam a aproximação indireta de Tenacidade à Fratura através da determinação de tenacidade à fratura aproximada sem pré-trinca (K_m) e tenacidade à fratura aparente (K_{Qm}). Os autores realizaram os testes sem criar a pré-trinca de fadiga, utilizando como referência P_{max} e a_0 como parâmetros para obter K_m .

O granito Stripa foi avaliado em ensaios de *crack mouth opening displacement* (CMOD), em flexão em três pontos, no formato de barras cilíndricas, utilizando um *clip gauge* para monitorar a abertura da trinca e controlar a aplicação da força, em uma velocidade de $0,06 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Em um segundo procedimento, CPs receberam pré-trinca em um único ciclo de carga controlada pelo *clip gauge*, que descarregou os corpos de prova detectar um desvio secante de 5% da inclinação do regime linear. Foram obtidos neste ponto a força aplicada (F_{Qi}), além do deslocamento (δ_{Qi}) associado. Um *clip gage* comandou o ensaio e descarregou o CP antes da quebra ao atingir este patamar. Estes ensaios foram repetidos até o corpo falhar.

A técnica de estimativa do tamanho de trinca através do flexibilidade elástica (OUCHTERLONY; SUN, 1983) foi utilizada durante o teste. O eixo de deslocamentos é chamado de deslocamento no ponto de carga (DPC), do inglês *load point displacement* (LPD). O profundidade da trinca foi calculada em função dos valores de deslocamento obtidos pelo *clip gage* associados à flexibilidade elástica do primeiro ciclo, e usado em substituição nos ciclos subsequentes. O primeiro ciclo (pré-trinca) forneceu o módulo de elasticidade através da tangente da curva. Os próximos ciclos forneceram o entalhe equivalente ou efetivo utilizando valores estáveis da relação entre flexibilidade elástica e razão a/W .

A partir dos valores obtidos, foi observado que os valores de K_m foram constantes para um intervalo de a/W entre 0,2 – 0,4. Estes valores foram sempre inferiores a K_{Qm} , porque o K_m ignora as microtrincas formadas antes do crescimento formal da trinca.

Para lidar com o comportamento não linear e inelástico dos granitos foi usada a técnica de pré-trinca em um primeiro ciclo de carregamento anterior ao teste. Os autores consideraram que a espessura do ligamento dos corpos de prova ($W - a$) foi determinante para obter ensaios válidos, além de ter observações do tamanho dos entalhes (a).

Labuz, Shah e Dowding (1987) investigaram a existência da zona de processamento de fratura (ZPF) e seus efeitos no comportamento dos granitos Charcoal e Rockville. O tamanho de grãos médio foi entre 1 e 10 mm. Foram realizados testes em CPs nos formatos DEN e DCB com comprimento de 500 mm, largura de 200 mm e espessura de 40 mm. Foram utilizadas técnicas de avaliação por ultra-som e emissão acústica para avaliar a região inelástica.

O tamanho da trinca descarregada medido pelo ultra-som foi compatível com o tamanho

da trinca observado.

Através de ultra-som foi detectado um aumento de três vezes na área onde uma trinca aberta se fechou parcialmente. O fim da zona de dano foi detectado pela atenuação do sinal, comparado com o sinal anterior ao carregamento, totalizando um comprimento da zona inelástica no granito Charcoal de aproximadamente 40 mm, e de 90 mm no granito Rockville.

Foi possível detectar o tamanho efetivo da trinca (a_{ef}) composta pela ZPF com a macro trinca. Este a_{ef} foi utilizada para criação de uma curva de resistência (curva-R), contabilizando a energia do processo.

Um modelo de propagação de trinca foi criado, consistente com as medidas da região inelástica, descrevendo os efeitos da ZPF. A maior parte do sinal registrado veio da região fraturada.

Os autores consideraram que a energia liberada durante a fratura foi devida a cristais ininterruptos e entrelaçados dentro da macro trinca, o que pode ser confirmado através de microscopia.

Segundo os autores, quando o tamanho da ZPF for maior que alguns por cento do tamanho da trinca, é possível usar a a_{ef} para estimar tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca.

Segundo Chong, Li e Einstein (1989) os valores de tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca obtidos através dos modelos da mecânica da fratura linear elástica são subestimados, penalizando as propriedades dos materiais. Nos casos mais específicos de rochas e granitos, estes valores normalmente não concordam com observações fora do laboratório, ou seja, com os fenômenos observados *in situ*.

Os autores apresentaram como alternativa a técnica *tension-softening* adaptada para trabalhar com a integral J. Esta técnica representa a perda de resistência do material em função do deslocamento da ponta da trinca, conforme apresentado na Figura 2.15.

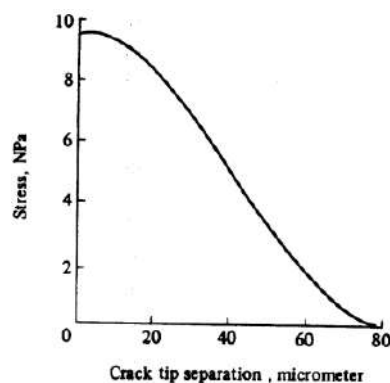


Figura 2.15 – Gráfico de Suavização da Resistência. Fonte: Chong, Li e Einstein (1989).

Os autores testaram em argamassa de concreto, pelo material ser semifrágil e não apresentar escoamento plástico. Foram executados ensaios de flexão em quatro pontos e de *compact*

type instrumentado com clip gages.

Seguindo a metodologia descrita por Li, Chan e Leung (1987), foi utilizada a integral-J modificada conforme a Equação 2.59 para calcular os valores de tensão baseados na razão $\partial J(\delta)/\partial x$, combinada na Equação 2.60.

$$J = - \int_a^L \sigma(x) \frac{\partial \delta}{\partial x} dx, \quad (2.59)$$

$$\sigma(\delta) = \frac{1}{B(a_2 - a_1)} \frac{\partial Area(\Delta)}{\partial \delta}, \quad (2.60)$$

A integral J, que contabiliza originalmente a densidade da energia de deformação elástica, passou a contabilizar somente uma zona com deformação inelástica no plano à frente da ponta da trinca.

Como resultado, a metodologia permitiu produzir valores das propriedades mecânicas mais próximos dos encontrados na literatura, com um esforço de preparo menor, isento do efeito de tamanho que impactava o K_A .

Ouyang, Mobasher e Shah (1990) propõe uma adaptação da *curva - R* para materiais semi frágeis. Os autores esperam obter a equação da curva-R a partir do deslocamento crítico da ponta da trinca inicial (CTODc) e da tenacidade à fratura na ponta da trinca efetiva (K_{IC}^S).

Avaliando a curva-R, os autores identificam que taxa de liberação de energia de Griffith é a taxa de energia requerida para a propagação da trinca, que é uma função crescente e convexa para MSFs. Sendo assim, os valores da taxa de energia de propagação da trinca da curva-R encontram um valor crítico de resistência (R_c).

Shah e Wecharatana (1982) predisseram que o comportamento da curva-R deveria permanecer após o ponto de fratura. Os autores então transformam a curva-R em uma equação que prediz profundidade da trinca ao invés de variação de crescimento de trinca (Equações 2.61, 2.62, 2.63 e 2.64).

$$G_c = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \Delta a_c^{dn}, \quad (2.61)$$

$$R = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \Delta a_c^{dn}, \quad (2.62)$$

$$d_1 = \frac{\alpha - 1}{\alpha}, \quad (2.63)$$

$$R = \beta_1 (a - a_0)^{d_1}, \quad (2.64)$$

Para $n = 2$, G é aproximado pela expressão quadrática de comprimento da trinca:

$$d_{1,2} = \frac{1}{2} + \frac{\alpha - 1}{\alpha} \pm \left[\frac{1}{4} + \frac{\alpha - 1}{\alpha} - \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.65)$$

A partir de d_1 e d_2 foi possível calcular então a Função R (Equação 2.66),

$$R = \beta_1 (a - a_0)^{d_1} + \beta_2 (a - a_0)^{d_2}, \quad (2.66)$$

Limitando o problema para a condição de contorno $(dR/da_c) = 0$, a relação entre β_1 e β_2 se torna (Equação 2.67)

$$R = \beta \left[1 - \frac{d_2}{d_1} \left(\frac{\alpha a_0 - a_0}{a - a_0} \right)^{d_2 - d_1} \right] (a - a_0)^{d_2}, \quad (2.67)$$

Por simplificação é possível usar

$$R = \beta_2 (a - a_0)^{d_2}, \quad (2.68)$$

Os parâmetros α e β pode ser determinados usando K_{IC}^S e CTODc. Como o valor limite de R em a_c é dado por

$$a_c = \alpha \cdot a_0, \quad (2.69)$$

portanto, diretamente relacionado à K_{IC}^S ,

$$R_{IC}^S = \beta (\alpha a_0 - a_0)^d = \frac{(K_{IC}^S)^2}{E}, \quad (2.70)$$

logo

$$\beta = \frac{(K_{IC}^S)^2 (\alpha a_0 - a_0)^{-d}}{E}, \quad (2.71)$$

O valor de α é obtido a partir da equação do ensaio de CTODc.

Os autores conseguiram demonstrar que, baseado nos parâmetros α e β da curva-R adaptada, foi obtido dos ensaios de K_{IC}^S e CTODc. O comportamento das curvas curva de carregamento-CMOD e da curva de carga-deslocamento puderam ser estimados a partir da curva-R adaptada, usando raio na ponta do entalhe igual a taxa de liberação de energia de Griffith.

Bazant, Gettu e Kazemi (1991), autor da lei do efeito de tamanho, aplica o método do efeito de tamanho em rochas visando demonstrar que os conceitos são aplicáveis a materiais frágeis, com a formação de ZPF. O trabalho apresenta resultados para a energia de fratura, Tenacidade à Fratura, tamanho efetivo da trinca, zona de processamento de fratura, além de suportar a avaliação de parâmetros não lineares como a ponta do entalhe efetiva crítica e abertura

da trinca. As curvas de carga vs. deflexão são estimadas a partir da curva-R modificada para prever respostas não lineares, após o pico de carga.

A lei do efeito de tamanho

$$\sigma_N = c_n \cdot \frac{P_u}{b \cdot d}, \quad (2.72)$$

onde:

σ_N tensão nominal

c_n coeficiente arbitrário

P_u carregamento de falha

b profundidade do corpo de prova

d dimensão característica da estrutura ou espécime

Para materiais frágeis existe uma zona de processamento de fratura, que possui um tamanho considerável, na frente da trinca ou entalhe. Começa com tamanho zero e cresce sob carregamento, mas se mantém aderida à ponta do entalhe ou trinca.

Os autores consideram que se a estrutura pode ser considerada elástica, então os campos de tensão e o deslocamento que cercam a zona de processamento de fratura devem ser campos elásticos assintóticos. Estes campos são independentes da geometria do espécime, portanto a geometria da zona de processamento de fratura deve ser a mesma para qualquer geometria de espécime.

Gogotsi (2000) avalia a tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca de materiais cerâmicos através de ensaios de flexão com CPs *Single Edge V-Notched Beam* (SEVNB). Uma vantagem deste método foi a obtenção de dados de baixa dispersão. Os valores de K_{IC} foram compatíveis com os valores encontrados em ensaios SEPB. Outra vantagem do método é que o raio pequeno na ponta do entalhe em V provoca valores de K_{IC} mais próximos dos da literatura.

Neste trabalho foram testados Nitreto de Silício (Si_3N_4), Alumina (Al_2O_3) e zircônia (ZrO_2) através de ensaios de flexão de três e quatro pontos. Os corpos de prova foram produzidos no formato de barras retangulares ($3 \times 4 \times 45mm$), e os entalhes produzidos em dois estágios. No primeiro estágio foi utilizado um disco diamantado, com espessura de 0.8 a 1.8 mm. No segundo estágio foi feito um aprofundamento da trinca, no formato em V, com profundidades entre 0.1 e 0.2 mm, usando lâminas e pasta de diamante (Figura 2.16).

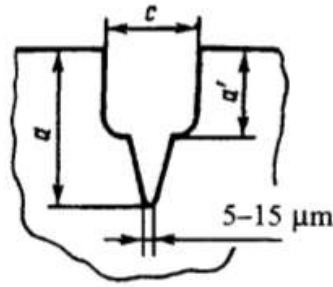


Figura 2.16 – Esquema do entalhe em V (GOGOTSI, 2000)

As equações utilizadas para os ensaios de três pontos foram:

$$K_{IC} = \frac{3P_{max}S_0}{2BW^{3/2}}\alpha^{0,5}g(\alpha), \quad (2.73)$$

onde

$$g(\alpha) = \frac{1,99 - \alpha(1 - \alpha)(2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)}{(1 - 2\alpha)(1 - \alpha)^{1,5}}, \quad \alpha = \frac{a}{W} = 0,45 - 0,55, \quad (2.74)$$

As equações para ensaios de quatro pontos:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{BW^{0,5}} \frac{S_0 - S_1}{W} \frac{3\alpha^{0,5}}{2(1 - \alpha)^{1,5}} y(\alpha), \quad (2.75)$$

onde

$$y(\alpha) = 1,9887 - 1,326\alpha - \frac{(3,49 - 0,68\alpha + 1,35\alpha^2)\alpha(1 - \alpha)}{(1 + \alpha)^2}, \quad \alpha = \frac{a}{W} = 0,2 - 0,3, \quad (2.76)$$

Nestes experimentos os autores encontraram que os valores de K_{IC} foram dependentes do raio na ponta do entalhe (ρ). Em valores menores de ρ , entre $6\ \mu\text{m} - 8\ \mu\text{m}$, os valores de K_{IC} permaneceram constantes, mesmo usando métodos IS, SEVNB e SEP. Os dados obtidos do nitrato de silício (Si_3N_4) apresentaram valores comparáveis à entalhes de aproximadamente $30\ \mu\text{m}$ apesar do seu entalhe ter $0,1\ \mu\text{m} - 0,2\ \mu\text{m}$. O mesmo aconteceu com as cerâmicas de nitrato de silício contendo 20% de fibras de SiC. Os resultados dos ensaios realizados em três e quatro pontos foram idênticos, no entanto as restrições no uso de flexão em três pontos (F3P) são maiores, exigindo um posicionamento do entalhe mais preciso na máquina de ensaios. Os ensaios de flexão em quatro pontos (F4P) normalmente ficam limitados por um tamanho mínimo de CP em função das estruturas das máquinas de ensaio. Os autores perceberam também o

fenômeno da oxidação nos cerâmicos como uma fonte de distorção e dispersão nos dados de K_{IC}

Lazzarin e Zambardi (2001) definem a relação entre a densidade de energia de deformação do volume da zona crítica (ZC) do material e seu uso para prever o comportamento em carregamento estático e em fadiga de entalhes em V afiados. Os autores citam que a energia do volume que cerca a ponta do entalhe controla o processo da falha. Esta energia distribuída pelo volume de raio R , é uma função precisa do fator intensificador de tensão de entalhe (FITE), e é dada para estado plano de tensões e estado plano de deformações, para materiais isotrópicos e lineares-elásticos. Desta forma os autores propõem um critério baseado no conceito de energia crítica para fratura contida em um volume finito do material que cerca a ponta de entalhes afiados em V.

Este método foi validado utilizando testes em acrílico e duralumínio, e o fator intensificador de tensão generalizado (FITG) foi usado para prever comportamento estático de componentes frágeis na ausência de singularidade. Segundo os autores, o critério conseguiu prever com precisão tanto o comportamento estático quanto dinâmico na presença dos entalhes estudados.

Filippi, Lazzarin e Tovo (2002) desenvolveram um modelo para aproximação do fator de intensificador, modo I de abertura de trinca, chamado de FIT generalizado para entalhes em U, descrito na Equação 2.77

$$K^U = \sigma_{max} \sqrt{\pi \frac{R}{4}} = K_{tn} \sigma_N \sqrt{\pi \frac{R}{4}}, \quad (2.77)$$

onde:

- K^U FIT generalizado para entalhes em U
- R raio do furo
- σ_{max} tensão máxima
- K_{tn} fator concentrador de tensão líquido (*net*)
- σ_n tensão baseada na área líquida (*net*)

Cabe observar na Equação 2.77 que o K_t utilizado precisa ser o K_{tn} em função da tensão baseada na área líquida (*net*) (σ_n) presente na Equação.

Tanaka et al. (2003) avaliaram a tenacidade à fratura em materiais frágeis, apresentando um método para encontrar valores de K_{IC} mais realísticos. Os autores observam que o comportamento do material não é influenciado por entalhes inferiores ao tamanho do defeito crítico do material, conforme Usami et al. (1986).

Uma perda da linearidade no regime elástico foi observada, conforme descrito por Godman (1989) (Figura 2.17).

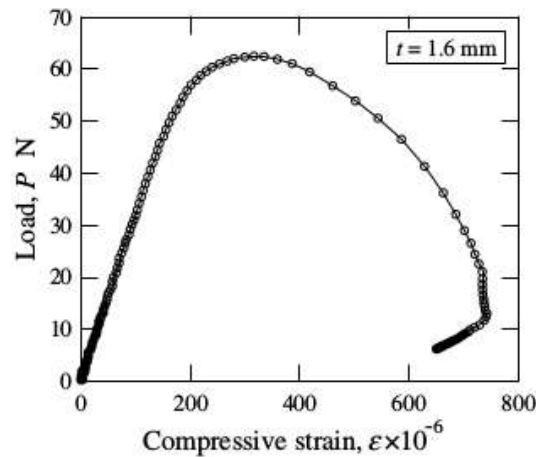


Figura 2.17 – Gráfico de Tensão x Deformação, utilizando strain gages, demonstrando comportamento não linear no final do regime elástico do material frágil (TANAKA et al., 2003)

O carboneto de silício utilizado pelo autor é uma cerâmica compacta de engenharia, e foi utilizados em função do tamanho de defeitos internos (TANAKA, 1983). Os corpos de prova foram confeccionados com as dimensões de $7 \times 5 \times 45$ mm. O tamanho de grão foi identificado em $100 \mu\text{m} - 150 \mu\text{m}$. Entalhes em V foram produzidos com profundidade do entalhe (t) de 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 e 2,8 mm, visando investigar a dominância do entalhe do processo de falha.

Entalhes de tamanho compatível com o defeito intrínseco produziram uma resistência a fratura constante, enquanto entalhes maiores produziram um fator intensificador de tensão (K_I) constante. O modelo do tamanho de defeito intrínseco (ICM) (TANAKA, 1983) foi proposto para prever o efeito do tamanho do defeito intrínseco na σ_f . Uma curva-R foi construída para analisar o efeito da profundidade do entalhe na resistência a fratura.

Outra vantagem da construção da curva-R foi corrigir a não linearidade no final do regime elástico, possibilitando estimar o tamanho da trinca efetiva a partir do *compliance* (λ) do material (Equação 2.78). Os valores de λ foram modelados matematicamente através do método de elementos finitos, produzindo uma relação (Figura 2.18) que possibilitou corrigir a porção não linear dos corpos de prova. Desta forma o tamanho da trinca efetiva foi estimado, e foram recalculados os valores de K_{IC} , obtendo assim valores mais precisos.

$$\lambda = \frac{\epsilon}{P}, \quad (2.78)$$

onde:

λ *compliance*

ϵ deformação

P carga aplicada

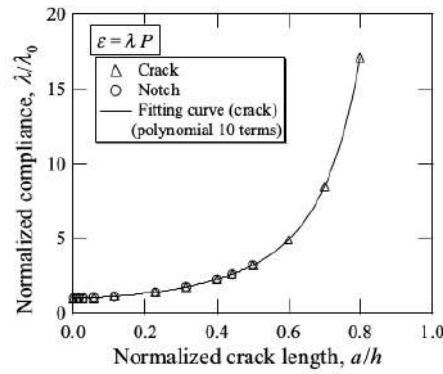


Figura 2.18 – Relação entre o variação de crescimento de trinca (Δa) e a *compliance* (λ) adimensionalizados. Fonte: Tanaka et al. (2003).

O material analisado foi o carbetto de silício ($\alpha - SiC$), usinado a partir de tubulações de filtros. O poro médio foi de $40 \mu m$ e a porosidade foi de 37%. O tamanho médio de grão foi de $100 \mu m - 150 \mu m$. Os corpos de prova tinham seção reta retangular de $7 \times 5 mm^2$ e um comprimento de 45 mm, ensaiados em flexão em quatro pontos. Os CPs receberam entalhes nas profundidades: 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 e 2,8 mm.

A tensão nominal no corpo (σ_{nom}) foi calculada pela Equação 3.6, com avanço constante de 0,1 mm/min. A deformação (ϵ) foi medida através de *strain gage* (SG) posicionados na parte superior do CP, entre os roletes aplicadores de força da máquina de ensaios. O fator intensificador de tensão (K) foi calculado pelas Equações 2.79 e 2.80.

$$K = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} \cdot F(a/h) , \tag{2.79}$$

onde:

- K fator intensificador de tensão
- σ_{nom} tensão nominal no corpo
- a profundidade da trinca
- $F(a/h)$ fator de ajuste de geometria
- h altura do corpo de prova

$$F(a/h) = \sqrt{\frac{2h}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2h}\right)} \cdot \frac{0,923 + 0,199 \left(1 - \sin\left(\frac{\pi a}{2h}\right)\right)^4}{\cos\left(\frac{\pi a}{2h}\right)} , \tag{2.80}$$

Para cada profundidade foram confeccionados lotes de cinco CPs.

Os autores perceberam um desvio da linearidade do material no final do regime elástico, conforme apresentado na Figura 2.17, e após o ponto de carga máxima aplicada não ocorre uma queda imediata da resistência do material, mas sim uma diminuição progressiva.

O final da curva, com a diminuição de deformação se deu porque os CPs não foram quebrados até a separação. A máquina de ensaios foi programada para interromper o ensaio,

liberando o carregamento, quando obtivesse uma leitura de carregamento inferior a 10 % (aproximadamente 6 N) da carga máxima (P_{MAX}) observada durante o ensaio, aproximadamente 60 N, causando assim o relaxamento da deformação no corpo e no *strain gage*.

Segundo o autor, os valores de K_{MAX} obtidos a partir do profundidade inicial do entalhe (a_0) segundo a Equação 2.79 são apenas formais e inferiores ao K_I real do material, que poderia ser obtido em P_{MAX} .

Os valores de tensão no início da extensão da trinca (σ_{IN}) e tenacidade à fratura na iniciação da trinca (K_{IN}) são obtidos no ponto onde ocorre o início do crescimento da trinca, descrito pela não linearidade, e marcando o final do regime elástico.

Quanto menores os valores de a_0 , maiores os valores de σ_{IN} e σ_{max} suportados pelo CP. A K_{MAX} (formal) diminui em a_0 pequenos, enquanto K_{IN} permanece constante.

A falha em CP com a_0 de aproximadamente 0,2 mm ocorreu fora do entalhe, e os valores de σ_{max} permaneceram constantes. Em a_0 superiores a trinca se iniciou nos entalhes e apresentou valores de σ_{IN} e σ_{max} menores e decrescentes, inversamente proporcionais ao aumento de a_0 .

O autor assumiu que a não linearidade na curva P- ϵ ocorreu em função do início de uma trinca a partir do entalhe. Os valores de λ são afetados pelo início e pelo crescimento da trinca, sendo assim foi possível perceber quando a trinca começou a se desenvolver, e consequentemente deduzir o tamanho da trinca em função da variação de λ .

O método de elementos finitos (MEF) foi utilizado para calcular os valores de deslocamento da abertura da boca da trinca (CMOD), para calcular λ . De posse dos valores de λ foi possível estimar o valor da profundidade do entalhe (t), recalculando os valores da extensão da trinca (Δa) e consequentemente o K_I .

A partir dos dados do MEF foi desenvolvida uma Equação adimensional para modelar o comportamento entre flexibilidade elástica (*compliance*) adimensional (λ_{ad}) e comprimento adimensional da trinca (a/h) (Equação 2.81)

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) = 1,0000 + 0,16016 \left(\frac{a}{h}\right) + 2,3452 \left(\frac{a}{h}\right)^2 + 147,61 \left(\frac{a}{h}\right)^3 - 1916 \left(\frac{a}{h}\right)^4 + 12907 \left(\frac{a}{h}\right)^5 - 49299 \left(\frac{a}{h}\right)^6 + 1,0767 \times 10^5 \left(\frac{a}{h}\right)^7 - 1,2495 \times 10^5 \left(\frac{a}{h}\right)^8 + 59765 \left(\frac{a}{h}\right)^9, \quad (2.81)$$

Esta Equação permitiu estimar valores de λ_{ad} em função do a/h obtido no MEF. A inversão desta Equação permitiu calcular o mesmo fenômeno, porém estimando o a_{ef} em função do λ_{ad} .

Como resultados os autores puderam afirmar que a extensão da trinca (Δa) começou em um mesmo valor de fator de intensificação de tensão estimado por *compliance* (K_R) em

todos os CPs, chamado de K_{IN} , e que o valor máximo (K_{MAX}) de dependeu dos valores de profundidade do entalhe.

Conforme apresentado pelos autores foi possível construir uma curva de resistência a partir da mudança no *compliance*, que se mostrou independente da profundidade do entalhe. O método de elementos finitos foi utilizado com sucesso para estimar o *compliance*, profundidade do entalhe e K_c dos CPs, possibilitando prever o σ_{max} .

Utilizando o modelo do tamanho de defeito intrínseco foi possível prever a iniciação das trincas e a instabilidade dos entalhes.

A relação entre a tensão normal máxima e profundidade do entalhe foi dividida em três regiões: não fraturada, trinca iniciada, e fratura.

Fett (2005) demonstra matemática e experimentalmente a dependência do comprimento da trinca (ℓ), do raio na ponta do entalhe (R) e da existência de um comportamento na curva-R relevantes para o cálculo da tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca.

Os autores consideraram incorreto o cálculo do fator intensificador de tensão aparente (K^*), conforme exposto nas Equações 2.82 e 2.83 e apresentado na Figura 2.19.

$$a = a_0 + \ell, \quad (2.82)$$

$$K^* = \sigma_{bend} \sqrt{\pi a} \cdot F_{bend} \left(\frac{a}{W} \right), \quad (2.83)$$

onde:

a	profundidade da trinca
a_0	profundidade inicial do entalhe
ℓ	comprimento da trinca
K^*	fator intensificador de tensão aparente
σ_{bend}	tensão em flexão
$F_{bend}(a/W)$	função de geometria para uma trinca de canto
W	largura do corpo de prova

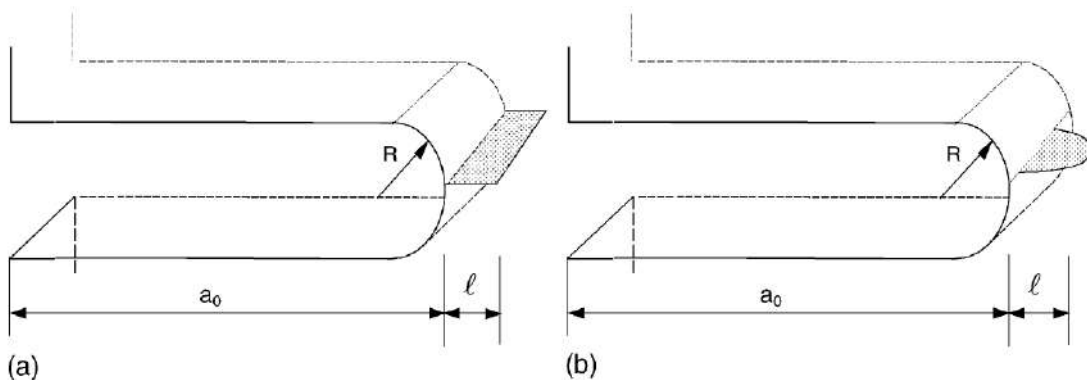


Figura 2.19 – Esquema de entalhe (a_0) + trinca (ℓ) (Adaptado de Fett (2005))

Segundo os autores, o K^* (Equação 2.82) só é válido quando comprimento da trinca (ℓ) é claramente maior que raio na ponta do entalhe (R). Na primeira fase de extensão da trinca, i.e., no primeiro ensaio ou pré-carga, a Equação 2.83 não representa a verdade.

Quando o tamanho da trinca não pode ser identificado na superfície fraturada, deve-se considerar a Equação 2.84

$$\hat{K} = \sigma_{bend,max} \sqrt{\pi a_0} \cdot F_{bend} \left(\frac{a_0}{W} \right), \quad (2.84)$$

onde:

a_0	profundidade inicial do entalhe
\hat{K}	fator intensificador de tensão estimado
$\sigma_{bend,max}$	tensão máxima em flexão
$F_{bend}(a_0/W)$	função de geometria para a trinca de canto inicial
W	largura do corpo de prova

O autor pretende demonstrar a relevância da curva-R para descrever esta diferença e capturar os valores reais de resistência. Neste estudo foi demonstrado o efeito do raio na ponta do entalhe para a estimativa da K_C . Os autores demonstraram que um entalhe com uma pequena trinca no fundo se comporta como uma trinca de tamanho total equivalente.

Gómez, Guinea e Elices (2006) propõe um critério para prever a carga máxima aplicada e estimar a K_{IC} de materiais frágeis e semi frágeis, usando entalhes em U não singulares, tendo como base a Teoria da Distância Crítica. Os autores verificam que sete diferentes critérios podem ser generalizados em uma expressão básica, e fazem uma avaliação experimental para este critério. Os experimentos focaram em um único material com entalhes no formato U, com diferentes raio na ponta do entalhe. Foram realizados ensaios de flexão em três pontos. Os autores calcularam o FIT generalizado para entalhes em U (K^U) em função da tensão normal máxima (σ_{max}). Como resultado os autores apresentam a Equação 2.85

$$K^U = K_{tn} \cdot \sigma_N \sqrt{\pi \frac{\rho}{4}}, \quad (2.85)$$

onde:

K^U	FIT generalizado para entalhes em U
K_{tn}	fator concentrador de tensão líquido (<i>net</i>)
σ_N	tensão nominal
ρ	raio na ponta do entalhe

Os autores revisaram a aplicação de diversos critérios e chegaram a conclusão que este critério simplifica e generaliza os conceitos aplicados nos sete critérios investigados. Os materiais experimentados durante sua pesquisa também obtiveram resultados dentro dos valores

aceitáveis, porém sendo ainda necessária uma validação formal em um estudo mais profundo para entalhes em U, com maior variedade de raio na ponta do entalhe.

Gómez, Guinea e Elices (2006) propõem um critério simples para prever a P_{rup} para materiais frágeis e materiais semi frágeis (MSF), a partir de entalhe em U não singulares (E-Uns).

Cabe esclarecer que entalhe em U são considerados não singulares ou cegos, i.e. o raio na ponta do entalhe não tende a zero. Sendo assim, a MFLE tradicional não tem sua aplicação garantida, pois os cálculos do FIT se baseiam no ρ afiados ou tendendo a zero.

De forma complementar, o critério de falha baseado em σ_{rup} , estabelece que a fratura inicia quando a σ atinge seu valor crítico, somente é válido quando ρ é grande o suficiente.

O critério proposto pelos autores se destina a estimar o carregamento de fratura para entalhes arredondados no formato U em componentes cerâmicos, onde a MFLE não for aplicável, i.e. na ausência de singularidade, e é baseado no fator intensificador de tensão generalizado (FITG).

Os autores revisaram critérios para K_{IC} a partir de E-Uns. Leguillon e Yosibash (2003) avaliaram vários critérios de falhar para entalhes arredondados afiados. Taylor, Cornetti e Pugno (2005) critério de mecânica da fratura finita e o critério da distância local para entalhes. Lazzarin e Zambardi (2001) e Lazzarin e Berto (2005) criaram um modelo para prever a carga máxima de um entalhe em U com o critério da densidade de energia de deformação média.

Foi observado que o modo I de carregamento a tensão máxima principal no fundo do entalhe (σ_m), está relacionada com o FIT generalizado para entalhes em V (K^V), definido por Filippi, Lazzarin e Tovo (2002). Os autores adaptaram esta ideia para um FIT generalizado para entalhes em U (K^U), segundo a equação

$$K_C^U = K_{tn} \cdot \sigma_N \sqrt{\pi \frac{R}{4}}, \quad (2.86)$$

onde:

K_C^U FIT generalizado crítico para entalhes em U

K_{tn} fator concentrador de tensão líquido (*net*)

σ_N tensão nominal

R raio na ponta do entalhe

Inicialmente os autores selecionaram trabalhos na literatura e obtiveram valores de K^U e R para entalhe em U. Estes valores foram relativizados por K_{IC} e ℓ_{ch} e analisados (Figura 2.20).

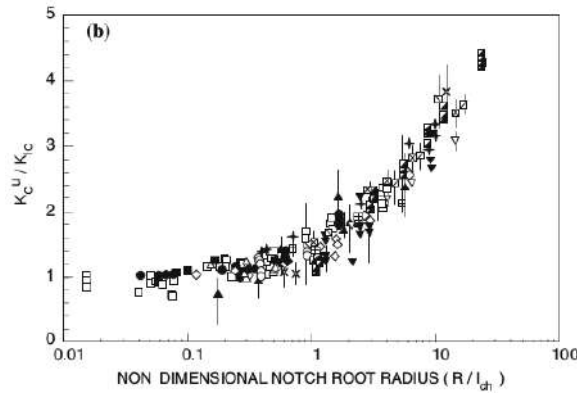


Figura 2.20 – Fator intensificador de tensão generalizado crítico adimensional como função de raio no fundo do entalhe adimensionalizado (indicados os valores médios e variação) (Adaptado de Gómez, Guinea e Elices (2006)).

No gráfico observou-se que o fator K_C^U / K_{IC} tendeu a 1, indicando que a formulação de K_C^U apresenta boa convergência para K_{IC} , sendo portanto um bom estimador do mesmo.

Foi portanto modelada a razão de relacionamento entre K_C^U e K_{IC} , conforme Equação 2.87

$$\frac{K_C^U}{K_{IC}} = \sqrt{1 + \frac{\pi R}{4 l_{ch}}}, \quad (2.87)$$

Atem de Carvalho (forthcoming 2018b) trata esta Equação, tornando-a mais objetiva para estimar K_I a partir de valores de K^U , resultando na Equação 2.88

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{4 \cdot K_C^U - \pi \cdot \rho \cdot \sigma_u^2}{4}}, \quad (2.88)$$

Bazant e Yu (2009) fazem uma revisão sobre ZPF e definem um modelo geral para sua lei do efeito de tamanho. Segundo Bazant, existem dois tipos básicos de efeito de tamanho.

O efeito tipo I é chamado de energético-estatístico, desenvolvido por Weibull (1939), ocorre em estruturas que falham na iniciação da trinca, em superfície lisa. O efeito tipo II, chamado de energético-determinístico, ocorre em estruturas com entalhes profundos ou componentes fadigados.

Susmel e Taylor (2010) citam que diversos autores discutem a dificuldade de prever o comportamento tensão-deformação em materiais frágeis, e sua resistência é associada às características de sua população de defeitos.

Na condição de deformação plana a Equação 2.89 (BERTO; BARATI, 2011) possibilita estimar a zona de processamento R_c , como esquematizado na Figura 2.21.

$$R_c = \frac{(1 + \nu)(5 - 8\nu)}{4\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right), \quad (2.89)$$

onde:

- R_c área da zona de processamento
- ν coeficiente de Poisson
- K_{IC} tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca
- σ_t resistência à tração

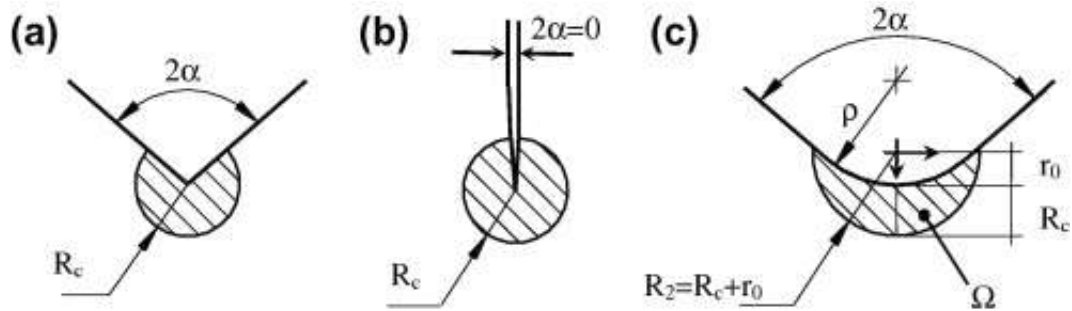


Figura 2.21 – Área da zona de processamento (R_c) - Adaptado de (BERTO; BARATI, 2011)

Para entalhes em V a distância acima do fundo do entalhe (r_0), que marca o centro da zona de processamento de fratura pode ser calculada pela Equação 2.90 de Berto e Barati (2011)

$$r_0 = \rho \times \left(\frac{\pi - 2\alpha}{2\pi - 2\alpha} \right), \quad (2.90)$$

onde:

- r_0 distância acima do fundo do entalhe
- ρ raio na ponta do entalhe
- α ângulo de abertura do entalhe em V

Para entalhes em U, r_0 segue a Equação 2.91.

$$r_0 = \frac{\rho}{2}, \quad (2.91)$$

Berto, Lazzarin e Marangon (2012) investigam o modo de falha sob carregamento misto (I e II), em materiais frágeis com entalhes em U. Os ensaios foram realizados em grafite isoestático, com variações de raio na ponta do entalhe (ρ) e variações do modo de carregamento (I e II). Ele apresenta um modelo para estimar o carregamento de falha em componentes de grafite sujeitos a carregamentos de modo misto. A média dos valores densidade de energia de deformação sobre o volume de controle é usada para estimar o carregamento de falha.

Foram testados corpos de prova no formato de placas com dimensões de 200 mm x 50 mm x 10 mm, com entalhes em formato de U. O material foi o grafite isostático com tamanho médio de grãos medindo 2 μ m, porosidade de 7%, tensão de fratura (σ_f) de 46 MPa, módulo

de elasticidade (E) de 8,05 GPa, tensão de flexão (σ_{flex}) foi de 49 MPa. Todos os testes foram controlados por carregamento usando uma célula de carga de 100 kN.

Os entalhes tiveram a mesma profundidade da trinca, valendo 10 mm, diferentes raio na ponta do entalhe (0.25, 0.5, 1, 2, 4 mm) e diferentes ângulos de entalhe (β).

Foi utilizada uma máquina de ensaios universais controlada por deslocamento de barra-mento, em uma velocidade de 0.05 mm/min. Em todos os ensaios a curva carga x deslocamento foram lineares, permitindo o uso de mecânica da fratura linear elástica. Os valores de carga máxima aplicada aumentaram com o aumento do raio na ponta do entalhe.

O comprimento crítico foi calculado pela Equação 2.92 (YOSIBASH; BUSSIBA; GILAD, 2004), valendo aproximadamente 0,17 mm.

$$R_c = \frac{(1 + \nu)(5 - 8\nu)}{4\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_t} \right), \quad (2.92)$$

onde:

- R_c área da zona de processamento
- ν coeficiente de Poisson
- K_{Ic} tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca
- σ_t resistência à tração

Segundo o critério de densidade de energia de deformação (SED) a falha frágil ocorre quando a densidade de energia de deformação sobre um dado volume de controle é igual ao seu valor crítico W_c , calculado pela Equação 2.93 de Beltrami (1885). Este valor crítico varia de material em material e não depende do formato.

$$W_c = \frac{\sigma_t^2}{2 \cdot E}, \quad (2.93)$$

onde:

- W_c energia de deformação crítica
- σ_t resistência à tração
- E módulo de elasticidade

O valor de W foi considerado constante para todos os corpos de prova, valendo W_c , valendo 0,13 MJ/m³.

Para estimar o valor de carga de fratura teórico o autor usa a Equação 2.94

$$\frac{P_{th}}{P} = \sqrt{\frac{W_c}{W}}, \quad (2.94)$$

onde:

- P_{th} carga teórica estimada
 P carga aplicada
 W_c energia de deformação crítica
 W largura do corpo de prova

Pluinage e Capelle (2014) propõe uma nova expressão analítica para estimar o fator intensificador de tensão (FIT) no modo de falha I, apresentando um bom ajuste para trincas pequenas com relação ao tamanho do entalhe. A vantagem desta equação é que leva em consideração as características do entalhe, como seu ângulo de curvatura, não somente a trinca. A estimativa se baseia também na profundidade e no raio de curvatura do fundo do entalhe. A técnica envolve o uso do método de elementos finitos e do processamento utilizando o algoritmo previsto por (WAWRZYNEK, 1991).

O cálculo do parâmetro envolve produzir modelos com seis diferentes ângulos, diferentes profundidades de entalhe e comprimentos de trinca, utilizando elementos de malha quadrados de oito pontos e triangulares de seis pontos para descrever a trinca. O fator intensificador de tensão foi estimado a partir dos tamanhos de trinca adimensionalizados obtidos a usando MEF.

Schindler, Kalkhof e Viehrig (2014) investigam a tenacidade à fratura efetiva devida ao entalhe (K_{cN}) obtida a partir de entalhes em comparação com a tenacidade a fratura obtida por trincas produzidas por fadiga, conforme proposto na literatura. Os autores consideram que apesar de entalhes cegos normalmente promoverem o fator concentrador de tensão (K_t), dependendo do raio na ponta do entalhe (ρ), os entalhes suficientemente afiados ($\rho \ll a_0$) podem atuar como fator intensificador de tensão (FIT), diminuindo a resistência à iniciação de trincas. Esta relação entre trincas e entalhes é estudada para materiais frágeis, dúcteis e durante a transição dúctil-frágil.

Os modelos existentes de tenacidade à fratura são avaliados para entalhes afiados nos formatos U e V. A norma ASTM E1921 é avaliada e considerada não aplicável para entalhes cegos. Para materiais frágeis, ou em transição para frágeis, foi considerado que a fratura é governada pela taxa de liberação de energia crítica de Griffith (G_c). Além disso, se o raio na ponta do entalhe (ρ) for maior que um valor limite dependente do material, então ρ teria efeito somente sobre σ_{rup} , mas não sobre a tenacidade a fratura (K_{IC}).

Cicero et al. (2014) realizou experimentos com granitos para avaliar a eficiência do método da linha (ML), o efeito do raio na ponta do entalhe para predizer a tenacidade a fratura aparente (K^N), utilizando a TDC. Foram compilados 555 testes de fratura e tratados pelo ML que conseguiu predizer a K_{IC} dos materiais avaliados, considerando o ρ dos entalhes.

Cicero, Madrazo e Garcia (2015) avaliaram a aplicabilidade da TDC para corpos de prova preparados com entalhe em U utilizado o método da linha (ML) e o diagrama de avaliação de falha (DAF). Neste diagrama são apresentados os modos de falha frágil, segundo a MFLE, dúctil segundo MFEP e por limite de resistência a tensão.

Justo et al. (2017) estuda a aplicação da TDC em 4 granitos e mármore: granito Flo-

resta sandstone, granito Moleano limestone, mármore Macael, e o mármore Italiano. Os autores realizam ensaios de flexão em quatro pontos em CPs de dimensões 180; 30 e 30 mm (comprimento, espessura, profundidade). Foram confeccionados 9 lotes de 6 CPs com raio na ponta do entalhe (ρ) de 0,15; 0,5; 1; 2; 4; 7; 10 e 15 mm. Todos os entalhes foram produzidos visando atingir uma profundidade inicial do entalhe (a_0) de $\approx 50\%$, ou seja 15 mm. Utilizando a TDC foi possível definir quais valores de ρ podem usados para calcular K_{IC} .

Friaes (2016) estudou um método exploratório e quantitativo para avaliar tamanhos de lotes confiáveis para um dado coeficiente de variação. Neste trabalho o autor assumiu que um dado fenômeno pode apresentar, seja em literatura ou em experimentação direta, um coeficiente de variação (c.v.) peculiar. Além disso, a cada finalidade desejada, seja pesquisa científica, seja projeto de engenharia, tem-se um alvo de significância estatística (α) característica. Sendo assim, o par c.v. e $1 - \alpha$ foram utilizados para estimar um tamanho do lote (n) mínimo representativo. Por exemplo, para um α de 0,5 e um c.v. de 15% o lote mínimo estimado por esta técnica seria de 21 amostras, conforme pode ser verificado no Anexo C.1.

3 Materiais e Métodos

Neste trabalho foi proposto um processo para obtenção de valores mais precisos de K_{IC} , e este segue o seguinte roteiro, conforme o modelo apresentado na Figura 3.1.

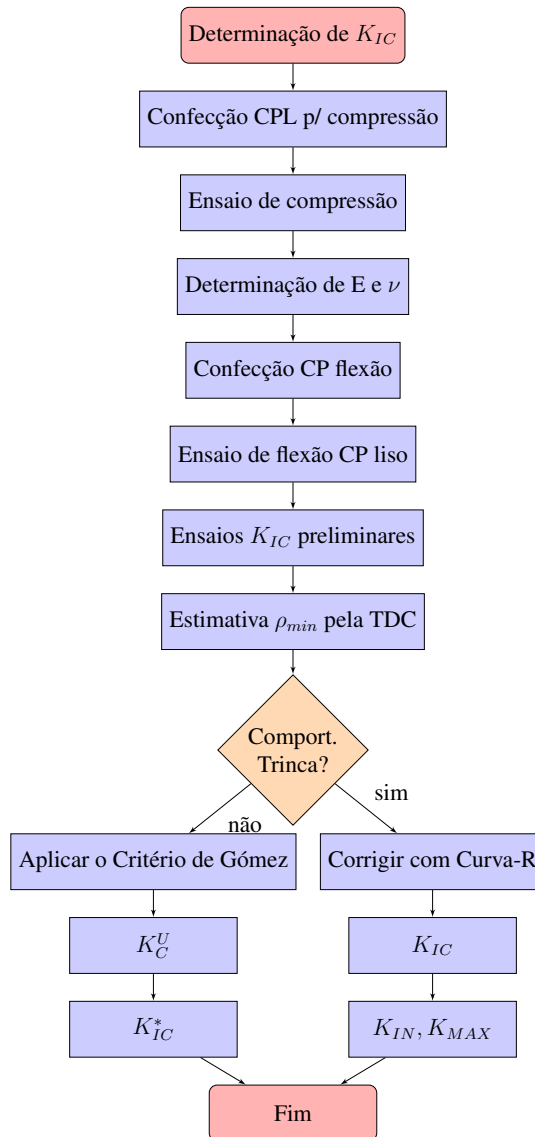


Figura 3.1 – Metodologia para determinação de K_{IC} desta Tese.

O método aqui citado como Critério de Gómez é uma adaptação de Gómez, Guinea e Elices (2006), conforme apresentado na subseção 3.3.17.

O método citado como Curva-R consiste em estimar o efeito causado pela formação da zona de processamento de fratura (ZPF) visando calcular o fator de intensificador, modo I de abertura de trinca em função do tamanho efetivo da trinca (a_{ef}), e é descrito na subseção 3.3.19.

3.1 Materiais

3.1.1 Granitos

Nesta pesquisa optou-se por utilizar como material a ser investigado um granito conhecido vulgarmente como Granito Cinza Andorinha (GCA) (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Placa de Granito Cinza Andorinha.

Segundo Nogami (2013) este granito é caracterizado petrograficamente como um monzogranito, que é considerado o produto de fracionamento final do magma (Figura 3.3). É portanto uma rocha granítica de coloração cinza-clara, com comportamento isotrópico, equigranular, hipidiomórfica, de granulação média a média/fina, oscilando entre 0,5 mm – 5,0 mm, populado por cristais com dimensões entre 1,0 mm – 2,0 mm.

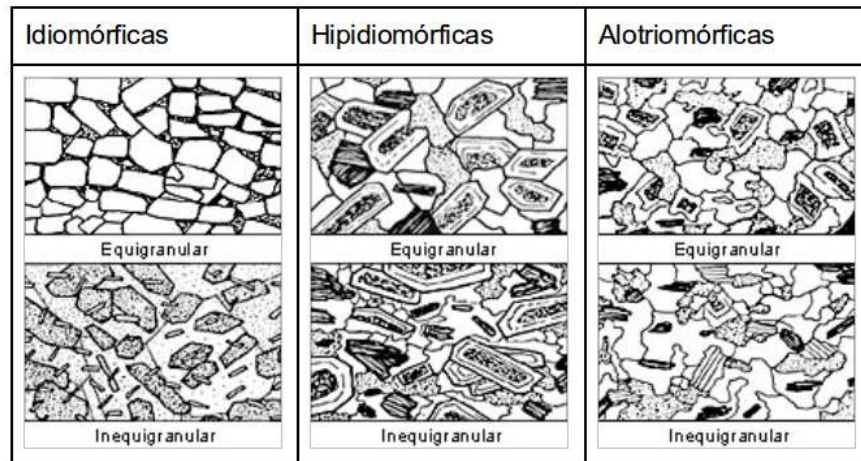


Figura 3.3 – Exemplos de características Petrográficas (NOGAMI, 2013).

Segundo Menegazzo (2001) o GCA é equigranular, e nele predomina o contato do tipo côncavo-convexo. Este granito apresenta microfissuramento moderado, ocorrendo predominantemente microfissuras intragrãos, que são normalmente preenchidas por sericita e carbonatos.

A escolha deste material trouxe como vantagem a facilidade de aquisição do material no comércio local, o baixo custo para o projeto, diminuindo também a complexidade original de fabricação dos CPs para determinação de K_{IC} .

3.1.2 Corpos de prova (CPs)

Os CPs foram adquiridos já cortados, obtidos de placas de granito de aproximadamente 2,60 m de largura por aproximadamente 1,80 m de altura, com duas faces lisas. O formato escolhido do corpo de prova para esta pesquisa é conhecido na literatura como Flexão com Entalhe em Única Face (SEN-B), e foi definido visando realizar ensaios de K_{IC} por flexão em quatro pontos, referentes ao objetivo da pesquisa. Os CPs especificados para ensaio de flexão seguiam o modelo da Figura 3.4. Os CPs foram cortados nas dimensões nominais de 30 mm de espessura, 30 mm de altura e 150 mm de comprimento. A Figura 3.4 ilustra a configuração geométrica e as dimensões do CP básico sem entalhes.

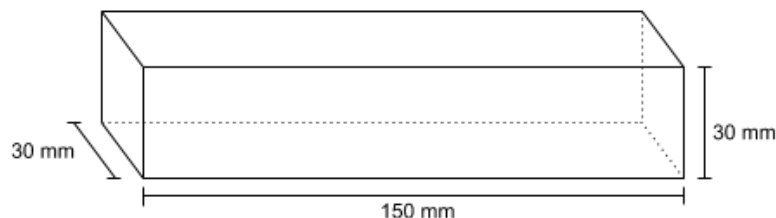


Figura 3.4 – Corpo de Prova para ensaio de flexão (Fonte: do autor).

Quatro discos de abrasão foram utilizadas com diferentes espessura do disco de abrasão (T), formando raio na ponta do entalhe (ρ) médios, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Cada um destes discos foram utilizadas para cortar três lotes de aproximadamente 25 corpos de prova. Cada lote recebeu entalhes nas profundidades de 30%, 40% e 50% da altura do CP padronizado (30 mm), configurando assim lotes com entalhes de aproximadamente 9; 12 e 15 mm. A espessura dos discos de corte (T) também é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Discos de abrasão utilizados nesta pesquisa

Ferramenta de corte	T (mm)	ρ_{tipico} (mm)
Minitom	0,3	0,14
Minitom	0,2	0,22
Makita	1,4	0,90
Makita	2,4	1,20
Disco Industrial	3,2	1,68

A norma ASTM-E399 (1990) propõe utilizar a Equação 3.1 como critério de validade para os corpos de prova no formato Flexão com Entalhe em Única Face (SEN-B).

$$B, a, (W - a) > 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{esc}} \right)^2, \quad (3.1)$$

onde:

- B profundidade do corpo de prova
- a profundidade da trinca
- W largura do corpo de prova
- K_Q estimativa inicial de tenacidade à fratura
- σ_{esc} tensão de escoamento

3.2 Equipamentos

3.2.1 Máquina de ensaios

A Máquina Universal de Ensaio Instron modelo 5582 (Figura 3.5), tem como característica uma alta rigidez estrutural.

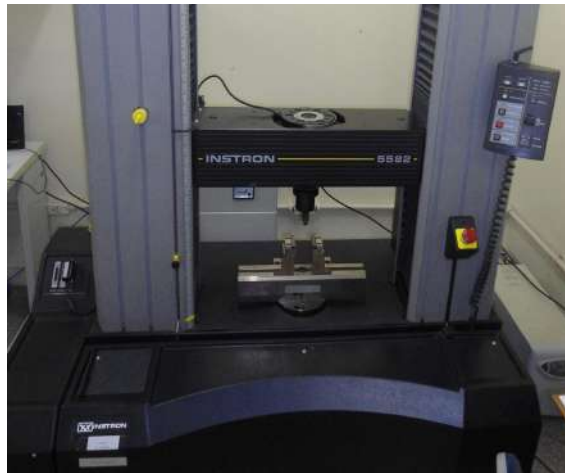


Figura 3.5 – Máquina Universal de Ensaios Instron modelo 5582 - LAMAV - UENF.

Sua operação pode ser manual ou remota a partir do programa BlueHill, versão 2. Nesta máquina foram realizados todos os ensaios de compressão e flexão, utilizando as seguintes configurações:

- célula de carga: 100 kN;
- controle por: deslocamento do barramento;
- velocidade: 0,1 mm/min (milímetro por minuto);
- gráfico gerados: um por ensaio e outro global, de todos os ensaios;
- arquivo no formato raw contendo: tempo e carga compressiva;
- calcular os estatísticos: mínimo, máximo, média, d.p. (desvio padrão) e c.v. (coeficiente de variação);
- dimensões nominais do corpo de prova de flexão:
 - espessura = 30 mm;
 - altura = 30 mm;
 - comprimento = 150 mm
- dimensões nominais do corpo de prova de compressão:
 - espessura = 30 mm;
 - altura = 150 mm;
 - comprimento = 60 mm
- critério de parada: limiar de 200 N e queda de 80 % do pico.

O software *Bluehill*, utilizado na Instron 5582, salva os dados referentes aos ensaios em dois arquivos distintos. Um arquivo no formato de documento de texto, contendo dados gerais de cada ensaio e um gráfico de carga aplicada (P) por extensão do barramento (δ).

Outro arquivo utiliza a extensão dados brutos (raw), com formatação segundo o padrão *Comma Separated Values* (csv). Deste arquivo foram separadas somente as colunas de tempo de ensaio (em segundos) e carregamento (N) para análise. Inicialmente foi localizada a fração de segundo referente a leitura da carga máxima aplicada (P_{max}). Em seguida foram filtrados os dados na mesma fração de segundo, eliminando todos os demais registros. Como resultado foi

obtida uma observação por segundo, de modo compatível com os dados oriundos da caixa P3 como explicado na subseção 3.2.3.

Este procedimento foi executado em um programa editor de planilhas de cálculo. Entretanto, cabe observar que os ensaios produzem uma quantidade grande de informação. Desta forma, como no caso do ensaio de deriva de zero (Apêndice C), foi utilizado o software apresentado na seção E.1.

3.2.2 Extensometria de resistência elétrica

Alguns CPs foram instrumentado por extensômetro de resistência elétrica (ERE) utilizando *strain gage* (SG) uniaxiais, coláveis do tipo folha, específicos para concretos e rochas, visando monitorar as deformações axiais obtidas durante os ensaios.

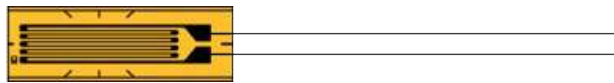


Figura 3.6 – Esquema de um *strain gage* (SG) para concreto da marca *Kyowa*.

Os SGs utilizados neste estudo foram adquiridos conforme a especificação apresentada na Tabela 3.2, abaixo.

Tabela 3.2 – Características do SG utilizado.

Fabricante	Kyowa (Japan)
Código	KFG-20-120-c1-11
Material grid	aço inoxidável (stainless steel)
Resistência	120 Ohms
Dimensões do grid	20 mm x 5 mm
Dimensões do strain gage	28 mm x 8 mm

O modelo descrito na Tabela 3.2 é específico para concreto e rochas. Apesar do fabricante ser Japonês os SGs foram adquiridos no mercado nacional. As dimensões do SG apresentadas são maiores que as disponíveis para metais, tendo em vista monitorar uma maior área de deformação a ser integrada.

3.2.3 Dispositivo condicionador de sinal (Vishay P3)

Cada um dos extensômetros foi associado à circuitos do tipo ponte de *Wheatstone*, em equipamento dispositivo condicionador e transdutor de sinal (Vishay P3) da empresa Vishay, comumente chamado de Caixa P3 (Figura 3.7).

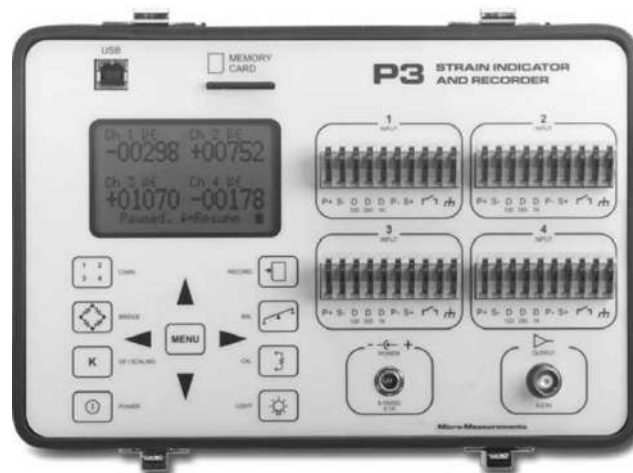


Figura 3.7 – Dispositivo condicionador e transdutor de sinal (Caixa P3) Fonte: Vishay Co.

Desta forma é possível monitorar até quatro pontes de *Wheatstone* simultaneamente, como pode ser observado no mostrador digital localizado na parte superior esquerda da Figura 3.7. Do lado direito ficam disponíveis quatro grupos de conectores para fiação, possibilitando alimentar o SG e monitorar sua queda de tensão. Os circuitos da caixa P3 calculam os valores de deformação, apresentam estes valores no visor e os salvam em memória auxiliar. Apesar da frequência de leitura e apresentação da caixa P3 ser inferior a um segundo, a frequência dos dados armazenados é de no máximo uma leitura por segundo.

A ligação entre o SG e a caixa P3 deve ser feita por um sistema de três fios, visando compensar a resistência dos fios, conforme apresentado na Figura 3.8.

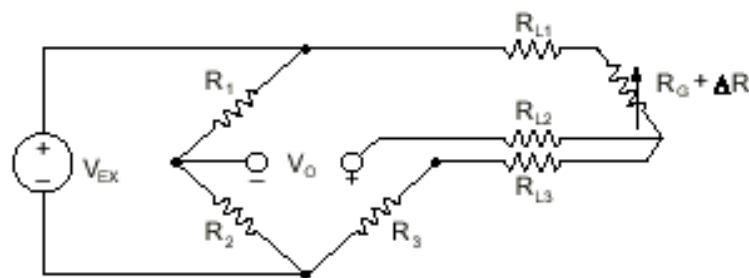


Figura 3.8 – Esquema de ligação elétrica para *strain gage* usando técnica de três fios. Fonte: adaptado de National Instruments (2013).

3.2.4 Equipamentos para produção de entalhes

O corte dos entalhes nos corpos de prova foi realizado através de uma máquina desenvolvida na oficina do LAMAV - UENF para dinamizar o processo e torná-lo o mais preciso possível. Esta máquina foi desenhada pelo professor Carlan Ribeiro do IFF, utilizando equipamentos e peças disponíveis nas oficinas do laboratório. Uma mesa móvel por meio de engrenagem, um torno morsa, uma bacia e máquina de corte do tipo *Makita* foram adaptados formando um equipamento capaz de impor um corte longitudinal no corpo de prova (Figura 3.9). Os cor-

tes foram realizados com rota úmida, visando facilitar o corte e aumentar a vida útil dos discos de corte.



Figura 3.9 – Máquina desenhada e construída na UENF

A máquina de corte utilizada foi da marca DeWALT, modelo DW861B, com potência de 1400 W e velocidade de rotação de 11e500 RPM ($1204,3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$), impossibilitando o uso de discos de abrasão de espessura inferior a 0,2 mm, pois estas correriam o risco de quebrar em alta rotação.

A máquina do tipo *Makita* foi fixada em hastes, acima do trilho da mesa móvel, com orientação ortogonal ao movimento da mesa, de tal forma que os corpos de prova puderam ser fixados no torno morsa e cortados pelo disco de abrasão. Os discos utilizados foram medidos com um paquímetro, e possuem espessuras de 1,1 e 1,9 mm, provocando entalhes com largura de aproximadamente 1,4 e 2,4 mm de largura.

Os entalhes foram produzidos objetivando atingir a profundidade do entalhe (a) nominais de aproximadamente 9; 12 e 15 mm na altura do corpo (H) padronizada em (30 mm), portanto profundidades relativas (a/H) de 30; 40 e 50 %.

A altura da máquina Makita foi fixada e foram construídos calços para levantar os corpos de prova para a altura mínima conveniente para o corte em cada uma das três profundidades de entalhe.

O diâmetro dos discos desta máquina é de aproximadamente 110 mm, com diâmetro de furo interno de 20 mm. Foram escolhidos discos diamantados, para corte de mármore ou granito.

Outros entalhes foram produzidos na marmoraria onde os corpos de prova foram adquiridos, com disco de corte diamantado para granito. A espessura destes cortes foi de aproximadamente 3,2 mm.

Discos de abrasão diamantados com espessura fina, de aproximadamente 0,3 mm foram adquiridos visando produzir entalhes mais finos nos corpos de prova. No entanto, estes discos não poderiam ser utilizadas na máquina do tipo *Makita*, e precisaram ser adaptados no equipamento *Minitom*, disponível no LAMAV - UENF. Este equipamento, da marca *Struers*, possibilitou utilizar o disco diamantado fino, regulando a velocidade do corte para aproximadamente 100 RPM ($10,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$), compatibilizando a espessura do disco de abrasão com a dureza do GCA.

3.2.5 Projetor de perfil

Um projetor de perfil PANTEC, modelo PJ 3150, possibilitou medir com precisão de até três casas decimais ($10 \times 10^{-3} \text{ mm}$) as dimensões dos entalhes, bem como sua profundidade e o raio na ponta do entalhe. Isso foi possível porque ele amplia em 10 vezes estas geometrias, além de medir o deslocamentos de seus eixos.

A Figura 3.10 mostra o projetor de perfil com um corpo de prova entalhado onde foi produzido um entalhe de profundidade $a = 9 \text{ mm}$ com raio $\rho = 0,7 \text{ mm}$.



Figura 3.10 – Projetor de perfil PANTEC.

Além dos equipamentos já citados, foram também utilizados:

- Paquímetro digital marca Mitutoyo, resolução de 0,01 mm;
- Esquadro da marca Mitutoyo;
- Multímetro digital, para verificar a continuidade e resistência dos SG;
- Mesa planificadora da marca Mitutoyo, para verificar o paralelismo das faces dos corpos de prova;
- Medidor de inclinação (inclinômetro) da marca Mitutoyo, modelo Pro 360.

3.2.6 Software livre *R-Project* (R-Project)

A determinação de propriedades mecânicas envolve lidar com valores contínuos, incerteza dos métodos e a variabilidade natural dos materiais. Estes fatores levam à uma dispersão estatística dos dados obtidos experimentalmente. Para lidar com este fenômeno foi necessário utilizar métodos estatísticos. O software livre *R-Project* (R-Project) (R Development Core Team, 2014) foi utilizado para tratar os dados estatísticos, cálculo das distribuições e testes de hipóteses.

3.3 Métodos

Os métodos utilizados nesta pesquisa envolvem:

- Descrição do CP para compressão;
- Cálculo da área da seção do CPs de compressão;
- Preparo do CP para compressão;
- Aplicação dos strain gages no CP de compressão;
- Ensaio de compressão;
- Cálculo das propriedades mecânicas;
- Preparo dos CPs de flexão lisos;
- Ensaio dos CPs de flexão lisos;
- Processamento dos dados dos CPs Lisos;
- Critério de exclusão do ensaios de flexão;
- Ensaio de flexão do CP liso (com SG);
- Corte dos corpos de prova para flexão ;
- Medição dos CPs com entalhe ;
- Ensaio e processamento de CPs com entalhe;
- Ensaio dos CPs entalhados (com SG);
- Tenacidade a fratura aparente;
- Processamento dos CPs com entalhe (com SG).
- Identificação do tamanho de defeito intrínseco
- Determinação da curva-R
- Cálculo do módulo de weibull

3.3.1 Descrição do CP para compressão

Os primeiros experimentos visaram a obtenção de propriedades mecânicas básicas, como módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν).

O ensaio de compressão envolveu a utilização de um CP com formato diferente dos demais, com as dimensões de aproximadamente 30 mm de espessura, 60 mm de largura e 150 mm de altura. Um esquema deste CP pode ser observado na Figura 3.11. O corpo de prova foi medido utilizando o paquímetro digital.

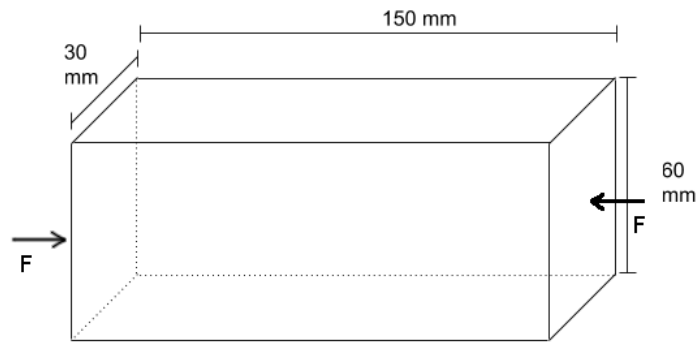


Figura 3.11 – Granito cortado no formato do CP para compressão, visando determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).

Os dados referentes ao CP estão disponíveis no Apêndice A na seção seção A.3.

3.3.2 Cálculo da área da seção transversal do CP

Para calcular a área da seção transversal foram escolhidas três alturas no corpo. Uma aproximadamente no meio do corpo, e outras duas próximas à suas extremidades. Em cada cota foram realizadas medidas referentes aos quatro lados e a dois ângulos opostos, conforme a Figura 3.12. A área da seção transversal em cada altura foi então calculada utilizando a Equação 3.2. A área da seção transversal foi assumida como a média das três áreas calculadas.

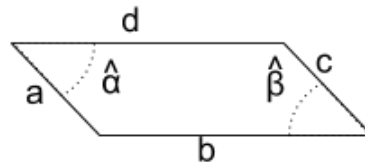


Figura 3.12 – corpo de prova para determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).

$$A = \frac{a \times d \times \sin(\hat{\alpha})}{2} + \frac{b \times c \times \sin(\hat{\beta})}{2} \quad (3.2)$$

onde:

A representa o valor de área calculado da seção transversal do quadrilátero irregular

a, c representam as espessuras medidas na esquerda e na direita

b, d representam as larguras do corpo, medidas na frente e atrás

$\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ representam ângulos opostos medidos no corpo

3.3.3 Preparo do CP para compressão

Placas de alumínio finas, com aproximadamente 2 mm de altura, e dimensões com 2 mm à mais que a seção reta do CP de compressão, foram obtidas na oficina do LAMAV - UENF, e fixadas utilizando cola Epoxi (marca Araldite), tomando o cuidado para que ficassem paralelas entre si, possibilitando bom alinhamento com os pratos de compressão da máquina de ensaios. Estas placas foram coladas no corpo de prova visando proteger suas extremidades durante os ensaios de compressão (Figura 3.13).

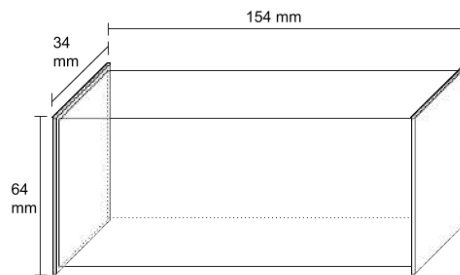


Figura 3.13 – CPL para determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).

Para medir o paralelismo entre as placas de alumínio foi utilizada uma mesa Mitutoyo e um medidor de inclinação digital. Este inclinômetro foi utilizado primeiramente para aferir o nivelamento da mesa, e posteriormente os corpos de prova foram posicionados na superfície aferida para verificar o paralelismo das faces superior e inferior. As placas com cola foram posicionadas no corpo e o inclinômetro posicionado na parte de cima, apoiado em outro objeto visando manter a inclinação desejada.

Os CPs com placas coladas que apresentaram inclinação nos eixos X e Y inferiores a $0,5^\circ$ forma aceitos como válidos para ensaio.

3.3.4 Aplicação de *strain gage* no CPL de compressão

Os *strain gage* (Figura 3.6) foram fixados usando cola Loctite 496 em uma das faces lisas do CPL (Figura 3.14).

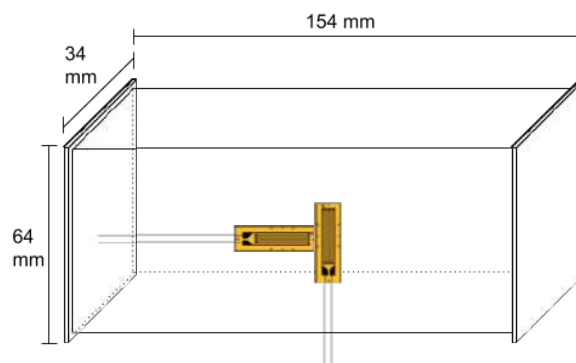


Figura 3.14 – CPL para determinação de propriedades mecânicas (Fonte: autor).

Um SG foi colado no sentido longitudinal e outro no sentido transversal, visando monitorar sua deformação durante os ensaios de compressão. Como resultado foi possível obter ε_{long} e ε_{trans} , possibilitando o cálculo do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

No Apêndice D pode ser encontrado uma explicação mais detalhada sobre a aplicação dos SG no CP.

3.3.5 Ensaio de Compressão

O ensaio de compressão foi realizado na Máquina Universal de Ensaios Instron modelo 5582 (subseção 3.2.1).

A máquina de ensaios foi verificada através de um ensaio de deriva de zero visando determinar seu erro de leitura e possíveis interferências externas. Este ensaio é descrito no Apêndice C.

Antes de iniciar o ensaio de compressão, cabe realizar ações preparatórias e de aquecimento. Um exemplo destas práticas, conforme foram realizadas neste trabalho, pode ser encontrado no Apêndice B.

Este ensaio foi realizado manualmente, isto é, sob o controle do operador da máquina, na seguinte sequência de passos.

1. Foram definidos um conjunto de valores de Força a serem aplicados, em intervalo regular;
2. A máquina de ensaios foi operada manualmente para aplicar o carregamento;
3. Os valores de deformação observados na caixa P3 foram anotadas manualmente;
4. Até que o último valor da lista fosse atingido;
5. Ao final, o carregamento foi liberado;
6. O valor de deformação na caixa P3 precisa retornar a ≈ 0 ;
7. ($\lesssim 2$);
8. Caso contrário o SG pode estar comprometido, e o ensaio é considerado inválido.

Os patamares de carregamento aplicados e as deformações obtidas estão disponíveis na Tabela A.6 (Apêndice A).

3.3.6 Obtenção das Propriedades Mecânicas

Segundo Hertzberg (1996, 10) o carregamento compressivo tende a ser mais resistente que carregamento de flexão ou trativo.

De posse da área da seção transversal do corpo de prova (A_0) e dos valores pareados de carga aplicada no instante i (P_i) foi possível calcular os valores de tensão no instante i (σ_i) (Equação 3.3)

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_0} \quad (3.3)$$

onde:

σ_i é a tensão calculada para a observação i

P_i é a carga aplicada no instante i

A_0 é a área da seção transversal do corpo de prova

Com os valores de tensão (σ) e deformação (ϵ) no instante i foi desenvolvido um gráfico de tensão \times deformação, e calculado o valor módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν).

O módulo de elasticidade do material foi calculado a partir do coeficiente angular da reta da seção elástica de maior extensão linear do gráfico.

$$E = \frac{\sigma - \sigma_0}{\epsilon - \epsilon_0} \quad (3.4)$$

onde:

σ representa um valor último de tensão escolhido

σ_0 representa um valor inicial de tensão escolhido

E representa o módulo de elasticidade calculado

ϵ representa um valor último de deformação escolhido

ϵ_0 representa um valor inicial de deformação escolhido

Com os valores de deformação longitudinal (ϵ_{long}) e deformação transversal (ϵ_{trans}), obtidos dos SGs, foi possível calcular coeficiente de Poisson (ν) utilizando a Equação 3.5.

$$\nu = -\frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}} \quad (3.5)$$

onde:

ν é o coeficiente de Poisson calculado

ϵ_{trans} é a deformação transversal colhida do SG

ϵ_{long} é a deformação longitudinal colhida do SG

3.3.7 Preparo dos CPs de flexão lisos para ensaio de flexão

As propriedades do GCA possuem uma dispersão naturalmente alta, por se tratarem de um material composto por diferentes minerais. Para obter esta propriedade faz-se necessário um N-amostral de pelo menos 25 (vinte e cinco) espécimes para tentar atrair esta dispersão para uma distribuição normal. Esta quantidade mínima foi confirmada em função de um c.v. de 10 % e uma confiabilidade desejada de 5 %, como descrito por Friaes (2016), além de concordar com o Teorema Central do Limite (WONNACOTT; WONNACOTT, 1991a).

Os CPs foram separados, limpos, numerados e medidos. A medição destes CPs deve obter as seguintes características de cada um:

- número do CP;
- altura do lado esquerdo;
- altura do lado direito;
- espessura do lado esquerdo;
- espessura do lado direito;
- comprimento.

3.3.8 Ensaios de flexão dos CPs lisos

Este ensaio exigiu cuidado na verificação da orientação do corpo de prova quanto ao alinhamento do corpo e dos suportes, tendo em vista manter a planicidade e paralelismo das faces do corpo de prova. Este método se baseia em provocar um carregamento considerado lento e assume que a carga de fratura seja a carga máxima durante o ensaio.

O ensaio de flexão tem como objetivo obter o valor de tensão de ruptura (σ_{rup}) do GCA. Esta propriedade do material será necessária nos cálculos de outros experimentos.

A máquina de ensaios foi configurada para ensaio de flexão em quatro pontos, utilizando a célula de carga de 100 kN, controle de avanço de barramento na velocidade de $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. O fim do ensaio foi configurado para ser automático quando, após ultrapassar um limiar mínimo de 200 N, o valor de força lido pela célula de carga cair para 80 % do valor de pico, isto é, o valor máximo alcançado durante o ensaio.

Os roletes da base de suporte para flexão foram configurados para que seus centros toquem os CPs a uma distância de 140 mm, enquanto os roletes superiores, fixados na célula de carga do barramento e responsáveis pela aplicação da força, foram configurados para uma distância de 70 mm.

Estes valores foram escolhidos buscando compatibilidade com o experimento de Gómez, Guinea e Elices (2006), onde os corpos de prova também foram ensaiados em flexão em quatro pontos e com razão entre os roletes de suporte e aplicadores de força foi de dois para um.

Cada um dos CPs foi posicionado nos roletes de flexão sob suas superfícies lisas, tomando cuidado para verificar se haviam defeitos na sua superfície. O alinhamento dos corpos de prova foi conferido utilizando um esquadro combinado da marca Mitutoyo, posicionado no meio da estrutura base de flexão da máquina de ensaios universais.

Os CPs foram ensaiados na ordem, anotando o número do CP e o valor de carregamento máximo.

3.3.9 Processamento dos dados obtidos da máquina de ensaios

Os resultados deste ensaio foram obtidos do arquivo no formato documento, onde estão armazenadas as carga máxima aplicada (P_{max}) de cada CPs na ordem em que foram ensaiados.

Os dados referentes à P_{max} foram planilhados, e realizados os seguintes cálculos:

W largura do corpo de prova (média) ;

b profundidade do corpo de prova (média) ;

σ_{rup} tensão de ruptura de cada CP.

O cálculo da σ_{rup} foi realizado utilizando a Equação 3.6, referente a σ em flexão por quatro pontos para espécimes retangulares.

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{P(L_2 - L_1)}{b \cdot h^2} \quad (3.6)$$

onde:

σ é a tensão calculada

P é a carga aplicada

L_1 é a Distância entre os roletes aplicadores de força (superiores)

L_2 é a Distância entre os roletes de apoio(inferiores)

b é a profundidade do corpo de prova

h é a altura do corpo de prova

Os resultados do ensaio foram disponibilizados na Tabela A.8 da subseção A.4.1.

3.3.10 Critério de Exclusão

O critério de exclusão de Chauvenet (DALLY; RILEY, 2005) foi utilizado para identificar valores de tensão que não sejam representativos do lote analisado. Considerando o N amostral de 25 espécimes, foi consultada a Tabela A.1 e encontrado o valor de desvio relativo máximo de 2.33 como referência para corte do critério.

Na subseção A.4.2 foram criadas novas colunas referentes ao cálculo do desvio relativizado de cada CP, e o status da medida quando comparado com o desvio relativo máximo obtido na Tabela A.1, segundo o processo de exclusão.

Adicionalmente, foi utilizado o critério de exclusão proposto por Tukey (1949). A série de dados foi ordenada e foram definidos três quartis (Q1, Q2 e Q3). Os dados de interesse se localizam no intervalo entre os limites LI e LS , conforme apresentado na subseção 3.3.10, e foram calculadas conforme as Equações 3.7, 3.8 e 3.9.

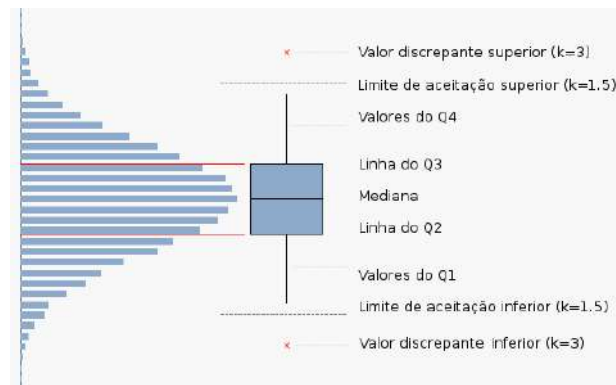


Figura 3.15 – Exemplificação do critério de exclusão, adaptado de Dong (2016).

$$Q1 = \frac{1}{4}(n + 1) , Q2 = \frac{2}{4}(n + 1) , Q3 = \frac{3}{4}(n + 1) , \quad (3.7)$$

$$IQR = Q3 - Q1 , \quad (3.8)$$

$$Lim_{inf} = Q1 - k \cdot IQR , Lim_{sup} = Q3 + k \cdot IQR , \quad (3.9)$$

onde:

$Q1$	primeiro quartil
$Q2$	segundo quartil
$Q3$	terceiro quartil
IQR	intervalo entre quartis
Lim_{inf}	limite inferior
Lim_{sup}	limite superior
k	coeficiente do <i>outlier</i> de Tukey

Neste trabalho o valor do coeficiente do *outlier* de Tukey (k) utilizado foi de 1,5, padronizado pelo autor (TUKEY, 1977).

3.3.11 Ensaio de flexão do CP liso instrumentado

Para este ensaio foi necessário realizar o procedimento de colagem do SG em uma das superfícies lisas, conforme descrito no Apêndice D, e a fixação dos fios de acesso conforme descrito na subseção 3.2.3, conforme esquema apresentado na Figura 3.16.

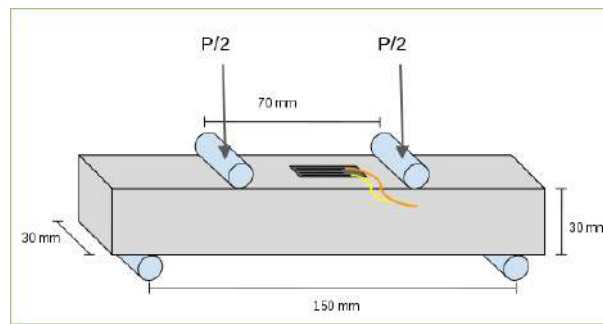


Figura 3.16 – corpo de prova para ensaio de flexão utilizando extensômetro (do autor).

O *software* da caixa P3 foi instalado no computador que controla a máquina de ensaios universais.

O trio de fios foi ligado à caixa P3, seguindo o protocolo de um quarto de ponte.

A caixa P3 e a máquina de ensaios universais foram ligados para aquecer seus circuitos meia hora antes de sua utilização.

Foram realizadas as seguintes configurações na caixa P3:

- o cabo usb foi conectado entre o dispositivo condicionador e transdutor de sinal (Vishay P3) e o computador;
- o software foi executado na computador, ficando visível na tela;
- configurar a hora, em sincronismo de segundos com o computador;
- configurar o *gage factor* (GF);
- configurar o circuito utilizado dentre os quatro disponíveis;
- calibrar o circuito;
- configurar para a gravação a cada segundo (mínimo disponível).

Uma câmera disponível no laboratório foi posicionada em um tripé em frente à tela do computador visando filmar os sinais lidos em separado pelos programas de computador desenvolvidos.

Após o tempo de aquecimento, a máquina de ensaios foi desligada e ligada novamente. Foi então calibrada a célula de carga, seguindo procedimento padrão, utilizando o menu do software *Blue Hill v2*.

Foi configurado um teste para flexão em quatro pontos, com velocidade de 0,1 mm/sec, com critério de parada se, após ultrapassar um patamar mínimo de 400 N o carregamento cair para 10 % da carga máxima aplicada registrada.

Foi necessário operar o barramento manualmente visando tocar no corpo de prova. Verificar se o valor e deformação do SG estava zerado, e afastar o barramento ou zerar o sinal da caixa P3.

O software da caixa P3 foi executado e posicionado na tela junto com a imagem do software *BlueHill v2*.

Antes de iniciar o ensaio a câmera foi ligada para gravar os dados de ambos os ensaios simultaneamente.

Antes de iniciar o ensaio na máquina de ensaios, foi verificado e zerada a deformação na caixa P3. Para iniciar o ensaio, tentou-se iniciar a gravação dos dados na caixa P3 de forma simultânea com o início do ensaio na máquina de ensaios.

Após o término do ensaio, foi anotada a P_{max} , salvos os dados do ensaio, e interrompida a gravação dos dados da caixa P3.

A deformação residual no corpo de prova ficou aparente na maioria dos ensaios deste tipo, em função dos danos acumulados no CP independente dele haver partido ou não.

Os dados da máquina de ensaios foram levados para um computador do laboratório e abertos em planilha de cálculo. Foram apagadas as noventa linhas iniciais do arquivo, cujas informações não representavam as leituras de deformação. Foram mantidas as colunas referentes ao tempo de ensaio, deslocamento do barramento e carregamento de flexão, enquanto todas as outras colunas foram apagadas.

Dada a limitação dos sistemas, foi identificado o segundo referente à carga máxima aplicada e foram selecionados para análise os segundos referentes à aquela mesma fração de segundo, restando somente uma leitura por segundo.

O arquivo referente às deformações armazenadas pela caixa P3 foi importado para a mesma planilha de dados. Foi observado na filmagem da câmera os segundos de paridade entre a deformação colhida pela caixa P3 e o tempo de duração do ensaio. as colunas de carregamento, deslocamento do barramento e deformação da caixa P3 foram sincronizados.

Foram digitadas as características do CP como altura do corpo de prova e profundidade do corpo de prova na planilha.

A tensão de ruptura foi calculada pela Equação 3.6, referente à flexão em quatro pontos.

Os CPs cortados com discos de abrasão mais finos, com um raio na ponta do entalhe menor, de aproximadamente 0,2 mm, tiveram sua tensão de ruptura calculada pela Equação 3.10, onde é utilizada a altura da seção resistente no cálculo ao invés da profundidade do corpo de prova.

$$\sigma = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{P(L1 - L2)}{d \cdot h^2}, \quad (3.10)$$

onde:

- σ_{rup} tensão de ruptura
- P_{max} carga máxima aplicada
- $L1$ distância entre roletes do suporte inferior
- $L2$ distância entre roletes superiores
- d altura da seção resistente
- h altura do corpo de prova

A profundidade inicial do entalhe e o raio na ponta do entalhe, foram digitados na planilha, visando o cálculo da fator de intensificador, modo I de abertura de trinca, utilizando a Equações 3.11 e 3.12,

$$K_I = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F(a/h) , \quad (3.11)$$

$$F(a/h) = 1,122 - 1,40(a/h) + 7,33(a/h)^2 - 13,08(a/h)^3 + 14,0(a/h)^4 , \quad (3.12)$$

onde:

K_I	fator de intensificador, modo I de abertura de trinca
σ_{max}	tensão normal máxima
a	profundidade da trinca
h	altura do corpo de prova
$F(a/h)$	fator de ajuste de geometria

3.3.12 Corte dos entalhes

Os CPs foram separados em lotes de 25 espécimes, em grupos por profundidade de entalhe. As profundidades estudadas foram 30 %, 40 % e 50 % da altura padronizada do CP, portanto respectivamente 9 mm, 12 mm e 15 mm. Os CPs foram selecionados verificando se possuíam algum defeito superficial, como trincas ou rachaduras visíveis.

A máquina de corte de entalhes desenvolvida no LAMAV - UENF (subseção 3.2.4) foi utilizada para realizar os cortes, mas inicialmente foi necessário produzir três suportes com as alturas necessárias para produzir os entalhes desejados nos CPs. Os suportes eram posicionados no torno morsa, aumentando a altura do CP, e com isso aumentando a profundidade do entalhe.

Um CP foi utilizado para sacrifício, verificando a profundidade de corte atingida. Com base nesta medição o suporte foi desbastado até atingir a profundidade de entalhe desejada no CP sacrificado.

Cada CP foi preso no torno morsa e cortado, movendo a mesa sob o disco de abrasão, para não produzir curvatura no interior do entalhe. Os cortes foram realizados usando Rota Úmida (corte facilitado com água), visando diminuir o dano no CP e o desgaste dos discos diamantados.

3.3.13 Medição dos CPs com entalhe

Os CPs deixados para secar durante um dia em local ventilado. Depois foram limpos, numerados e medidos utilizando o paquímetro digital. Nesta etapa foram medidos a altura do corpo de prova (h) entre as faces lisas do lado esquerdo e direito, e a profundidade do corpo de

prova (b) entre os lados cortados na marmoraria. No projetor de perfil (Figura 3.10) foi medida a profundidade do entalhe (a) (Figura 3.17).

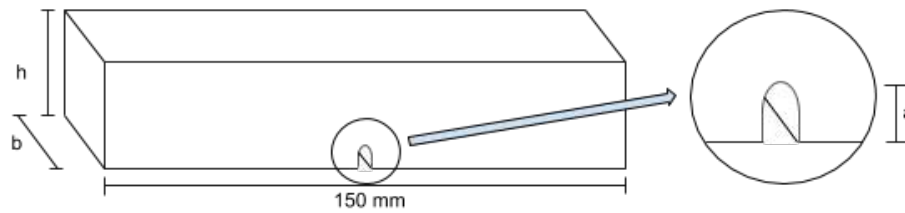


Figura 3.17 – Corpo de prova para flexão com entalhe.

Posteriormente, usando um microscópio digital, foi medido o raio na ponta do entalhe (ρ).

3.3.14 Ensaio e processamento de CPs com entalhe

Diferentes discos de abrasão foram utilizados para cortar os CPs, suas espessuras encontram-se apresentadas na Tabela 3.1. Com cada disco foram cortados entalhes nas três profundidades discutidas.

A máquina Instron 5582 foi configurada para ensaio de flexão em quatro pontos, com critério de término configurado, velocidade de barramento em 0,1 mm/min, conforme descrito na subseção 3.3.8.

Em cada disco utilizado foi criado um lote de 25 CPs para cada profundidade inicial do entalhe (a_0), à saber: 9; 12 e 15 mm). A sequência da numeração dos CPs e os valores de carga máxima aplicada (P_{max}) foram então anotados.

Para cada lote de CPs foram calculados:

- a altura do corpo de prova média (\hat{h});
- a profundidade do corpo de prova média (\hat{b});
- a carga máxima aplicada (P_{max});
- a tensão de ruptura (σ_{rup});
- a média da tensão de ruptura (σ_{rup});
- o desvio padrão (S) de P_{max} e σ_{rup} ;
- o coeficiente de variação (c.v.) de P_{max} e σ_{rup} ;
- o valor do desvio relativo de Chauvenet para cada σ_{rup} calculado;
- o *status* de Chauvenet (comprometido ou não)

Cada um dos três lotes referentes a cada disco de abrasão utilizado estão disponíveis na seção A.4 apresentando seus resultados obtidos e calculados.

3.3.15 Ensaio dos CPs com entalhe e SG

Três corpos de prova entalhados foram separados dos lotes de 25 para ensaio com SG visando obter sua deformação ao longo do ensaio. Estes CPs foram cabeados e ligados na caixa P3. Os ensaios foram realizados utilizando os mesmos parâmetros de teste dos ensaios sem SG (subseção 3.3.14), mas foram utilizados SG ligados na caixa P3 e filmados conforme descrito na subseção 3.3.11.

3.3.16 Aproximação do K_{IC}

Duas técnicas foram desenvolvidas para a aproximação dos valores de K_{IC} conforme apresentado na Figura 3.18.

O raio na ponta do entalhe (ρ) nos entalhes em U medidos nos corpos de prova cortados com os discos de espessura 1,4; 2,4 e 3,2 mm foram considerados como fator concentrador de tensão, conforme descrito por (GÓMEZ; GUINEA; ELICES, 2006) e (PILKEY, 2008, p. 110). Os valores de K_{IC} destes corpos de prova foram estimados através do método descrito como FIT generalizado para entalhes em U (K^U), descrito na subseção 3.3.17.

Os entalhes produzidos pelos discos de espessura 0,2; 0,33; 1,4 e 2,4 mm tiveram seus valores de tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca (K_{IC}) refinados pelo processo da curva de resistência (curva-R), descrito no tópico seção 4.12.

A estratégia de determinação de K_{IC} é descrita na Figura 3.18.

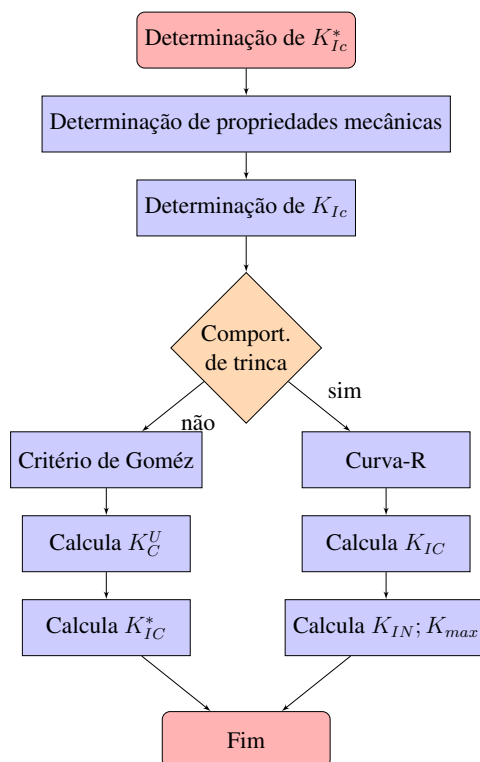


Figura 3.18 – Estratégia de integração entre diferentes técnicas para estimar K_{IC} .

Como apresentado na Figura 3.18, deseja-se estimar K_{IC} a partir de entalhes, quando não houver comportamento de trinca, ou melhorar a precisão dos valores obtidos através da técnica de Curva R quando se entende que já exista uma singularidade na geometria do corte.

3.3.17 Tenacidade a fratura aparente

Este método é uma adaptação do critério apresentado por Gómez, Guinea e Elices (2006) e pode ser observado de forma simplificada na Figura 3.19.

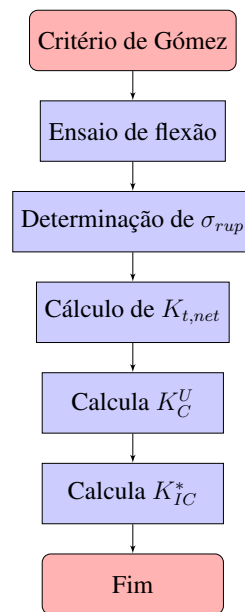


Figura 3.19 – Aplicação do critério de Gómez, Guinea e Elices (2006).

No cálculo da σ_{rup} foi levado em consideração a seção resistente do corpo de prova (d) conforme na Equação 3.13.

$$\sigma_{net} = \frac{3 \cdot P_{max} \cdot (L_1 - L_2)/2}{b \cdot d^2}, \quad (3.13)$$

onde:

- σ_{net} tensão baseada na área líquida (*net*)
- P_{max} carga máxima aplicada
- L_1 distância entre roletes do suporte inferior
- L_2 distância entre roletes superiores
- b profundidade do corpo de prova
- d seção resistente do corpo de prova

Este cálculo da tensão se assemelha à Equação 3.6 no entanto, em função da presença do entalhe, é considerada somente a seção resistente do corpo de prova (d) conforme descrito por Gómez, Guinea e Elices (2006).

3.3.18 Processamento dos CPs com entalhe e SG

Os dados de carregamento deste ensaio foram colhidos do arquivo com a extensão ".raw" criado pela Máquina Universal de Ensaio Instron modelo 5582. Em seguida o arquivo das deformações referentes ao ensaio foi colhido da caixa P3. Estes dados foram armazenados no formato texto, separados por espaços em distâncias fixas, apresentando apenas uma deformação por segundo. No início de cada linha foi disponibilizado o horário (hora, minuto e segundo) de cada leitura, e em seguida cada um dos sensores lidos, neste caso somente um.

Estes dados de deformação precisaram ser alinhados com os dados referentes ao carregamento. Utilizou-se como ponto de referência o ponto de quebra do CP.

Após o alinhamento, foram calculados os valores de tensão no instante i (σ_i) para cada segundo do arquivo, utilizando a Equação 3.6.

3.3.19 Determinação da curva-R

Este processo pode ser compreendido pelo diagrama apresentado na subseção 3.3.19.

O teste do tamanho de defeito intrínseco, conforme descrito por (TANAKA et al., 2003), foi realizado utilizando os CPs do GCA, conforme descritos na subseção 3.1.2. Os entalhes foram produzidos utilizando o disco de abrasão de espessura 0,2 mm, operados no equipamento Miniton, em velocidade 100 RPM.

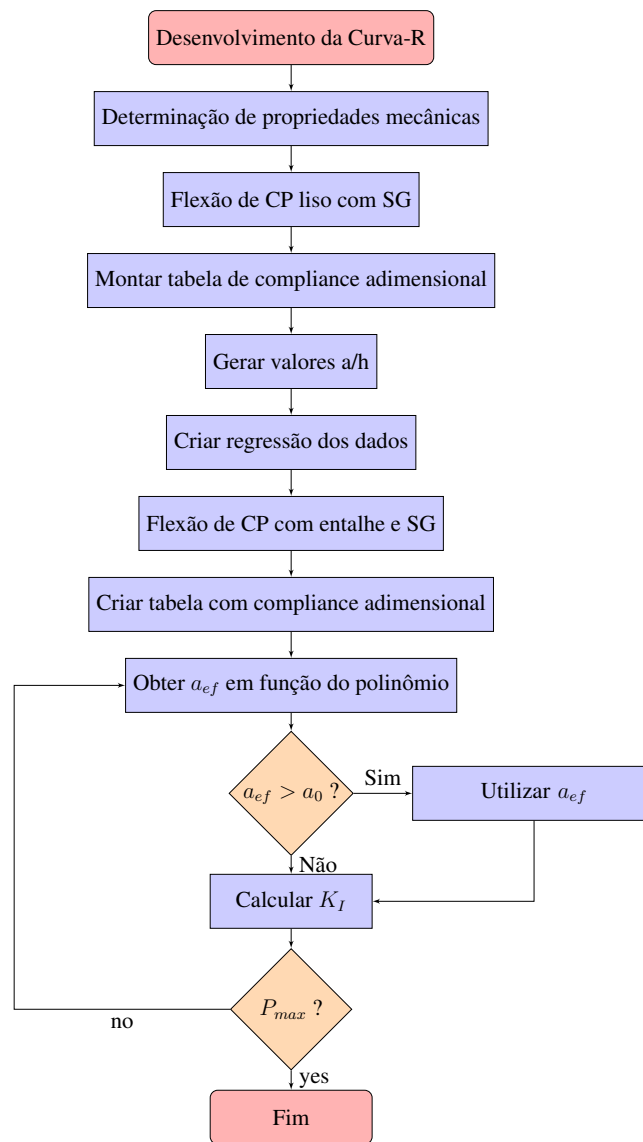


Figura 3.20 – Aplicação do critério de Gómez, Guinea e Elices (2006)

Neste fluxograma pode-se perceber que valores de λ são submetidos a um modelo matemático visando estimar o a_{ef} .

Inicialmente foi calculado o *compliance* do espécime sem entalhe (λ_0) através da Equação 3.14

$$\lambda_0 = \frac{\varepsilon_{rup}}{P_{max}}, \quad (3.14)$$

onde:

- λ_0 *compliance* do espécime sem entalhe
- ε_{rup} deformação no momento da ruptura do CP
- P_{max} carga máxima aplicada

Tanaka et al. (2003) utilizam a curva-R e obtêm uma solução genérica para uso de *compliance*, adimensionalizando profundidade do entalhe e *compliance*. Os valores de *compliance*

referentes a corpos de prova com entalhes são adimensionalizados em função de *compliance* do espécime sem entalhe (λ_0). De forma similar, os valores da profundidade do entalhe (a) são adimensionalizados pela altura do corpo de prova (h).

A partir de dados experimentais foi feita uma regressão polinomial e obtida a Equação 3.15, que estima valores da *compliance* adimensional em função de valores de profundidade do entalhe adimensional.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) = & 1.0000 + 0.16016 \left(\frac{a}{h}\right) + 2.3452 \left(\frac{a}{h}\right)^2 + 147.61 \left(\frac{a}{h}\right)^3 - 1916 \left(\frac{a}{h}\right)^4 \\ & + 12907 \left(\frac{a}{h}\right)^5 - 49299 \left(\frac{a}{h}\right)^6 + 1.0767 \times 10^5 \left(\frac{a}{h}\right)^7 \\ & - 1.2495 \times 10^5 \left(\frac{a}{h}\right)^8 + 59765 \left(\frac{a}{h}\right)^9, \end{aligned} \quad (3.15)$$

onde:

- λ *compliance*
- λ_0 *compliance* do espécime sem entalhe
- a profundidade do entalhe
- h altura do corpo de prova

Esta Equação por definição responde valores de flexibilidade elástica (*compliance*) adimensional (λ/λ_0), em função da profundidade do entalhe adimensional, ou seja, para dados valores de (a/h), a função determina valores de *compliance* adimensional.

Ao realizar um ensaio em corpos de prova entalhados, tem-se valores de *compliance* (λ), o valor de altura do corpo de prova (h), e já se sabe previamente o valor de *compliance* do espécime sem entalhe (λ_0), referente ao corpos de prova não entalhados.

Deseja-se então obter o valor de tamanho efetivo da trinca (a_{ef}), e para tanto foi necessário inverter o polinômio descrito na Equação 3.15, criando uma Equação onde, para dados valores de flexibilidade elástica (*compliance*) adimensional (λ/λ_0), possa-se estimar valores de profundidade do entalhe adimensionais (a/h), conforme descrito na Equação 3.16.

$$\frac{a}{h} = u \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right), \quad (3.16)$$

Para tanto deve-se produzir uma tabela com valores de a/h entre 0,3 – 0,7 em incrementos de 0,1;

Com estes valores, calcular a Equação 3.15, obtendo valores de λ/λ_0 ;

A partir destes valores foi possível realizar um outra regressão visando obter um polinô-

miro inverso da Equação 3.15, apresentado na Equação 3.17.

$$\begin{aligned} \left(\frac{a}{h}\right) = & 0.0196 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^5 - 0.2384 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^4 + 1.1552 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^3 \\ & - 2.8323 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 + 3.6864 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^1 - 1.7384, \end{aligned} \quad (3.17)$$

que apresenta um R^2 de aproximadamente 0.99997. Como se desejam valores de a , pode-se ainda, mais objetivamente, deduzir a Equação 3.18,

$$a_{eff} = h \cdot u \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right), \quad (3.18)$$

produzindo como resultado o polinômio da Equação 3.19

$$\begin{aligned} a = & 2426.8206 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^5 - 2824.9850 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^4 + 1312.0788 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^3 \\ & - 308.3302 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 + 38.4628 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^1 - 1.7384, \end{aligned} \quad (3.19)$$

3.3.20 Cálculo do módulo de Weibull

Inicialmente os valores de tensão de ruptura são organizados em uma coluna de planilha de cálculo e ordenados em ordem crescente. É criada uma coluna com um número sequencial pareado com os valores de tensão. Em seguida é criada uma coluna com a probabilidade de falha do espécime número i ($PF(i)$) do CP (Equação 3.20)

$$PF(i) = \frac{i - 0,5}{N}, \quad (3.20)$$

onde:

- i espécime de ordem i
- $PF(i)$ probabilidade de falha do espécime número i
- N quantidade de espécimes no lote

Em seguida foram criadas colunas com as Equações 3.21 e 3.22.

$$X(i) = \ln(\sigma_{rup}(i)), \quad (3.21)$$

$$Y(i) = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - PF(i)}\right)\right), \quad (3.22)$$

onde:

$PF(i)$ probabilidade de falha do espécime número i
 σ_{rup} tensão de ruptura

Em seguida foi calculada uma regressão linear e seu coeficiente de determinação da regressão (R^2) para as colunas referentes ao $PF(i)$ e σ_{rup} .

A partir das colunas das Equações 3.21 e 3.22 foi criado um gráfico de dispersão (X,Y) e solicitado uma regressão linear com coeficiente de determinação da regressão (R^2).

A partir deste gráfico foram obtidos os coeficientes $\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$, e calculados o tensão característica (σ_0) através da Equação 3.23.

$$\sigma_0 = e^{\left(-\frac{\hat{\beta}_0}{\hat{\beta}_1} \right)}, \quad (3.23)$$

onde:

σ_0 tensão característica
 $\hat{\beta}_0$ estimador do coeficiente linear
 $\hat{\beta}_1$ estimador da taxa de transformação

O valor de σ_0 é um valor de referência para σ_{rup} com probabilidade de falha 63,2%. O módulo de Weibull (m) é o estimador da taxa de transformação da curva ($beta_1$) e serve como um indicativo da dispersão dos valores de resistência mecânica do material, quanto maior o valor de m menor a dispersão dos dados.

A partir destes dados é criada uma Equação que descreve a resistência do Granito Cinza Andorinha, no formato (Equação 3.24)

$$F(\sigma_{rup}) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma_{rup}}{\sigma_0} \right)^m}, \quad (3.24)$$

onde:

$F(\sigma_{rup})$ função de distribuição de Weibull
 σ_{rup} tensão de ruptura
 σ_0 tensão característica
 m módulo de Weibull

3.3.21 Identificação do tamanho de defeito intrínseco

Vinte CPs receberam entalhes superficiais em profundidades entre 3 e 0,3 mm, visando identificar experimentalmente o tamanho do defeito intrínseco do material, conforme descrito por Gómez, Guinea e Elices (2006).

Os entalhes foram produzidos utilizando o disco de abrasão com espessura de 0,2 mm no equipamento Minitom. Estes corpos de prova foram posteriormente ensaiados na Instron 5582 conforme configuração descrita na subseção 3.3.14.

Segundo Gómez, Guinea e Elices (2006) os corpos de prova entalhados que apresentarem fratura iniciando fora do entalhe terão atingido uma profundidade de entalhe inferior ou compatível com o tamanho do defeito intrínseco.

3.3.22 Erro de estimativa

Os erros de estimativa deverão ser avaliados de acordo com a Equação 3.25

$$Erro[\%] = \frac{valor_experimental - valor_estimado}{valor_estimado}, \quad (3.25)$$

Antes de cada experimento deverão ser declarados os métodos para cálculo de estimativa. Ao final os valores obtidos experimentalmente deverão ser processados e o erro calculado.

4 Resultados e Discussão

Inicialmente foram avaliados dois tipos de *strain gage* (SG), visando escolher extensômetro de resistência elétrica (ERE) mais adequado para a pesquisa. Em seguida o comportamento do material foi estudado, visando obter suas propriedades, e adequar a estratégia da pesquisa. Posteriormente foram realizados ensaios para obtenção dos valores de tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca (K_{IC}), e foi utilizado um critério adaptado de Gómez, Guinea e Elices (2006). Visando melhorar a acurácia desta propriedade foram criadas as curva de resistência (curva-R), para obtenção dos valores de tenacidade à fratura na iniciação da trinca (K_{IN}) e fator intensificador de tensão formal (K_{MAX}).

Dentre os resultados serão primeiramente apresentados e discutidos os dados referentes às propriedades mecânicas referentes aos CPL e os CPs lisos. Em seguida serão discutidos os resultados referentes ao disco de abrasão maior (3,2 mm), calculados a partir do modelo que aproxima tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca a partir de fator concentrador de tensão. Em seguida serão apresentados os discos finos (0,2; 0,3; 1,4 e 2,4 mm) cujo cálculo de tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca é aproximado utilizando a curva R.

4.1 Avaliação do comportamento mecânico do GCA

A partir dos ensaios de flexão em quatro pontos do Granito Cinza Andorinha foram obtidos gráficos de força aplicada ao corpo (P) vs. deslocamento (δ) como por exemplo o gráfico apresentado na Figura 4.1

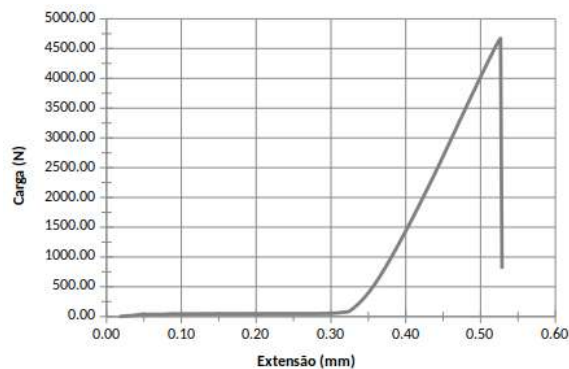


Figura 4.1 – Gráfico de Carga (N) em função da extensão do barramento (δ) (mm) obtido do corpo de prova de granito liso (sem entalhe) durante o ensaio de flexão em quatro pontos. Fonte: o autor.

Neste gráfico pode-se observar que neste ensaio não foi realizada pré-carga, com início do ensaio a partir de deslocamento e carga zerados.

A partir dos dados obtidos, percebeu-se que a extensão do barramento da máquina de ensaios observado até aproximadamente 0,5 mm não apresentou carregamento significativo. Na grande maioria dos ensaios dois patamares de carregamento foram observados (≈ 127 e 177 kPa) e uma deformação considerada baixa ($\approx 9 \mu\epsilon$), conforme apresentado na Figura 4.2 e Figura 4.3.

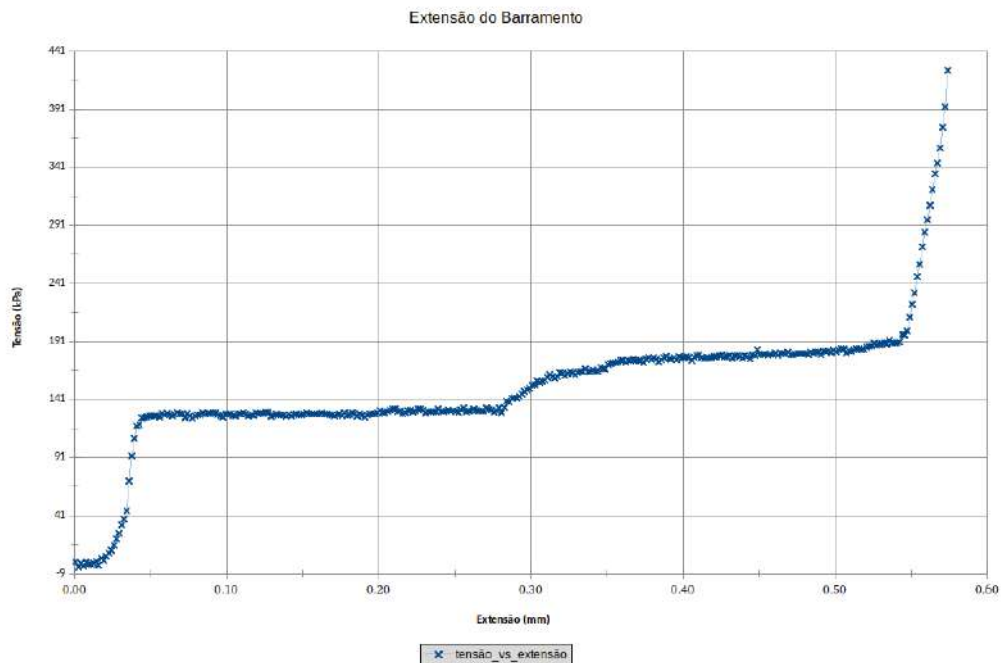


Figura 4.2 – Gráfico de Extensão vs. Tensão (até 500 kPa).

Este patamar foi atribuído ao ajuste da rigidez do aparato de flexão da máquina de ensaios, e foi observado em todos os ensaios de flexão realizados durante este estudo. Sendo assim, considerou-se que existe um intervalo inicial de dados obtidos que não deve ser considerado como relevante à obtenção de propriedades do material.

A partir do carregamento de aproximadamente 100 N ou 200 kPa observou-se um crescimento que representou a resistência do material até o final do ensaio. Sendo assim, durante todas as análises realizadas foram desconsiderados o comportamento do material inferiores a 100 N, 200 kPa e $10 \mu\epsilon$.

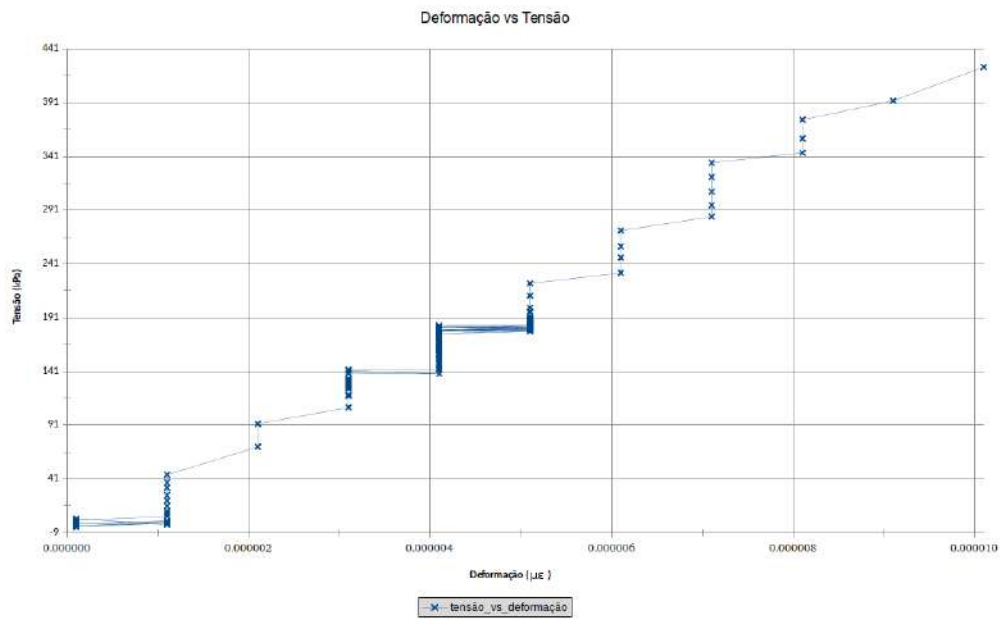


Figura 4.3 – Gráfico de Deformação vs. Tensão (até $10 \mu\epsilon$).

Para avaliar o comportamento do granito e obter suas propriedades em flexão foram criados os diagramas deformação (ϵ) vs. tensão (σ), conforme exemplo apresentado na Figura 4.4 que também representa o comportamento normal do granito em estudo.

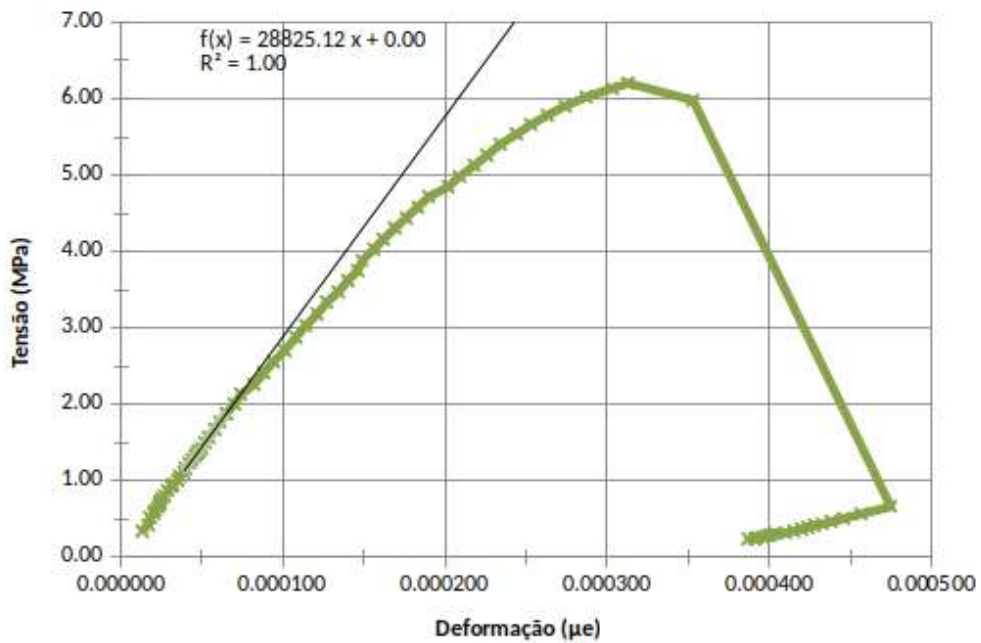


Figura 4.4 – Gráfico de Deformação vs. Tensão do granito Cinza Andorinha sem entalhes.

4.2 Verificação dos *strain gages*

O comportamento de dois *strain gage* (SG), um para concreto e outro para aço, foi aferido visando avaliar o SG mais adequado para o material.

Na Figura 4.5 os valores de deformação obtidos de um dos ensaios realizados foi transformado em um gráfico para comparação dos valores. Adicionalmente, foram adicionados os valores de carregamento (em Newtons) visando orientar a análise.

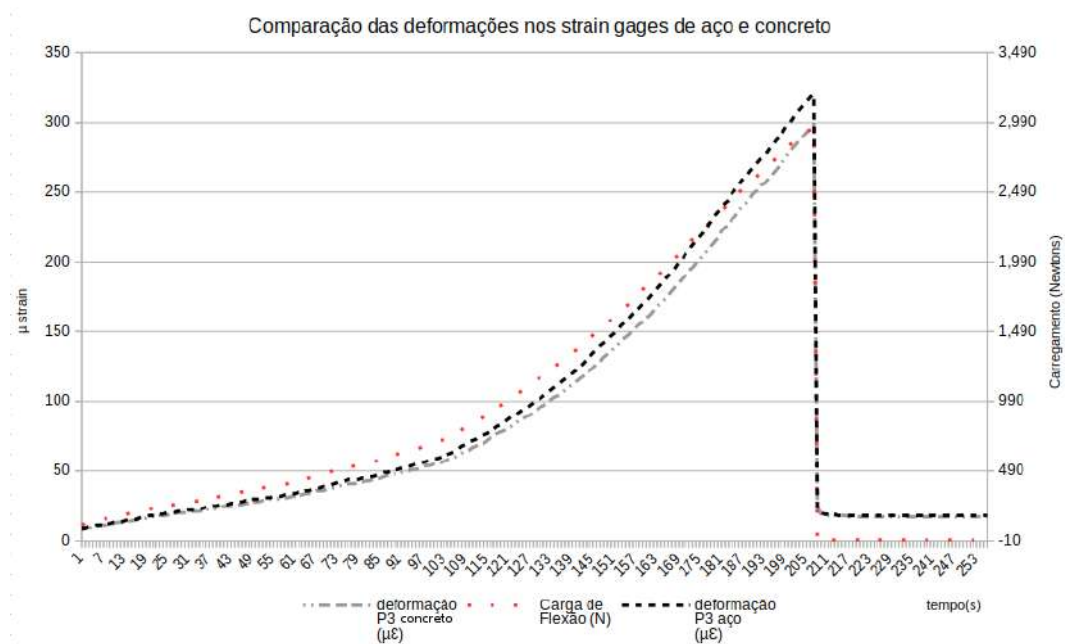


Figura 4.5 – Comparação entre valores colhidos dos *strain gages* de aço e concreto de um CP liso (sem entalhes). Fonte: O autor.

Pode-se observar que os valores de deformação dos SG tendem a se afastar, conforme avaliado na Figura 4.6. No entanto, na Figura 4.5, pode-se observar que a taxa de crescimento do SG de concreto é mais próxima da taxa do carregamento, sendo a taxa de variação da SG de aço mais inclinada.

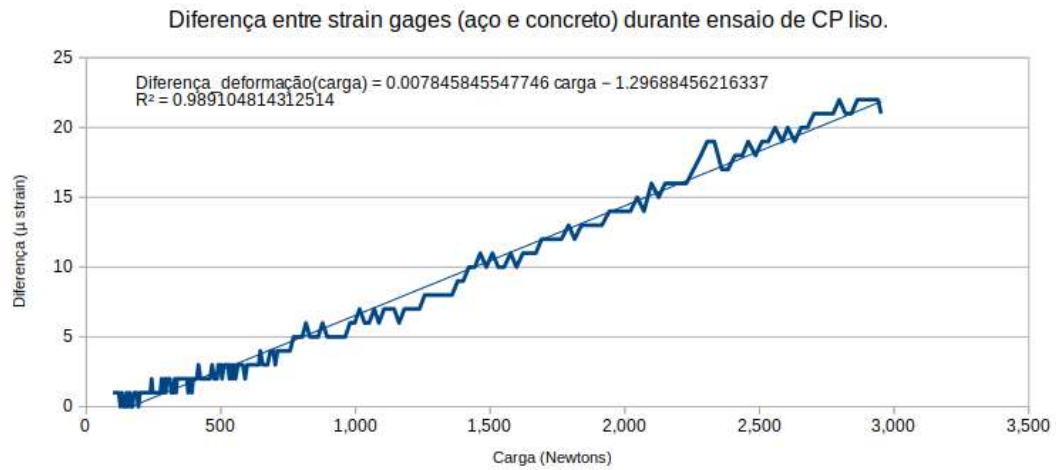


Figura 4.6 – Análise da diferença entre as deformações dos *strain gages* de aço e concreto. Fonte: O autor.

Outro experimento foi realizado com um corpo apresentando um entalhe de 12 mm, CP 226 (Figura 4.7).

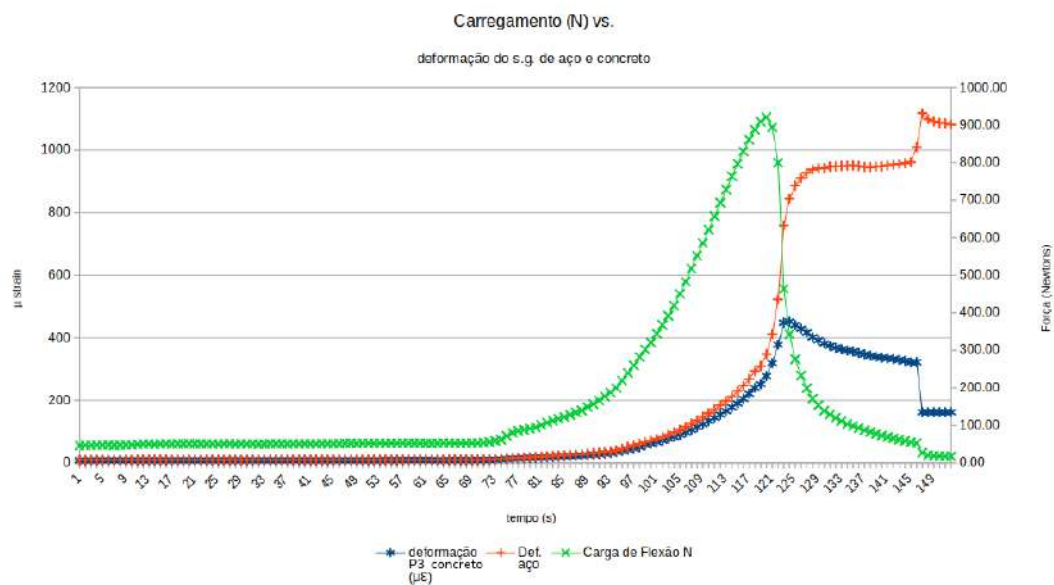


Figura 4.7 – Gráfico de linhas apresentando os valores de carregamento sincronizados com a deformação dos *strain gages* de aço e concreto (CP 226). Fonte: O Autor.

Uma vantagem do uso do SG de concreto foi sua maior área de grid, possibilitando integrar uma área maior de superfície. Considerando o GCA como um material heterogêneo, apresentando grãos entre 1 a 5 milímetros, diferente de um aço por exemplo, seria desejável observar o fenômeno da deformação de forma mais abrangente, e portanto integrando uma área maior do que a possível utilizando o SG utilizado para aço.

Dentre materiais considerados semi frágeis, o concreto possui ampla utilização, sendo bastante frequente o uso de SG, possibilitando que os dados ora produzidos possam ser comparados futuramente em outras pesquisas.

Por fim, o custo do SG de aço também foi superior ao do concreto.

Foi escolhido o SG para concreto, principalmente em função de sua maior área de integração, possibilitando obtenção de valores de deformação mais homogêneos e representativos para o caso da flexão do GCA.

4.3 Determinação de propriedades

Inicialmente a área do corpo de prova de formato largo (CPL) foi calculada (Figura 4.8) e foi obtido o valor de $1822,50 \text{ mm}^2$.

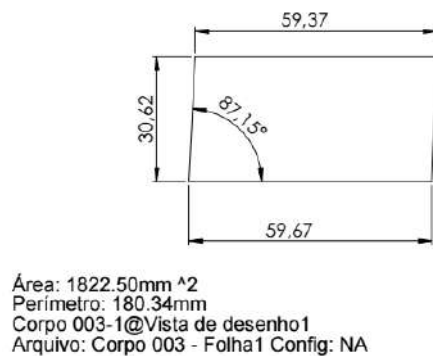


Figura 4.8 – Área do CP largo (003) utilizado para cálculo das propriedades mecânicas básicas do GCA. FONTE: o autor.

A partir dos dados do ensaio de compressão (subseção 3.3.5) realizado sobre o CPL foram obtidos valores de tensão (σ) e deformação (ϵ) (Tabela A.6), cujo comportamento é apresentado na Figura 4.9.

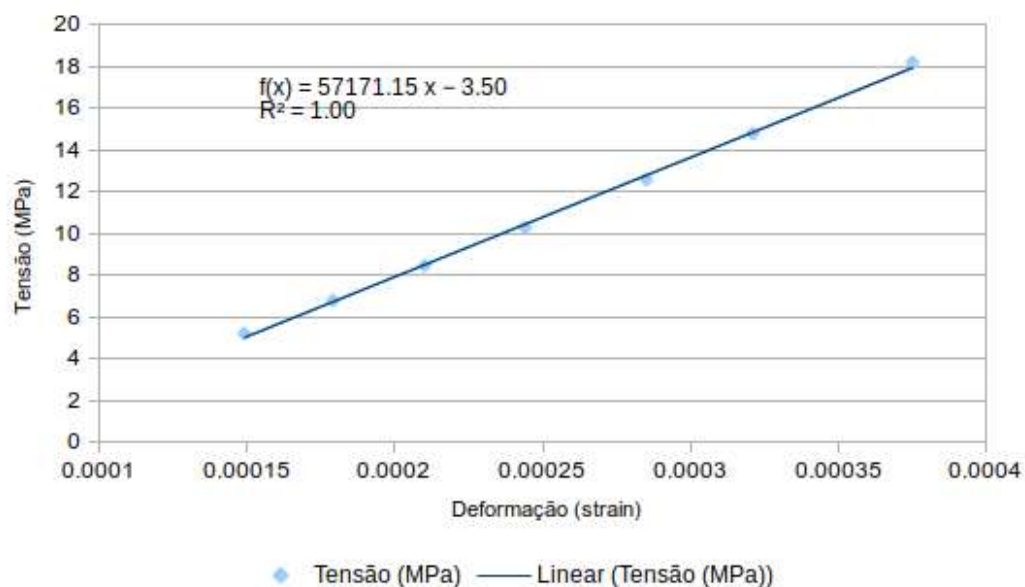


Figura 4.9 – Diagrama de Tensão x Deformação do granito cinza andorinha obtido por ensaio de compressão (CPL003).

O módulo de elasticidade (E) calculado para fins de referência neste trabalho foi de 57,2 GPa, para um coeficiente de determinação da regressão (R^2) de (0,998e59). O coeficiente de Poisson (ν) calculado para o GCA foi 0,211, através da Equação 3.5. Ambos foram calculados a partir dos dados apresentados na Tabela A.6.

A tensão de ruptura (σ_{rup}) dos CPs lisos são também consideradas propriedades do material, conforme descrito no tópico seguinte.

4.4 Determinação da tensão de ruptura

Um conjunto de 25 CPs foi separado para realizar ensaios e determinar a tensão de ruptura do material. Os dados referentes aos ensaios estão disponíveis na Tabela A.8 na seção A.3. Na Figura 4.10 apresenta um ensaio típico que representa a relação carga aplicada vs. extensão do barramento (δ) deste material.

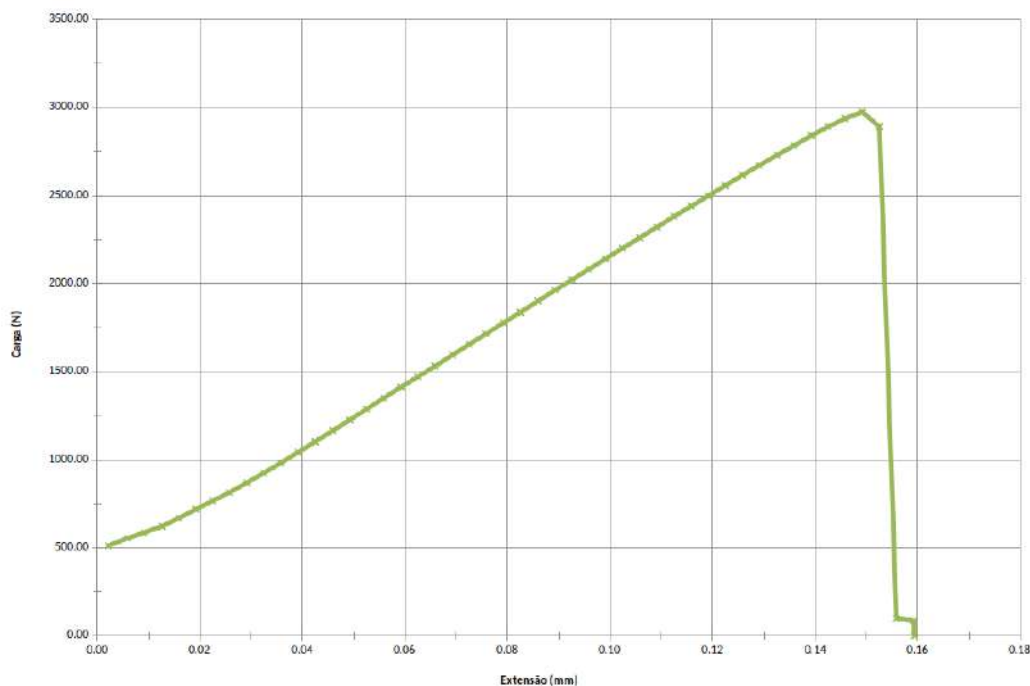


Figura 4.10 – Gráfico Extensão vs. Carga. Fonte: o autor

A dispersão da extensão do barramento é considerada natural em função da calibração da extensão ser feita manualmente. Pode-se observar que a maioria destes CPs receberam uma pré-carga de aproximadamente 250 N. A carga máxima aplicada deste lote atingiu um valor de 3008 ± 322 N e uma tensão de ruptura (σ_{rup}) de $(12,06 \pm 0,95)$ MPa (c.v. 7,92 %).

Um outro conjunto de CPs lisos (sem entalhe) foi separado e instrumentado um *strain gage* no sentido longitudinal para determinar a tensão de ruptura do material. Os dados referentes aos ensaios estão disponíveis na Tabela A.8 e foram resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de CPs lisos com *strain gage*.

CP	Alt.(H) (mm)	Esp.(b) (mm)	Carga máx. (N)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Tensão Ref. (MPa)	M.Young(E) (GPa)	λ_E $\times 10^{-8}$	λ_U $\times 10^{-8}$
cpliso_4668	30.98	31.61	4668.78	420	16.17	48.85	6.84	9.00
cpliso_4566	31.26	31.97	4566.89	411	15.35	47.58	7.00	9.00
cpliso_4356	31.77	30.96	4356.32	434	14.64	44.26	7.51	9.96
cpliso_4938	31.90	31.28	4938.66	464	16.30	44.80	7.37	9.40
cpliso_4416	31.26	31.81	4416.21	451	14.92	39.81	8.24	10.21
cpliso_3859	30.69	30.56	3859.02	399	14.08	48.64	7.44	10.34
cpliso_4442	31.26	31.81	4442.99	457	15.01	43.72	7.02	10.29
cpliso_4361	31.24	32.00	4361.25	418	14.67	45.54	6.69	9.58
cpliso_3544	30.71	30.60	3544.91	411	12.90	40.84	7.64	11.59
cpliso_2951	29.07	30.82	2951.72	299	11.91	48.34	8.01	10.13
cpliso_4572	31.17	31.68	4572.43	458	15.60	45.49	7.20	10.02
Média	31.03	31.37	4243.6	420	14.69	45.26	7.36	9.96
D.P.	0.75	0.55	572.5	46	1.32	3.04	0.48	0.73
C.V.	2.41%	1.75%	13.49%	10.95%	9.02%	6.71%	6.50%	7.33%

Na Tabela 4.1 apresentada constam, entre outras características, a deformação no momento da ruptura do CP (ϵ_{rup}) assinalada como "Deformação", o módulo de elasticidade (E) e os valores de *compliance* no final do regime elástico (λ_E) e por último o *compliance* último na ruptura (λ_U).

A obtenção sistemática destes valores com precisão motivou o desenvolvimento de um programa para organizar os dados obtidos da máquina de ensaio, sincronização com os dados da caixa de monitoramento dos *strain gage*, análise da região linear do comportamento tensão - deformação e identificação da *compliance* no final do regime elástico (λ_E). Estes programas tem sua lógica apresentada no Apêndice E.

A partir dos dados obtidos os valores da σ_{ref} foram avaliados estatisticamente e foram observados dois *outliers*, conforme os quadros *boxplot* apresentados na Figura 4.11

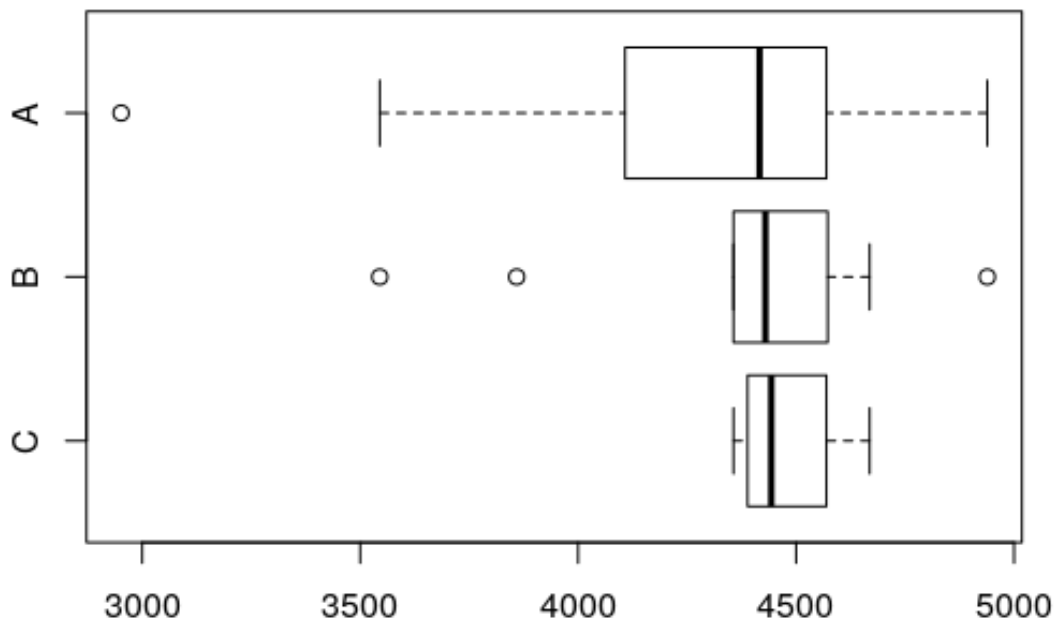


Figura 4.11 – Gráfico boxplot apresentando *outliers* dos dados de Carga máxima em CPs sem entalhe. Fonte: o autor.

A Figura 4.11 apresenta as indicações de quatro *outliers* que foram sucessivamente removidos (A e B), e a situação final desta amostra (C). Como resultado os valores médios das propriedades são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs sem entalhes.

Características e Propriedades	Valor méd.	Dev.Pad.	C.V.	Unidade
Altura (H)	31.27	0.24	0.77%	mm
Espessura (b)	31.69	0.35	1.11%	mm
Área (S)	991.01	7.92	0.80%	mm ²
Carga máxima (P)	4483.6	120.1	2.68%	N
Deformação na ruptura (ε)	436	20	4.55%	$\mu\varepsilon$
Tensão de ruptura (σ_{rup})	15.19	0.55	3.64%	MPa
Módulo de Young	45.04	2.92	6.48%	GPa
<i>Compliance</i> Linear (λ_E)	7.21	0.52	7.24%	$\mu\varepsilon/N$
<i>Compliance</i> ruptura (λ_E)	9.72	0.54	5.59%	$\mu\varepsilon/N$
Deslocamento máximo (δ)	0.0000626	0.0000029	4.58%	m
Flecha máxima (ν)	0.0000486	0.0000027	5.53%	m

Após os quatro CPs considerados *outliers* serem eliminados da análise, o c.v. das dimensões dos CPs ficou baixo (0,80%), demonstrando que pouca variação dos dados podem ser devidos à variação na geometria. O valor médio de tensão de ruptura foi (15,19 ± 0,55) MPa, portanto apresentando um coeficiente de variação de 2,91%, o que pode ser considerado um coeficiente de variação baixo e adequado para esta classe de material. A Figura 4.12 apresenta o gráfico *boxplot* da dispersão da tensão de ruptura dos CPs lisos sem a presença de *outliers*.

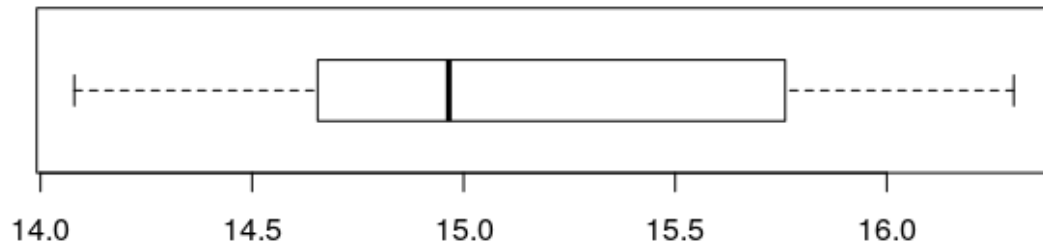


Figura 4.12 – *Boxplot* referente a tensão de ruptura (σ_{rup}) em flexão de quatro pontos dos CPs em flexão de quatro pontos.

Estes valores foram considerados compatíveis com outros trabalhos como Terra (2013) e Wonnacott e Wonnacott (1991b).

Terra (2013) encontrou valores de σ_{rup} de $(12,71 \pm 1,79)$ MPa, muito próximo dos valores obtidos inicialmente neste estudo.

Estes dados foram tratados pelo critério de exclusão de Chauvenet, utilizando como desvio relativo máximo 2,33 e foram encontrados percentuais de até 97%, não sendo indicado como *outliers* a ser excluído, conforme apresentado na Tabela A.8 na subseção A.4.1.

4.5 Estimativa da Tenacidade

Os valores médios dos raio na ponta do entalhe (ρ) nos CPs cortados com os discos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores aproximados dos raio na ponta do entalhe (ρ) obtidos para cada disco de abrasão utilizada.

Discos (T)	Raio (ρ)
0,2 mm	$(0,22 \pm 0,03)$ mm
0,3 mm	$(0,16 \pm 0,01)$ mm
0,5 mm	$(0,46 \pm 0,03)$ mm
1,4 mm	$(0,80 \pm 0,04)$ mm
2,4 mm	$(1,14 \pm 0,05)$ mm
3,2 mm	$(1,58 \pm 0,05)$ mm

Cabe observar que a espessura do disco de abrasão (T) 0,3 mm produz um raio menor que o disco de 0,2 mm. Este fato está relacionado à qualidade dos discos, à densidade e distribuição de diamantes nelas depositados. A discussão da eficiência dos discos foge ao escopo deste trabalho. Os dados referentes aos CPs entalhados com estes discos estão disponíveis na subseção A.4.3 e subseção A.4.4.

Foram realizados ensaios em seis CPs contendo entalhes de profundidade 9 mm utilizando os discos disponíveis. Neste experimento os CPs foram instrumentados com SG e foram

calculados os valores de K_{IC} de apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs com entalhe de 9 mm com vários raios no fundo do entalhe.

CP	Raio (ρ) (mm)	Alt.(H) (mm)	Esp.(b) (mm)	Ent.(a_0) (mm)	P_{max} (N)	Deform.(ε) ($\mu\varepsilon$)	σ_{ref} (MPa)	σ_{net} (MPa)	K_{Ic} (MPa· \sqrt{m})
cpsNe9_02	0.230	31.02	31.83	9.63	1516.6	324	5.20	10.94	1.025
cpsNe9_05	0.461	31.15	31.71	8.70	1731.3	356	5.91	11.37	1.077
cpsNe9_14	0.947	31.03	31.92	9.36	1751.5	370	5.99	12.28	1.153
cpsNe9_24	1.365	30.95	31.78	9.37	1777.7	370	6.13	12.62	1.183
cpsNe9_32	1.644	31.17	30.47	8.97	1509.8	374	5.36	10.55	0.998
Média		31.11	31.64	9.20	1657.39	359	5.72	11.55	1.09
Desv.Pad.		0.12	0.53	0.37	132.64	21	0.41	0.87	0.08
C.V.		0.39%	1.67%	4.01%	8.00%	5.75%	7.21%	7.57%	7.36%
Mín.		30.95	30.47	8.70	1509.83	324	5.20	10.55	1.00
Máx.		31.26	32.00	9.63	1777.69	374	6.13	12.62	1.18

Segundo Gómez, Guinea e Elices (2006), existe uma relação entre o raio na ponta do entalhe e Tenacidade à Fratura que se mantém enquanto o processo de falha por fratura for dominante. A partir de um determinado raio o processo de resistência a tensão passa a ser dominante, levando a falha por σ_{rup} antes da falha por K_{IC} .

A partir da Tabela 4.4 pode-se observar que a Tenacidade à Fratura referente ao CP de raio na ponta do entalhe 1,6 mm apresentou a menor resistência, e conseqüentemente um tenacidade também relativamente baixa. Foi então confeccionado o gráfico apresentado na Figura 4.13, onde este CP é separado em uma série própria.

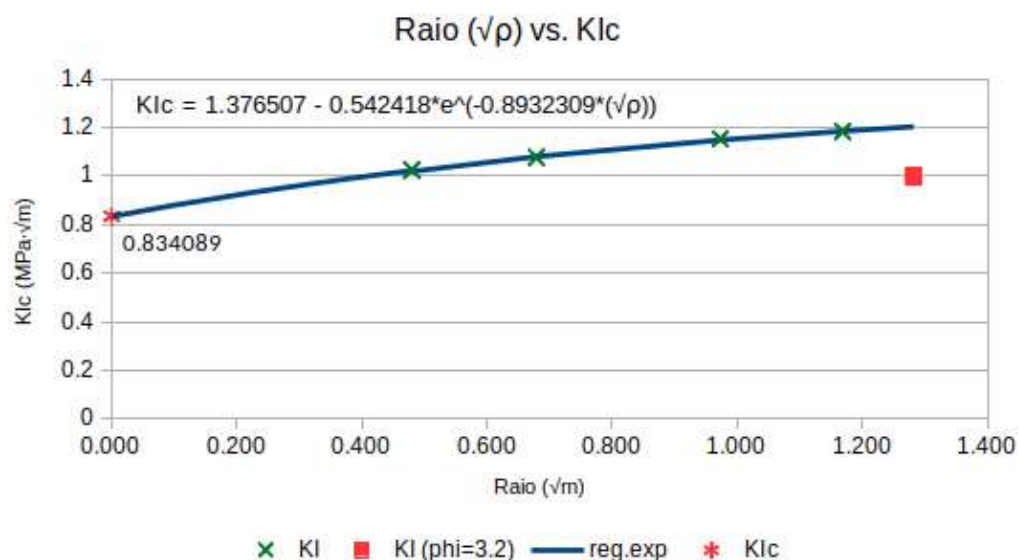


Figura 4.13 – Gráfico demonstrando a relação entre o raio na ponta do entalhe e a Tenacidade à Fratura.

Pode-se observar uma variação da tendência do disco mais espesso ($\rho=1,644$ mm), que pode ser explicado como um processo de falha por resistência a tensão (σ_{rup}). Os CPs entalha-

dos com discos mais finos foram considerados regidos pelo processo de falha por tenacidade à fratura (K_C).

O valor de K_{IC} foi estimado através de uma regressão exponencial (Equação 4.1) em $0,834 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$. Um resultado experimental mais preciso demandaria de uma tecnologia de cortes em granito mais finos e precisos, o que não estava disponível no momento desta pesquisa.

$$K_{Ic}(\rho) = 0.92801 \cdot e^{(0.23630 \cdot \sqrt{\rho})}, \quad (4.1)$$

Para verificar a condição do disco de espessura do disco de abrasão (T) 3,2 mm foi utilizada a Equação 4.2 da Teoria da Distância Crítica

$$\frac{\rho}{\ell_{ch}} < 1, \quad (4.2)$$

onde:

ρ raio na ponta do entalhe

ℓ_{ch} comprimento característico do material

a partir da qual, valores inferiores a 1 representam entalhes que se comportam como trinças. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Cálculo da validade dos raios de fundo do entalhe para assumir o comportamento de trinca.

T (mm)	ρ (mm)	$\frac{\rho}{\ell_{ch}}$ (mm)
0.2	0.203	0.175
0.5	0.300	0.259
1.4	0.758	0.654
2.4	1.135	0.979
3.2	1.556	1.342

De acordo com a Equação 4.2 o processo de falha predominante nos CPs com entalhes produzidos pelo disco de T 3,2 mm seria a falha por σ_c e não por K_{IC} .

A partir dos dados, excluindo o disco mais espesso, foi possível observar que existe uma relação direta entre o raio na ponta do entalhe e a tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca ($r = 0.96$; $p = 0.009$).

A propriedade tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca do Granito Cinza Andorinha foi estimada em $\approx 1,005 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

4.6 Avaliação da Tenacidade do entalhe em U - K^U

Os dados que possibilitaram o cálculo de K^U estão disponíveis nas Tabelas contidas nas Seções: A.4.3, A.4.4, A.4.5, A.4.6, A.4.7 do Apêndice A.

Os resultados foram feitos separadamente para os discos mais finos e para os discos mais espessos, e são apresentados a seguir.

4.7 Tenacidade dos discos finos

Os CPs cortados por discos de T 0,3 mm e 0,2 mm foram ensaiados e tiveram seus valores de K_C^U calculados através do critério de Gómez, Guinea e Elices (2006), e apresentaram também valores de K_{IC} calculados pela equação da MF (IRWIN; KIES; SMITH, 1958).

Entretanto, os valores de K_{tn} descritos por Pilkey (2008, p.110) somente cobrem as razões de $0.5 \leq t/r \leq 2.0$ e $2.0 \leq t/r \leq 20.0$. Como os discos de espessura do disco de abrasão menores produzem razões t/r fora destes intervalos, foram utilizadas as Equações 4.3, 4.4 e 4.5, desenvolvidas por Atem de Carvalho (forthcoming 2018a).

$$H/d_{1.11}(\rho/d) = 0.78571 \left(\frac{\rho}{d}\right)^{-0.45420}, \quad (4.3)$$

$$H/d_{1.22}(\rho/d) = 0.81714 \left(\frac{\rho}{d}\right)^{-0.47821}, \quad (4.4)$$

$$H/d_{1.43 \rightarrow 3.33}(\rho/d) = 0.85412 \left(\frac{\rho}{d}\right)^{-0.48225}, \quad (4.5)$$

conforme o gráfico apresentado na Figura 4.14

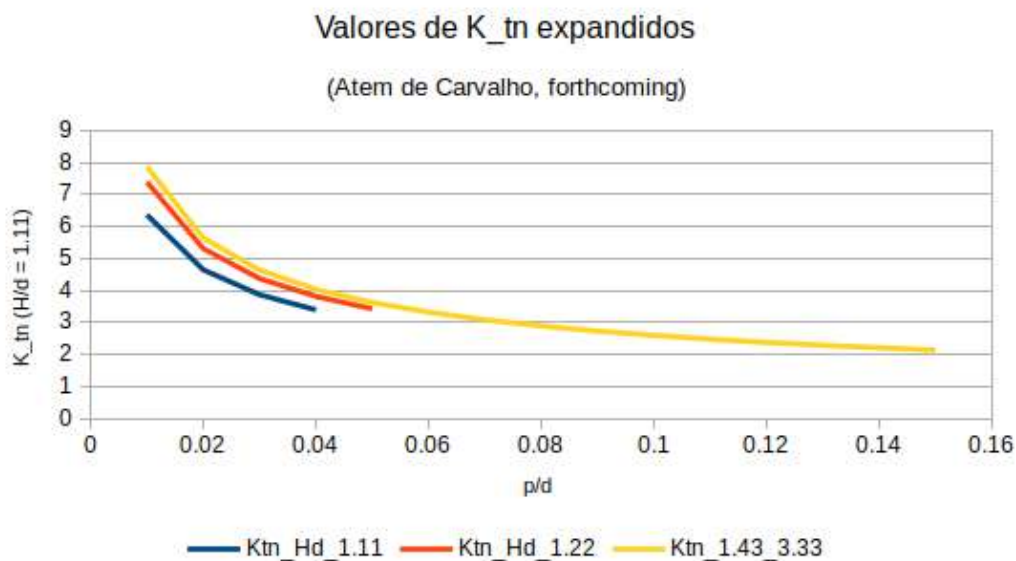


Figura 4.14 – Curvas extendidas de K_{tn} . Fonte: (Atem de Carvalho, forthcoming 2018a)

O gráfico da Figura 4.14 apresenta três curvas para cálculo de K_{tn} de espessuras mais finas que Pilkey (2008), sendo utilizada a Equação 4.5 nesta pesquisa.

4.8 Tenacidade dos discos finos

Os CPs cortados pelos discos mais finos utilizados nesta pesquisa foram ensaiados em separado em função da dificuldade no manuseio e na realização das medições, bem como em função de serem as melhores candidatas para obtenção de valores de K_C próximo ao verdadeiro.

4.8.1 Discos com espessura 0,3 mm

O disco de T 0,3 mm foi a que produziu entalhes mais precisos e de menor ρ ($\approx 0,17$ mm). Para medir este valor foi utilizado um *software* desenvolvido durante esta pesquisa (seção E.5). Um exemplo de entalhe produzido por este disco é apresentado na Figura 4.15.



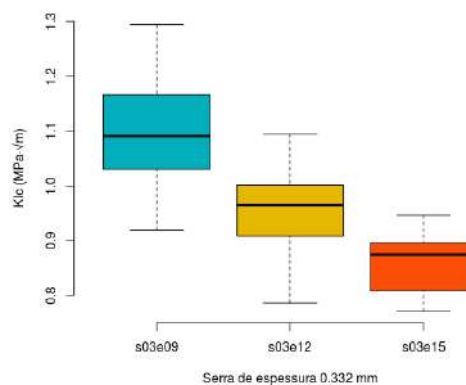
Figura 4.15 – Análise da foto do entalhe produzido no CP109 pelo disco de T 0,3 mm utilizando o *software* desenvolvido durante esta pesquisa. Fonte: o autor.

Um resumo dos valores de K_I deste disco foram dispostos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resumo dos valores calculados de K_I do disco de espessura 0,3 mm.

# cp	K_{Ic}	K_{Ic}	K_{Ic}
	$a_0 = 9mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 12mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 15mm$ (MPa·√m)
cp01	NA	1.007	0.804
cp02	0.919	0.964	0.917
cp03	0.967	0.927	0.788
cp04	1.196	1.036	0.882
cp05	1.006	1.056	0.925
cp06	1.049	0.896	0.773
cp07	1.086	0.806	0.812
cp08	1.278	0.943	0.770
cp09	1.127	0.866	0.870
cp10	1.096	0.946	0.880
cp11	1.103	0.996	0.901
cp12	1.237	0.922	0.869
cp13	1.166	1.051	0.823
cp14	1.106	0.786	0.892
cp15	Excl. 0.806	0.989	0.859
cp16	1.043	1.094	0.879
cp17	1.054	0.833	0.899
cp18	1.295	0.977	0.799
cp19	1.030	0.966	0.889
cp20	0.980	0.997	0.946
Média	1.096	0.953	0.859
Des.Pad.	0.106	0.083	0.053
C.V.	9.63%	8.76%	6.13%
Mín.	0.919	0.786	0.770
Máx.	1.295	1.094	0.946

Na Tabela 4.6 pode-se observar que um CP foi considerado defeituoso e não aproveitado (NA), e portanto não foi ensaiado. Outro CP, de número 15 ($a_0 = 9$ mm) foi ensaiado, analisado, porém apresentou um valor de K_{IC} que foi considerado como *outlier*. A dispersão dos valores de K_I obtidos pode ser avaliada através do gráfico de *Boxplot* (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Gráfico boxplot referente a distribuição do K_I do disco de T 0,3 mm

Formulando a hipótese de que os dados do K_I de cada profundidade sejam diferentes, foi realizado uma análise de variância (ANOVA), com os dados da Tabela 4.6. Através deste teste pôde-se afirmar que as médias dos valores de K_I das profundidades são iguais com uma significância de 0,1 % (Figura 4.17)

```
> summary(KIc_03.anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
KIc_03$entalhe  2  0.5391  0.26956    39.6 2.22e-11 ***
Residuals      55  0.3744  0.00681
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
2 observations deleted due to missingness
```

Figura 4.17 – Teste ANOVA referente ao K_{IC} do disco de T 0,3 mm

Adicionalmente foi realizado um teste de Tukey para evidenciar possíveis diferenças entre as profundidades, como pode ser observado na Figura 4.18.

```
> TukeyHSD(KIc_03.anova)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = KIc_03$kiic ~ KIc_03$entalhe)

$`KIc_03$entalhe`
              diff          lwr          upr          p adj
s03e12-s03e09 -0.1435514 -0.2081160 -0.07898690 0.0000051
s03e15-s03e09 -0.2375560 -0.3021206 -0.17299150 0.0000000
s03e15-s03e12 -0.0940046 -0.1568471 -0.03116209 0.0019282
```

Figura 4.18 – Teste de Tukey referente ao K_{IC} do disco de espessura 0.332

Os valores de K_I foram plotados usando a distribuição Weibull, Figura 4.8.1.

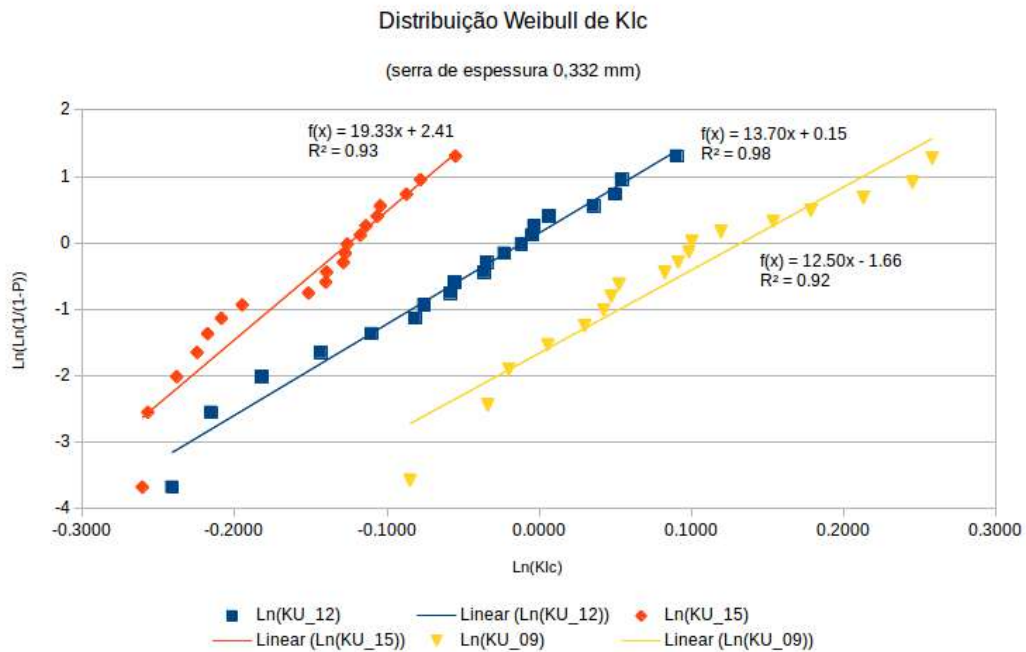


Figura 4.19 – Distribuição de Weibull para as três profundidades do disco 0,332 mm.

Como resultados da análise usando a distribuição de Weibull foram obtidas os resultados da Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resumo da análise utilizando a distribuição de Weibull para o disco 0,3 mm.

Parâmetro	$a_0 = 9mm$	$a_0 = 12mm$	$a_0 = 15mm$
Estimador da taxa de transformação ($\hat{\beta} = m$)	12.50	13.70	19.33
Estimador do coeficiente linear ($\hat{\alpha}$)	-1.66	0.15	2.41
FIT generalizado característico para entalhes em U (K_0^U)	1.14	0.99	0.88
Equação	$y = 12.5x + (-1.66)$	$y = 13.7x + (0.14)$	$y = 19.33x + (2.41)$
Coefficiente de determinação da regressão (R^2)	0.9236	0.9795	0.9294

Após este tratamento foi calculado o valor de K^U deste disco, que são apresentados no subseção A.4.3 e resumidamente na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resumo dos valores de K^U obtidos nos ensaios de CPs com entalhes produzidos com pelo disco de T 0,3 mm.

# cp	K_c^U	K_c^U	K_c^U
	$a_0 = 9mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 12mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 15mm$ (MPa·√m)
cp01	NA	1.071	0.845
cp02	1.003	1.025	0.967
cp03	1.057	0.986	0.831
cp04	1.298	1.103	0.930
cp05	1.100	1.123	0.976
cp06	1.145	0.950	0.814
cp07	1.177	0.854	0.855
cp08	1.386	1.004	0.855
cp09	1.227	0.921	0.916
cp10	1.183	1.003	0.929
cp11	1.200	1.059	0.950
cp12	1.347	0.978	0.917
cp13	1.269	1.118	0.869
cp14	1.213	0.835	0.942
cp15	Excl. 0.878	1.051	0.906
cp16	1.133	1.165	0.927
cp17	1.139	0.885	0.948
cp18	1.409	1.037	0.843
cp19	1.117	1.029	0.935
cp20	1.063	1.063	0.998
Média	1.193	1.013	0.908
Dev.Pad.	0.114	0.090	0.053
C.V.	9.57%	8.84%	5.82%
Mín.	1.003	0.835	0.814
Máx.	1.409	1.165	0.998

Gómez, Guinea e Elices (2006, p. 101) em seu trabalho sugere que os valores de K^U devem convergir para o K_I do material e pode-se perceber que ao aumentar o valor a_0 os valores de K^U tendem ao valor esperado da propriedade do material estimada inicialmente ($K_I = 0,9281 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$), conforme pode ser observado na Figura 4.20

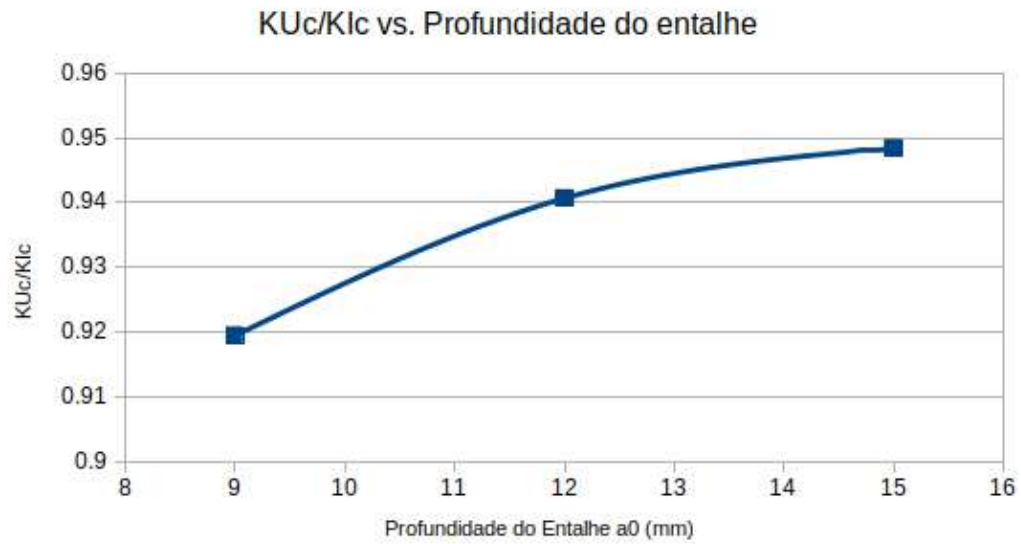


Figura 4.20 – Razão K_{Uc}/K_{Ic} para as três profundidades de entalhe do disco de T 0,3 mm.
Fonte: o autor.

4.8.2 Disco com espessura 0,2 mm

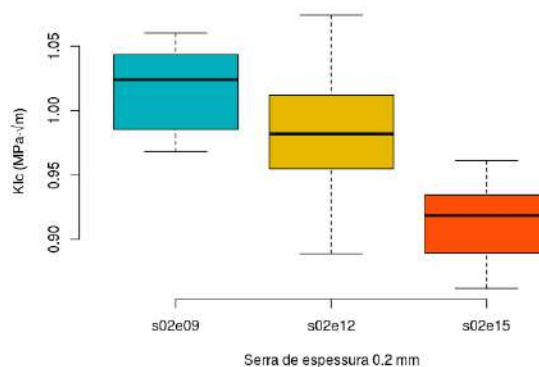
Os valores de K_I deste disco são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resumo dos valores de K_{IC} obtidos nos ensaios de CPs cortados com o disco de espessura 0,2 mm nas três profundidades de entalhe (a_0) estudadas.

# cp	K_{Ic}	K_{Ic}	K_{Ic}
	$a_0 = 9mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 12mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 15mm$ (MPa·√m)
cp01	1.024	0.889	0.888
cp02	0.986	0.930	0.914
cp03	1.060	0.981	0.935
cp04	0.968	Excl. 0.836	0.927
cp05	1.044	1.028	0.880
cp06	0.984	0.955	0.909
cp07	1.031	0.952	0.919
cp08	1.043	0.988	Excl. 0.772
cp09	0.968	1.043	Excl. 0.774
cp10	1.049	0.926	0.918
cp11	Excl. 0.916	0.958	0.923
cp12	1.055	0.919	0.862
cp13	1.015	0.992	0.961
cp14	1.009	1.074	0.941
cp15	1.036	1.007	0.934
cp16	1.003	0.972	0.882
cp17	1.044	0.974	0.891
cp18	1.038	1.012	0.945
cp19	1.028	0.983	0.884
cp20	0.985	Excl. 0.854	0.920
cp21	1.053	1.035	0.918
cp22	1.018	0.989	0.952
cp23	Excl. 0.930	Excl. 0.870	Excl. 0.831
cp24	0.971	1.020	NA
cp25	0.979	0.965	NA
média	1.017	0.982	0.915
stdev	0.031	0.044	0.027
c.v.	3.02%	4.52%	2.91%
mín	0.968	0.889	0.862
máx	1.060	1.074	0.961

Foram encontrados estatisticamente alguns *outliers* neste lote de GCA, conforme podem ser observados na Tabela 4.9. A dispersão dos valores de K_{IC} obtidos pode ser avaliada através do gráfico de *Boxplot* Figura 4.21

Figura 4.21 – Gráfico boxplot referente a distribuição do K_{IC} do disco de espessura 0,332 mm



Os valores de K_{IC} foram plotados usando a distribuição Weibull, Figura 4.8.2.

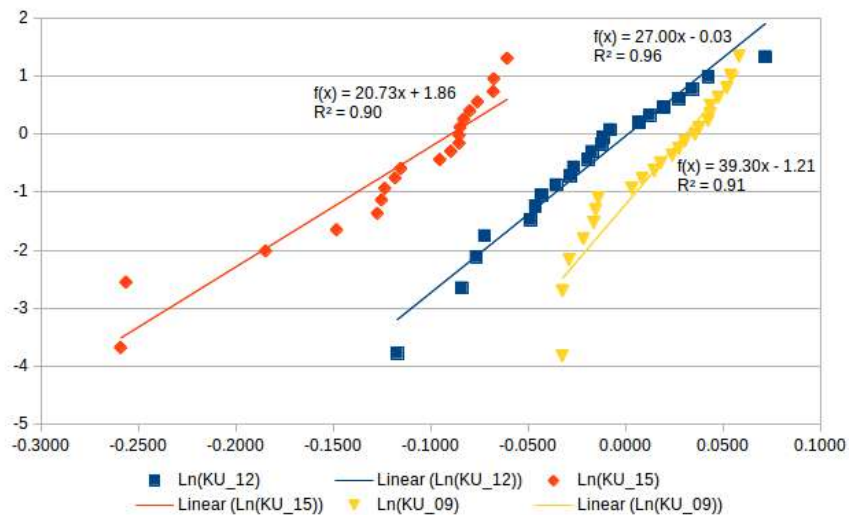


Figura 4.22 – Distribuição de Weibull para as três profundidades do disco 0,2 mm.

Como resultados da análise usando a distribuição de Weibull foram obtidas os resultados da Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resumo da análise utilizando a distribuição de Weibull para as três profundidades do disco 0,2 mm.

Parâmetro	$a_0 = 9mm$	$a_0 = 12mm$	$a_0 = 15mm$
Estimador da taxa de transformação ($\hat{\beta} = m$)	39.30	27.00	20.73
Estimador do coeficiente linear ($\hat{\alpha}$)	-1.21	-0.03	1.86
FIT generalizado característico para entalhes em U (K_0^U)	1.03	1.00	0.91
Equação	$y = 39.3x - 1.21$	$y = 27x - 0.03$	$y = 20.72x + 1.86$
Coefficiente de determinação da regressão (R^2)	0.9122	0.9618	0.9039

Os valores de K^U (GÓMEZ; GUINEA; ELICES, 2006) são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resumo dos valores de K_C^U obtidos nos ensaios de CPs com entalhes produzidos com pelo disco de T 0,2 mm.

# cp	K^U		
	$a_0 = 9mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 12mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 15mm$ (MPa·√m)
cp1	1.123	0.950	0.941
cp2	1.081	0.985	0.967
cp3	1.157	1.046	0.989
cp4	1.066	0.892	0.982
cp5	1.149	1.094	0.933
cp6	1.080	1.020	0.963
cp7	1.134	1.013	0.972
cp8	1.141	1.053	Excl. 0.817
cp9	1.054	1.116	Excl. 0.819
cp10	1.153	0.993	0.971
cp11	1.015	1.024	0.978
cp12	1.167	0.987	0.912
cp13	1.118	1.063	1.001
cp14	1.097	1.151	0.996
cp15	1.134	1.076	0.990
cp16	1.103	1.042	0.936
cp17	1.149	1.042	0.944
cp18	1.145	1.084	1.001
cp19	1.125	1.053	0.935
cp20	1.085	0.913	0.975
cp21	1.157	1.106	0.974
cp22	1.119	1.061	1.008
cp23	1.041	0.934	0.879
cp24	1.107	1.094	NA
cp25	1.052	1.030	NA
Méd.	1.110	1.033	0.964
Dev.P.	0.041	0.064	0.033
C.V.	3.73%	6.20%	3.39%
Mín.	1.015	0.892	0.879
Máx.	1.167	1.151	1.008

Tabela 4.12 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios dos discos mais finos (0.2 e 0.3 mm).

Disco	Ent (t)	Raio (ρ) (mm)	D.P. (mm)	C.V.	Entalhe (mm)	D.P. (mm)	C.V.	P_{rup} (N)	D.P. (N)	C.V.	σ_{nom} (MPa)	D.P. (MPa)	C.V.
0.2	9	0.253	0.011	4.29%	9.244	0.375	4.05%	1564.3	73.2	4.68%	5.3	0.2	4.48%
0.2	12	0.195	0.007	3.76%	12.174	0.348	2.86%	1187.1	64.0	5.39%	4.0	0.2	5.25%
0.2	15	0.203	0.009	4.47%	15.250	0.411	2.69%	846.6	48.2	5.69%	2.9	0.2	5.57%
0.33	9	0.171	0.003	2.04%	9.213	0.348	3.78%	1510.9	142.8	9.45%	5.7	0.5	9.52%
0.33	12	0.151	0.011	7.18%	12.078	0.366	3.03%	1064.4	107.7	10.12%	3.9	0.4	10.34%
0.33	15	0.159	0.009	5.77%	15.095	0.272	1.80%	723.7	43.2	5.97%	2.7	0.2	6.56%

4.8.3 Análise do K^U dos discos 1,4; 2,4 e 3,2 mm

A Tabela 4.13 apresenta um resumo da média dos valores medidos de raio na ponta do entalhe (ρ), profundidade inicial do entalhe (a_0), carga máxima aplicada (P_{max}), e dos valores calculados de K^U de todas os discos utilizadas.

Tabela 4.13 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios dos discos (1.4, 2.4 e 3.2 mm).

Disco	Ent (t)	Raio (ρ) (mm)	D.P. (mm)	C.V.	Entalhe (mm)	D.P. (mm)	C.V.	P_{rup} (N)	D.P. (N)	C.V.	σ_{nom} (MPa)	D.P. (MPa)	C.V.
1.4	9	0.841	0.018	2.20%	9.132	0.147	1.61%	1729.8	78.4	4.53%	11.8	0.6	4.68%
1.4	12	0.794	0.022	2.79%	12.077	0.231	1.91%	1291.3	64.8	5.02%	11.8	0.6	4.77%
1.4	15	0.777	0.031	3.97%	14.535	0.198	1.36%	1004.7	37.5	3.73%	12.2	0.5	4.13%
2.4	9	1.183	0.041	3.43%	8.932	0.190	2.13%	1310.5	57.6	4.40%	10.8	0.4	3.89%
2.4	12	1.119	0.038	3.43%	12.039	0.153	1.27%	907.4	50.8	5.60%	10.4	0.6	5.57%
2.4	15	1.135	0.045	3.96%	15.403	0.170	1.10%	680.3	36.7	5.40%	11.8	0.8	6.37%
3.2	9	1.581	0.062	3.91%	8.877	0.277	3.12%	1438.5	99.5	6.92%	9.9	0.7	7.36%
3.2	12	1.608	0.020	1.22%	11.799	0.210	1.78%	1067.3	27.2	2.55%	10.0	0.2	2.24%
3.2	15	1.556	0.046	2.96%	14.402	0.194	1.35%	787.4	15.5	1.97%	9.9	0.2	2.16%

Cabe observar que os valores de K_{IC} para os Discos de espessura 0,2 e 0,33 mm foram significativamente menores que a resistência observada nos discos de espessura 1,4; 2,4 e 3,2 mm.

Diferentemente, os valores calculados do coeficiente de variação (c.v.) foram razoavelmente pequenos, inferiores a 10 % na maioria dos casos, com ressalva para o disco de espessura 0,33 mm, onde atingiu-se um c.v. de 10,34 %. Esta variação provavelmente deveu-se ao domínio da técnica de corte e a imperfeição na forma de um dente encontrada nesta disco, levando à um c.v. maior em a_0 , que por sua vez determinou uma variação na P_{max} e σ_{rup} .

4.9 Tenacidade aparente de entalhes em U

Os valores de K^U foram obtidos a partir do cálculo de fator concentrador de tensão (K_t), considerando portanto o valor do raio na ponta do entalhe (ρ). Os valores dos discos de 1,4; 2,4 e 3,2 mm encontram-se listados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs com entalhes.

Disco	Ent (t)	Raio (ρ) (mm)	D.P. (mm)	C.V.	Entalhe (mm)	D.P. (mm)	C.V.	P_{rup} (N)	D.P. (N)	C.V.	σ_{nom} (MPa)	D.P. (MPa)	C.V.	KIc (MPa \sqrt{m})	D.P. (MPa \sqrt{m})	C.V.
1.4	9	0.841	0.018	2.20%	9.132	0.147	1.61%	1729.8	78.4	4.53%	11.8	0.6	4.68%	1.2	0.1	4.65%
1.4	12	0.794	0.022	2.79%	12.077	0.231	1.91%	1291.3	64.8	5.02%	11.8	0.6	4.77%	1.1	0.1	4.72%
1.4	15	0.777	0.031	3.97%	14.535	0.198	1.36%	1004.7	37.5	3.73%	12.2	0.5	4.13%	1.1	0.0	4.30%
2.4	9	1.183	0.041	3.43%	8.932	0.190	2.13%	1310.5	57.6	4.40%	10.8	0.4	3.89%	1.1	0.0	3.84%
2.4	12	1.119	0.038	3.43%	12.039	0.153	1.27%	907.4	50.8	5.60%	10.4	0.6	5.57%	1.0	0.1	5.54%
2.4	15	1.135	0.045	3.96%	15.403	0.170	1.10%	680.3	36.7	5.40%	11.8	0.8	6.37%	1.0	0.1	7.16%
3.2	9	1.581	0.062	3.91%	8.877	0.277	3.12%	1438.5	99.5	6.92%	9.9	0.7	7.36%	1.1	0.1	7.18%
3.2	12	1.608	0.020	1.22%	11.799	0.210	1.78%	1067.3	27.2	2.55%	10.0	0.2	2.24%	1.0	0.0	2.25%
3.2	15	1.556	0.046	2.96%	14.402	0.194	1.35%	787.4	15.5	1.97%	9.9	0.2	2.16%	0.9	0.0	2.03%

A variação no valor de K^U entre as três discos e três profundidades de entalhe foi considerada pequena, apresentando um coeficiente de variação máximo de 7,18 % nos CPs com profundidade da trinca de 15 mm no disco de espessura 2,4 mm. A variação de K^U é apresentada na Figura 4.23.

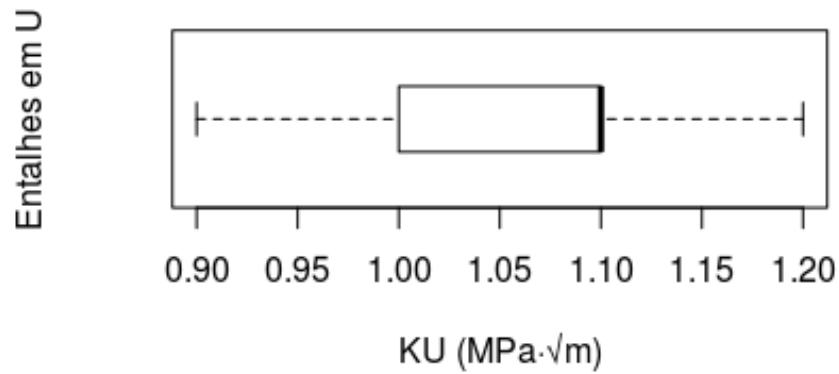


Figura 4.23 – *Boxplot* referente à variação do FIT generalizado para entalhes em U

Os ensaios apresentaram um c.v. máximo de 7,16% no entalhe de 15 mm do disco de 2,4 mm de espessura.

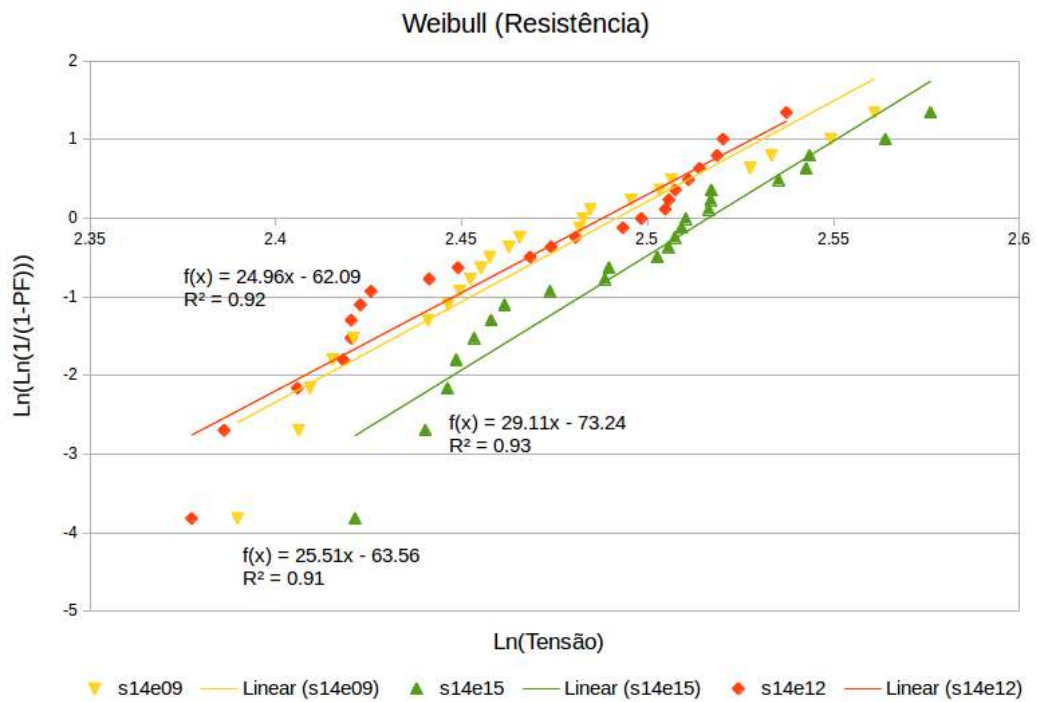


Figura 4.24 – Probabilidade de resistência a fratura Weibull do disco de espessura 1,4 mm

O módulo de Weibull (m) e a tensão característica (σ_0) da disco de espessura 1,4 mm apresentam valores semelhantes entre as várias profundidades, conforme esperado (Tabela 4.15).

Tabela 4.15 – Valores aproximado em milímetros dos raios (ρ) obtidos para cada disco utilizado.

Parâmetro	$a = 09mm$	$a = 12mm$	$a = 15mm$
Coef. Ang.	25,51 mm	24,96 mm	29,11 mm
Coef. Lin.	-63,56 mm	-62,09 mm	-73,24 mm
Módulo m	25,51	24,96	29,11
R^2	0,91 mm	0,92 mm	0,93 mm
σ_0	12,08 mm	12,04 mm	12,38 mm

4.10 Tenacidade Aparente dos discos espessos

Os CPs cortados com os discos de T 1,4; 2,4 e 3,2 mm foram testadas tenacidade foi estimada usando o critério de aproximação por FIT generalizado para entalhes em U (K^U), visando comparar seus resultados e obter o valor de K_{IC} para o disco de T 3,2 mm.

4.10.1 Discos com espessura 1,4 mm

Os valores de K^U dos CPs do disco de espessura 1,4 mm, para as profundidades pesquisadas, é apresentada na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Valores da K^U dos CPs entalhados com o disco de espessura 1,4 mm

# cp	K^U	K^U	K^U
	$a_0 = 9mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 12mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 15mm$ (MPa·√m)
cp01	1.30	1.03	1.10
cp02	1.27	1.07	1.10
cp03	1.19	1.18	1.08
cp04	1.18	1.05	1.11
cp05	1.25	1.13	1.08
cp06	1.19	1.10	1.03
cp07	1.22	1.08	1.09
cp08	1.11	1.08	1.04
cp09	1.14	1.17	1.01
cp10	1.15	1.16	1.12
cp11	1.13	1.18	1.06
cp12	1.16	1.07	0.99
cp13	1.19	1.03	1.03
cp14	1.19	1.07	1.09
cp15	1.24	1.13	1.03
cp16	1.22	1.16	1.09
cp17	1.17	1.16	1.15
cp18	1.28	1.17	1.17
cp19	1.20	1.09	1.12
cp20	1.31	1.20	1.03
cp21	1.23	1.14	1.05
cp22	1.22	1.15	1.01
cp23	1.13	1.18	1.09
média	1.20	1.12	1.07
stdev	0.06	0.05	0.05
c.v.	4.65%	4.72%	4.30%
mín	1.11	1.03	0.99
máx	1.31	1.20	1.17

Cabe observar que neste disco não foram encontrados *outliers* pelo critério de exclusão de Chauvenet conforme descrito por DALLY e RILEY (2005).

A dispersão do K^U deste disco pode ser descrita através da Figura 4.25.

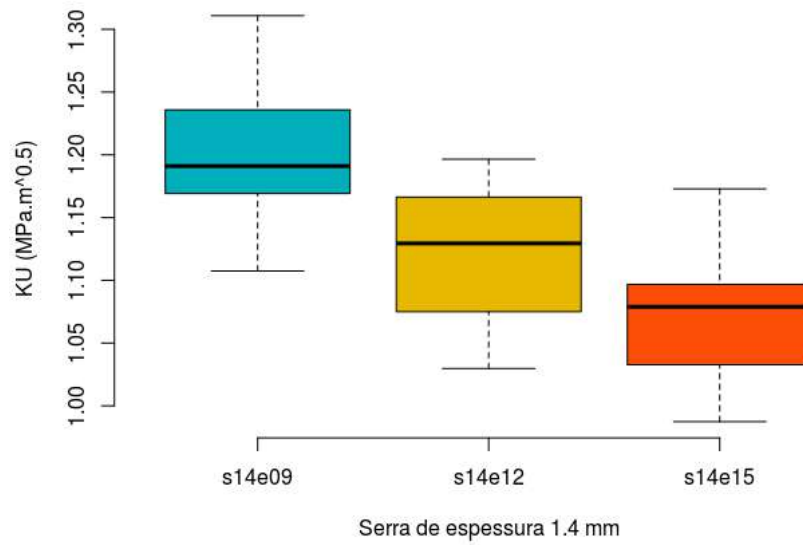


Figura 4.25 – Boxplot referente à variação do K^U do disco de espessura 1,4 mm.

Utilizando a distribuição de Weibull foi possível obter o gráfico apresentado na Figura 4.26, e os parâmetros apresentados na Tabela 4.17.

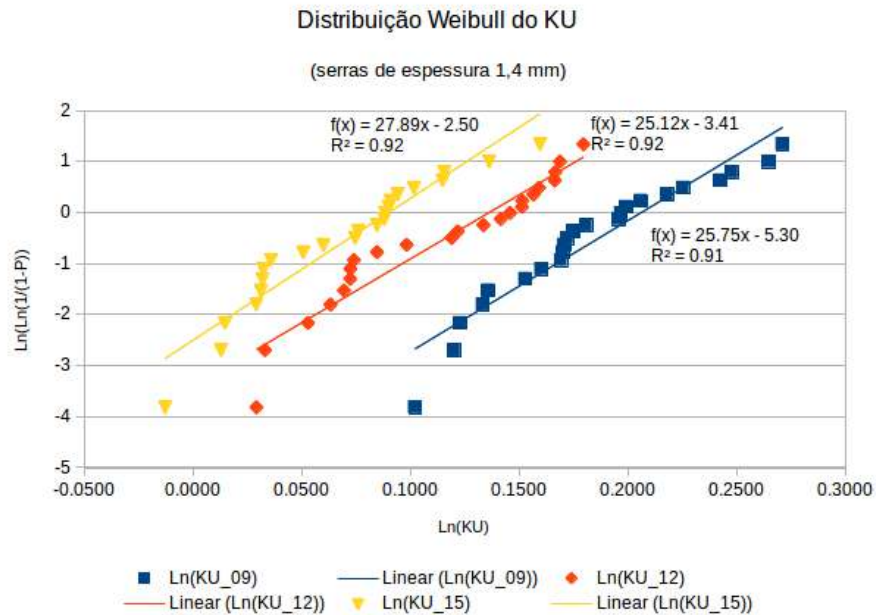


Figura 4.26 – Gráfico de K^U do disco de espessura 1,4 mm na distribuição Weibull.

Tabela 4.17 – Análise distribuição de Weibull do K^U nas três profundidades do disco de espessura 1,4 mm.

Parâmetro	$a_0 = 9mm$	$a_0 = 12mm$	$a_0 = 15mm$
estimador da taxa de transformação ($\hat{\beta} = m$)	25.75	25.12	27.89
estimador do coeficiente linear ($\hat{\alpha}$)	-5.30	-3.41	-2.50
FIT generalizado característico para entalhes em U (K_0^U)	1.23	1.15	1.09
Equação	$y = 25.74x + (-5.3)$	$y = 25.12x + (-3.42)$	$y = 27.88x + (-2.51)$
coeficiente de determinação da regressão (R^2)	0.9128	0.9171	0.9215

Dentre os parâmetros da distribuição de Weibull obtidos (Tabela 4.17) o módulo de Weibull (m) foram considerados altos, indicando uma boa estabilidade do modelo, e o FIT generalizado característico para entalhes em U (K_0^U) foram considerados semelhantes, com um coeficiente de variação de 6% entre as profundidades.

No gráfico (Figura 4.26) a reta de regressão dos valores de K^U apresenta boa concordância, com alguns *outliers* nas extremidades, que poderiam ser desconsiderados.

Os valores de K^U podem ser considerados estatisticamente semelhantes se avaliados pelo método ANOVA com um nível de significância de aproximadamente inferior à 0,1 %.

Formulando a hipótese de que os dados de K^U de cada profundidade sejam diferentes, foi realizado uma análise de variância (ANOVA), com os dados da Tabela 4.16. Através deste teste pôde-se afirmar que as médias dos valores de K^U das profundidades são diferentes com uma confiabilidade de 4,39 %.

A partir destes valor foi possível estimar o valor da tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca (K_{IC}) através da Equação 4.6 proposta por Gómez, Guinea e Elices (2006).

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{4 \cdot (K_c^U)^2 - \pi \cdot \rho \cdot \sigma_{rup}^2}{4}}, \quad (4.6)$$

onde:

K_{IC} tenacidade à fratura do modo I de abertura de trinca

K_C^U FIT generalizado crítico para entalhes em U

ρ raio na ponta do entalhe

σ_{rup} tensão de ruptura

Os valores calculados utilizando a Equação 4.6 são apresentados na Tabela 4.18, considerando a σ_{rup} de $\approx 15,14$ MPa.

Tabela 4.18 – Valores obtidos de K_{IC} dos CPs com entalhes de 9; 12 e 15 mm com o disco de T 1,4 mm.

# cp	K_{Ic}	K_{Ic}	K_{Ic}
	$a_0 = 9$ mm (MPa·√m)	$a_0 = 12$ mm (MPa·√m)	$a_0 = 15$ mm (MPa·√m)
	1.242	0.955	1.026
	1.212	1.004	1.032
	1.120	1.117	1.008
	1.116	0.984	1.049
	1.190	1.060	1.006
	1.119	1.035	0.972
	1.153	1.007	1.026
	1.037	1.005	0.966
	1.077	1.104	0.946
	1.073	1.098	1.050
	1.062	1.120	0.992
	1.099	1.005	0.916
	1.120	0.961	0.961
	1.127	0.999	1.028
	1.181	1.068	0.965
	1.153	1.093	1.023
	1.107	1.103	1.081
	1.221	1.111	1.103
	1.134	1.022	1.052
	1.253	1.137	0.965
	1.168	1.077	0.989
	1.157	1.088	0.946
	1.058	1.122	1.026
Média	1.138	1.055	1.006
Dev.Pad.	0.059	0.057	0.046
C.V.	5.2%	5.4%	4.6%
Mín	1.037	0.955	0.916
Máx	1.253	1.137	1.103

Os ensaios apresentaram valores de K_{IC} próximos da propriedade do material estimada, com tendência de diminuição em função da a_0 . O c.v. foi considerado baixo, corroborando com a baixa dispersão dos resultados neste disco. O erro foi calculado em Equação 4.7

$$erro\% = \frac{0.92801 - 1.138}{0.92801} = 22.63\% , \quad (4.7)$$

A partir dos dados de K_{IC} estimados foi traçado o gráfico comparativo entre a tenacidade à fratura e o ρ adimensionado pelo ℓ_{ch} Figura 4.27

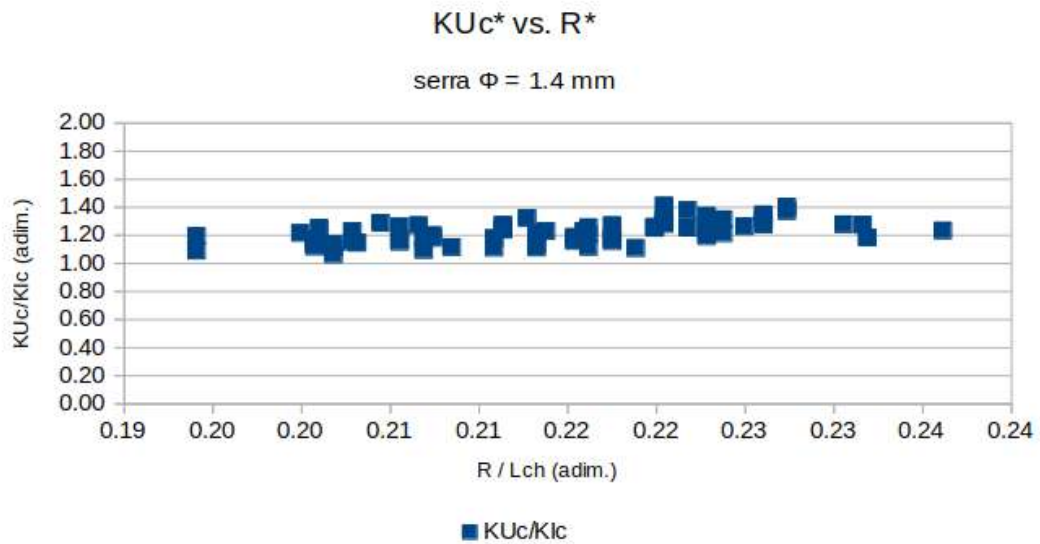


Figura 4.27 – Gráfico entre K_{Ic} estimado adimensional pelo K_{Ic} vs. Raio do fundo do entalhe adimensionado pelo comprimento característico para o disco de T 1,4 mm. Fonte: o autor

A partir do gráfico (Figura 4.27) pode-se observar uma tendência para o valor de K_{IC} medido inicialmente nesta pesquisa ($0,928 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$), acompanhando o decréscimo de ρ .

4.10.2 Disco com espessura 2,4 mm

A Tabela 4.19 apresenta a K^U dos CPs do disco de T 2,4 mm.

Tabela 4.19 – Valores da K^U dos CPs entalhados pelo disco de T 2,4 mm

# cp	K^U		
	$a_0 = 9mm$ ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	$a_0 = 12mm$ ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	$a_0 = 15mm$ ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
1	1.13	Excl. 1.18	1.09
2	1.16	0.98	NA
3	Excl. 1.26	Excl. 1.23	1.13
4	1.16	1.01	1.09
5	Excl. 1.24	0.94	1.15
6	1.13	Excl. 0.80	1.10
7	1.12	0.90	1.06
8	1.05	1.02	0.99
9	1.07	0.91	1.11
10	1.05	0.98	1.02
11	1.08	1.03	1.08
12	1.06	1.01	1.05
13	1.04	1.04	0.99
14	1.02	0.94	Excl. 0.86
15	1.11	0.99	1.04
16	1.09	0.95	0.95
17	1.10	0.96	1.04
18	1.05	0.90	0.98
19	1.08	Excl. 0.67	0.96
20	1.14	1.02	0.96
21	1.12	0.93	1.05
22	1.12	1.09	Excl. 0.78
23	1.07	0.97	0.93
24	1.02	1.01	0.94
25	1.13	1.10	1.05
26	N.U.	1.00	N.U.
média	1.09	0.99	1.04
stdev	0.04	0.05	0.06
c.v.	3.84%	5.54%	6.26%
mín	1.02	0.90	0.93
máx	1.16	1.10	1.15

Através dos critérios de exclusão (DALLY; RILEY, 2005; TUKEY, 1949) descritos na subseção 3.3.10, foram excluídos da análise os CPs sinalizados na Tabela com a anotação "Exc.". Os estatísticos apresentados não consideram os valores excluídos. A profundidade de 15 mm apresentou o maior c.v. entre as profundidades analisadas.

A dispersão do K^U deste disco pode ser descrita através do gráfico de *BoxPlot* apresentado na Figura 4.28.

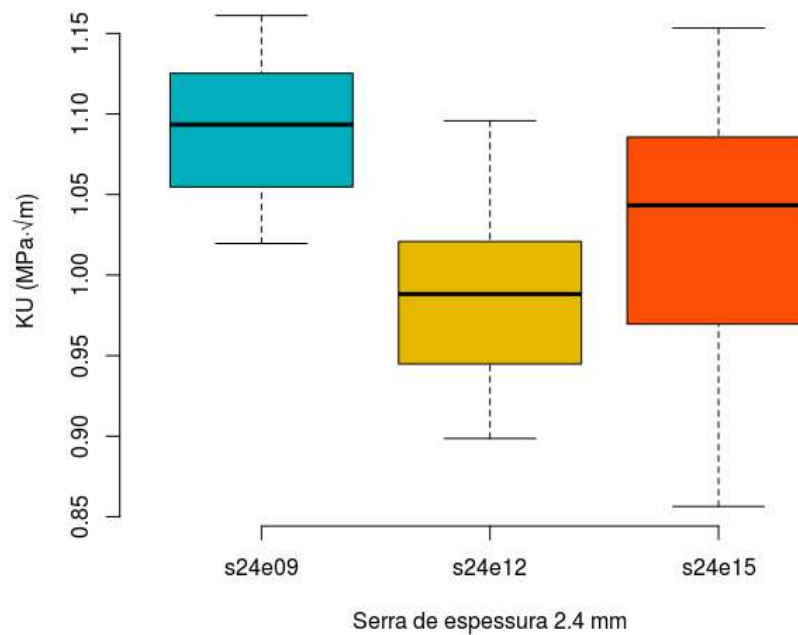


Figura 4.28 – *Boxplot* referente à variação do K^U do disco de espessura 2,4 mm.

De acordo com a Figura 4.28 pode-se verificar uma aparente diferença nos resultados de FIT generalizado para entalhes em U da a_0 de 12 mm.

Formulando a hipótese de que as tensão de ruptura entre as profundidades sejam significativamente diferentes, foi realizado o teste ANOVA com os dados da Tabela 4.19, e foi possível confirmar que pelo menos uma das profundidades seja diferente, com confiabilidade inferior a um por cento Figura 4.29.

```
> summary(KU_24.anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
KU_24$entalhe  2  0.1271  0.06355   18.74 3.75e-07 ***
Residuals     65  0.2204  0.00339
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
13 observations deleted due to missingness
```

Figura 4.29 – Resultado do teste ANOVA de K^U entre profundidades de entalhe do disco de espessura 2,4 mm.

A partir do teste de Tukey foi identificado que as profundidades 9 mm e 12 mm apresentam um valor de P (chance de ocorrer ao acaso) de 0,0524 em um nível de significância de 5%. Entretanto, neste trabalho este valor foi considerado baixo, e portanto esta profundidade foi considerada semelhante para fins de análise Figura 4.30

```

> TukeyHSD(KU_24.anova)
  Tukey multiple comparisons of means
    95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = KU_24$ku ~ KU_24$entalhe)

$`KU_24$entalhe`
      diff          lwr          upr    p adj
s24e12-s24e09 -0.10537292 -0.1470276809 -0.06371817 0.0000002
s24e15-s24e09 -0.06369130 -0.1048806294 -0.02250198 0.0012445
s24e15-s24e12  0.04168162  0.0000268646  0.08333638 0.0498174
    
```

Figura 4.30 – Teste de Tukey para as três profundidades do disco de espessura 2,4 mm.

Utilizando a distribuição de Weibull foi possível plotar o gráfico apresentado na Figura 4.31 obter os parâmetros apresentados na (Tabela 4.20) indicam um módulo de Weibull alto e um K^U característico semelhantes.

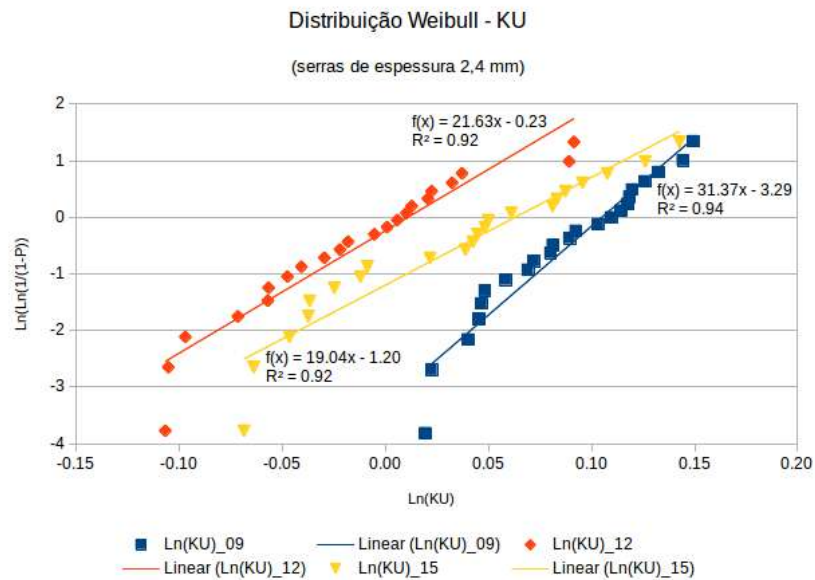


Figura 4.31 – Gráfico de K^U do disco de espessura 2,4 mm na distribuição Weibull.

Tabela 4.20 – Análise do disco de 2,4 mm na distribuição de Weibull do K^U .

Parâmetro	$a_0 = 9mm$	$a_0 = 12mm$	$a_0 = 15mm$
estimador da taxa de transformação ($\hat{\beta} = m$)	31.37	21.63	16.91
estimador do coeficiente linear ($\hat{\alpha}$)	-3.29	-0.23	-0.99
FIT generalizado característico para entalhes em U (K_0^U)	1.11	1.01	1.06
Equação	$y = 31.37x + (-3.29)$	$y = 21.63x + (-0.23)$	$y = 16.91x + (-0.99)$
coeficiente de determinação da regressão (R^2)	0.9369	0.9191	0.9746

Os valores de K_0^U podem ser considerados estatisticamente semelhantes se avaliados pelo método ANOVA com um nível de significância de aproximadamente inferior à 0,1 %.

Calculando K_{IC} obteve-se os valores apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Valores de K_{IC} referente ao disco de T 2,4 mm.

# cp	K_{IC}	K_{IC}	K_{IC}
	$a_0 = 9$ mm (MPa·√m)	$a_0 = 12$ mm (MPa·√m)	$a_0 = 15$ mm (MPa·√m)
cp01	1.028	1.091	0.989
cp02	1.060	0.870	NA
cp03	1.169	1.153	0.997
cp04	1.068	0.894	0.986
cp05	1.151	0.833	1.062
cp06	1.035	0.916	1.005
cp07	1.017	0.788	0.962
cp08	0.978	0.921	0.881
cp09	0.972	0.789	1.018
cp10	0.934	0.879	0.917
cp11	0.974	0.928	0.987
cp12	0.951	0.908	0.947
cp13	0.943	0.936	0.877
cp14	0.903	0.828	0.730
cp15	1.010	0.890	0.937
cp16	0.986	0.842	0.842
cp17	0.993	0.850	0.940
cp18	0.939	0.772	0.869
cp19	0.983	0.500	0.855
cp20	1.045	0.918	0.851
cp21	1.021	0.813	0.949
cp22	1.032	0.993	0.632
cp23	0.971	0.865	0.817
cp24	0.912	0.900	0.822
cp25	1.028	1.001	0.943
cp26	NA	0.894	NA
Média	0.9906	0.8794	0.9209
Dev.Pad.	0.0462	0.0601	0.0793
C.V.	4.67%	6.84%	8.61%
Mín	0.9030	0.7718	0.7303
Máx	1.0681	1.0010	1.0618

Pode-se observar que as médias de K_{IC} deste disco não seguiram o comportamento das outras. O valor do K_{IC} dos discos tem apresentado um decréscimo proporcional e linear com relação à a_0 , mas neste disco os valores não seguiram este comportamento.

A partir destes dados foi possível desenhar o gráfico apresentado na Figura 4.32

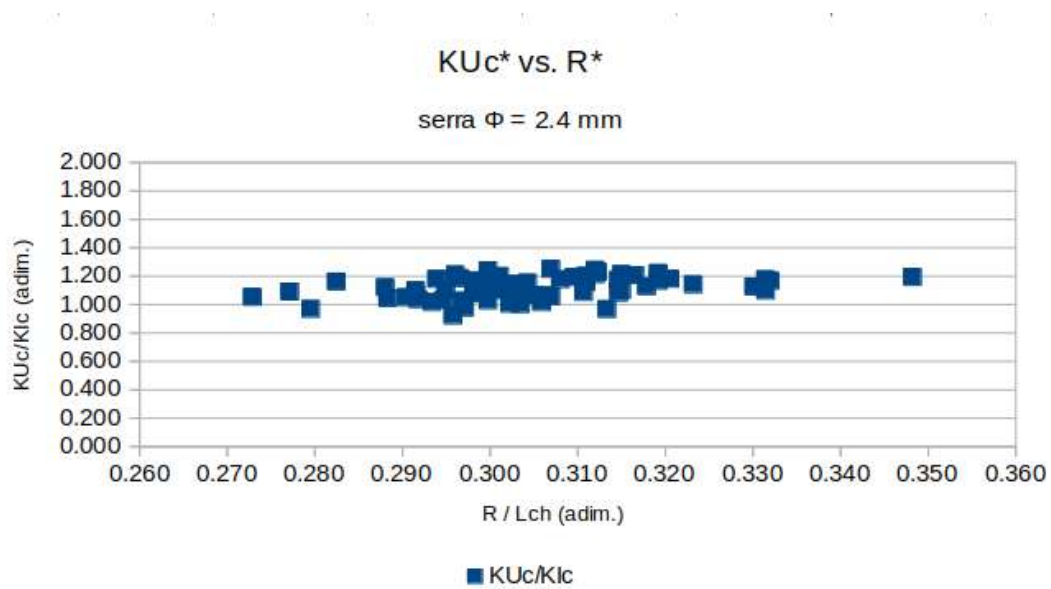


Figura 4.32 – Gráfico apresentando a dispersão dos CPs entalhados usando o disco de T 2,4 mm. Fonte: o autor.

4.10.3 Disco com espessura 3,2 mm

Cabe lembrar, conforme já discutido na seção 4.5, que neste disco obteve-se um ρ de $(1,5820 \pm 0,0502)$ mm, e que segundo a TDC não se comporta como trinca, sendo portanto necessário um critério para estimar o valor K_{IC} .

A Tabela 4.22 apresenta a K^U dos CPs do disco de T 3,2 mm.

Tabela 4.22 – Valores do K^U dos CPs entalhados com o disco de T 3,2 mm

# cp	K^U		
	$a_0 = 9mm$ ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	$a_0 = 12mm$ ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	$a_0 = 15mm$ ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
cp01	0.978	0.985	0.938
cp02	0.922	1.013	0.950
cp03	0.988	1.042	0.915
cp04	0.983	1.016	0.949
cp05	1.098	1.022	0.929
cp06	0.967	1.039	0.927
cp07	1.038	Excl. 0.914	0.933
cp08	0.922	0.990	0.936
cp09	1.036	1.001	0.942
cp10	1.062	0.979	0.949
cp11	1.023	1.034	0.973
cp12	1.061	0.974	0.917
cp13	1.030	1.034	0.941
cp14	1.053	1.001	0.965
cp15	1.025	0.985	0.957
cp16	1.104	1.019	0.987
cp17	1.166	0.979	0.940
cp18	1.207	1.011	0.960
cp19	1.155	1.002	0.936
cp20	1.022	1.007	0.966
cp21	0.979	0.993	0.982
cp22	1.159	1.051	0.944
cp23	1.097	NA	NA
média	1.047	1.008	0.947
stdev	0.077	0.023	0.019
c. v.	7.32%	2.25%	2.03%
mín	0.922	0.974	0.915
máx	1.207	1.051	0.987

A dispersão da FIT generalizado para entalhes em U deste disco pode ser descrita através da Figura 4.33.

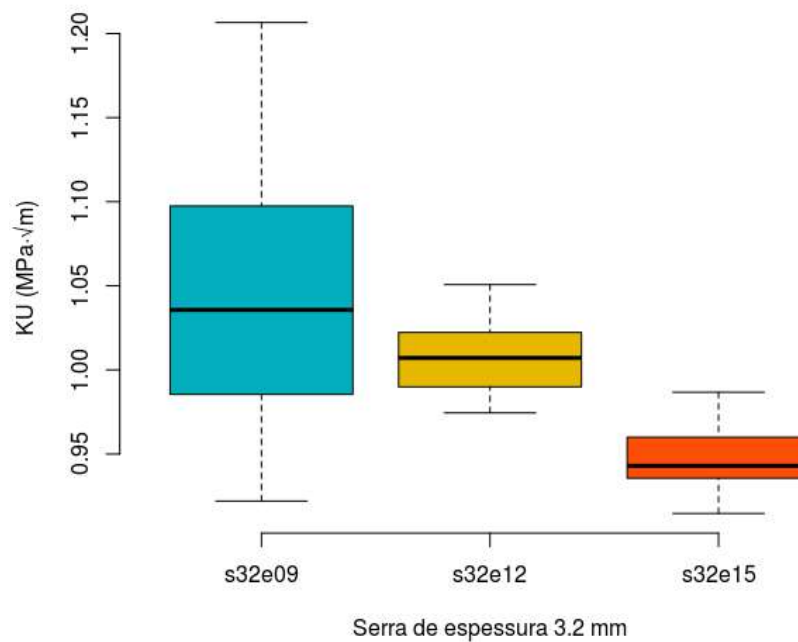


Figura 4.33 – *Boxplot* referente à variação do K^U do disco de espessura 3,2 mm.

Formulando a hipótese de que os dados do K^U de cada profundidade sejam diferentes, foi realizado uma análise de variância (ANOVA), com os dados da Tabela 4.22. Através deste teste pôde-se afirmar que as médias dos valores de K^U dos discos são iguais com uma sensibilidade de 0,1 % (Figura 4.34)

```
> summary(KU_32.anova)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
KU_32$entalhe  2  0.1136  0.05681    24.3 1.5e-08 ***
Residuals     63  0.1473  0.00234
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
9 observations deleted due to missingness
```

Figura 4.34 – Teste ANOVA referente ao K^U do disco de espessura 3.2

Adicionalmente foi realizado um teste de Tukey para evidenciar possíveis diferenças entre as profundidades, como pode ser observado na Figura 4.35.

```
> TukeyHSD(KU_32.anova)
Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = KU_32$ku ~ KU_32$entalhe)

$`KU_32$entalhe`
      diff      lwr      upr    p adj
s32e12-s32e09 -0.03831129 -0.07334023 -0.00328235 0.0288484
s32e15-s32e09 -0.09982427 -0.13443456 -0.06521399 0.0000000
s32e15-s32e12 -0.06151298 -0.09691985 -0.02610612 0.0002764
```

Figura 4.35 – Teste de Tukey referente ao K^U do disco de espessura 3.2

Utilizando a distribuição de Weibull foi possível obter o gráfico apresentado na Figura 4.36, e os parâmetros apresentados na Tabela 4.23.

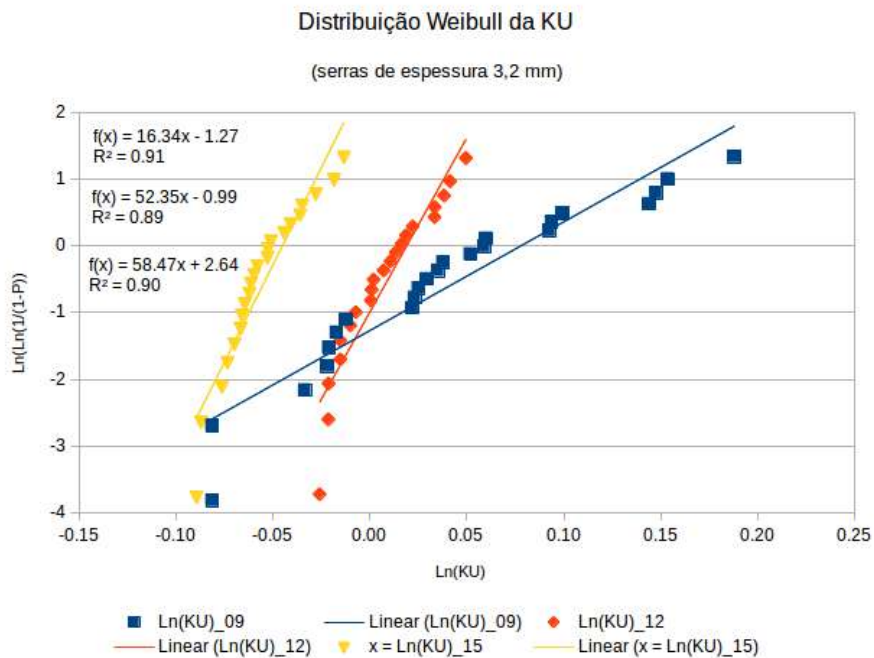


Figura 4.36 – Gráfico de K^U do disco de espessura 3,2 mm na distribuição Weibull.

No gráfico (Figura 4.36) a reta de regressão dos valores de K^U dos entalhes de a_0 igual a 9 mm parece se encontrar no limiar do domínio dos processos de falha por tensão de ruptura e tenacidade a fratura. O entalhe com a_0 de 12 mm foi dominado pelo

Tabela 4.23 – Análise do disco de 3,2 mm na distribuição de Weibull do K^U .

Parâmetro	$a_0 = 9$ mm	$a_0 = 12$ mm	$a_0 = 15$ mm
estimador do coeficiente linear ($\hat{\alpha}$)	-5,30	-3,41	-2,50
estimador da taxa de transformação ($\hat{\beta} = m$)	25,75	25,12	27,89
FIT generalizado para entalhes em U (K^U)	1,23	1,15	1,09
coeficiente de determinação da regressão (R^2)	0,9128	0,9171	0,9215

A partir dos valores de K_C^U foram estimados os valores de K_{IC} , apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.24 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs com entalhes.

# cp	K_{Ic}	K_{Ic}	K_{Ic}
	$a_0 = 9mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 12mm$ (MPa·√m)	$a_0 = 15mm$ (MPa·√m)
cp01	0.8270	0.824	0.765
cp02	0.7543	0.855	0.784
cp03	0.8343	0.891	0.748
cp04	0.8290	0.860	0.785
cp05	0.9706	0.870	0.768
cp06	0.8137	0.889	0.756
cp07	0.8973	0.739	0.774
cp08	0.7590	0.833	0.766
cp09	0.8881	0.841	0.783
cp10	0.9194	0.819	0.791
cp11	0.8792	0.884	0.821
cp12	0.9222	0.812	0.753
cp13	0.8824	0.882	0.783
cp14	0.9127	0.843	0.813
cp15	0.8803	0.824	0.791
cp16	0.9488	0.864	0.834
cp17	1.0388	0.823	0.772
cp18	1.0835	0.855	0.796
cp19	1.0433	0.850	0.766
cp20	0.9745	0.851	0.803
cp21	0.8234	0.834	0.832
cp22	1.0350	0.902	0.787
cp23	0.9623	NA	NA
Média	0.9078	0.8475	0.7850
Dev.Pad.	0.0901	0.0354	0.0239
C.V.	9.92%	4.18%	3.05%
Mín	0.7543	0.7385	0.7482
Máx	1.0835	0.9025	0.8337

4.11 Determinação do tamanho de defeito intrínseco

Foram realizados um lote de ensaios em CPs visando determinar o tamanho de defeito intrínseco, realizando cortes de profundidade decrescentes, utilizando o disco de T 0,2 mm.

Um resumo dos dados deste experimento é apresentado na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs para identificação do defeito intrínseco do GCA

CP	Entalhe (mm)	P_{rup} (N)	σ_{ref} (MPa)	K_{IC} (MPa·√m)
cpliso	0.00	4566.9	15.35	0.928
cplp2-01	3.14	2844.3	9.73	1.008
cplp2-02	3.16	2760.6	9.42	0.980
cplp2-03	3.23	2910.6	9.84	1.034
cplp2-04	3.26	2550.9	8.70	0.917
cplp2-05	3.19	2659.5	9.06	0.946
cplp2-06	2.17	2996.8	10.02	0.874
cplp2-07	1.84	3350.2	11.29	0.913
cplp2-08	1.64	3075.3	10.49	0.803
cplp2-09	1.66	3217.9	10.97	0.845
cplp2-10	2.10	2658.6	8.79	0.756
cplp2-11	3.20	2869.6	9.53	0.998
cplp2-12	0.64	3767.0	12.84	0.630
cplp2-13	1.57	3121.0	10.51	0.789
cplp2-14	0.89	3897.3	13.24	0.762
cplp2-16	0.97	3918.4	13.40	0.803
cplp2-17	0.80	3752.3	12.85	0.704
cplp2-18	0.71	3864.8	13.33	0.686
cplp2-19	0.74	3854.1	13.18	0.692
cplp2-20	0.82	3736.6	12.76	0.708

Na Tabela 4.25 foi apresentado um CP liso e apresentada o valor de K_{IC} utilizado como referência neste estudo. A partir dos dados deste experimento não foi possível determinar com exatidão o limite do tamanho do defeito mínimo para evitar a fratura pelo entalhe. Somente o cp14 quebrou fora do entalhe Figura 4.37, indicando que os entalhes chegaram bem perto do tamanho investigado, apesar da tecnologia utilizada não oferecer resolução suficiente para determinação exata desta dimensão do corpo Figura 4.38



Figura 4.37 – Foto do CP com fratura na superfície fora do entalhe criado. Fonte: o autor.

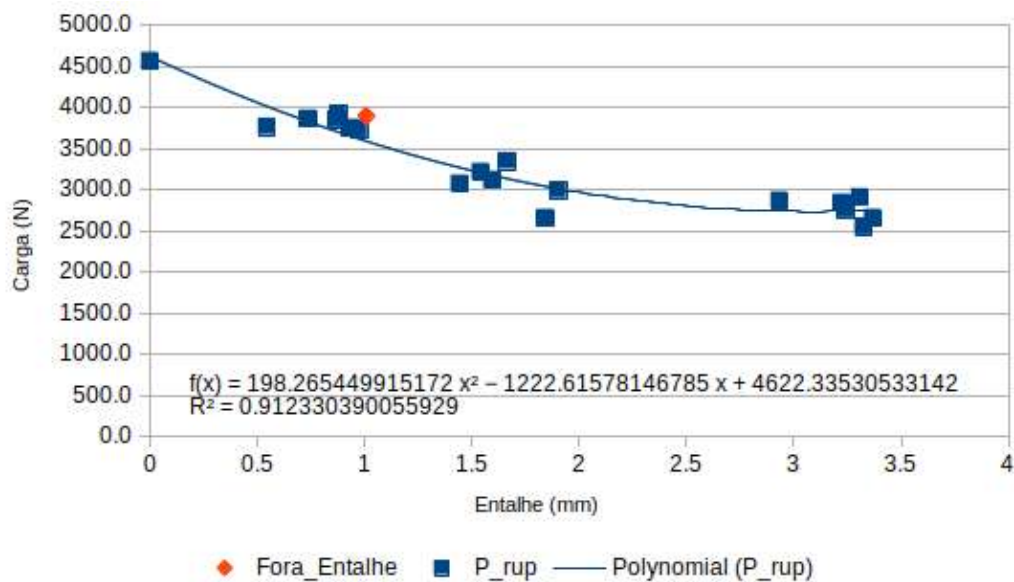


Figura 4.38 – Gráfico relacionando Força em Newtons e Profundidade do entalhe. Fonte: o autor

Na Figura 4.38 foi apresentado em destaque o valor de carga do CP que quebrou fora do entalhe. Pode-se observar que o valor de carregamento se aproximou do valor do CP sem entalhes, sendo possível estimar uma curva de tendência de carga de ruptura para o material.

4.12 Cálculo da curva-R

O objetivo do emprego da metodologia de curva de resistência é determinar o comprimento efetivo atingido pela trinca durante o ensaio.

O primeiro passo foi determinar a *compliance* do espécime sem entalhe (λ_0) dos CPs lisos. Esta propriedade é importante como referência para relativizar a *compliance* (λ) dos corpos entalhados. Foram utilizados os dados relativos a CPs lisos instrumentados com SG para a esta investigação, e os valores obtidos constam da Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de CPs lisos, sem entalhes.

CP	P_{rup} (N)	Deformação ($\mu\epsilon$)	λ_{lp} (ϵ/N)	λ_{rup} (ϵ/N)
cpliso4668	4668.78	420	5.59	9.00
cpliso4566	4566.89	411	7.36	9.00
cpliso4356	4356.32	434	7.97	9.96
cpliso4938	4938.66	464	8.14	9.40
cpliso4416	4416.21	451	7.83	10.21
cpliso3859	3859.02	399	8.81	10.34
cpliso4442	4442.99	457	7.23	10.29
cpliso4361	4361.25	418	4.47	9.58
cpliso3544	3544.91	411	6.76	11.59
cpliso2951	2951.72	299	7.55	10.13
Média	4210.67	416	7.17	9.95
Desv.Pad.	592.42	47	1.28	0.77
C.V.	14.07%	11.20%	17.89%	7.73%
Mín.	2951.72	299	4.47	9.00
Máx.	4938.66	464	8.81	11.59

A Figura 4.39 apresenta o gráfico de Tensão vs. Deformação referente aos CPs apresentados na Tabela 4.26.

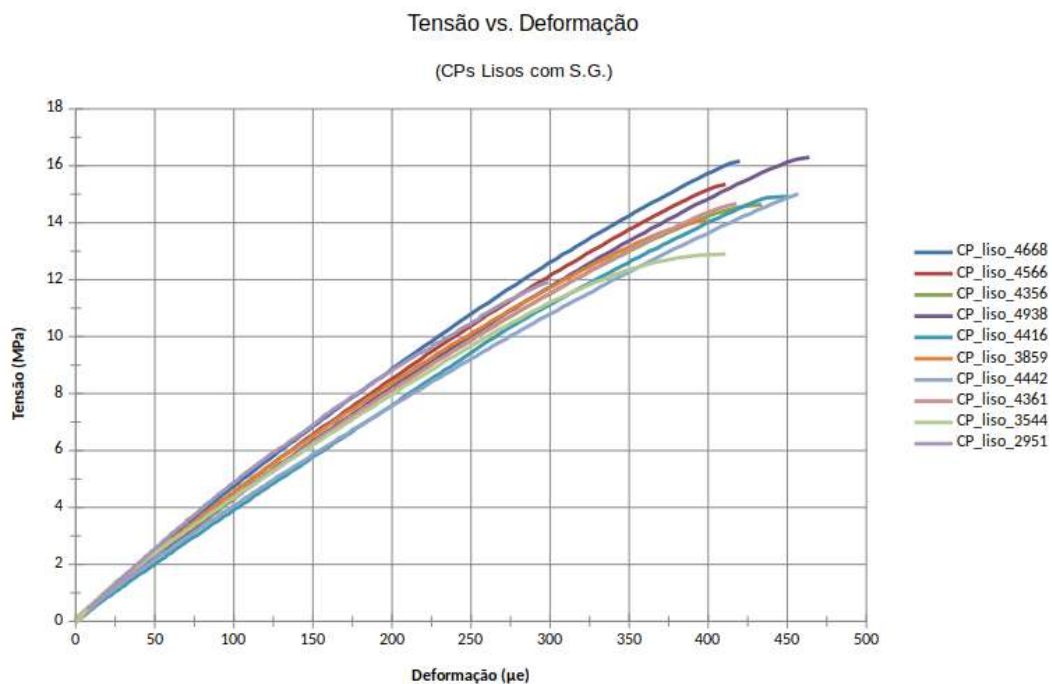


Figura 4.39 – Gráficos de Tensão vs. Deformação de vários CPs lisos instrumentados com SG
Fonte: o autor

A Figura 4.40 apresenta o limite de proporcionalidade do CPLiso4668.

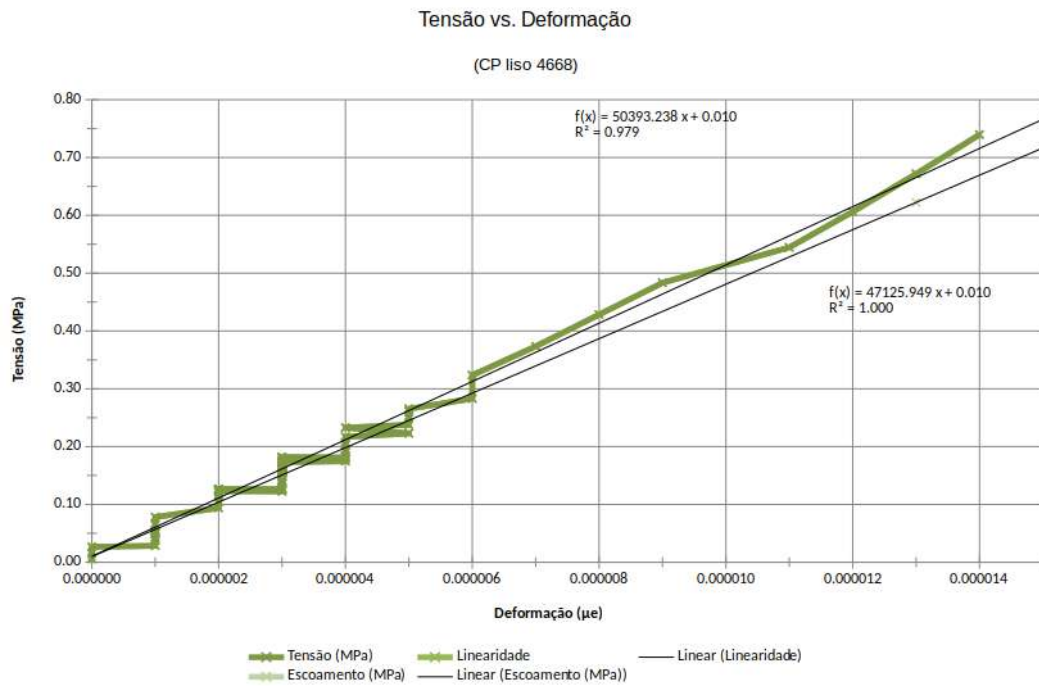


Figura 4.40 – Gráfico Tensão vs. Deformação do CPLiso4668, indicando a tangente referente ao regime elástico do material.

Os valores da Tabela 4.26 foram obtidos a partir do programa desenvolvido para tratar dados dos ensaios mecânicos. O valor de *compliance* no limite de proporcionalidade (λ_{lp}) foi obtido identificando o intervalo de dados antes do processo de *softening* causado pela zona de processamento de fratura (ZPF), dentro do limite de validade da Lei de Hooke (regime linear), e representa o *compliance* natural do material.

O valor indicado como *compliance* na ruptura (λ_{rup}) representa o λ calculado no instante do carregamento máximo, que causou a ruptura do corpo de prova liso, e servirá de referência para fratura do material.

Os cálculos do módulo de elasticidade em flexão realizado pelo programa desenvolvido levaram em consideração somente a região linear após o intervalo de exclusão descrito.

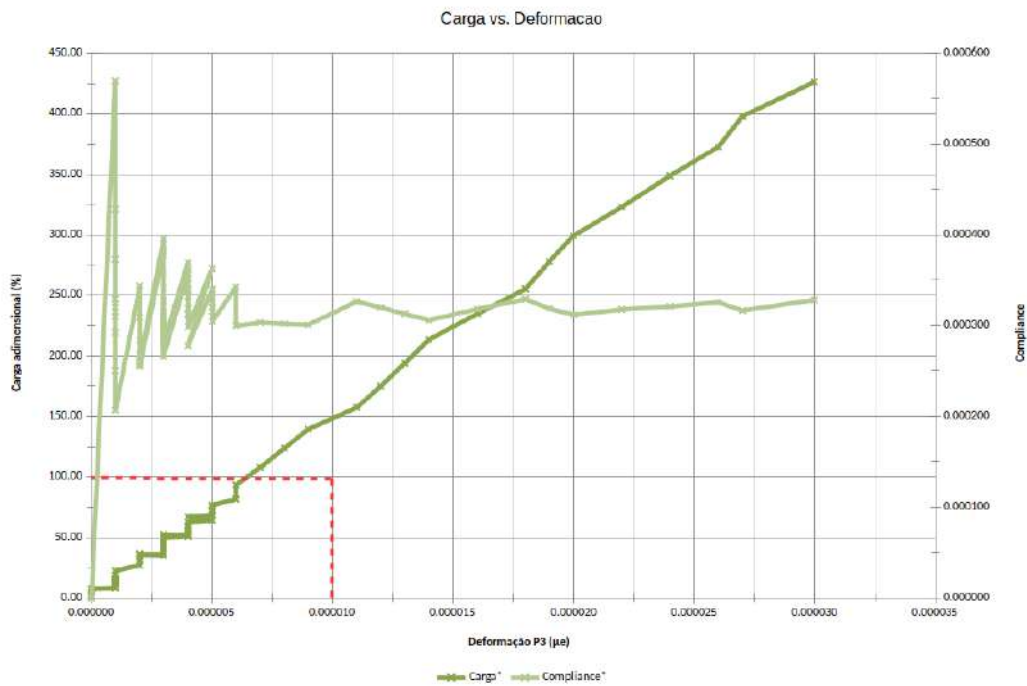


Figura 4.41 – Gráfico Força vs. Deformação do CPLiso4668 focando nos momentos iniciais do ensaio. Fonte: o autor.

A Figura 4.42 apresenta gráfico de *boxplot* visando avaliar a dispersão da *compliance* dentre os CPs analisados.

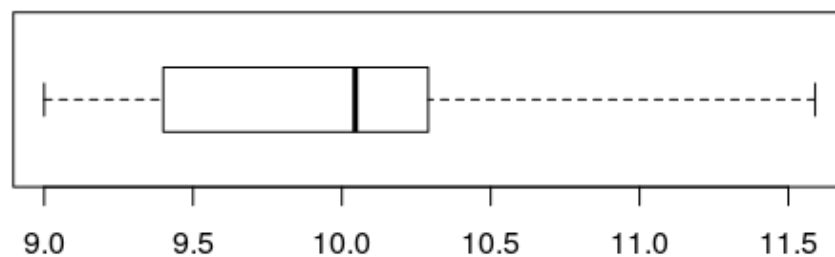


Figura 4.42 – *Compliance* máxima entre os CPs lisos instrumentados com S.G. (Unidade: strain/N) Fonte: o autor.

Sendo assim, foi definida a media da série ($\lambda_0 = 10,046e11 \times 10^{-8} \text{ } \epsilon/\text{N}$) como o valor representativo de *compliance* do espécime sem entalhe.

Um experimento foi realizado com CPs entalhados com o disco de espessura do disco de abrasão 0,2 mm em diversas profundidades, conforme apresentado na subseção A.4.8 e resumidos na Tabela A.56. A partir dos dados deste experimento uma curva-R foi construída usando

a relação entre profundidade inicial do entalhe (a_0) adimensional e *compliance* na ruptura (λ_{rup}) adimensionado pelo *compliance* do espécime sem entalhe (λ_0).

Com estes dados foi possível avaliar algumas relações. A relação entre P_{rup} e a_0 produziu o gráfico apresentado na Figura 4.43, demonstrando uma relação exponencial entre os dados.

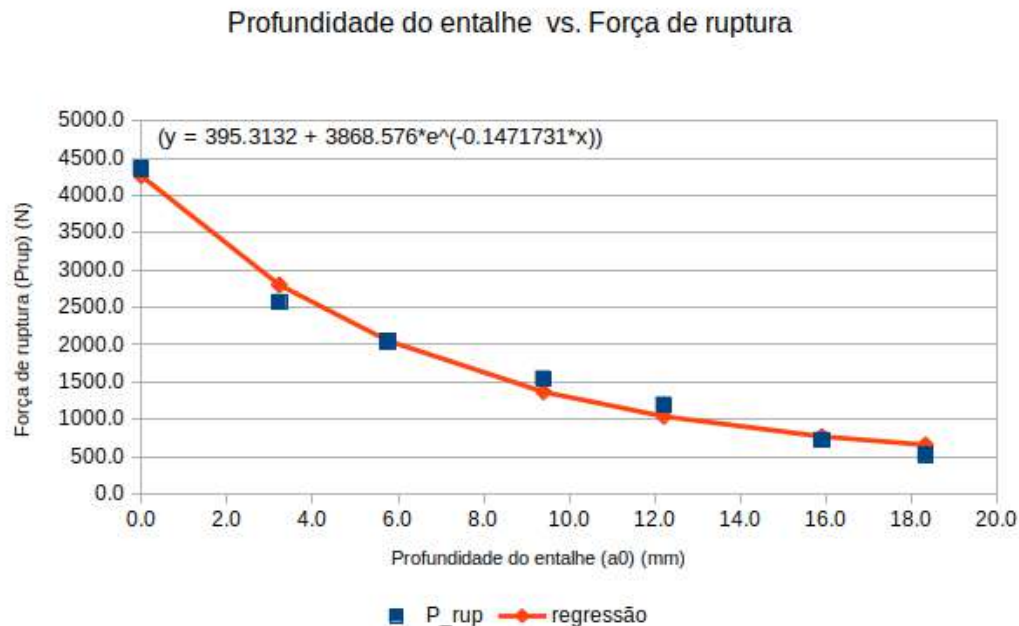


Figura 4.43 – Gráfico apresentando a Força de ruptura como consequência da profundidade do entalhe. Fonte: o autor.

Entretanto, observa-se que carga de ruptura (P_{rup}) não guarda relação direta com profundidade inicial do entalhe (a_0), mas sim tamanho efetivo da trinca (a_{ef}), sendo portanto ainda imprecisa a relação observada na Figura 4.43, pois a mesma apresenta os valores de a_0 e não valores de a_{ef} provenientes da curva-R.

A Equação 4.8 (TANAKA et al., 2003) foi utilizada por tratar-se de um modelo matemático para a relação elástica entre o crescimento de trinca e o *compliance*, ambos adimensionalizados.

$$\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) = 1.0000 + 0.16016 \left(\frac{a}{h}\right) + 2.3452 \left(\frac{a}{h}\right)^2 + 147.61 \left(\frac{a}{h}\right)^3 - 1916 \left(\frac{a}{h}\right)^4 + 12907 \left(\frac{a}{h}\right)^5 - 49299 \left(\frac{a}{h}\right)^6 + 1.0767 \times 10^5 \left(\frac{a}{h}\right)^7 - 1.2495 \times 10^5 \left(\frac{a}{h}\right)^8 + 59765 \left(\frac{a}{h}\right)^9, \quad (4.8)$$

No entanto, apesar do comportamento descrito pela Equação 4.8 ser o desejado, foi ne-

cessário invertê-la, para obter o valor de a_0 relativo à partir do λ relativo, obtendo a Equação 4.9

$$\begin{aligned} \left(\frac{a}{h}\right) = & -0.00042 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^4 + 0.01073 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^3 - 0.10319 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 \\ & + 0.46119 \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) - 0.22828 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Para descrever a construção da curva de resistência será exemplificado o procedimento com um CP entalhado cujas características são apresentadas na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Resumo das características do CP com um entalhe de 9 mm produzidos com o disco de T 0,2 mm, utilizado para exemplificar a curva de resistência.

Característica	Valor	Unidade
# CP	cp224	
Espessura do disco (T)	0,2	mm
Raio do Entalhe (ρ)	0,230	mm
Altura (h)	31,015	mm
Espessura (b)	31,83	mm
Profundidade do entalhe (a_0)	9,63	mm
Seção Resistente (d)	21,4	mm
Módulo de Young (E)	52,7	GPa
Coef. Poisson (ν)	0,250	
Carga na Ruptura (P)	1516,6	N
Deformação na Ruptura (ε)	324	$\mu\varepsilon$
Compliance na Ruptura (λ_{rup})	0,213e63	$\varepsilon/N \cdot 10^{-6}$

Os valores de carga e deformação do ensaio os valores obtidos da máquina de ensaios universais e os valores obtidos dos SG foram planilhados e sincronizados, conforme descrito na subseção 3.3.18. Foi utilizada a Equação 4.9 para obter valores de a_0 relativizados (a_0/h), e o valor da tamanho efetivo da trinca (a_{eff}) foi obtido a partir da Equação 4.10

$$a_{eff} = h \cdot \frac{a_{eff}}{h}, \quad (4.10)$$

Os dados referentes à estes cálculos podem ser observados na Tabela A.60. Na Figura 4.44 é apresentada a comparação entre os valores calculados de K_{IC} e K_{MAX} .

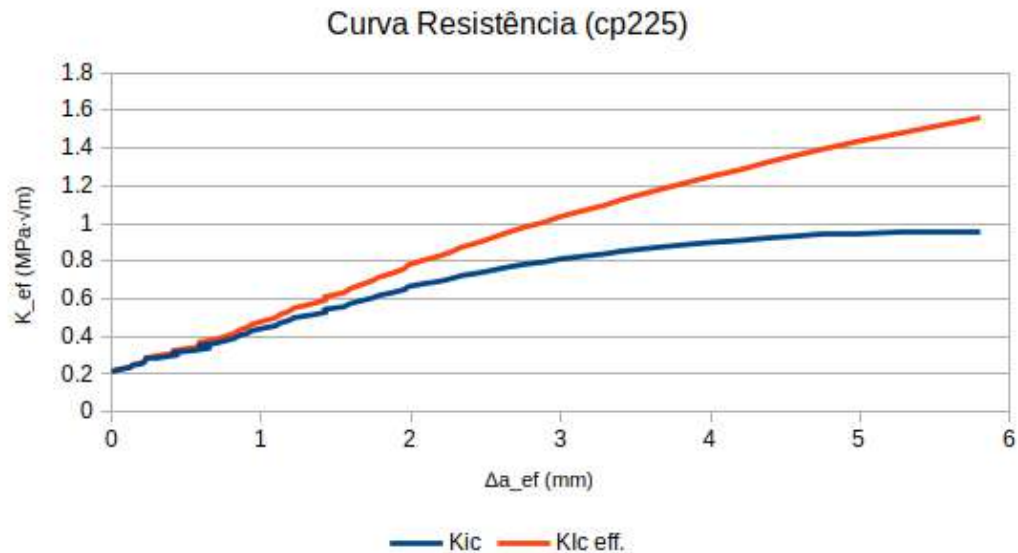


Figura 4.44 – Curva-R referente ao CP225 (Disco T 0.2 mm ; e $a_0 = 8.98$ mm). Fonte: o autor.

Na Figura 4.44 pode-se verificar que os valores atualizados de a produzem valores de fator intensificador de tensão formal (K_{MAX}) atualizados e maiores.

Essencialmente os valores de K apurados pela curva-R viabilizam pesquisa mais precisa e possibilitam penalizar menos o material em projetos.

4.13 Curva-R em várias profundidades de entalhe

Este experimento foi realizado visando comparar o desempenho da curva-R e investigar seu comportamento com relação ao comprimento característico do material (ℓ_{ch}) do GCA, estimado em 5,34 mm. A Tabela 4.28.

Tabela 4.28 – Resumo das características dos CPs com entalhes produzidos com o disco de T 0,2 mm.

CP	cd401	cd402	cd403	cd404	cd405	cd406
a_0/h (%)	10.4	18.8	30.5	39.21	51.3	59.1
a_0 (mm)	3.23	5.82	9.40	12.21	15.90	18.32
a_{max} (mm)	8.05	9.03	13.02	15.38	17.93	19.02
σ_{IN} (MPa)	6.43	4.87	3.88	2.95	1.72	1.73
σ_{ref} (MPa)	8.78	7.01	5.36	4.06	2.48	1.80
K_{IN} (MPa·√m)	0.85	0.69	0.76	0.72	0.59	0.78
K_{Ic} (MPa·√m)	0.92	0.99	1.04	0.99	0.85	0.81
K_{max} (MPa·√m)	1.52	1.32	1.41	1.32	1.06	0.87

Cada um dos CPs ensaiados foi analisado automaticamente pelo programa desenvolvido e foi localizado o ponto de limite superior do regime linear. A partir deste ponto os dados

de cada ensaio foram avaliados para a curva-R. Na maioria dos CPs, com exceção do CP401 ($a_0 = 10\%$), o comportamento foi semelhante, proporcional à profundidade inicial do entalhe, conforme apresentado na Figura 4.45 e na Figura 4.46

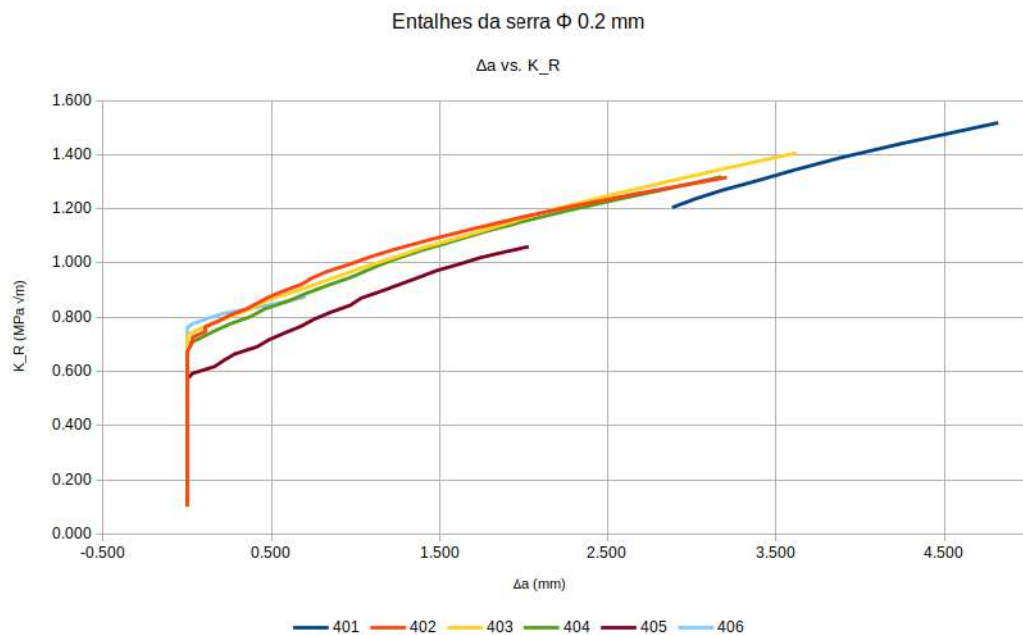


Figura 4.45 – Curva de resistência (K_R vs. Δa). Fonte: o autor.

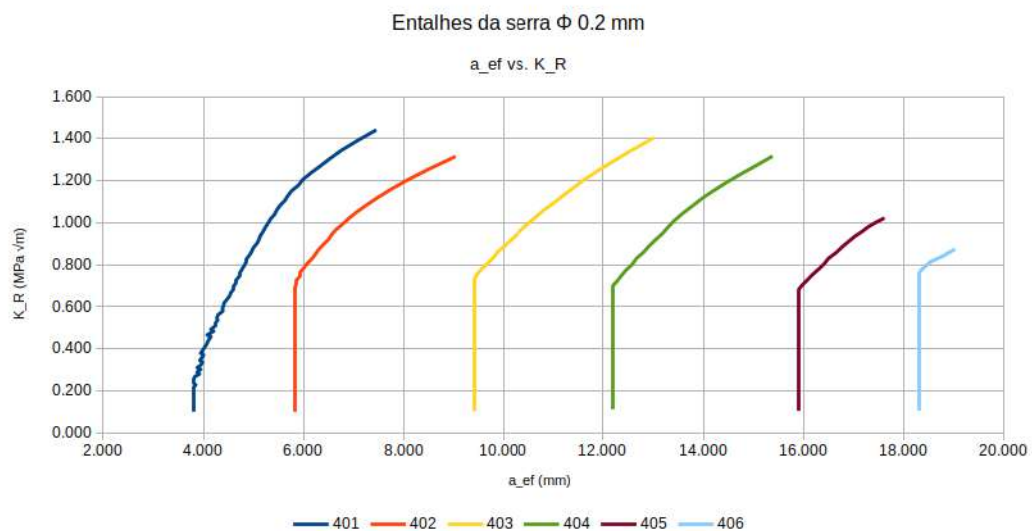


Figura 4.46 – Curva de resistência (K_R vs. a_{ef}). Fonte: o autor.

O valor da tensão no início da extensão da trinca (σ_{IN}) é obtido no início da não linearidade. Nos CPs com a_0 maior que 5,8 mm (403, 404, 405 e 406) este ponto foi claramente obtido em Δa , conforme apresentado na Figura 4.45. No entanto, nos CPs 401 e 402 (a_0 até 5,8 mm) os valores de Δa se apresentam instáveis, oscilando acima e abaixo de a_0 , e portanto os valores de σ_{IN} e K_{IN} foram obtidos manualmente, localizando o ponto de crescimento estável da trinca em Δa .

O gráfico da curva-R do cp401 (Disco $T = 0,2$ mm ; $a_0 = 0,322$ mm) é apresentado isoladamente na Figura 4.47.

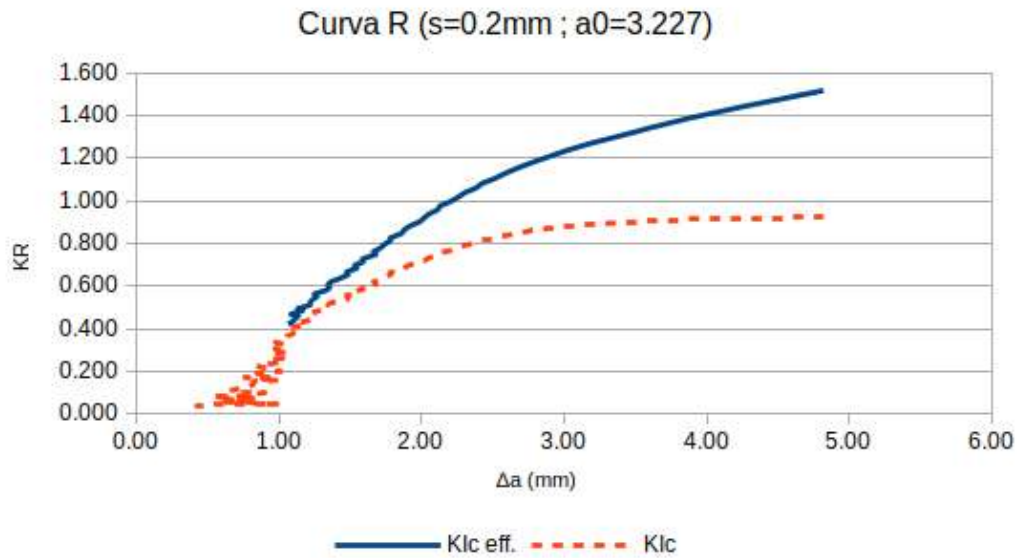


Figura 4.47 – Curva R (KR vs. Δa) do cp401 (Disco $T = 0,2$ mm ; $a_0 = 0,322$ mm). Fonte: o autor.

Como pode ser observado na Figura 4.47 o crescimento da trinca (Δa) apresentado é inicialmente instável.

4.14 Comparação de resultados

Nos experimentos com entalhes utilizando o disco de $T = 0,2$ mm foi observado que na medida que o disco se aprofunda no CP os valores de ρ tendem a diminuir, conforme apresentado na Figura 4.48

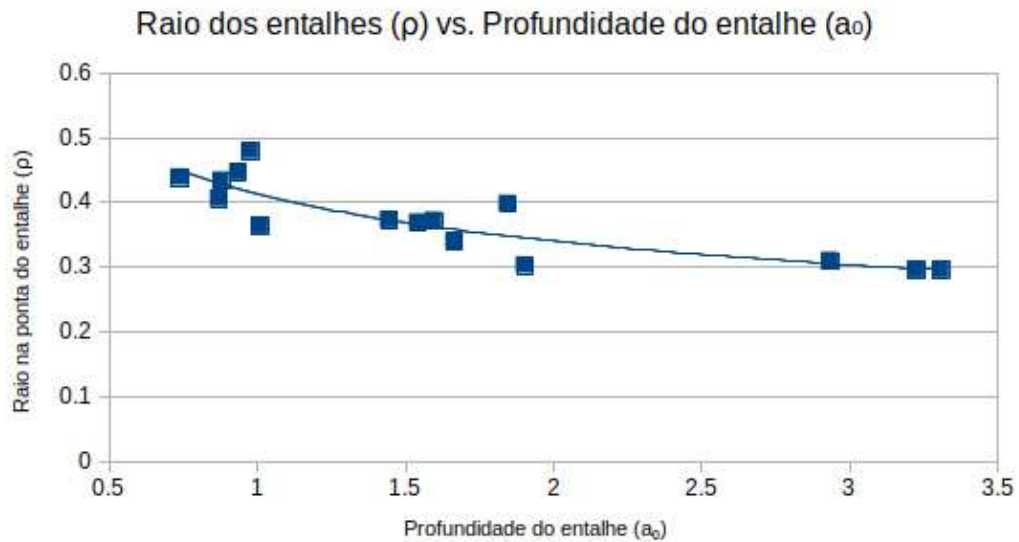


Figura 4.48 – Relação entre raio no fundo do entalhe e profundidade do entalhe usando Discos de T 0,2 mm

O fenômeno citado pode ser explicado em função da vibração dos discos finos que foram adaptadas no equipamento Minitom, de tal forma que para cortes superficiais tendem a produzir maiores raio na ponta do entalhe, enquanto para cortes mais profundos tiveram menor liberdade de movimento, produzindo valores de ρ menores.

Os resultados médios obtidos pelo critério de K_{IC} , K_C^U e curva-R para o disco de T 0,2 mm são apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Resumo dos valores de K_R obtidos nos ensaios de CPs com entalhes produzidos com pelo disco de T 0,2 mm.

Entalhe típico (mm)	Raio Típico (mm)	K_C^U (MPa·√m)	K_{Ic}^* (MPa·√m)	K_{IN} (MPa·√m)	K_{Ic} (MPa·√m)	K_{max} (MPa·√m)
3	0.231	0.848	1.308	1.297	0.997	1.442
6	0.214	1.173	1.162	0.691	0.994	1.316
9	0.230	1.134	1.121	0.755	1.037	1.406
12	0.230	1.058	1.044	0.723	0.988	1.318
15	0.214	0.902	0.887	0.593	0.852	1.061
18	0.214	0.854	0.838	0.775	0.805	0.875

A partir dos dados da Tabela 4.29 foi produzido o gráfico da Figura 4.49, onde se pode analisar o comportamento das variáveis de tenacidade obtidos.

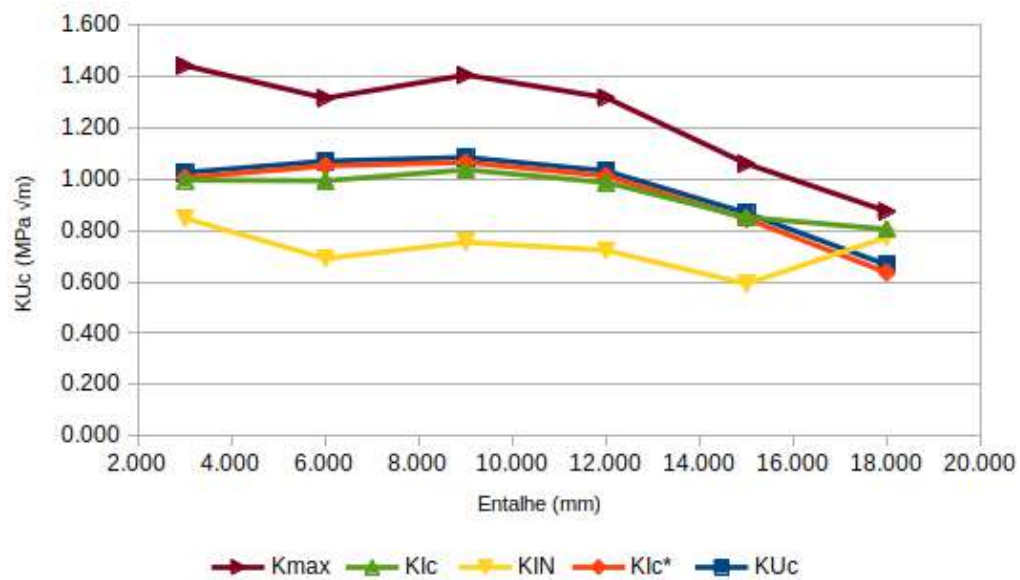


Figura 4.49 – Variáveis relacionadas a tenacidade relacionadas à profundidade do entalhe

Na Figura 4.49 pode-se observar que os valores K_{IN} e K_{MAX}

Também é possível observar que os valores de K_{IC} , K_C^U , K_{IC}^* , K_{IN} e K_{MAX} convergem na medida que a profundidade aumenta. A partir de a_0 de aproximadamente 18 mm, ou seja todas as medidas parecem convergir, sendo portanto mais interessante produzir entalhes maiores visando detectar o valor mais apropriado de K_{IC} .

Os valores de K_{IC} se comportam sempre entre K_{IN} e K_{MAX} . Os valores de K_{IN} e K_{MAX} convergem em função da profundidade do entalhe para um valor coerente com o do material. A variação dos valores de K_{IN} pode ser considerada uma dispersão da propriedade medida em diferentes CPs, com valor médio próximo ao do entalhe de a_0 igual a 18 mm.

Foi avaliado que a σ_{ref} tende a decrescer em função da P_{max} , no entanto a σ_n se estabiliza a partir de um comprimento de trinca mínimo e se mantém, conforme apresentado na Figura 4.50.

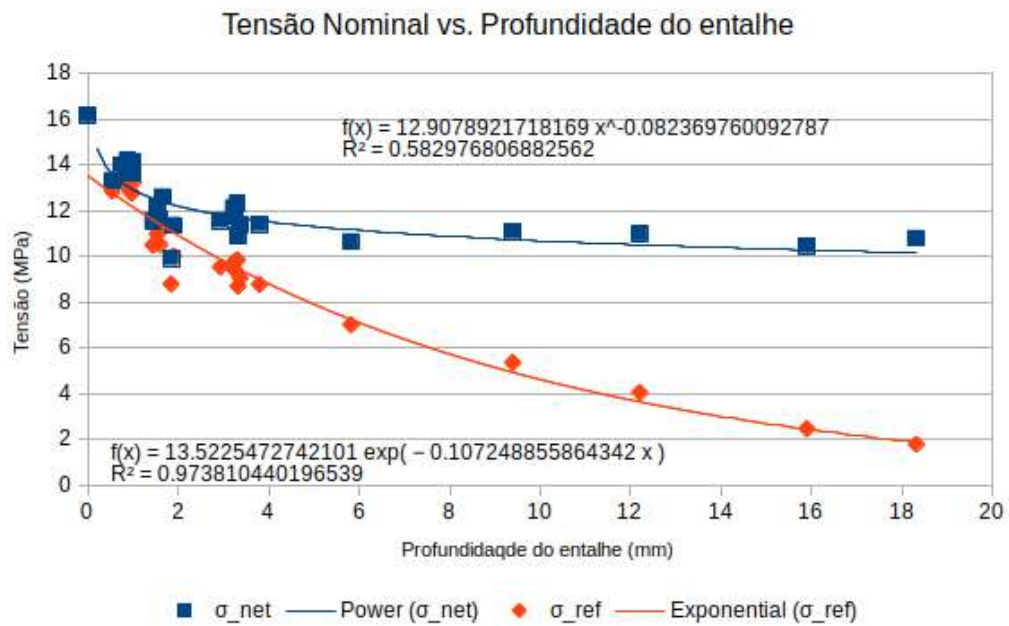


Figura 4.50 – Comparação entre σ_{ref} e σ_n .

Nesta Figura são apresentados valores da σ_{ref} calculada a partir de ensaios de flexão e apresenta valores que concordam com a profundidade do entalhe, ou seja entalhes menores relacionados com resistência maior. A σ_n representa a tensão líquida percebida pelo corpo, e considera somente a seção resistente do mesmo. Neste caso pode-se perceber que o corpo resiste mais para entalhes pequenos, de até aproximadamente 2 mm, enquanto entalhes maiores apresentaram uma σ_n mais estável.

Conclusão Geral

Foi possível determinar a existência de um raio mínimo no entalhe em U para determinação de K_{IC} no Granito Cinza Andorinha.

O GCA apresentou comportamento parcialmente não linear com segmento central linear que propiciou a medida das propriedades elásticas necessária aos experimentos.

O tamanho da amostra se demonstrou adequado, produzindo um c.v. pequeno e avaliação unimodal a partir da estatística de Weibull.

O Critério de Gómez, Guinea e Elices (2006) corrigiu adequadamente os valores de FIT generalizado para entalhes em U (K^U) para materiais semi frágeis.

O *strain gage* (SG) para concreto revelou-se adequado para o estudo do granito, possibilitando diferenciar as regiões linear e não lineares do comportamento sob carregamento.

A metodologia da curva de resistência funcionou adequadamente para o GCA instrumentado com SG.

Foi possível acoplar o Critério de Gómez com a Teoria da Distância Crítica o que permitiu estimar a K_{IC} a partir de entalhes em U não singulares.

Foi possível acoplar a Teoria da Distância Crítica e com a curva de resistência, o que permitiu a determinação com maior precisão dos parâmetros de fratura em materiais com fratura não linear.

Foi possível identificar o limiar da mudança de domínio entre os processos de falha por tensão e falha por tenacidade.

Foi possível estimar o tamanho do defeito intrínseco do material, pois em pelo menos um CP com entalhe nas dimensões estimadas houve a quebra fora do entalhe, conforme planejado.

4.15 Trabalhos futuros

Estudar o método de elementos discretos e avaliar seu desempenho comparativo com elementos finitos para materiais semi-frágeis como o granito e concreto, tendo em vista a possibilidade de diferenciar os materiais constituintes destes.

Avaliar a associação da Teoria da Distância Crítica com a curva de resistência para outros materiais, como aços, concreto e cerâmicos.

Desenvolver componentes computacionais de extensometria óptica para medir *Crack Mouth Opening Displacement* (CMOD).

Criar um software que facilite os cálculos de MF a partir dos dados de extensometria e

da máquina de ensaios universais.

Aprofundar investigações sobre o defeito intrínseco do GCA.

Referências

- ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*. 3. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. Citado 5 vezes nas páginas vii, 2, 5, 7 e 31.
- ASTM. E561-05: Standard test method for k_r curve determination. *Annual book of ASTM Standards*, v. 3, 2010. Citado na página 23.
- ASTM-C1421. Astm c1421-16. standard test method for the determination of fracture toughness of advanced ceramics at ambient temperature. PA, USA, p. 1–33, 2016. Citado na página 2.
- ASTM-E1820. E1820-11: Standard test method for measurement of fracture toughness. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 25.
- ASTM-E399. E399-90 - standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{Ic} of metallic materials. *1990 Annual book of ASTM standards*. ASTM, p. 13–5, 1990. Citado 4 vezes nas páginas 2, 25, 28 e 54.
- ASTM-E855. Astm e855-90. standard test methods for bend testing of metallic flat materials for spring applications involving static loading. PA, USA, p. 1–8, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 21.
- Atem de Carvalho, E. Curvas de k_{tn} expandidas para entalhes finos. forthcoming 2018. (forthcoming). Citado 3 vezes nas páginas ix, 92 e 197.
- Atem de Carvalho, E. Investigação sobre o critério de gomez para materiais semi frágeis. forthcoming 2018. (forthcoming). Citado na página 46.
- BARENBLATT, G. I. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. general ideas and hypotheses. axially-symmetric cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Elsevier, v. 23, n. 3, p. 622–636, 1959. Citado na página 16.
- BARENBLATT, G. I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, Elsevier, v. 7, p. 55–129, 1962. Citado 4 vezes nas páginas vii, 16, 31 e 32.
- BAŽANT, Z.; GETTU, R.; KAZEMI, M. Identification of nonlinear fracture properties from size effect tests and structural analysis based on geometry-dependent r -curves. In: ELSEVIER. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. [S.l.], 1991. v. 28, n. 1, p. 43–51. Citado na página 36.
- BAŽANT, Z. P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal. *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, v. 110, n. 4, p. 518–535, 1984. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 30.
- BAŽANT, Z. P. Concrete fracture models: testing and practice. *Engineering fracture mechanics*, Elsevier, v. 69, n. 2, p. 165–205, 2002. Citado 3 vezes nas páginas vii, 12 e 13.
- BAŽANT, Z. P.; KIM, J.-K.; PFEIFFER, P. A. Nonlinear fracture properties from size effect tests. *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 112, n. 2, p. 289–307, 1986. Citado na página 23.

- BAŽANT, Z. P.; PIJAUDIER-CABOT, G. Measurement of characteristic length of nonlocal continuum. *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, v. 115, n. 4, p. 755–767, 1989. Citado na página 17.
- BAŽANT, Z. P.; PLANAS, J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. CRC Press, London, p. 616, 1998. Citado na página 12.
- BAŽANT, Z. P.; YU, Q. Universal size effect law and effect of crack depth on quasi-brittle structure strength. *Journal of engineering mechanics*, American Society of Civil Engineers, v. 135, n. 2, p. 78–84, 2009. Citado na página 46.
- BEER, F. P. et al. *Mecânica dos Materiais*. 5. ed. Porto Alegre, RGS: Mc Graw Hill - Bookman, 2011. 804 p. Citado 3 vezes nas páginas vii, 23 e 24.
- BELTRAMI, E. Sulle condizioni di resistenza dei corpi elastici. *Il Nuovo Cimento (1877-1894)*, Springer, v. 18, n. 1, p. 145–155, 1885. Citado na página 48.
- BERTO, F.; BARATI, E. Fracture assessment of u-notches under three point bending by means of local energy density. *Materials & Design*, Elsevier, v. 32, n. 2, p. 822–830, 2011. Citado 3 vezes nas páginas vii, 46 e 47.
- BERTO, F.; LAZZARIN, P.; MARANGON, C. Brittle fracture of u-notched graphite plates under mixed mode loading. *Materials & Design*, Elsevier, v. 41, p. 421–432, 2012. Citado na página 47.
- CHONG, K.; LI, V. C.; EINSTEIN, H. Size effects, process zone and tension softening behavior in fracture of geomaterials. *Engineering fracture mechanics*, Elsevier, v. 34, n. 3, p. 669–678, 1989. Citado 3 vezes nas páginas vii, 11 e 34.
- CICERO, S. et al. Analysis of notch effect on the fracture behaviour of granite and limestone: An approach from the theory of critical distances. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 177, p. 1–9, 2014. Citado na página 49.
- CICERO, S.; MADRAZO, V.; GARCIA, T. On the assessment of u-shaped notches using failure assessment diagrams and the line method: Experimental overview and validation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Elsevier, v. 80, p. 235–241, 2015. Citado na página 49.
- COTTERELL, B. The past, present, and future of fracture mechanics. *Engineering fracture mechanics*, Elsevier, v. 69, n. 5, p. 533–553, 2002. Citado na página 5.
- CREAGER, M.; PARIS, P. C. Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking. *International Journal of Fracture Mechanics*, Springer, v. 3, n. 4, p. 247–252, 1967. Citado na página 6.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. F. *Experimental Stress Analysis*. Knoxville, Tennessee: College House Enterprises, LLC, 2005. 671 p. Citado 5 vezes nas páginas xiii, 66, 104, 109 e 200.
- DAMANI, R.; GSTREIN, R.; DANZER, R. Critical notch-root radius effect in senb-s fracture toughness testing. *Journal of the European Ceramic Society*, Elsevier, v. 16, n. 7, p. 695–702, 1996. Citado na página 11.
- DONG, A. *Easy Statistics Series 2: Graphing*. 2016. Acessado em: 2016-03-17. Disponível em: <<http://www.dralexdong.com/statistics/easy-statistics-series-2-graphing>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 67.

- DUGDALE, D. S. Yielding in steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 8, p. 100–104, 1960. Citado 3 vezes nas páginas 16, 30 e 32.
- FETT, T. Influence of a finite notch root radius on fracture toughness. *Journal of the European Ceramic Society*, Elsevier, v. 25, n. 5, p. 543–547, 2005. Citado 3 vezes nas páginas vii, 11 e 43.
- FETT, T.; MUNZ, D.; THUN, G. *Fracture toughness and R-curve behaviour of PZT*. [S.l.]: Kernforschungszentrum, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- FILIPPI, S.; LAZZARIN, P.; TOVO, R. Developments of some explicit formulas useful to describe elastic stress fields ahead of notches in plates. *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, v. 39, n. 17, p. 4543–4565, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 45.
- FRIAES, A. de S. *Determinação de Lote Mínimo em Propriedades Mecânicas de Materias Frágeis*. 114 p. Graduação em Engenharia Metalúrgica — Universidade Estadual do Norte Fluminense-Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 50, 64 e 202.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. *Ensaaios dos Materiais*. 1. ed. Rio de Janeiro-RJ: Livros Técnicos e Científicos - LTC., 2000. 247 p. Citado 3 vezes nas páginas vii, 19 e 22.
- GLUCKLICH, J. Fracture of plain concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, v. 89, n. 6, p. 127–138, 1963. Citado na página 12.
- GOGOTSI, G. Fracture toughness studies on v-notched ceramic specimens. *Strength of materials*, Springer, v. 32, n. 1, p. 81–85, 2000. Citado 3 vezes nas páginas vii, 37 e 38.
- GOODMAN, R. E. *Introduction to Rock Mechanics*. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 1989. 576 p. Citado na página 39.
- GRIFFITH, A. The phenomena of flow and rupture in solids: *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Ser. A*, v. 221, p. 163–98, 1920. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- GÓMEZ, F.; GUINEA, G.; ELICES, M. Failure criteria for linear elastic materials with u-notches. *International Journal of Fracture*, Springer, v. 141, n. 1-2, p. 99–113, 2006. Citado 20 vezes nas páginas vii, viii, 16, 44, 45, 46, 51, 65, 72, 73, 75, 78, 79, 80, 90, 92, 96, 99, 106 e 131.
- HERTZBERG, R. W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. [S.l.]: Wiley, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 63.
- HILLERBORG, A. Examples of practical results achieved by means of the fictitious crack model. In: *Preprints, Prager Symp. on Mechanics of Geomaterials: Rocks, Concretes, Soils*. [S.l.: s.n.], 1983. p. 611–614. Citado na página 17.
- HOSHIDE, T. et al. Fracture mechanics approach to evaluation of strength in sintered silicon nitride. *International Journal of Fracture Mechanics*, Springer, Noordhoff, v. 26, n. 3, p. 229–239, 1984. Citado na página 28.
- INGLIS, C. E. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Trans. Roy. Inst. Naval Architects*, v. 60, p. 219–241, 1913. Citado 4 vezes nas páginas vii, 5, 7 e 18.

- IRWIN, G. Plastic zone near a crack and fracture toughness. Proc 7th Sagamore Ordinance Mater. Res. Conf, Racquette Lake, NY, iv, p. 63–78, Agosto 1960. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 30.
- IRWIN, G. et al. Fracture testing of high-strength sheet materials under conditions appropriate for stress analysis. Naval Research Laboratory, 1961. Citado na página 23.
- IRWIN, G. R. Fracture dynamics. *Fracturing of metals*, ASM Cleveland, v. 152, 1948. Citado na página 5.
- IRWIN, G. R. Fracturing of metals. ASM, Cleveland, OH, p. 147–166, 1955. Citado na página 5.
- IRWIN, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, v. 24, p. 361–364, 1957. Citado 3 vezes nas páginas 6, 7 e 16.
- IRWIN, G. R.; KIES, J. A.; SMITH, H. L. Fracture strengths relative to onset and arrest of crack propagation. In: *Proceedings ASTM*. [S.l.: s.n.], 1958. v. 58, p. 640–657. Citado na página 92.
- JUSTO, J. et al. Notch effect on the fracture of several rocks: Application of the theory of critical distances. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 90, n. Supplement C, p. 251 – 258, 2017. ISSN 0167-8442. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844217302483>>. Citado na página 49.
- KOBAYASHI, T.; YAMAMOTO, I.; NIINOMI, M. J. Introduction of a new dynamic fracture toughness evaluation system. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 21, p. 145–153, 1993. Citado na página 5.
- KRAFFT, J.; SULLIVAN, A.; BOYLE, R. Effect of dimensions on fast fracture instability of notched sheets. In: SN. *Proceedings of the crack propagation symposium*. [S.l.], 1961. v. 1, p. 8–26. Citado na página 23.
- KUMAR, S.; BARAI, S. V. *Concrete fracture models and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. Citado 5 vezes nas páginas vii, 12, 13, 14 e 23.
- LABUZ, J.; SHAH, S.; DOWDING, C. Experimental analysis of crack propagation in granite. In: ELSEVIER. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Great Britain: Pergamon Press Ltd, 1985. v. 22, n. 2, p. 85–98. Citado na página 30.
- LABUZ, J.; SHAH, S.; DOWDING, C. The fracture process zone in granite: evidence and effect. In: ELSEVIER. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. [S.l.], 1987. v. 24, n. 4, p. 235–246. Citado na página 33.
- LAZZARIN, P.; BERTO, F. Some expressions for the strain energy in a finite volume surrounding the root of blunt v-notches. *International Journal of Fracture*, Springer, v. 135, n. 1-4, p. 161–185, 2005. Citado na página 45.
- LAZZARIN, P.; ZAMBARDI, R. A finite-volume-energy based approach to predict the static and fatigue behavior of components with sharp v-shaped notches. *International journal of fracture*, Springer, v. 112, n. 3, p. 275–298, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 45.
- LEGUILLON, D.; YOSIBASH, Z. Crack onset at a v-notch. influence of the notch tip radius. *International journal of fracture*, Springer, v. 122, n. 1-2, p. 1–21, 2003. Citado na página 45.

- LI, V. C.; CHAN, C.-M.; LEUNG, C. K. Experimental determination of the tension-softening relations for cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 441–452, 1987. Citado na página 35.
- MCNAMARA, D. et al. Fracture toughness evaluation of polycrystalline diamond as a function of microstructure. *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier, v. 143, p. 1–16, 2015. Citado 2 vezes nas páginas vii e 18.
- MENDEZ, J.; GASC, C. On the influence of notch tip radius on fracture toughness measurements. *International Journal of Fracture*, Springer, v. 13, n. 3, p. 365–367, 1977. Citado na página 24.
- MENEGAZZO, A. P. M. *Estudo da correlação entre a microestrutura e as propriedades finais de revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelanato*. Tese (Doutorado) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 2001. Citado na página 53.
- National Instruments. *Medindo distensão com Strain Gauges*. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 57.
- NOGAMI, L. *INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS E DA RUGOSIDADE DE PLACAS DE GRANITOS E MARMORE FIXADAS COM ARGAMASSAS*. Tese (Doutorado) — USP, São Carlos, São Carlos, Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.loa.istc.cnr.it/Guizzardi/SELMAS-CR.pdf>>. Acesso em: 3.7.2011. Citado 3 vezes nas páginas viii, 52 e 53.
- OROWAN, E. Fracture and strength of solids. *Reports on progress in physics*, IOP Publishing, v. 12, n. 1, p. 185, 1949. Citado na página 5.
- OROWAN, E. Energy criteria of fracture. *Weld J*, p. 1575–1605, 1955. Citado na página 5.
- OUCHTERLONY, F.; SUN, Z. New methods of measuring fracture toughness on rock cores. In: LULEÅ TEKNISKA UNIVERSITET. *First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Lulea, Sweden, 1983. p. 199–224. Citado 3 vezes nas páginas vii, 26 e 33.
- OUYANG, C.; MOBASHER, B.; SHAH, S. P. An r-curve approach for fracture of quasi-brittle materials. *Engineering fracture mechanics*, Elsevier, v. 37, n. 4, p. 901–913, 1990. Citado na página 35.
- PILKEY, W. D. *Peterson's Stress Concentration Factors*. 3. ed. [S.l.]: pub:Wiley Interscience, 2008. Citado 9 vezes nas páginas vii, x, 8, 9, 10, 72, 92, 93 e 201.
- PLUVINAGE, G.; CAPELLE, J. On characteristic lengths used in notch fracture mechanics. *International Journal of Fracture*, v. 187, n. 1, p. 187–197, 2014. ISSN 1573-2673. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10704-013-9924-2>>. Citado na página 49.
- R Development Core Team. *R A language and environment for statistical computing*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 60.
- SAXENA, A.; HUDAK, S. Review and extension of compliance information for common crack growth specimens. *International Journal of Fracture*, Springer, v. 14, n. 5, p. 453–468, 1978. Citado na página 25.
- SCHINDLER, H.-J.; KALKHOF, D.; VIEHRIG, H.-W. Effect of notch acuity on the apparent fracture toughness. *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier, v. 129, p. 26–37, 2014. Citado na página 49.

- SHAH, S.; VELAZCO, G.; VISALVANICH, K. Fracture behavior and analysis of fiber reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Research*, Elsevier, v. 10, n. 1, p. 41–51, 1980. Citado na página 23.
- SHAH, S. P.; WECHARATANA, M. Slow crack growth in cement composites. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v. 108, n. 6, p. 1400–1413, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 35.
- SUN, Z.; OUCHTERLONY, F. Fracture toughness of stripa granite cores. In: ELSEVIER. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. [S.l.], 1986. v. 23, n. 6, p. 399–409. Citado na página 33.
- SUSMEL, L.; TAYLOR, D. The theory of critical distances as an alternative experimental strategy for the determination of k_{Ic} and δK_{th} . *Engineering Fracture Mechanics*, Dublin, Ireland, v. 77, n. 9, p. 1492–1501, June 2010. Citado na página 46.
- TADA, H.; PARIS, P.; IRWIN, G. *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. 3. ed. New York: ASME Press, 2000. 696 p. Citado na página 20.
- TANAKA, K. Engineering formulae for fatigue strength reduction due to crack-like notches. *International Journal of Fracture*, Springer, v. 22, n. 2, p. R39–R46, 1983. Citado na página 40.
- TANAKA, K. et al. R-curve behavior in fracture of notched porous ceramics. *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japão, v. 70, n. 9, p. 1101–1113, 2003. Citado 8 vezes nas páginas vii, 15, 39, 40, 41, 74, 75 e 123.
- TAROKH, A. et al. Scaling of the fracture process zone in rock. *International Journal of Fracture*, Springer, v. 204, n. 2, p. 191–204, 2017. Citado na página 13.
- TAYLOR, D. *The theory of critical distances: a new perspective in fracture mechanics*. [S.l.]: Elsevier, 2010. Citado na página 17.
- TAYLOR, D.; CORNETTI, P.; PUGNO, N. The fracture mechanics of finite crack extension. *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier, v. 72, n. 7, p. 1021–1038, 2005. Citado na página 45.
- TERRA, R. V. A. *Avaliação da tenacidade à fratura real e do uso da teoria da distância crítica em materiais semi-frágeis*. Dissertação (Mestrado) — Programa de pós-gradua em Materiais Avançados, UENF, Rio de Janeiro - RJ, 2013. Citado na página 89.
- TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, Wiley, International Biometric Society, 1949. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 109.
- TUKEY, J. W. *Exploratory data analysis*. [S.l.]: Reading, Mass., 1977. Citado na página 67.
- USAMI, S. et al. Strength of ceramic materials containing small flaws. *Engineering fracture mechanics*, Elsevier, v. 23, n. 4, p. 745–761, 1986. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944\(86\)90120-7](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7944(86)90120-7)>. Citado na página 39.
- WAWRZYNEK, P. A. *Discrete modeling of crack propagation: theoretical aspects and implementation issues in two and three dimensions*. [S.l.: s.n.], 1991. Citado na página 49.
- WEIBULL, W. A statistical theory of the strength of materials. *Proc. Royal Swedish Academy of Eng. Sci.*, n. 151, p. 1–45, 1939. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 46.

WESTERGAARD, H. M. Bearing pressures and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, v. 6, p. 49–53, 1939. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.

WONNACOTT, T. H.; WONNACOTT, R. J. Statistique-economie-gestion-21. sciences-médecine (avec exercices d'application). *Economica*, France, Paris, p. 211–259, 1991. Citado na página 64.

WONNACOTT, T. H.; WONNACOTT, R. J. Statistique-economie-gestion-21. sciences-médecine (avec exercices d'application). *Economica*, France, Paris, p. 211–259, 1991. Citado na página 89.

YOSIBASH, Z.; BUSSIBA, A.; GILAD, I. Failure criteria for brittle elastic materials. *International Journal of Fracture*, Springer, v. 125, n. 3-4, p. 307–333, 2004. Citado na página 48.

Apêndices

APÊNDICE A – Dados dos Experimentos

A.1 Avaliação do Tirante de aço

Tabela A.1 – Dimensões do Tirante de Aço

Dimensão	Valor medido
Altura	150 mm
Largura	60 mm
Espessura	30 mm
Área	1846,25 mm ²

A.3 Dados dos CPs de Compressão

Tabela A.3 – Dimensões do CP de Compressão

Dimensão	Valor medido
Altura	150,45 mm
a	30,32 mm
b	60,38 mm
c	30,79 mm
d	60,51 mm
$\hat{\alpha}$	88,5 mm
$\hat{\beta}$	91,5 mm
$rea(mm^2)$	1846,25 mm ²

Tabela A.4 – Dimensões do CPL de Compressão (003)

Dimensão	Valor medido
Altura	150 mm
Largura	59,37 mm
Espessura	30,62 mm
Área	1822,50 mm ²
Ângulo (α)	87,15°

O corpo de prova inicial utilizado para compressão produziu como resultados:

- Dimensões do CP (Tabela A.4);
- Cargas fixadas para obter E e ν ;
- Cálculos de tensão;

Tabela A.5 – Dados de carregamento do ensaio de compressão (CPL002)

Carga (kN)	ϵ_1 ($\mu\epsilon$)	ϵ_2 ($\mu\epsilon$)	ν	ϵ_{long} (strain)	σ (MPa)	E (Young) (MPa)
30,82	-144	24	0,167	0,000144	16,69	
41,63	-227	38	0,167	0,000227	22,55	70543,51461
50,35	-294	50	0,170	0,000294	27,27	70521,32701
61,24	-378	66	0,175	0,000378	33,17	70412,99932
70,40	-448	79	0,176	0,000448	38,13	70519,90165
81,40	-531	95	0,179	0,000531	44,09	70790,88662
91,70	-609	110	0,181	0,000609	49,67	70913,86929

$$\hat{\nu} = 0,174$$

$$\hat{E} = 70617,08309$$

Tabela A.6 – Dados de carregamento do ensaio de compressão (CPL003)

Carga (kN)	ϵ_1 ($\mu\epsilon$)	ϵ_2 ($\mu\epsilon$)	ν	ϵ_{long} (strain)	σ (MPa)	E (Young) (MPa)
9,50	-149	31	0,208	0,000144	5,20	42866.9
12,40	-179	37	0,207	0,000227	6,78	53040.7
15,45	-210	44	0,210	0,000294	8,45	53984.7
18,80	-244	50	0,205	0,000378	10,29	54062.8
23,00	-285	58	0,204	0,000448	12,58	56208.0
27,00	-321	65	0,202	0,000531	14,77	60966.3
33,25	-375	76	0,203	0,000609	18,19	63506.6

$$\hat{\nu} = 0,211$$

$$\hat{E} = 54948.0$$

Tabela A.7 – Propriedades mecânicas do CP de Compressão

Propriedade	Valor calculado
módulo de elasticidade	57,2 GPa
coeficiente de Poisson	0,211

A.4 Dados dos CPs de flexão

A.4.1 Dados de CPs lisos em flexão de 4 pontos

Tabela A.8 – Dados de CPs lisos em flexão de 4 pontos

multicolumnlrl CP	Altura			Largura			tamanho (mm)	carga (N)	σ_{Nc} (MPa)
	esq (mm)	dir (mm)	média (mm)	esq (mm)	dir (mm)	média (mm)			
cp101	29,34	29,50	29,42	30,63	30,60	30,62	150,42	3037,6	12.04
cp102	29,18	29,12	29,15	30,71	30,85	30,78	150,40	2954,4	11.86
cp103	29,03	29,16	29,10	30,63	30,65	30,64	150,08	2631,3	10.65
cp104	29,17	29,00	29,09	30,68	31,14	30,91	150,71	3103,7	12.46
cp105	29,02	29,17	29,10	30,75	30,79	30,77	150,72	2731,1	11.01
cp106	29,15	29,17	29,16	30,50	30,50	30,50	150,80	3140,2	12.71
cp107	29,12	29,20	29,16	30,50	30,55	30,53	151,30	3107,1	12.57
cp108	29,51	29,37	29,44	30,53	30,72	30,63	150,86	2974,5	11.77
cp109	29,44	29,29	29,37	30,57	30,77	30,67	150,66	2667,7	10.59
cp110	29,50	29,31	29,41	30,49	30,45	30,47	150,55	2995	11.94
cp111	29,30	29,44	29,37	30,50	30,58	30,54	150,62	2854,9	11.38
cp112	29,26	29,43	29,35	30,59	30,44	30,52	150,49	Falha	
cp112b	29,11	29,17	29,14	30,69	30,77	30,73	150,90	3314,8	13.34
cp113	29,47	29,29	29,38	30,58	30,77	30,68	150,48	2864,4	11.36
cp114	29,25	29,04	29,15	30,62	30,71	30,67	150,74	3119,7	12.58
cp115	29,24	29,06	29,15	30,72	30,75	30,74	150,67	3341,2	13.43
cp116	29,42	29,22	29,32	30,52	30,57	30,55	150,62	3342,2	13.36
cp117	29,15	29,02	29,09	30,65	30,63	30,64	150,67	3032,7	12.29
cp118	29,59	29,32	29,46	30,54	30,55	30,55	150,04	3374,8	13.37
cp119	29,45	29,28	29,37	30,72	30,73	30,73	150,54	2921,7	11.58
cp120	29,28	29,06	29,17	30,84	30,76	30,80	150,85	2466,2	9.88
cp121	29,16	29,01	29,09	30,63	30,85	30,74	150,81	2788,8	11.26
cp122	29,16	29,21	29,19	30,63	30,54	30,59	150,77	3245,6	13.08
cp123	29,16	29,07	29,12	30,68	30,58	30,63	150,87	3091,6	12.50
cp124	29,26	29,13	29,20	30,75	30,84	30,80	150,72	Falha	
cp124b	29,29	29,32	29,31	30,42	30,45	30,44	150,90	3166,3	12.72
cp125	29,28	29,53	29,41	30,64	30,56	30,60	150,43	2948,2	11.70
média			29,24			30,64	150,65	3008,6	12.06
std dev			0,13			0,12	0,26	235,0	0.95
coef. var			0,45%			0,38%	0,17%	7,8%	7.92%
min			29,09			30,44	150,04	2466,2	9.88
máx			29,46			30,91	151,30	3374,8	13.43

Tabela A.9 – Distribuição Weibull dos CPs lisos em flexão de 4 pontos

CP	#	σ_{rup} (MPa)	PF (%)	$\ln(\sigma_{rup})$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-PF}\right)\right)$	S_{x2}	S_{y2}	S_{xy}
cp120	1	9.9	0.7	2.3	0.1	5.2	0.0	0.3
cp109	2	10.6	0.7	2.4	0.3	5.6	0.1	0.7
cp103	3	10.7	0.7	2.4	0.3	5.6	0.1	0.7
cp105	4	11.0	0.8	2.4	0.4	5.8	0.1	0.9
cp121	5	11.3	0.8	2.4	0.4	5.9	0.2	1.0
cp113	6	11.4	0.8	2.4	0.4	5.9	0.2	1.1
cp111	7	11.4	0.8	2.4	0.4	5.9	0.2	1.1
cp119	8	11.6	0.8	2.4	0.5	6.0	0.2	1.2
cp125	9	11.7	0.8	2.5	0.5	6.0	0.3	1.3
cp108	10	11.8	0.8	2.5	0.5	6.1	0.3	1.3
cp102	11	11.9	0.8	2.5	0.5	6.1	0.3	1.3
cp110	12	11.9	0.8	2.5	0.6	6.1	0.3	1.4
cp101	13	12.0	0.8	2.5	0.6	6.2	0.3	1.5
cp117	14	12.3	0.9	2.5	0.6	6.3	0.4	1.6
cp104	15	12.5	0.9	2.5	0.7	6.4	0.5	1.7
cp123	16	12.5	0.9	2.5	0.7	6.4	0.5	1.8
cp107	17	12.6	0.9	2.5	0.7	6.4	0.5	1.8
cp114	18	12.6	0.9	2.5	0.7	6.4	0.5	1.8
cp106	19	12.7	0.9	2.5	0.8	6.5	0.6	1.9
cp124b	20	12.7	0.9	2.5	0.8	6.5	0.6	1.9
cp122	21	13.1	0.9	2.6	0.9	6.6	0.7	2.2
cp112b	22	13.3	0.9	2.6	0.9	6.7	0.9	2.5
cp116	23	13.4	0.9	2.6	1.0	6.7	0.9	2.5
cp118	24	13.4	0.9	2.6	1.0	6.7	0.9	2.5
cp115	25	13.4	0.9	2.6	1.0	6.7	1.0	2.6
Σ	25			62.2	15.3	154.7	10.6	38.4

A.4.2 Dados de CPs lisos em flexão 4 pontos com critério de Chauvenet

Tabela A.10 – Dados de CPs lisos em flexão 4 pontos com critério de Chauvenet

CP	Altura		Largura			Comprimento (mm)	Carga (N)	$\sigma - N$ (MPa)	Chauvenet (%)	Resposta	
	Esq. (mm)	Dir. (mm)	Média (mm)	Esq. (mm)	Dir. (mm)						Média (mm)
cp101	29.34	29.50	29.42	30.63	30.60	30.62	150.42	3037.6	12.0	5%	Ok
cp102	29.18	29.12	29.15	30.71	30.85	30.78	150.40	2954.4	11.9	9%	Ok
cp103	29.03	29.16	29.10	30.63	30.65	30.64	150.08	2631.3	10.7	68%	Ok
cp104	29.17	29.00	29.09	30.68	31.14	30.91	150.71	3103.7	12.5	17%	Ok
cp105	29.02	29.17	29.10	30.75	30.79	30.77	150.72	2731.1	11.0	50%	Ok
cp106	29.15	29.17	29.16	30.50	30.50	30.50	150.80	3140.2	12.7	24%	Ok
cp107	29.12	29.20	29.16	30.50	30.55	30.53	151.30	3107.1	12.6	17%	Ok
cp108	29.51	29.37	29.44	30.53	30.72	30.63	150.86	2974.5	11.8	6%	Ok
cp109	29.44	29.29	29.37	30.57	30.77	30.67	150.66	2667.7	10.6	62%	Ok
cp110	29.50	29.31	29.41	30.49	30.45	30.47	150.55	2995.0	11.9	2%	Ok
cp111	29.30	29.44	29.37	30.50	30.58	30.54	150.62	2854.9	11.4	28%	Ok
cp112	29.26	29.43	29.35	30.59	30.44	30.52	150.49	Falha			
cp112b	29.11	29.17	29.14	30.69	30.77	30.73	150.90	3314.8	13.3	55%	Ok
cp113	29.47	29.29	29.38	30.58	30.77	30.68	150.48	2864.4	11.4	26%	Ok
cp114	29.25	29.04	29.15	30.62	30.71	30.67	150.74	3119.7	12.6	20%	Ok
cp115	29.24	29.06	29.15	30.72	30.75	30.74	150.67	3341.2	13.4	60%	Ok
cp116	29.42	29.22	29.32	30.52	30.57	30.55	150.62	3342.2	13.4	60%	Ok
cp117	29.15	29.02	29.09	30.65	30.63	30.64	150.67	3032.7	12.3	4%	Ok
cp118	29.59	29.32	29.46	30.54	30.55	30.55	150.04	3374.8	13.4	66%	Ok
cp119	29.45	29.28	29.37	30.72	30.73	30.73	150.54	2921.7	11.6	15%	Ok
cp120	29.28	29.06	29.17	30.84	30.76	30.80	150.85	2466.2	9.9	99%	Ok
cp121	29.16	29.01	29.09	30.63	30.85	30.74	150.81	2788.8	11.3	40%	Ok
cp122	29.16	29.21	29.19	30.63	30.54	30.59	150.77	3245.6	13.1	43%	Ok
cp123	29.16	29.07	29.12	30.68	30.58	30.63	150.87	3091.6	12.5	15%	Ok
cp124	29.26	29.13	29.20	30.75	30.84	30.80	150.72	Falha			
cp124b	29.29	29.32	29.31	30.42	30.45	30.44	150.90	3166.3	12.7	28%	Ok
cp125	29.28	29.53	29.41	30.64	30.56	30.60	150.43	2948.2	11.7	11%	Ok
média			29.24			30.64	150.65	3008.6	12.1		
std dev			0.13			0.12	0.26	235.0	0.9		
coef. var			0.45			0.38	0.17	7.8	7.1		
min			29.09			30.44	150.04	2466.2	9.9		
máx			29.46			30.91	151.30	3374.8	13.4		

A.4.3 Dados dos CPs entalhados com a serra de 0,20 mm

Tabela A.11 – Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,20 mm $a_0 \approx 9$ mm

# cp	ρ (mm)	Compr (L) (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	ΔR (%)
201	0.262	151.96	31.29	31.97	9.42	21.87	1578.6	5.30	30%	1.12	1.0	15% Ok	12% Ok
202	0.262	152.10	31.24	31.87	9.42	21.81	1510.5	5.10	30%	1.12	1.0	31% Ok	42% Ok
203	0.249	151.28	31.15	31.93	9.71	21.44	1576.7	5.35	31%	1.13	1.1	61% Ok	65% Ok
204	0.253	152.00	31.10	31.84	8.96	22.15	1522.8	5.19	29%	1.11	1.0	55% Ok	70% Ok
205	0.266	151.70	31.08	31.79	9.13	21.95	1615.7	5.52	29%	1.12	1.0	42% Ok	43% Ok
206	0.262	152.00	31.08	31.81	9.29	21.78	1506.0	5.15	30%	1.12	1.0	32% Ok	42% Ok
207	0.266	151.80	31.21	31.96	9.14	22.07	1623.6	5.48	29%	1.12	1.0	30% Ok	29% Ok
208	0.253	151.55	31.16	31.69	9.57	21.59	1563.7	5.34	31%	1.13	1.0	42% Ok	43% Ok
209	0.262	152.07	31.32	31.70	10.12	21.20	1403.9	4.74	32%	1.15	1.0	53% Ok	67% Ok
210	0.257	151.64	31.18	31.78	9.14	22.04	1632.6	5.55	29%	1.12	1.0	48% Ok	50% Ok
211	0.257	152.00	31.25	31.85	8.60	22.65	1504.0	5.08	28%	1.10	0.9	119% EX	
212	0.262	152.08	31.32	31.52	8.79	22.53	1692.1	5.75	28%	1.10	1.1	55% Ok	58% Ok
213	0.219	152.08	31.46	31.56	8.86	22.60	1637.0	5.51	28%	1.10	1.0	4% Ok	0% Ok
214	0.253	151.52	31.47	31.46	10.14	21.33	1461.0	4.93	32%	1.15	1.0	5% Ok	12% Ok
215	0.253	151.60	31.18	31.59	9.47	21.71	1559.6	5.33	30%	1.13	1.0	31% Ok	30% Ok
216	0.253	152.00	31.36	31.74	9.17	22.19	1576.8	5.30	29%	1.11	1.0	9% Ok	16% Ok
217	0.241	152.24	31.49	31.91	9.07	22.42	1676.4	5.56	29%	1.11	1.0	41% Ok	42% Ok
218	0.249	151.72	31.28	31.64	8.88	22.40	1654.6	5.61	28%	1.11	1.0	34% Ok	33% Ok
219	0.249	152.64	30.93	31.36	9.37	21.56	1521.6	5.33	30%	1.12	1.0	21% Ok	19% Ok
220	0.245	151.84	31.15	31.44	8.90	22.25	1542.6	5.31	29%	1.11	1.0	34% Ok	45% Ok
221	0.257	152.48	31.25	31.56	9.22	22.03	1625.1	5.54	30%	1.12	1.1	53% Ok	56% Ok
222	0.228	151.74	31.16	31.47	9.04	22.12	1580.1	5.43	29%	1.11	1.0	8% Ok	4% Ok
223	0.253	151.40	30.94	31.89	9.49	21.44	1442.8	4.96	31%	1.13	1.0	55% Ok	69% Ok
224	0.253	151.74	31.05	31.83	8.98	22.07	1516.6	5.19	29%	1.11	1.0	53% Ok	67% Ok
225	0.253	151.88	31.39	31.58	9.23	22.16	1522.7	5.14	29%	1.12	1.0	43% Ok	55% Ok

# cp	ρ (mm)	Compr (L) (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}$)	ΔR (%)	ΔR (%)
média	0.253	151.88	31.22	31.71	9.24	21.97	1564.3	5.3	30%	1.12	1.0	1.0	1.0
stdev	0.011	0.31	0.15	0.18	0.37	0.40	73.2	0.2	1%	0.01	0.0	0.0	0.0
cv	4.29%	0.21%	0.48%	0.57%	4.05%	1.81%	4.68%	4.48%	4%	1.01%	3.62%	3.12%	3.12%
mín	0.219	151.28	30.93	31.36	8.60	21.20	1403.9	4.7	28%	1.10	1.1	1.1	1.1
máx	0.266	152.64	31.49	31.97	10.14	22.65	1692.1	5.7	32%	1.15	0.9	1.0	1.0

Tabela A.12 – Distribuição de Weibull com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 9$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	209	4.74	0.02	1.56	-3.90	0.01	11.13	0.37
2	214	4.93	0.06	1.59	-2.78	0.01	4.91	0.16
3	223	4.96	0.10	1.60	-2.25	0.00	2.84	0.11
4	211	5.08	0.14	1.62	-1.89	0.00	1.76	0.06
5	202	5.10	0.18	1.63	-1.62	0.00	1.11	0.04
6	225	5.14	0.22	1.64	-1.39	0.00	0.68	0.03
7	206	5.15	0.26	1.64	-1.20	0.00	0.40	0.02
8	224	5.19	0.30	1.65	-1.03	0.00	0.22	0.01
9	204	5.19	0.34	1.65	-0.88	0.00	0.10	0.01
10	201	5.30	0.38	1.67	-0.74	0.00	0.03	0.00
11	216	5.30	0.42	1.67	-0.61	0.00	0.00	0.00
12	220	5.31	0.46	1.67	-0.48	0.00	0.01	0.00
13	219	5.33	0.50	1.67	-0.37	0.00	0.04	0.00
14	215	5.33	0.54	1.67	-0.25	0.00	0.10	0.00
15	208	5.34	0.58	1.67	-0.14	0.00	0.18	0.00
16	203	5.35	0.62	1.68	-0.03	0.00	0.28	0.00
17	222	5.43	0.66	1.69	0.08	0.00	0.41	0.02
18	207	5.48	0.70	1.70	0.19	0.00	0.56	0.02
19	213	5.51	0.74	1.71	0.30	0.00	0.75	0.03
20	205	5.52	0.78	1.71	0.41	0.00	0.96	0.04
21	221	5.54	0.82	1.71	0.54	0.00	1.22	0.05
22	210	5.55	0.86	1.71	0.68	0.00	1.54	0.06
23	217	5.56	0.90	1.72	0.83	0.00	1.96	0.07
24	218	5.61	0.94	1.73	1.03	0.00	2.56	0.09
25	212	5.75	0.98	1.75	1.36	0.01	3.72	0.16
N =	25		Médias	1.67	-0.57			
					Somas	0.05	37.48	1.35

Tabela A.13 – Análise da serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 9$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	27.34
Coef. Lin.	-46.17
m	27.34
$\ln(\sigma_0)$	1.69
σ_0	5.41
Equação	$y = 27.34x + (-46.18)$
R^2	0.98

Tabela A.14 – Dados dos CPs entalhados com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 12$ mm

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}$)	ΔR (%)	ΔR (%)	ΔR (%)	ΔR (%)
101	0.195	31.12	31.74	11.86	19.26	1101.2	3.76	38%	1.22	0.89	60% Ok	71% Ok	83% Ok	83% Ok
102	0.208	30.99	31.45	12.33	18.65	1084.9	3.77	40%	1.25	0.93	28% Ok	35% Ok	44% Ok	44% Ok
103	0.216	31.08	31.86	12.48	18.59	1152.4	3.93	40%	1.26	0.98	11% Ok	8% Ok	3% Ok	3% Ok
104	0.208	31.24	31.57	12.43	18.80	991.1	3.38	40%	1.25	0.84	102% EX			
105	0.203	31.09	31.97	12.81	18.27	1179.0	4.01	41%	1.28	1.03	48% Ok	48% Ok	48% Ok	48% Ok
106	0.208	31.31	31.62	12.66	18.65	1118.6	3.79	40%	1.26	0.95	8% Ok	14% Ok	20% Ok	20% Ok
107	0.195	31.22	31.73	12.80	18.42	1097.6	3.73	41%	1.27	0.95	10% Ok	16% Ok	23% Ok	23% Ok
108	0.208	30.99	31.83	12.60	18.39	1139.7	3.92	41%	1.27	0.99	17% Ok	14% Ok	10% Ok	10% Ok
109	0.216	31.01	31.88	12.33	18.68	1236.5	4.24	40%	1.25	1.04	60% Ok	62% Ok	63% Ok	63% Ok
110	0.208	31.31	31.49	11.99	19.32	1143.3	3.89	38%	1.23	0.93	31% Ok	39% Ok	48% Ok	48% Ok
111	0.203	31.26	31.54	12.30	18.96	1148.7	3.91	39%	1.24	0.96	6% Ok	11% Ok	18% Ok	18% Ok
112	0.208	31.25	31.51	12.05	19.20	1124.2	3.84	39%	1.23	0.92	36% Ok	45% Ok	54% Ok	54% Ok
113	0.208	30.99	31.49	12.11	18.88	1180.8	4.10	39%	1.24	0.99	20% Ok	17% Ok	14% Ok	14% Ok
114	0.208	31.09	31.64	12.02	19.08	1306.4	4.49	39%	1.23	1.07	85% Ok	89% Ok	93% Ok	93% Ok
115	0.192	31.32	31.55	11.88	19.44	1257.2	4.27	38%	1.22	1.01	32% Ok	30% Ok	28% Ok	28% Ok
116	0.195	31.31	31.61	11.85	19.46	1218.2	4.13	38%	1.22	0.97	4% Ok	0% Ok	4% Ok	4% Ok
117	0.195	31.19	31.35	11.90	19.28	1193.0	4.11	38%	1.23	0.97	5% Ok	1% Ok	2% Ok	2% Ok
118	0.195	31.26	31.53	11.69	19.57	1277.6	4.35	37%	1.21	1.01	36% Ok	35% Ok	34% Ok	34% Ok
119	0.195	31.24	31.53	11.62	19.62	1245.7	4.25	37%	1.21	0.98	13% Ok	9% Ok	5% Ok	5% Ok
120	0.203	31.36	31.76	11.78	19.58	1085.6	3.65	38%	1.22	0.85	88% Ok	101% EX		
121	0.203	31.03	31.92	12.17	18.86	1246.3	4.26	39%	1.24	1.03	54% Ok	54% Ok	55% Ok	55% Ok
122	0.203	31.29	32.13	11.81	19.47	1260.6	4.21	38%	1.22	0.99	17% Ok	14% Ok	11% Ok	11% Ok
123	0.199	31.40	31.69	11.80	19.60	1106.1	3.72	38%	1.22	0.87	75% Ok	87% Ok	101% EX	
124	0.212	31.22	31.94	12.40	18.81	1223.9	4.13	40%	1.25	1.02	42% Ok	41% Ok	41% Ok	41% Ok
125	0.195	31.24	31.82	12.15	19.09	1180.2	3.99	39%	1.24	0.96	0% Ok	5% Ok	11% Ok	11% Ok

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}$)	ΔR (%)	ΔR (%)	ΔR (%)	ΔR (%)
média	0.195	31.17	31.69	12.17	19.00	1187.1	4.05	39%		0.97	0.97	0.98	0.98	0.98
stdev	0.007	0.12	0.21	0.35	0.41	64.0	0.21	1%		0.06	0.05	0.05	0.05	0.04
cv	3.8%	0.4%	0.6%	2.9%	2.1%	5.4%	5.3%	3.01%		6.16%	5.58%	5.03%	4.52%	4.52%
mín	0.192	30.99	31.35	11.62	18.27	1084.9	3.73	37%		0.84	0.85	0.87	0.87	0.89
máx	0.216	31.32	32.13	12.81	19.62	1306.4	4.49	41%		1.07	1.07	1.07	1.07	1.07

Tabela A.15 – Distribuição de Weibull com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 12$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - PF}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	107	3.73	0.02	1.32	-3.77	0.01	10.29	0.26
2	101	3.76	0.07	1.33	-2.65	0.01	4.35	0.15
3	102	3.77	0.11	1.33	-2.12	0.00	2.40	0.11
4	106	3.79	0.16	1.33	-1.75	0.00	1.41	0.08
5	112	3.84	0.20	1.34	-1.47	0.00	0.83	0.05
6	110	3.89	0.25	1.36	-1.25	0.00	0.46	0.03
7	111	3.91	0.30	1.36	-1.05	0.00	0.24	0.02
8	108	3.92	0.34	1.36	-0.87	0.00	0.10	0.01
9	103	3.93	0.39	1.37	-0.72	0.00	0.02	0.00
10	125	3.99	0.43	1.38	-0.57	0.00	0.00	0.00
11	105	4.01	0.48	1.39	-0.43	0.00	0.02	0.00
12	113	4.10	0.52	1.41	-0.30	0.00	0.07	0.00
13	117	4.11	0.57	1.41	-0.17	0.00	0.15	0.01
14	116	4.13	0.61	1.42	-0.05	0.00	0.26	0.01
15	124	4.13	0.66	1.42	0.07	0.00	0.41	0.01
16	122	4.21	0.70	1.44	0.20	0.00	0.58	0.03
17	109	4.24	0.75	1.44	0.33	0.00	0.79	0.04
18	119	4.25	0.80	1.45	0.46	0.00	1.05	0.05
19	121	4.26	0.84	1.45	0.61	0.00	1.38	0.06
20	115	4.27	0.89	1.45	0.78	0.00	1.80	0.07
21	118	4.35	0.93	1.47	0.99	0.01	2.41	0.12
22	114	4.49	0.98	1.50	1.33	0.01	3.59	0.20
N =	22		Médias	1.40	-0.56			
					Somas	0.06	32.63	1.30

Tabela A.16 – Análise da serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 12$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	
Coef. Lin.	
m	
$\ln(\sigma_0)$	
σ_0	
Equação	$y = 12.45x + (-22.24)$
R^2	

Tabela A.17 – Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 15$ mm

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	ΔR (%)	ΔR (%)
301	0.215	31.08	31.79	15.69	15.38	774.5	2.65	50%	1.51	0.9	10% Ok	33% Ok	47% Ok
302	0.194	31.16	31.86	15.24	15.92	842.0	2.86	49%	1.46	0.9	14% Ok	4% Ok	1% Ok
303	0.203	31.30	31.93	15.67	15.63	838.2	2.81	50%	1.50	0.9	33% Ok	34% Ok	34% Ok
304	0.215	31.46	31.88	15.37	16.09	868.2	2.89	49%	1.46	0.9	25% Ok	23% Ok	20% Ok
305	0.215	31.24	31.84	15.56	15.68	791.6	2.68	50%	1.49	0.9	17% Ok	45% Ok	61% Ok
306	0.207	31.13	31.79	15.49	15.64	812.6	2.77	50%	1.49	0.9	9% Ok	3% Ok	10% Ok
307	0.203	31.09	31.77	15.49	15.60	817.5	2.80	50%	1.49	0.9	18% Ok	10% Ok	5% Ok
308	0.215	31.28	31.85	16.04	15.24	664.3	2.24	51%	1.54	0.8	119% EX		
309	0.207	31.30	31.51	15.76	15.54	679.3	2.31	50%	1.51	0.8	117% EX		
310	0.203	31.21	31.83	15.87	15.33	797.3	2.70	51%	1.52	0.9	17% Ok	10% Ok	5% Ok
311	0.207	31.27	31.64	15.46	15.81	835.5	2.84	49%	1.48	0.9	22% Ok	17% Ok	13% Ok
312	0.207	31.26	32.00	16.05	15.21	743.1	2.50	51%	1.54	0.9	34% Ok	72% Ok	93% Ok
313	0.181	31.19	32.18	15.20	15.98	899.6	3.02	49%	1.46	1.0	58% Ok	73% Ok	80% Ok
314	0.19	31.20	31.71	14.87	16.33	897.2	3.05	48%	1.43	0.9	39% Ok	43% Ok	45% Ok
315	0.203	31.27	31.97	14.76	16.50	913.0	3.07	47%	1.41	0.9	32% Ok	34% Ok	33% Ok
316	0.207	31.33	31.69	14.70	16.62	864.3	2.92	47%	1.41	0.9	15% Ok	42% Ok	58% Ok
317	0.207	31.20	31.74	15.17	16.02	825.8	2.81	49%	1.45	0.9	7% Ok	29% Ok	42% Ok
318	0.198	31.16	31.69	15.03	16.13	883.4	3.02	48%	1.44	0.9	42% Ok	49% Ok	52% Ok
319	0.186	31.26	31.79	15.00	16.26	838.9	2.84	48%	1.44	0.9	14% Ok	40% Ok	55% Ok
320	0.194	31.00	31.80	14.69	16.30	878.1	3.02	47%	1.42	0.9	19% Ok	13% Ok	8% Ok
321	0.211	31.23	31.76	14.63	16.59	898.8	3.05	47%	1.40	0.9	17% Ok	10% Ok	5% Ok
322	0.194	31.32	32.05	15.05	16.28	913.0	3.05	48%	1.44	1.0	49% Ok	60% Ok	65% Ok
323	0.198	30.86	31.92	15.47	15.39	728.4	2.52	50%	1.50	0.8	63% Ok	118% EX	
324	0.203	30.90	31.84	15.41	15.49								
325	0.203	31.26	31.86	14.80	16.46								

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	ΔR (%)	ΔR (%)
média	0.203	31.21	31.83	15.25	15.96	846.6	2.9	49%		0.90	0.91	0.92	
stdev	0.009	0.10	0.13	0.41	0.42	48.2	0.2	1%		0.05	0.03	0.03	
cv	4.47%	0.33%	0.42%	2.69%	2.64%	5.69%	5.57%	2.70%		5.57%	3.49%	2.91%	
mín	0.181	31.00	31.64	14.63	15.21	743.1	2.5	47%		0.77	0.83	0.86	
máx	0.215	31.46	32.18	16.05	16.62	913.0	3.1	51%		0.96	0.96	0.96	

Tabela A.18 – Distribuição de Weibull com a serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 15$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - PF}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	312	2.50	0.03	0.91	-3.68	0.02	9.69	0.43
2	301	2.65	0.08	0.97	-2.55	0.01	3.95	0.15
3	305	2.68	0.13	0.98	-2.01	0.00	2.10	0.10
4	310	2.70	0.18	0.99	-1.65	0.00	1.18	0.06
5	306	2.77	0.23	1.02	-1.37	0.00	0.65	0.03
6	307	2.80	0.28	1.03	-1.13	0.00	0.33	0.01
7	317	2.81	0.33	1.03	-0.93	0.00	0.14	0.01
8	303	2.81	0.38	1.03	-0.76	0.00	0.04	0.00
9	319	2.84	0.43	1.04	-0.59	0.00	0.00	0.00
10	311	2.84	0.48	1.04	-0.44	0.00	0.02	0.00
11	302	2.86	0.53	1.05	-0.30	0.00	0.07	0.00
12	304	2.89	0.58	1.06	-0.16	0.00	0.17	0.00
13	316	2.92	0.63	1.07	-0.02	0.00	0.30	0.01
14	318	3.02	0.68	1.10	0.12	0.00	0.46	0.04
15	320	3.02	0.73	1.10	0.26	0.00	0.67	0.04
16	313	3.02	0.78	1.10	0.40	0.00	0.93	0.05
17	321	3.05	0.83	1.11	0.56	0.00	1.25	0.07
18	322	3.05	0.88	1.11	0.73	0.00	1.68	0.08
19	314	3.05	0.93	1.12	0.95	0.00	2.30	0.10
20	315	3.07	0.98	1.12	1.31	0.00	3.49	0.13
N =	20		Médias	1.05	-0.56			
					Somas	0.06	29.40	1.31

Tabela A.19 – Análise da serra de 0,20 mm, $a_0 \approx 15$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	21.58
Coef. Lin.	-23.25
m	21.58
$\ln(\sigma_0)$	1.08
σ_0	2.94
Equação	$y = 21.57x + (-23.26)$
R^2	0.96

A.4.4 Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm

A.4.4.1 Dados dos CPs com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)

Tabela A.20 – Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)

# cp	ρ (mm)	Comp. (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} (MPa·√m)	ΔR (%)	ΔR (%)
1		152.13	30.39	30.86									
2	0.171	152.60	30.43	30.52	8.97	21.46	1318.2	4.90	29%	1.12	0.92	62% Ok	79% Ok
3	0.171	152.60	30.34	30.58	8.79	21.56	1402.7	5.23	29%	1.11	0.97	43% Ok	57% Ok
4	0.171	152.16	30.12	30.40	9.30	20.83	1625.4	6.19	31%	1.13	1.20	43% Ok	44% Ok
5	0.171	152.25	30.14	30.31	8.76	21.38	1427.4	5.45	29%	1.11	1.01	28% Ok	40% Ok
6	0.171	151.91	30.06	30.26	8.84	21.22	1467.0	5.64	29%	1.12	1.05	12% Ok	21% Ok
7	0.163	152.20	30.20	30.21	9.40	20.80	1462.4	5.58	31%	1.13	1.09	1% Ok	4% Ok
8	0.171	152.22	30.17	30.32	9.46	20.71	1714.5	6.53	31%	1.14	1.28	75% Ok	80% Ok
9	0.171	152.09	30.35	30.60	9.16	21.19	1587.3	5.91	30%	1.12	1.13	17% Ok	13% Ok
10	0.171	153.21	30.57	30.41	10.01	20.56	1452.6	5.37	33%	1.15	1.10	5% Ok	0% Ok
11	0.171	152.24	30.16	30.37	9.19	20.97	1515.8	5.76	30%	1.13	1.10	8% Ok	3% Ok
12	0.171	152.08	30.14	30.36	9.10	21.04	1710.7	6.51	30%	1.12	1.24	59% Ok	62% Ok
13	0.171	152.23	30.15	30.34	9.17	20.99	1603.1	6.10	30%	1.13	1.17	32% Ok	31% Ok
14	0.171	152.25	30.43	30.08	8.57	21.86	1617.2	6.10	28%	1.10	1.11	9% Ok	4% Ok
15	0.171	153.19	31.12	30.29	9.30	21.82	1174.7	4.21	30%	1.12	0.81	105% EX	
16	0.171	152.38	30.38	30.18	9.40	20.98	1423.0	5.37	31%	1.13	1.04	14% Ok	23% Ok
17	0.171	152.25	29.59	30.50	9.60	19.99	1344.5	5.29	32%	1.15	1.05	10% Ok	18% Ok
18	0.180	152.27	30.38	30.31	9.24	21.14	1797.7	6.75	30%	1.13	1.29	81% Ok	88% Ok
19	0.163	152.23	30.29	30.10	9.40	20.89	1392.4	5.29	31%	1.13	1.03	19% Ok	29% Ok
20	0.171	152.13	30.29	30.55	9.50	20.79	1333.4	5.00	31%	1.14	0.98	38% Ok	51% Ok
21		152.39	30.42	30.47	9.34	21.08							
22		152.43	30.40	30.27	9.60	20.80							
23		152.17	30.72	30.43									

# cp	ρ (mm)	Comp. (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} (MPa·√m)	ΔR (%)	ΔR (%)
média	0.171	152.29	30.23	30.35	9.21	21.02	1510.9	5.72	30%	1.13	1.08	1.10	1.10
stdev	0.003	0.28	0.21	0.16	0.35	0.41	142.8	0.54	1%	0.01	0.12	0.11	0.11
c.v.	2.0%	0.2%	0.7%	0.5%	3.8%	2.0%	9.5%	9.5%	3.9%	1.1%	11.3%	9.6%	9.6%
min	0.163	151.91	29.59	30.08	8.57	19.99	1318.2	4.21	28%	1.10	0.81	0.00	0.00
max	0.180	153.21	30.57	30.60	10.01	21.86	1797.7	6.75	33%	1.15	1.29	0.00	0.00

Tabela A.21 – Distribuição de Weibull da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)

# cp	i	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
2	1	4.90	0.03	1.59	-3.57	0.02	9.05	0.45
20	2	5.00	0.08	1.61	-2.44	0.02	3.53	0.25
3	3	5.23	0.14	1.65	-1.90	0.01	1.79	0.11
17	4	5.29	0.19	1.67	-1.53	0.01	0.94	0.07
19	5	5.29	0.25	1.67	-1.25	0.01	0.47	0.05
16	6	5.37	0.31	1.68	-1.01	0.00	0.20	0.03
10	7	5.37	0.36	1.68	-0.80	0.00	0.06	0.01
5	8	5.45	0.42	1.69	-0.62	0.00	0.00	0.00
7	9	5.58	0.47	1.72	-0.45	0.00	0.01	0.00
6	10	5.64	0.53	1.73	-0.29	0.00	0.08	0.00
11	11	5.76	0.58	1.75	-0.13	0.00	0.18	0.01
9	12	5.91	0.64	1.78	0.02	0.00	0.34	0.02
14	13	6.10	0.69	1.81	0.17	0.00	0.54	0.05
13	14	6.10	0.75	1.81	0.33	0.00	0.79	0.06
4	15	6.19	0.81	1.82	0.49	0.01	1.11	0.09
12	16	6.51	0.86	1.87	0.68	0.02	1.54	0.17
8	17	6.53	0.92	1.88	0.91	0.02	2.17	0.20
18	18	6.75	0.97	1.91	1.28	0.03	3.38	0.31
Médias				1.74	-0.56			
				Somos		0.15	26.18	1.88

Tabela A.22 – Análise da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 9$ mm)

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	12.46
Coef. Lin.	-22.23
m	12.46
$\ln(\sigma_0)$	1.78
σ_0	5.96
Equação	$y = 12.45x + (-22.24)$
R^2	0.89

A.4.4.2 Dados dos CPs com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)

Tabela A.23 – Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)

# cp	ρ (mm)	Compr (L) (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
1	0.142	152.11	30.38	30.86	11.65	18.73	1161.7	4.28	38%	1.23	1.01	30% Ok
2	0.150	152.06	30.29	30.40	11.99	18.29	1056.4	3.98	40%	1.25	0.96	6% Ok
3	0.150	152.15	30.45	30.65	11.95	18.50	1041.9	3.85	39%	1.24	0.93	14% Ok
4	0.154	152.31	30.35	30.13	11.85	18.49	1144.8	4.33	39%	1.24	1.04	46% Ok
5	0.146	152.12	30.43	30.27	11.77	18.66	1188.3	4.45	39%	1.23	1.06	57% Ok
6	0.138	152.79	31.00	30.34	12.37	18.62	1005.1	3.62	40%	1.25	0.90	32% Ok
7	0.154	152.14	30.43	30.03	12.84	17.59	818.8	3.09	42%	1.30	0.81	82% Ok
8	0.162	152.14	30.51	30.46	12.06	18.45	1048.9	3.88	40%	1.25	0.94	5% Ok
9	0.150	152.56	30.99	30.14	12.09	18.90	988.9	3.59	39%	1.24	0.87	48% Ok
10	0.134	152.20	30.41	30.14	12.08	18.32	1029.3	3.88	40%	1.25	0.95	3% Ok
11	0.150	152.15	30.37	30.44	11.74	18.63	1124.0	4.20	39%	1.23	1.00	23% Ok
12	0.162	152.05	30.41	30.10	12.86	17.55	935.9	3.53	42%	1.30	0.92	17% Ok
13	0.158	153.40	30.52	30.42	12.12	18.40	1162.0	4.31	40%	1.25	1.05	55% Ok
14	0.162	153.12	31.08	30.39	12.51	18.57	878.8	3.14	40%	1.26	0.79	94% Ok
15	0.142	153.01	31.07	30.52	12.02	19.05	1157.4	4.12	39%	1.23	0.99	20% Ok
16	0.174	153.07	30.87	30.33	12.37	18.50	1215.1	4.41	40%	1.26	1.09	79% Ok
17	0.135	152.71	30.97	30.24	11.93	19.04	965.9	3.50	39%	1.23	0.83	67% Ok
18	0.131	152.90	31.04	30.45	11.98	19.05	1141.7	4.09	39%	1.23	0.98	13% Ok
19	0.164	152.44	30.33	30.44	11.80	18.52	1080.7	4.05	39%	1.24	0.97	7% Ok
20	0.156	152.47	30.19	30.38	11.37	18.82	1142.3	4.33	38%	1.22	1.00	24% Ok
21	0.151	152.19	30.49	30.51	11.89	18.60			39%	1.24		
22	0.151	152.19	30.46	30.45	12.47	17.99			41%	1.27		
# cp	ρ (mm)	Compr (L) (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
média	0.151	152.47	30.59	30.37	12.08	18.51	1064.4	3.93	39%	1.25	0.95	0.95
stdev	0.011	0.41	0.30	0.19	0.37	0.40	107.7	0.41	1%	0.02	0.08	0.08
c.v.	7.18%	0.27%	0.97%	0.63%	3.03%	2.16%	10.12%	10.34%	2.92%	1.65%	8.76%	8.76%
min	0.131	152.05	30.19	30.03	11.37	17.55	818.8	3.09	38%	1.22	0.79	0.79
max	0.174	153.40	31.08	30.86	12.86	19.05	1215.1	4.45	42%	1.30	1.09	1.09

Tabela A.24 – Distribuição de Weibull serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	7	3.09	0.03	1.13	-3.68	0.06	9.69	0.73
2	14	3.14	0.08	1.15	-2.55	0.05	3.95	0.43
3	17	3.50	0.13	1.25	-2.01	0.01	2.10	0.16
4	12	3.53	0.18	1.26	-1.65	0.01	1.18	0.11
5	9	3.59	0.23	1.28	-1.37	0.01	0.65	0.07
6	6	3.62	0.28	1.29	-1.13	0.01	0.33	0.04
7	3	3.85	0.33	1.35	-0.93	0.00	0.14	0.01
8	10	3.88	0.38	1.36	-0.76	0.00	0.04	0.00
9	8	3.88	0.43	1.36	-0.59	0.00	0.00	0.00
10	2	3.98	0.48	1.38	-0.44	0.00	0.02	0.00
11	19	4.05	0.53	1.40	-0.30	0.00	0.07	0.01
12	18	4.09	0.58	1.41	-0.16	0.00	0.17	0.02
13	15	4.12	0.63	1.42	-0.02	0.00	0.30	0.03
14	11	4.20	0.68	1.44	0.12	0.01	0.46	0.05
15	1	4.28	0.73	1.45	0.26	0.01	0.67	0.07
16	13	4.31	0.78	1.46	0.40	0.01	0.93	0.09
17	20	4.33	0.83	1.47	0.56	0.01	1.25	0.11
18	4	4.33	0.88	1.47	0.73	0.01	1.68	0.13
19	16	4.41	0.93	1.48	0.95	0.01	2.30	0.18
20	5	4.45	0.98	1.49	1.31	0.02	3.49	0.24
N =	20		Médias	1.36	-0.56			
					Somas	0.22	29.40	2.51

Tabela A.25 – Análise da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 12$ mm)

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	11.34
Coef. Lin.	-16.04
m	11.34
$\ln(\sigma_0)$	1.41
σ_0	4.11
Equação	$y = 11.34x + (-16.04)$
R^2	0.97

A.4.4.3 Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)

Tabela A.26 – Dados dos CPs entalhe com a serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)

# cp	ρ (mm)	Compr (L) (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
1	0.1320	154.32	31.16	30.26	15.15	16.01	710.0	2.5	49%	1.45	0.8	48% Ok
2	0.1560	152.11	30.06	30.38	14.64	15.42	767.8	2.9	49%	1.46	0.9	51% Ok
3	0.1600	152.25	30.32	30.27	15.11	15.21	643.6	2.4	50%	1.49	0.8	63% Ok
4	0.1600	152.52	30.45	30.21	15.01	15.44	735.1	2.8	49%	1.47	0.9	20% Ok
5	0.1600	152.27	30.35	30.45	14.77	15.58	788.4	3.0	49%	1.45	0.9	58% Ok
6	0.1520	152.19	31.02	30.42	15.65	15.36	643.8	2.3	50%	1.51	0.8	76% Ok
7	0.1520	153.01	30.56	30.34	14.93	15.63	692.9	2.6	49%	1.46	0.8	42% Ok
8	0.1690	153.42	30.54	30.30	14.94	15.61	655.0	2.4	49%	1.46	0.8	78% Ok
9	0.1600	152.29	30.96	30.60	15.56	15.40	731.2	2.6	50%	1.50	0.9	9% Ok
10	0.1690	152.76	30.58	30.44	15.13	15.45	740.5	2.7	49%	1.48	0.9	19% Ok
11	0.1650	152.09	30.39	30.19	15.20	15.19	732.1	2.8	50%	1.50	0.9	37% Ok
12	0.1600	153.15	30.47	30.23	14.92	15.56	733.8	2.7	49%	1.46	0.9	9% Ok
13	0.1680	152.88	30.50	30.44	14.62	15.87	721.5	2.7	48%	1.43	0.8	32% Ok
14	0.1720	152.12	30.34	30.24	15.30	15.04	715.3	2.7	50%	1.51	0.9	29% Ok
15	0.1640	152.49	30.46	30.20	15.29	15.17	697.1	2.6	50%	1.50	0.9	0% Ok
16	0.1560	152.30	31.01	30.66	15.00	16.00	786.0	2.8	48%	1.45	0.9	18% Ok
17	0.1600	152.38	30.41	30.16	14.94	15.47	750.5	2.8	49%	1.47	0.9	35% Ok
18	0.1600	152.60	30.97	30.15	15.00	15.97	700.0	2.5	48%	1.45	0.8	53% Ok
19	0.1390	152.94	31.07	30.21	15.57	15.49	744.8	2.7	50%	1.50	0.9	26% Ok
20	0.1600	152.61	30.41	30.22	15.04	15.37	784.3	2.9	49%	1.48	0.9	78% Ok
21	0.1600	152.25	30.40	30.07	15.26	15.13						
22	0.1600	152.59	30.98	30.25	15.06	15.92						
# cp	ρ (mm)	Compr (L) (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res. (d) (mm)	P_{rup} (N)	σ_{nom} (MPa)	a/W	F(a/W)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
média	0.159	152.62	30.61	30.30	15.09	15.51	723.7	2.7	49%	1.5	0.9	0.9
stdev	0.009	0.53	0.31	0.15	0.27	0.29	43.2	0.2	1%	0.0	0.1	0.1
c.v.	5.8%	0.3%	1.0%	0.5%	1.8%	1.9%	6.0%	6.6%	2%	1.56%	6.1%	6.1%
min	0.132	152.09	30.06	30.07	14.62	15.04	643.6	2.3	48%	1.4	0.8	0.8
max	0.172	154.32	31.16	30.66	15.65	16.01	788.4	3.0	50%	1.5	0.9	0.9

Tabela A.27 – Distribuição de Weibull da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - PF}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	6	2.3	0.03	0.84	-3.68	0.02	9.69	0.45
2	3	2.4	0.08	0.89	-2.55	0.01	3.95	0.19
3	8	2.4	0.13	0.89	-2.01	0.01	2.10	0.14
4	1	2.5	0.18	0.93	-1.65	0.00	1.18	0.06
5	18	2.5	0.23	0.93	-1.37	0.00	0.65	0.04
6	7	2.6	0.28	0.94	-1.13	0.00	0.33	0.02
7	15	2.6	0.33	0.96	-0.93	0.00	0.14	0.01
8	9	2.6	0.38	0.96	-0.76	0.00	0.04	0.00
9	13	2.7	0.43	0.98	-0.59	0.00	0.00	0.00
10	19	2.7	0.48	0.99	-0.44	0.00	0.02	0.00
11	14	2.7	0.53	0.99	-0.30	0.00	0.07	0.00
12	10	2.7	0.58	1.00	-0.16	0.00	0.17	0.01
13	12	2.7	0.63	1.01	-0.02	0.00	0.30	0.01
14	4	2.8	0.68	1.01	0.12	0.00	0.46	0.02
15	11	2.8	0.73	1.01	0.26	0.00	0.67	0.03
16	16	2.8	0.78	1.03	0.40	0.00	0.93	0.04
17	17	2.8	0.83	1.04	0.56	0.00	1.25	0.06
18	2	2.9	0.88	1.08	0.73	0.01	1.68	0.12
19	20	2.9	0.93	1.08	0.95	0.01	2.30	0.15
20	5	3.0	0.98	1.08	1.31	0.01	3.49	0.19
N =	20		Médias	0.98	-0.56			
					Somas	0.08	29.40	1.55

Tabela A.28 – Análise da serra de 0,33 mm ($a_0 \approx 15$ mm)

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	18.49
Coef. Lin.	-18.74
m	18.49
$\ln(\sigma_0)$	1.01
σ_0	5.96
Equação	$y = 18.49x + (-18.74)$
R^2	0.97

A.4.5 Dados dos CPs da serra com $T = 1,4$ mm

Tabela A.29 – Dados de CPs entalhados ($T = 1,4$ mm; $a = 9$ mm)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
cp01	0.854	31.27	31.44	9.20	22.03	1859.4	10.8	29%	3.93	12.80	50.30	1.3	Ok 76%
cp02	0.854	30.95	31.63	8.83	22.21	1860.9	10.3	29%	3.93	12.52	49.20	1.3	Ok 54%
cp03	0.866	31.33	31.76	9.25	21.86	1683.7	10.7	30%	3.91	11.65	45.53	1.2	Ok 11%
cp04	0.870	31.43	31.74	9.18	22.17	1720.0	10.6	29%	3.91	11.58	45.30	1.2	Ok 14%
cp05	0.849	31.42	31.65	9.12	22.17	1815.7	10.7	29%	3.96	12.26	48.50	1.3	Ok 37%
cp06	0.849	31.46	31.75	9.22	22.11	1716.9	10.9	29%	3.95	11.61	45.92	1.2	Ok 13%
cp07	0.849	31.24	31.54	9.17	22.01	1740.6	10.8	29%	3.94	11.96	47.14	1.2	Ok 10%
cp08	0.837	31.23	31.51	9.26	22.02	1586.6	11.1	30%	3.96	10.91	43.19	1.1	Ok 73%
cp09	0.803	31.40	31.68	9.27	22.01	1645.2	11.5	30%	4.04	11.26	45.49	1.1	Ok 46%
cp10	0.887	31.31	31.67	9.07	22.21	1664.6	10.2	29%	3.88	11.19	43.39	1.1	Ok 44%
cp11	0.837	31.20	31.42	9.14	22.09	1624.5	10.9	29%	3.96	11.13	44.10	1.1	Ok 55%
cp12	0.833	30.96	31.20	8.94	22.06	1659.6	10.7	29%	3.97	11.48	45.54	1.2	Ok 29%
cp13	0.837	30.87	31.21	8.80	22.00	1678.7	10.5	29%	3.96	11.68	46.22	1.2	Ok 13%
cp14	0.828	31.19	31.39	9.18	22.06	1706.4	11.1	29%	3.98	11.74	46.70	1.2	Ok 9%
cp15	0.837	31.10	31.27	8.94	22.04	1768.0	10.7	29%	3.97	12.22	48.49	1.2	Ok 30%
cp16	0.828	31.11	31.23	9.01	22.02	1726.5	10.9	29%	3.98	11.97	47.69	1.2	Ok 10%
cp17	0.845	31.16	31.64	9.13	22.01	1684.7	10.8	29%	3.95	11.55	45.55	1.2	Ok 22%
cp18	0.833	31.45	31.71	9.38	21.97	1835.1	11.3	30%	3.98	12.59	50.07	1.3	Ok 59%
cp19	0.828	31.42	31.67	9.26	22.05	1725.3	11.2	29%	3.99	11.77	46.98	1.2	Ok 3%
cp20	0.828	30.96	31.35	9.05	22.04	1877.2	10.9	29%	3.97	12.95	51.41	1.3	Ok 82%
cp21	0.799	31.23	31.35	9.18	22.08	1764.6	11.5	29%	4.04	12.13	49.04	1.2	Ok 19%
cp22	0.841	31.28	31.35	9.20	22.15	1757.3	10.9	29%	3.96	12.00	47.49	1.2	Ok 13%
cp23	0.841	31.15	31.61	9.08	22.47	1685.1	10.8	29%	3.96	11.09	43.88	1.1	Ok 58%
cp24	0.841	31.42	31.52	9.37	22.27								
cp25	0.841	31.12	31.70	9.13	21.93								

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
média	0.841	31.22	31.52	9.13	22.08	1729.8	10.9	29.21%	3.96	11.83	46.83	1.20	1.20
std dev	0.018	0.17	0.19	0.15	0.12	78.4	0.3	0.34%	0.04	0.55	2.26	0.06	0.06
coef. var	2.20%	0.55%	0.59%	1.61%	0.56%	4.53%	2.94%	1.16%	0.94%	4.68%	4.83%	4.65%	4.65%
min	0.799	30.87	31.20	8.80	21.86	1586.6	10.2	28.51%	3.88	10.91	43.19	1.11	1.11
max	0.887	31.46	31.76	9.38	22.47	1877.2	11.5	29.83%	4.04	12.95	51.41	1.31	1.31

Tabela A.30 – Distribuição de Weibull com a serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	cp08	10.91	0.02	2.39	-3.82	0.01	10.58	0.26
2	cp23	11.09	0.07	2.41	-2.70	0.00	4.54	0.13
3	cp11	11.13	0.11	2.41	-2.16	0.00	2.55	0.10
4	cp10	11.19	0.15	2.42	-1.80	0.00	1.53	0.07
5	cp09	11.26	0.20	2.42	-1.52	0.00	0.92	0.05
6	cp12	11.48	0.24	2.44	-1.30	0.00	0.54	0.02
7	cp17	11.55	0.28	2.45	-1.10	0.00	0.29	0.01
8	cp04	11.58	0.33	2.45	-0.93	0.00	0.13	0.01
9	cp06	11.61	0.37	2.45	-0.77	0.00	0.04	0.00
10	cp03	11.65	0.41	2.46	-0.63	0.00	0.00	0.00
11	cp13	11.68	0.46	2.46	-0.49	0.00	0.00	0.00
12	cp14	11.74	0.50	2.46	-0.37	0.00	0.04	0.00
13	cp19	11.77	0.54	2.47	-0.24	0.00	0.10	0.00
14	cp07	11.96	0.59	2.48	-0.12	0.00	0.20	0.01
15	cp16	11.97	0.63	2.48	0.00	0.00	0.31	0.01
16	cp22	12.00	0.67	2.48	0.11	0.00	0.46	0.01
17	cp21	12.13	0.72	2.50	0.23	0.00	0.64	0.02
18	cp15	12.22	0.76	2.50	0.36	0.00	0.85	0.03
19	cp05	12.26	0.80	2.51	0.49	0.00	1.11	0.04
20	cp02	12.52	0.85	2.53	0.63	0.00	1.43	0.07
21	cp18	12.59	0.89	2.53	0.80	0.00	1.86	0.09
22	cp01	12.80	0.93	2.55	1.00	0.01	2.46	0.13
23	cp20	12.95	0.98	2.56	1.34	0.01	3.64	0.17
N =	23		Médias	2.47	-0.56			
					Somas	0.05	34.24	1.22

Tabela A.31 – Análise da serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	25.51
Coef. Lin.	-63.56
m	25.51
$\ln(\sigma_0)$	2.49
σ_0	12.08
Equação	$y = 25.5x + (-63.56)$
R^2	0.91

Tabela A.32 – Dados de CPs entalhados ($T = 1,4$ mm; $a = 12$ mm)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/ratio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{uc} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
cp01	0.822	31.46	31.71	12.38	19.08	1184.8	15.1	39%	3.76	10.8	40.5	1.03	74% Ok
cp02	0.817	31.18	31.64	12.10	19.08	1234.0	14.8	39%	3.77	11.2	42.4	1.07	37% Ok
cp03	0.817	31.07	31.80	11.87	19.20	1374.2	14.5	38%	3.78	12.3	46.6	1.18	48% Ok
cp04	0.801	31.47	31.62	12.44	19.03	1208.5	15.5	40%	3.79	11.1	42.0	1.05	54% Ok
cp05	0.801	31.24	31.63	12.12	19.12	1299.9	15.1	39%	3.80	11.8	44.9	1.13	3% Ok
cp06	0.809	30.99	31.71	12.00	18.99	1260.8	14.8	39%	3.78	11.6	43.8	1.10	14% Ok
cp07	0.809	30.85	31.24	11.79	19.06	1218.0	14.6	38%	3.79	11.3	42.7	1.08	36% Ok
cp08	0.809	30.93	31.76	11.74	19.19	1249.6	14.5	38%	3.80	11.2	42.6	1.08	37% Ok
cp09	0.826	31.14	31.81	12.17	18.97	1335.5	14.7	39%	3.75	12.3	45.9	1.17	38% Ok
cp10	0.826	31.27	31.94	12.45	18.82	1318.8	15.1	40%	3.73	12.2	45.7	1.16	34% Ok
cp11	0.776	30.98	31.69	11.84	19.14	1371.6	15.3	38%	3.85	12.4	47.8	1.18	48% Ok
cp12	0.772	31.16	31.74	12.12	19.04	1239.1	15.7	39%	3.85	11.3	43.5	1.07	40% Ok
cp13	0.801	31.29	31.53	12.29	19.00	1177.8	15.3	39%	3.79	10.9	41.2	1.03	71% Ok
cp14	0.763	31.05	31.43	12.00	19.05	1221.7	15.7	39%	3.87	11.2	43.5	1.07	45% Ok
cp15	0.751	30.86	31.74	11.58	19.28	1333.1	15.4	38%	3.92	11.9	46.5	1.13	6% Ok
cp16	0.794	31.39	31.67	12.32	19.07	1334.0	15.5	39%	3.81	12.2	46.3	1.16	28% Ok
cp17	0.755	30.99	31.44	11.87	19.12	1343.3	15.7	38%	3.89	12.3	47.8	1.16	33% Ok
cp18	0.772	31.01	31.72	11.95	19.06	1357.1	15.5	39%	3.85	12.4	47.6	1.17	41% Ok
cp19	0.772	31.24	31.72	12.20	19.04	1257.2	15.8	39%	3.85	11.5	44.2	1.09	26% Ok
cp20	0.768	31.18	31.83	12.18	19.01	1384.4	15.9	39%	3.85	12.6	48.7	1.20	60% Ok
cp21	0.811	30.88	31.80	11.77	19.11	1321.6	14.5	38%	3.79	11.9	45.3	1.14	17% Ok
cp22	0.794	31.20	31.43	12.13	19.07	1316.7	15.3	39%	3.81	12.1	46.1	1.15	24% Ok
cp23	0.794	31.26	31.47	12.17	19.09	1357.2	15.3	39%	3.81	12.4	47.4	1.18	50% Ok
cp24	0.794	31.22	31.46	12.32	18.91		15.5	39%	3.80				
cp25	0.794	31.28	31.89	12.16	19.12		15.3	39%	3.82				

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/ratio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{uc} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
média	0.794	31.14	31.66	12.08	19.06	1291.3	15.2	39%	3.81	11.8	44.9	1.12	1.12
std dev	0.022	0.18	0.17	0.23	0.09	64.8	0.4	1%	0.04	0.6	2.3	0.05	0.05
coef. var	2.79%	0.01	0.01	0.02	0.00	5.02%	2.82%	1.40%	1.17%	4.77%	5.16%	4.72%	4.72%
min	0.751	30.85	31.24	11.58	18.82	1177.8	14.5	38%	3.73	10.8	40.5	1.03	1.03
max	0.826	31.47	31.94	12.45	19.28	1384.4	15.9	40%	3.92	12.6	48.7	1.20	1.20

Tabela A.33 – Distribuição de Weibull com a serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	cp01	10.78	0.02	2.38	-3.82	0.01	10.58	0.29
2	cp13	10.87	0.07	2.39	-2.70	0.01	4.54	0.17
3	cp04	11.09	0.11	2.41	-2.16	0.00	2.55	0.09
4	cp08	11.22	0.15	2.42	-1.80	0.00	1.53	0.06
5	cp14	11.25	0.20	2.42	-1.52	0.00	0.92	0.04
6	cp02	11.25	0.24	2.42	-1.30	0.00	0.54	0.03
7	cp07	11.28	0.28	2.42	-1.10	0.00	0.29	0.02
8	cp12	11.31	0.33	2.43	-0.93	0.00	0.13	0.01
9	cp19	11.49	0.37	2.44	-0.77	0.00	0.04	0.01
10	cp06	11.58	0.41	2.45	-0.63	0.00	0.00	0.00
11	cp05	11.80	0.46	2.47	-0.49	0.00	0.00	0.00
12	cp15	11.87	0.50	2.47	-0.37	0.00	0.04	0.00
13	cp21	11.95	0.54	2.48	-0.24	0.00	0.10	0.00
14	cp22	12.10	0.59	2.49	-0.12	0.00	0.20	0.01
15	cp16	12.16	0.63	2.50	0.00	0.00	0.31	0.02
16	cp10	12.24	0.67	2.50	0.11	0.00	0.46	0.03
17	cp09	12.25	0.72	2.51	0.23	0.00	0.64	0.03
18	cp17	12.27	0.76	2.51	0.36	0.00	0.85	0.04
19	cp03	12.32	0.80	2.51	0.49	0.00	1.11	0.05
20	cp18	12.35	0.85	2.51	0.63	0.00	1.43	0.06
21	cp11	12.41	0.89	2.52	0.80	0.00	1.86	0.07
22	cp23	12.43	0.93	2.52	1.00	0.00	2.46	0.09
23	cp20	12.65	0.98	2.54	1.34	0.01	3.64	0.14
N =	23		Médias	2.47	-0.56			
					Somas	0.05	34.24	1.27

Tabela A.34 – Análise da serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	24.96
Coef. Lin.	-62.09
m	24.96
$\ln(\sigma_0)$	2.49
σ_0	12.04
Equação	$y = 24.95x + (-62.1)$
R^2	0.92

Tabela A.35 – Dados de CPs entalhados ($T = 1,4$ mm; $a = 15$ mm)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{uc} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
cp01	0.871	31.25	31.70	14.72	16.57	1011.7	16.9	0.47	3.44	12.21	42.00	1.10	Ok (23%)
cp02	0.779	31.23	31.45	14.56	16.73	1038.0	18.7	0.47	3.57	12.38	44.27	1.10	Ok (20%)
cp03	0.754	31.22	31.44	14.65	16.46	997.7	19.4	0.47	3.60	12.31	44.27	1.08	Ok (4%)
cp04	0.729	31.09	31.41	14.50	16.67	1057.1	19.9	0.47	3.64	12.72	46.25	1.11	Ok (31%)
cp05	0.762	31.13	31.51	14.47	16.47	997.1	19.0	0.46	3.60	12.25	44.10	1.08	Ok (5%)
cp06	0.754	31.27	31.41	14.85	16.62	980.5	19.7	0.47	3.58	11.87	42.43	1.03	Ok (37%)
cp07	0.754	31.04	31.39	14.42	16.66	1028.3	19.1	0.46	3.61	12.39	44.72	1.09	Ok (14%)
cp08	0.783	31.01	31.27	14.32	16.70	969.4	18.3	0.46	3.58	11.68	41.80	1.04	Ok (33%)
cp09	0.729	31.07	31.27	14.30	16.76	968.0	19.6	0.46	3.66	11.57	42.34	1.01	Ok (55%)
cp10	0.779	31.36	31.19	14.71	16.45	1021.9	18.9	0.47	3.57	12.71	45.37	1.12	Ok (45%)
cp11	0.758	31.07	31.53	14.39	16.60	996.8	19.0	0.46	3.61	12.06	43.52	1.06	Ok (10%)
cp12	0.758	31.14	31.43	14.57	16.59	927.7	19.2	0.47	3.59	11.26	40.47	0.99	Ok (79%)
cp13	0.792	31.18	31.42	14.49	16.68	967.8	18.3	0.46	3.56	11.63	41.41	1.03	Ok (37%)
cp14	0.792	31.35	31.58	14.86	16.58	1023.7	18.8	0.47	3.53	12.39	43.80	1.09	Ok (18%)
cp15	0.758	31.09	31.22	14.49	16.73	974.8	19.1	0.47	3.60	11.72	42.20	1.03	Ok (40%)
cp16	0.817	31.28	31.52	14.71	16.53	1007.8	18.0	0.47	3.51	12.29	43.19	1.09	Ok (19%)
cp17	0.762	31.24	31.44	14.49	16.66	1079.1	19.0	0.46	3.61	12.99	46.84	1.15	Ok (67%)
cp18	0.812	31.23	31.49	14.54	16.53	1076.5	17.9	0.47	3.53	13.14	46.44	1.17	Ok (92%)
cp19	0.812	31.16	31.36	14.62	16.48	1022.8	18.0	0.47	3.52	12.62	44.41	1.12	Ok (45%)
cp20	0.812	30.93	31.26	14.25	16.87	977.4	17.5	0.46	3.54	11.54	40.85	1.03	Ok (38%)
cp21	0.754	31.43	31.41	14.86	16.67	1001.1	19.7	0.47	3.59	12.04	43.23	1.05	Ok (19%)
cp22	0.777	31.09	31.35	14.44	16.73	958.8	18.6	0.46	3.58	11.48	41.08	1.01	Ok (54%)
cp23	0.777	30.85	31.11	14.07	16.78	1023.2	18.1	0.46	3.60	12.27	44.20	1.09	Ok (17%)
cp24	0.777	31.06	31.42	14.39	16.84								
cp25	0.777	31.54	31.46	14.75	16.76								
# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{uc} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
média	0.777	31.17	31.40	14.53	16.64	1004.7	18.7	0.47	3.57	12.15	43.44	1.07	1.07
std dev	0.031	0.16	0.13	0.20	0.12	37.5	0.8	0.00	0.05	0.50	1.80	0.05	0.05
coef. var	3.97%	0.50%	0.41%	1.36%	0.71%	3.73%	4.04%	0.97%	1.30%	4.13%	4.14%	4.30%	4.30%
min	0.729	30.85	31.11	14.07	16.45	927.7	16.9	0.46	3.44	11.26	40.47	0.99	0.99
max	0.871	31.54	31.70	14.86	16.87	1079.1	19.9	0.47	3.66	13.14	46.84	1.17	1.17

Tabela A.36 – Distribuição de Weibull com a serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	cp12	11.26	0.02	2.42	-3.82	0.01	10.58	0.25
2	cp22	11.48	0.07	2.44	-2.70	0.00	4.54	0.12
3	cp20	11.54	0.11	2.45	-2.16	0.00	2.55	0.08
4	cp09	11.57	0.15	2.45	-1.80	0.00	1.53	0.06
5	cp13	11.63	0.20	2.45	-1.52	0.00	0.92	0.04
6	cp08	11.68	0.24	2.46	-1.30	0.00	0.54	0.03
7	cp15	11.72	0.28	2.46	-1.10	0.00	0.29	0.02
8	cp06	11.87	0.33	2.47	-0.93	0.00	0.13	0.01
9	cp21	12.04	0.37	2.49	-0.77	0.00	0.04	0.00
10	cp11	12.06	0.41	2.49	-0.63	0.00	0.00	0.00
11	cp01	12.21	0.46	2.50	-0.49	0.00	0.00	0.00
12	cp05	12.25	0.50	2.51	-0.37	0.00	0.04	0.00
13	cp23	12.27	0.54	2.51	-0.24	0.00	0.10	0.00
14	cp16	12.29	0.59	2.51	-0.12	0.00	0.20	0.01
15	cp03	12.31	0.63	2.51	0.00	0.00	0.31	0.01
16	cp02	12.38	0.67	2.52	0.11	0.00	0.46	0.01
17	cp14	12.39	0.72	2.52	0.23	0.00	0.64	0.02
18	cp07	12.39	0.76	2.52	0.36	0.00	0.85	0.02
19	cp19	12.62	0.80	2.54	0.49	0.00	1.11	0.04
20	cp10	12.71	0.85	2.54	0.63	0.00	1.43	0.05
21	cp04	12.72	0.89	2.54	0.80	0.00	1.86	0.06
22	cp17	12.99	0.93	2.56	1.00	0.00	2.46	0.11
23	cp18	13.14	0.98	2.58	1.34	0.01	3.64	0.15
N =	23		Médias	2.50	-0.56			
					Somas	0.04	34.24	1.09

Tabela A.37 – Análise da serra de 1,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	29.11
Coef. Lin.	-73.24
m	29.11
$\ln(\sigma_0)$	2.52
σ_0	12.38
Equação	$y = 29.1x + (-73.25)$
R^2	0.93

A.4.6 Dados dos CPs entalhe com $T = 2,4$ mm

Tabela A.38 – Dados de CPs entalhados ($T = 2,4$ mm; $a = 9$ mm)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	$\Delta R'$ (%)	$\Delta R''$ (%)
cp301	1.172	29.50	30.92	9.07	20.44	1372.2	7.73	30.73%	3.3	11.2	37.1	1.1	15% Ok	23% Ok	34% Ok
cp302	1.172	29.11	30.87	8.84	20.27	1389.0	7.54	30.37%	3.3	11.5	38.1	1.2	37% Ok	48% Ok	65% Ok
cp303	1.162	29.15	30.93	8.58	20.58	1552.0	7.38	29.42%	3.3	12.4	41.6	1.3	110% EX		
cp304	1.153	29.22	30.78	8.76	20.46	1414.4	7.60	29.98%	3.3	11.5	38.6	1.2	41% Ok	53% Ok	71% Ok
cp305	1.148	29.20	30.75	8.66	20.54	1517.5	7.54	29.66%	3.4	12.3	41.2	1.2	97% Ok	118% EX	
cp306	1.199	29.10	30.71	8.78	20.32	1359.6	7.32	30.16%	3.3	11.3	37.0	1.1	22% Ok	30% Ok	43% Ok
cp307	1.168	29.14	30.56	8.80	20.35	1336.4	7.53	30.18%	3.3	11.1	36.8	1.1	8% Ok	15% Ok	24% Ok
cp308	1.199	29.48	30.63	9.18	20.30	1250.7	7.66	31.15%	3.3	10.4	34.2	1.0	39% Ok	40% Ok	43% Ok
cp309	1.168	29.12	30.61	8.86	20.27	1280.6	7.58	30.41%	3.3	10.7	35.5	1.1	21% Ok	19% Ok	17% Ok
cp310	1.240	29.16	30.64	8.72	20.45	1260.9	7.03	29.89%	3.2	10.3	33.5	1.0	42% Ok	43% Ok	46% Ok
cp311	1.247	29.32	30.83	8.87	20.46	1313.4	7.11	30.24%	3.2	10.7	34.6	1.1	15% Ok	12% Ok	8% Ok
cp312	1.214	29.41	30.59	9.01	20.40	1271.7	7.42	30.62%	3.3	10.5	34.3	1.1	32% Ok	31% Ok	32% Ok
cp313	1.082	29.39	30.61	9.31	20.09	1228.0	8.60	31.66%	3.4	10.4	35.7	1.0	46% Ok	48% Ok	51% Ok
cp314	1.245	29.18	30.43	9.04	20.15	1189.9	7.26	30.96%	3.2	10.1	32.6	1.0	61% Ok	66% Ok	73% Ok
cp315	1.163	29.12	30.76	8.72	20.41	1343.6	7.49	29.93%	3.3	11.0	36.7	1.1	3% Ok	9% Ok	17% Ok
cp316	1.245	29.16	30.81	8.79	20.37	1316.3	7.06	30.13%	3.2	10.8	35.0	1.1	7% Ok	3% Ok	1% Ok
cp317	1.204	29.14	30.69	8.89	20.25	1305.3	7.38	30.51%	3.3	10.9	35.7	1.1	5% Ok	0% Ok	5% Ok
cp318	1.194	29.52	30.72	9.12	20.40	1262.6	7.64	30.90%	3.3	10.4	34.2	1.0	41% Ok	42% Ok	45% Ok
cp319	1.168	29.10	30.74	8.87	20.23	1294.1	7.59	30.49%	3.3	10.8	35.8	1.1	14% Ok	11% Ok	7% Ok
cp320	1.173	29.10	30.81	8.96	20.14	1355.1	7.64	30.79%	3.3	11.4	37.6	1.1	27% Ok	37% Ok	51% Ok
cp321	1.189	29.56	30.84	9.37	20.19	1334.2	7.88	31.69%	3.3	11.1	36.7	1.1	12% Ok	19% Ok	30% Ok
cp322	1.112	29.38	30.60	8.83	20.55	1375.3	7.94	30.06%	3.4	11.2	38.1	1.1	15% Ok	22% Ok	33% Ok
cp323	1.143	29.15	30.82	8.72	20.43	1305.5	7.62	29.90%	3.4	10.7	35.8	1.1	23% Ok	22% Ok	20% Ok
cp324	1.183	29.14	30.70	8.82	20.33	1227.2	7.45	30.25%	3.3	10.2	33.5	1.0	59% Ok	63% Ok	70% Ok
cp325	1.183	29.52	30.73	9.17	20.35	1354.8	7.75	31.05%	3.3	11.2	37.0	1.1	16% Ok	24% Ok	36% Ok
cp326	1.183	29.12	30.58	9.04	20.08										
cp327	1.183	29.13	30.65	9.46	19.68										
# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	$\Delta R'$ (%)	$\Delta R''$ (%)
média	1.18	29.26	30.71	8.93	20.33	1310.5	7.56	30.52%	3.3	10.8	35.8	1.1	1.1	1.1	1.1
std dev	0.04	0.17	0.12	0.19	0.12	57.6	0.33	0.52%	0.0	0.4	1.6	0.1	0.1	0.1	0.0
coef.var	3.43%	0.57%	0.38%	2.13%	0.58%	4.40%	4.35%	1.71%	1.47%	3.89%	4.55%	5.33%	4.62%	3.84%	3.84%
min	1.08	29.10	30.43	8.72	20.09	1189.9	7.03	29.89%	3.2	10.1	32.6	1.0	1.0	1.0	1.0
max	1.25	29.56	30.92	9.37	20.55	1414.4	8.60	31.69%	3.4	11.5	38.6	1.3	1.2	1.2	1.2

Tabela A.39 – Distribuição de Weibull com a serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - PF}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	cp314	10.1	0.02	2.31	-3.82	0.00	10.58	0.22
2	cp324	10.2	0.07	2.32	-2.70	0.00	4.54	0.14
3	cp310	10.3	0.11	2.34	-2.16	0.00	2.55	0.07
4	cp318	10.4	0.15	2.34	-1.80	0.00	1.53	0.05
5	cp308	10.4	0.20	2.34	-1.52	0.00	0.92	0.04
6	cp313	10.4	0.24	2.35	-1.30	0.00	0.54	0.03
7	cp312	10.5	0.28	2.35	-1.10	0.00	0.29	0.02
8	cp323	10.7	0.33	2.37	-0.93	0.00	0.13	0.01
9	cp311	10.7	0.37	2.37	-0.77	0.00	0.04	0.00
10	cp309	10.7	0.41	2.37	-0.63	0.00	0.00	0.00
11	cp319	10.8	0.46	2.38	-0.49	0.00	0.00	0.00
12	cp316	10.8	0.50	2.38	-0.37	0.00	0.04	0.00
13	cp317	10.9	0.54	2.39	-0.24	0.00	0.10	0.00
14	cp315	11.0	0.59	2.40	-0.12	0.00	0.20	0.01
15	cp307	11.1	0.63	2.41	0.00	0.00	0.31	0.01
16	cp321	11.1	0.67	2.41	0.11	0.00	0.46	0.02
17	cp301	11.2	0.72	2.41	0.23	0.00	0.64	0.02
18	cp325	11.2	0.76	2.41	0.36	0.00	0.85	0.03
19	cp322	11.2	0.80	2.41	0.49	0.00	1.11	0.03
20	cp306	11.3	0.85	2.42	0.63	0.00	1.43	0.05
21	cp320	11.4	0.89	2.43	0.80	0.00	1.86	0.07
22	cp302	11.5	0.93	2.44	1.00	0.00	2.46	0.09
23	cp304	11.5	0.98	2.45	1.34	0.00	3.64	0.12
N =	23		Médias	2.38	-0.56			
					Somas	0.03	34.24	1.03

Tabela A.40 – Análise da serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 9$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	30.91
Coef Lin	-74.21
m	30.91
$\ln(\sigma_0)$	2.40
σ_0	11.03
Equação	$y = 30.91x + (-74.22)$
R^2	0.93

Tabela A.41 – Dados de CPs entalhados ($\rho = 2,4 \text{ mm}$; $a = 12 \text{ mm}$)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{in}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	$\Delta R'$ (%)	$\Delta R''$ (%)	$\Delta R'''$ (%)	
cp201	1.128	29.13	30.92	11.93	17.20	1088.6	10.6	41%	3.2	12.5	39.7	1.18	77% Ok	87% Ok	108% EX		
cp202	1.153	29.15	30.71	12.03	17.12	890.9	10.4	41%	3.1	10.4	32.6	0.98	0% Ok	6% Ok	2% Ok	3% Ok	
cp203	1.066	29.12	30.61	11.92	17.20	1131.1	11.2	41%	3.2	13.1	42.6	1.23	98% Ok	113% EX			
cp204	1.182	29.31	30.81	11.93	17.38	935.9	10.1	41%	3.1	10.6	33.0	1.01	8% Ok	4% Ok	10% Ok	15% Ok	
cp205	1.102	29.22	30.71	12.03	17.19	866.1	10.9	41%	3.2	10.0	32.1	0.94	15% Ok	24% Ok	23% Ok	32% Ok	
cp206	1.041	29.33	30.79	12.01	17.32	746.6	11.5	41%	3.3	8.5	27.9	0.80	72% Ok	94% Ok	104% EX		
cp207	1.050	29.57	30.70	12.15	17.42	845.4	11.6	41%	3.3	9.5	31.3	0.90	33% Ok	46% Ok	48% Ok	67% Ok	
cp208	1.095	29.23	30.72	11.90	17.33	950.2	10.9	41%	3.2	10.8	34.9	1.02	15% Ok	12% Ok	20% Ok	28% Ok	
cp209	1.116	29.19	30.80	12.02	17.17	831.7	10.8	41%	3.2	9.6	30.6	0.91	30% Ok	42% Ok	44% Ok	61% Ok	
cp210	1.025	29.26	30.37	12.50	17.29	900.4	12.2	42%	3.3	10.4	34.5	0.98	2% Ok	8% Ok	4% Ok	6% Ok	
cp211	1.140	29.26	30.75	12.04	17.22	948.0	10.6	41%	3.2	10.9	34.5	1.03	19% Ok	17% Ok	25% Ok	36% Ok	
cp212	1.120	29.16	30.79	11.97	17.20	929.9	10.7	41%	3.2	10.7	34.1	1.01	11% Ok	7% Ok	14% Ok	20% Ok	
cp213	1.120	29.13	30.69	11.95	17.18	948.5	10.7	41%	3.2	11.0	35.0	1.04	21% Ok	19% Ok	28% Ok	40% Ok	
cp214	1.149	29.41	30.28	12.28	17.13	845.7	10.7	42%	3.1	10.0	31.4	0.94	15% Ok	24% Ok	23% Ok	32% Ok	
cp215	1.095	29.19	30.74	11.87	17.33	924.8	10.8	41%	3.2	10.5	33.9	0.99	4% Ok	0% Ok	4% Ok	6% Ok	
cp216	1.115	29.23	30.75	11.97	17.26	880.1	10.7	41%	3.2	10.1	32.2	0.95	11% Ok	20% Ok	18% Ok	25% Ok	
cp217	1.107	29.28	30.64	11.90	17.39	893.6	10.7	41%	3.2	10.1	32.6	0.96	9% Ok	17% Ok	14% Ok	20% Ok	
cp218	1.177	29.61	30.42	12.25	17.36	824.0	10.4	41%	3.1	9.4	29.6	0.90	33% Ok	46% Ok	49% Ok	68% Ok	
cp219	1.079	29.62	30.27	12.25	17.37	616.3	11.3	41%	3.2	7.1	23.0	0.67	123% EX				
cp220	1.108	29.25	30.75	11.89	17.36	951.1	10.7	41%	3.2	10.8	34.6	1.02	14% Ok	11% Ok	19% Ok	27% Ok	
cp221	1.140	29.50	30.35	12.12	17.38	855.2	10.6	41%	3.2	9.8	31.1	0.93	20% Ok	31% Ok	31% Ok	43% Ok	
cp222	1.157	29.20	30.74	12.00	17.21	1000.5	10.4	41%	3.1	11.5	36.3	1.09	43% Ok	46% Ok	59% Ok	84% Ok	
cp223	1.083	29.33	30.44	12.13	17.21	884.5	11.2	41%	3.2	10.3	33.3	0.97	5% Ok	12% Ok	8% Ok	12% Ok	
cp224	1.167	29.20	30.67	11.91	17.29	929.0	10.2	41%	3.1	10.6	33.4	1.01	10% Ok	6% Ok	13% Ok	18% Ok	
cp225	1.104	29.21	30.69	11.99	17.22	1005.9	10.9	41%	3.2	11.6	37.2	1.10	44% Ok	47% Ok	61% Ok	86% Ok	
cp226	1.12	29.32	30.72	12.08	17.25	920.9	10.8	41%	3.2	10.6	33.7	1.00	6% Ok	2% Ok	7% Ok	11% Ok	
cp227	1.119	30.53	29.31	12.24	18.30												
# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{in}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	$\Delta R'$ (%)	$\Delta R''$ (%)	$\Delta R'''$ (%)	
média	1.119	29.30	30.65	12.04	17.27	907.4	10.8	41%	3.2	10.4	33.3	0.98	1.00	0.99	0.99	0.99	
std dev	0.038	0.17	0.16	0.15	0.09	50.8	0.4	0%	0.0	0.6	1.9	0.11	0.09	0.08	0.05	0.05	
coef. var	3.43%	0.58%	0.52%	1.27%	0.51%	5.60%	4.14%	0.83%	1.49%	5.57%	5.57%	11.07%	9.02%	7.78%	5.54%	5.54%	
min	1.025	29.13	30.28	11.87	17.12	824.0	10.1	41%	3.1	9.4	29.6	0.67	0.80	0.80	0.80	0.90	
máx	1.182	29.79	30.81	12.50	17.42	1005.9	12.2	42%	3.3	11.6	37.2	1.23	1.10	1.18	1.18	1.10	

Tabela A.42 – Distribuição de Weibull com a serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	cp218	9.4	0.02	2.24	-3.77	0.01	10.29	0.32
2	cp207	9.5	0.07	2.25	-2.65	0.01	4.35	0.18
3	cp209	9.6	0.11	2.26	-2.12	0.01	2.40	0.12
4	cp221	9.8	0.16	2.28	-1.75	0.00	1.41	0.07
5	cp214	10.0	0.20	2.30	-1.47	0.00	0.83	0.04
6	cp205	10.0	0.25	2.30	-1.25	0.00	0.46	0.03
7	cp216	10.1	0.30	2.31	-1.05	0.00	0.24	0.02
8	cp217	10.1	0.34	2.32	-0.87	0.00	0.10	0.01
9	cp223	10.3	0.39	2.33	-0.72	0.00	0.02	0.00
10	cp202	10.4	0.43	2.34	-0.57	0.00	0.00	0.00
11	cp210	10.4	0.48	2.34	-0.43	0.00	0.02	0.00
12	cp215	10.5	0.52	2.35	-0.30	0.00	0.07	0.00
13	cp204	10.6	0.57	2.36	-0.17	0.00	0.15	0.01
14	cp226	10.6	0.61	2.36	-0.05	0.00	0.26	0.01
15	cp224	10.6	0.66	2.36	0.07	0.00	0.41	0.01
16	cp212	10.7	0.70	2.37	0.20	0.00	0.58	0.02
17	cp220	10.8	0.75	2.38	0.33	0.00	0.79	0.03
18	cp208	10.8	0.80	2.38	0.46	0.00	1.05	0.04
19	cp211	10.9	0.84	2.39	0.61	0.00	1.38	0.06
20	cp213	11.0	0.89	2.40	0.78	0.00	1.80	0.07
21	cp222	11.5	0.93	2.45	0.99	0.01	2.41	0.16
22	cp225	11.6	0.98	2.45	1.33	0.01	3.59	0.21
N =	22		Médias	2.34	-0.56			
					Somas	0.06	32.63	1.40

Tabela A.43 – Análise da serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 12$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	21.65
Coef Lin	-51.28
m	21.65
$\ln(\sigma_0)$	2.37
σ_0	10.69
Equação	$y = 21.64x + (-51.29)$
R^2	0.93

Tabela A.44 – Dados de CPs entalhados ($\rho = 2,4 \text{ mm}$; $a = 15 \text{ mm}$)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	$t/raio$	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	$\Delta R'$ (%)	$\Delta R''$ (%)
cp401	1.182	29.42	30.77	15.46	13.97	710.3	13.1	53%	2.88	12.43	35.82	1.1	35% Ok	36% Ok	36% Ok
cp402	1.146	29.41	30.69	15.47	13.94		13.5	53%	2.91						
cp403	1.308	29.52	30.64	15.41	14.12	739.5	11.8	52%	2.78	12.72	35.39	1.1	56% Ok	62% Ok	62% Ok
cp404	1.061	29.20	30.54	15.10	14.10	722.8	14.2	52%	3.01	12.50	37.65	1.1	33% Ok	34% Ok	34% Ok
cp405	1.126	29.35	30.58	15.48	13.87	741.7	13.7	53%	2.93	13.25	38.78	1.2	65% Ok	73% Ok	73% Ok
cp406	1.114	29.35	30.45	15.57	13.79	699.2	14.0	53%	2.93	12.69	37.20	1.1	40% Ok	42% Ok	42% Ok
cp407	1.136	29.35	30.52	15.56	13.80	676.0	13.7	53%	2.91	12.22	35.59	1.1	22% Ok	20% Ok	20% Ok
cp408	1.146	29.56	30.56	15.39	14.17	658.1	13.4	52%	2.93	11.27	33.04	1.0	12% Ok	21% Ok	21% Ok
cp409	1.131	29.40	30.53	15.48	13.92	719.3	13.7	53%	2.93	12.77	37.37	1.1	46% Ok	50% Ok	50% Ok
cp410	1.131	29.39	30.56	15.48	13.91	659.5	13.7	53%	2.93	11.72	34.28	1.0	2% Ok	3% Ok	3% Ok
cp411	1.121	29.07	31.00	15.04	14.03	720.7	13.4	52%	2.94	12.41	36.55	1.1	32% Ok	32% Ok	32% Ok
cp412	1.141	29.11	30.82	15.03	14.08	696.3	13.2	52%	2.93	11.97	35.06	1.0	15% Ok	12% Ok	12% Ok
cp413	1.152	29.59	30.60	15.48	14.11	652.2	13.4	52%	2.92	11.24	32.84	1.0	14% Ok	23% Ok	23% Ok
cp414	1.111	29.65	30.54	15.52	14.13	567.9	14.0	52%	2.96	9.79	28.99	0.9	78% Ok	100% EX	
cp415	1.126	29.40	30.79	15.28	14.12	693.1	13.6	52%	2.95	11.86	34.96	1.0	10% Ok	6% Ok	6% Ok
cp416	1.126	29.45	30.60	15.46	13.99	623.0	13.7	53%	2.94	10.93	32.09	1.0	30% Ok	42% Ok	42% Ok
cp417	1.141	29.68	30.74	15.67	14.01	685.0	13.7	53%	2.92	11.92	34.85	1.0	12% Ok	8% Ok	8% Ok
cp418	1.091	29.50	30.91	15.47	14.03	649.0	14.2	52%	2.97	11.20	33.32	1.0	20% Ok	30% Ok	30% Ok
cp419	1.096	29.51	30.74	15.45	14.06	639.2	14.1	52%	2.97	11.05	32.83	1.0	26% Ok	37% Ok	37% Ok
cp420	1.135	29.67	30.56	15.38	14.29	649.9	13.5	52%	2.95	10.94	32.28	1.0	26% Ok	37% Ok	37% Ok
cp421	1.135	29.50	30.82	15.55	13.95	687.5	13.7	53%	2.92	12.04	35.20	1.1	16% Ok	13% Ok	13% Ok
cp422	1.121	29.45	30.66	15.05	14.41	532.5	13.4	51%	2.97	8.79	26.15	0.8	117% EX		
cp423	1.135	29.50	30.62	15.43	14.07	614.8	13.6	52%	2.93	10.66	31.26	0.9	40% Ok	55% Ok	55% Ok
cp424	1.135	29.58	30.79	15.21	14.37	642.7	13.4	51%	2.96	10.62	31.41	0.9	38% Ok	52% Ok	52% Ok
cp425	1.135	29.59	30.59	15.53	14.06	687.4	13.7	52%	2.93	11.94	35.02	1.0	13% Ok	10% Ok	10% Ok
cp426	1.135	29.70	30.55	15.54	14.17		13.7	52%	2.94						
cp427	1.135	29.45	30.68	15.35	14.10		13.5	52%	2.94						

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	$t/raio$	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	$\Delta R'$ (%)	$\Delta R''$ (%)
média	1.135	29.44	30.67	15.40	14.03	680.3	13.57	52%	2.93	11.83	34.67	1.02	1.03	1.03	1.03
std dev	0.045	0.16	0.14	0.17	0.14	36.7	0.49	0%	0.04	0.75	2.10	0.09	0.07	0.07	0.07
coef. var	3.96%	0.55%	0.47%	1.10%	1.00%	5.40%	3.63%	1%	1.43%	6.37%	6.05%	8.70%	7.16%	7.16%	7.16%
min	1.061	29.07	30.45	15.03	13.79	614.8	11.78	51%	2.78	10.62	31.26	1.15	1.15	1.15	1.15
max	1.308	29.68	31.00	15.67	14.37	741.7	14.23	53%	3.01	13.25	38.78	0.78	0.86	0.86	0.86

Tabela A.45 – Distribuição de Weibull com a serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	cp424	10.62	0.02	2.36	-3.77	0.01	10.29	0.34
2	cp423	10.66	0.07	2.37	-2.65	0.01	4.35	0.21
3	cp416	10.93	0.11	2.39	-2.12	0.01	2.40	0.12
4	cp420	10.94	0.16	2.39	-1.75	0.01	1.41	0.09
5	cp419	11.05	0.20	2.40	-1.47	0.00	0.83	0.06
6	cp418	11.20	0.25	2.42	-1.25	0.00	0.46	0.04
7	cp413	11.24	0.30	2.42	-1.05	0.00	0.24	0.02
8	cp408	11.27	0.34	2.42	-0.87	0.00	0.10	0.01
9	cp410	11.72	0.39	2.46	-0.72	0.00	0.02	0.00
10	cp415	11.86	0.43	2.47	-0.57	0.00	0.00	0.00
11	cp417	11.92	0.48	2.48	-0.43	0.00	0.02	0.00
12	cp425	11.94	0.52	2.48	-0.30	0.00	0.07	0.00
13	cp412	11.97	0.57	2.48	-0.17	0.00	0.15	0.01
14	cp421	12.04	0.61	2.49	-0.05	0.00	0.26	0.01
15	cp407	12.22	0.66	2.50	0.07	0.00	0.41	0.02
16	cp411	12.41	0.70	2.52	0.20	0.00	0.58	0.04
17	cp401	12.43	0.75	2.52	0.33	0.00	0.79	0.05
18	cp404	12.50	0.80	2.53	0.46	0.00	1.05	0.06
19	cp406	12.69	0.84	2.54	0.61	0.01	1.38	0.08
20	cp403	12.72	0.89	2.54	0.78	0.01	1.80	0.10
21	cp409	12.77	0.93	2.55	0.99	0.01	2.41	0.12
22	cp405	13.25	0.98	2.58	1.33	0.01	3.59	0.22
N =	22		Médias	2.47	-0.56			
					Somas	0.09	32.63	1.61

Tabela A.46 – Análise da serra de 2,40 mm, $a_0 \approx 15$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	18.73
Coef. Lin.	-46.81
m	18.73
$\ln(\sigma_0)$	2.50
σ_0	12.17
Equação	$y = 18.72x + (-46.81)$
R^2	0.92

A.4.7 Dados dos CPs entalhe com $T = 3,2$ mm

Tabela A.47 – Dados de CPs entalhados ($T = 3,2$ mm; $a = 9$ mm)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
101	1.586	30.83	31.30	8.53	22.74	1407.8	5.38	28%	3.03	9.13	27.72	0.98	41% Ok
102	1.598	30.87	31.85	9.04	22.07	1280.1	5.66	29%	3.00	8.67	26.03	0.92	73% Ok
103	1.598	30.77	31.37	8.89	22.14	1358.3	5.56	29%	3.01	9.28	27.88	0.99	35% Ok
104	1.570	30.75	31.09	8.94	21.93	1317.9	5.69	29%	3.02	9.26	27.99	0.98	38% Ok
105	1.498	30.79	30.72	8.57	22.39	1413.8	5.72	28%	3.10	9.64	29.88	1.02	14% Ok
106	1.578	30.83	31.76	8.48	22.76	1514.8	5.37	27%	3.04	9.67	29.43	1.04	8% Ok
107	1.558	30.83	31.26	8.80	22.26	1438.4	5.65	29%	3.04	9.75	29.69	1.04	7% Ok
108	1.542	30.79	31.06	8.23	22.72	1313.1	5.33	27%	3.08	8.60	26.49	0.92	73% Ok
109	1.574	30.86	31.29	9.02	21.83	1383.4	5.73	29%	3.02	9.75	29.46	1.04	8% Ok
110	1.590	30.81	31.86	9.14	21.79	1441.2	5.75	30%	3.00	10.01	30.05	1.06	6% Ok
111	1.574	30.78	31.65	9.09	21.97	1404.0	5.78	30%	3.01	9.66	29.10	1.02	15% Ok
112	1.578	30.51	31.06	8.77	22.02	1433.6	5.56	29%	3.01	10.00	30.13	1.06	5% Ok
113	1.582	30.85	31.06	9.03	21.91	1375.8	5.70	29%	3.01	9.69	29.22	1.03	11% Ok
114	1.594	30.76	30.91	9.13	21.94	1406.7	5.73	30%	3.00	9.93	29.76	1.05	1% Ok
115	1.578	30.81	31.54	8.97	22.07	1411.7	5.68	29%	3.02	9.65	29.13	1.03	14% Ok
116	1.799	30.79	31.91	9.11	21.78	1479.7	5.06	30%	2.86	10.26	29.38	1.10	30% Ok
117	1.598	30.82	32.07	8.82	22.18	1640.9	5.52	29%	3.01	10.93	32.91	1.17	65% Ok
118	1.639	30.81	31.41	9.23	21.86	1622.4	5.63	30%	2.96	11.36	33.63	1.21	88% Ok
119	1.434	30.84	31.38	9.38	21.79	1564.9	6.54	30%	3.12	11.03	34.41	1.15	59% Ok
120	1.546	30.79	31.16	8.87	21.23	1410.9	5.74	29%	3.05	10.56	32.16	1.12	39% Ok
121	1.586	30.79	31.98	8.90	22.06	1363.0	5.61	29%	3.02	9.20	27.74	0.98	40% Ok
122	1.573	30.45	31.82	8.47	22.27	1635.9	5.38	28%	3.03	10.89	32.97	1.16	61% Ok
123	1.581	30.45	31.22	8.82	21.83	1467.2	5.58	29%	3.00	10.36	31.13	1.10	26% Ok
124	1.581	30.62	31.78	8.81	21.92		5.57	29%	3.01				
125	1.581	30.57	31.83	8.95	22.01		5.66	29%	3.01				

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
média	1.581	30.76	31.42	8.88	22.06	1438.5	5.62	29%	3.02	9.88	29.84	1.05	
stddev	0.062	0.12	0.38	0.28	0.35	99.5	0.26	1%	0.05	0.73	2.19	0.08	
coef var	3.91%	0.39%	1.20%	3.12%	1.60%	6.92%	4.70%	3.03%	1.61%	7.36%	7.34%	7.18%	
min	1.434	30.45	30.72	8.23	21.23	1280.1	5.06	27%	2.86	8.60	26.03	0.92	
max	1.799	30.87	32.07	9.38	22.76	1640.9	6.54	30%	3.12	11.36	34.41	1.21	

Tabela A.48 – Distribuição de Weibull com a serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 9$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - PF}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	108	8.60	0.02	2.15	-3.82	0.02	10.58	0.44
2	102	8.67	0.07	2.16	-2.70	0.02	4.54	0.27
3	101	9.13	0.11	2.21	-2.16	0.01	2.55	0.12
4	121	9.20	0.15	2.22	-1.80	0.00	1.53	0.09
5	104	9.26	0.20	2.23	-1.52	0.00	0.92	0.06
6	103	9.28	0.24	2.23	-1.30	0.00	0.54	0.04
7	105	9.64	0.28	2.27	-1.10	0.00	0.29	0.01
8	115	9.65	0.33	2.27	-0.93	0.00	0.13	0.01
9	111	9.66	0.37	2.27	-0.77	0.00	0.04	0.00
10	106	9.67	0.41	2.27	-0.63	0.00	0.00	0.00
11	113	9.69	0.46	2.27	-0.49	0.00	0.00	0.00
12	109	9.75	0.50	2.28	-0.37	0.00	0.04	0.00
13	107	9.75	0.54	2.28	-0.24	0.00	0.10	0.00
14	114	9.93	0.59	2.30	-0.12	0.00	0.20	0.00
15	112	10.00	0.63	2.30	0.00	0.00	0.31	0.01
16	110	10.01	0.67	2.30	0.11	0.00	0.46	0.01
17	116	10.26	0.72	2.33	0.23	0.00	0.64	0.03
18	123	10.36	0.76	2.34	0.36	0.00	0.85	0.05
19	120	10.56	0.80	2.36	0.49	0.00	1.11	0.07
20	122	10.89	0.85	2.39	0.63	0.01	1.43	0.12
21	117	10.93	0.89	2.39	0.80	0.01	1.86	0.14
22	119	11.03	0.93	2.40	1.00	0.01	2.46	0.18
23	118	11.36	0.98	2.43	1.34	0.02	3.64	0.27
N =	23		Médias	2.29	-0.56			
					Somas	0.12	34.24	1.93

Tabela A.49 – Análise da serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 9$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	16.31
Coef. Lin.	-37.88
m	16.31
$\ln(\sigma_0)$	2.32
σ_0	10.20
Equação	$y = 16.3x + (-37.89)$
R^2	0.92

Tabela A.50 – Dados de CPs entalhados ($T = 3,2$ mm; $a = 12$ mm)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	ΔR (%)
201	1.620	30.83	31.09	12.03	18.80	1021.3	7.43	39%	2.83	9.76	27.61	0.98	27% Ok	44% Ok
202	1.640	30.81	31.28	11.69	19.12	1085.3	7.13	38%	2.83	9.97	28.23	1.01	13% Ok	9% Ok
203	1.625	30.79	31.79	12.07	18.72	1096.9	7.43	39%	2.82	10.35	29.17	1.04	54% Ok	63% Ok
204	1.625	30.62	31.14	11.67	18.95	1069.7	7.18	38%	2.83	10.05	28.45	1.02	17% Ok	15% Ok
205	1.600	30.51	31.19	11.59	18.93	1077.0	7.24	38%	2.85	10.12	28.84	1.02	26% Ok	26% Ok
206	1.610	30.72	31.44	11.95	18.77	1087.7	7.42	39%	2.83	10.31	29.22	1.04	49% Ok	57% Ok
207	1.610	30.52	31.44	11.80	18.72	952.9	7.33	39%	2.83	9.08	25.70	0.91	129% EX	
208	1.585	30.47	31.35	11.60	18.88	1044.8	7.32	38%	2.86	9.82	28.06	0.99	20% Ok	34% Ok
209	1.630	30.83	31.31	11.97	18.87	1050.5	7.34	39%	2.82	9.90	27.96	1.00	5% Ok	14% Ok
210	1.600	30.80	31.35	11.84	18.96	1039.4	7.40	38%	2.85	9.68	27.61	0.98	36% Ok	55% Ok
211	1.595	30.82	31.33	11.97	18.85	1086.5	7.50	39%	2.85	10.26	29.21	1.03	42% Ok	48% Ok
212	1.610	30.75	32.06	11.94	18.82	1044.5	7.41	39%	2.84	9.66	27.40	0.97	42% Ok	64% Ok
213	1.620	30.64	31.26	11.37	19.27	1123.1	7.02	37%	2.85	10.16	28.99	1.03	42% Ok	48% Ok
214	1.620	30.45	31.89	11.46	18.99	1083.0	7.07	38%	2.84	9.89	28.06	1.00	4% Ok	14% Ok
215	1.620	30.72	31.58	11.83	18.90	1046.4	7.30	38%	2.83	9.75	27.61	0.98	27% Ok	44% Ok
216	1.615	30.78	31.14	11.89	18.89	1066.8	7.36	39%	2.84	10.09	28.61	1.02	21% Ok	19% Ok
217	1.565	30.81	30.86	11.90	18.91	1020.9	7.60	39%	2.87	9.71	27.92	0.98	36% Ok	55% Ok
218	1.608	30.60	31.45	11.71	18.89	1069.7	7.28	38%	2.84	10.01	28.43	1.01	9% Ok	4% Ok
219	1.560	30.61	31.43	11.70	18.92	1065.0	7.50	38%	2.88	9.95	28.62	1.00	3% Ok	12% Ok
220	1.608	30.66	31.52	11.55	19.11	1088.8	7.18	38%	2.85	9.93	28.34	1.01	4% Ok	2% Ok
221	1.608	30.80	31.74	12.13	18.68	1040.7	7.54	39%	2.83	9.87	27.93	0.99	16% Ok	29% Ok
222	1.608	30.75	31.54	11.97	18.78	1104.5	7.44	39%	2.84	10.43	29.56	1.05	66% Ok	79% Ok
223	1.608	30.45	31.30	11.60	18.85		7.21	38%	2.84					
224	1.608	30.77	30.86	11.95	18.82		7.43	39%	2.84					
225	1.608	30.84	31.21	12.01	18.83		7.46	39%	2.84					
# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)	ΔR (%)
média	1.608	30.70	31.41	11.80	18.90	1067.3	7.34	38%	2.84	9.98	28.37	1.00	1.01	
std dev	0.020	0.12	0.28	0.21	0.14	27.2	0.16	1%	0.02	0.22	0.62	0.03	0.02	
coef. var	1.22%	0.39%	0.91%	1.78%	0.73%	2.55%	2.13%	1.50%	0.54%	2.24%	2.18%	2.98%	2.25%	
min	1.560	30.45	30.86	11.37	18.68	1020.9	7.02	37%	2.82	9.66	27.40	0.91	0.00	
max	1.640	30.83	32.06	12.13	19.27	1123.1	7.60	39%	2.88	10.43	29.56	1.05	0.00	

Tabela A.51 – Distribuição de Weibull com a serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 12$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	212	9.66	0.02	2.27	-3.73	0.00	10.00	0.10
2	210	9.68	0.07	2.27	-2.60	0.00	4.15	0.06
3	217	9.71	0.12	2.27	-2.07	0.00	2.25	0.04
4	215	9.75	0.17	2.28	-1.70	0.00	1.30	0.03
5	201	9.76	0.21	2.28	-1.42	0.00	0.74	0.02
6	208	9.82	0.26	2.28	-1.19	0.00	0.39	0.01
7	221	9.87	0.31	2.29	-0.99	0.00	0.18	0.00
8	214	9.89	0.36	2.29	-0.82	0.00	0.06	0.00
9	209	9.90	0.40	2.29	-0.66	0.00	0.01	0.00
10	220	9.93	0.45	2.30	-0.51	0.00	0.00	0.00
11	219	9.95	0.50	2.30	-0.37	0.00	0.04	0.00
12	202	9.97	0.55	2.30	-0.23	0.00	0.11	0.00
13	218	10.01	0.60	2.30	-0.10	0.00	0.21	0.00
14	204	10.05	0.64	2.31	0.03	0.00	0.35	0.00
15	216	10.09	0.69	2.31	0.16	0.00	0.52	0.01
16	205	10.12	0.74	2.31	0.29	0.00	0.73	0.01
17	213	10.16	0.79	2.32	0.43	0.00	0.99	0.02
18	211	10.26	0.83	2.33	0.58	0.00	1.32	0.03
19	206	10.31	0.88	2.33	0.76	0.00	1.74	0.04
20	203	10.35	0.93	2.34	0.97	0.00	2.35	0.05
21	222	10.43	0.98	2.34	1.32	0.00	3.54	0.08
N =	21		Médias	2.30	-0.56			
					Somas	0.01	31.01	0.52

Tabela A.52 – Análise da serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 12$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	52.19
Coef. Lin.	-120.63
m	52.19
$\ln(\sigma_0)$	2.31
σ_0	10.09
Equação	$y = 52.18x + (-120.64)$
R^2	0.88

Tabela A.53 – Dados de CPs entalhados ($T = 3,2$ mm; $a = 15$ mm)

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
301	1.635	30.81	31.82	14.49	16.33	788.2	8.86	47%	2.68	9.76	26.17	0.94	20% Ok
302	1.606	30.59	31.20	14.13	16.46	795.9	8.80	46%	2.71	9.89	26.76	0.95	7% Ok
303	1.537	30.77	32.24	14.52	16.25	777.3	9.45	47%	2.74	9.59	26.33	0.91	72% Ok
304	1.576	30.52	31.22	14.40	16.12	769.6	9.14	47%	2.71	9.96	26.97	0.95	4% Ok
305	1.522	30.77	31.85	14.40	16.38	791.4	9.46	47%	2.76	9.73	26.88	0.93	39% Ok
306	1.591	30.75	31.42	14.44	16.31	770.1	9.08	47%	2.71	9.68	26.21	0.93	45% Ok
307	1.502	30.80	31.17	14.51	16.29	771.4	9.66	47%	2.77	9.79	27.15	0.93	31% Ok
308	1.606	30.81	31.33	14.65	16.17	763.1	9.12	48%	2.69	9.79	26.34	0.94	25% Ok
309	1.522	30.81	31.17	14.38	16.43	789.1	9.45	47%	2.77	9.85	27.25	0.94	10% Ok
310	1.522	30.84	31.18	14.54	16.30	784.6	9.55	47%	2.76	9.95	27.44	0.95	3% Ok
311	1.507	30.84	31.15	14.60	16.24	799.6	9.68	47%	2.77	10.22	28.27	0.97	57% Ok
312	1.517	30.45	31.00	13.92	16.53	772.4	9.17	46%	2.77	9.58	26.56	0.92	67% Ok
313	1.507	30.43	31.23	14.21	16.22	774.3	9.43	47%	2.76	9.90	27.34	0.94	14% Ok
314	1.502	30.79	31.28	14.41	16.38	808.1	9.59	47%	2.78	10.11	28.09	0.96	39% Ok
315	1.611	30.81	31.94	14.42	16.39	813.4	8.95	47%	2.70	9.96	26.90	0.96	22% Ok
316	1.547	30.80	30.89	14.51	16.29	806.3	9.38	47%	2.74	10.33	28.31	0.99	89% Ok
317	1.596	30.38	31.31	14.11	16.27	775.4	8.84	46%	2.70	9.83	26.54	0.94	15% Ok
318	1.601	30.79	30.77	14.56	16.23	774.0	9.09	47%	2.70	10.03	27.07	0.96	29% Ok
319	1.606	30.82	31.28	14.12	16.70	804.4	8.79	46%	2.72	9.69	26.36	0.94	23% Ok
320	1.601	30.67	31.21	14.42	16.25	792.0	9.00	47%	2.70	10.09	27.24	0.97	42% Ok
321	1.512	30.85	31.75	14.70	16.15	814.5	9.72	48%	2.76	10.33	28.49	0.98	77% Ok
322	1.507	30.70	31.63	14.45	16.25	788.7	9.59	47%	2.77	9.92	27.43	0.94	7% Ok
323		30.84	31.12	14.60	16.24								
324		30.86	31.84	14.65	16.21								
325		30.44	30.87	14.24	16.20								

# cp	ρ (mm)	Alt. (H) (mm)	Esp. (b) (mm)	Ent. (t) (mm)	Res (d) (mm)	P_{rup} (N)	t/raio	t/H	K_{tn}	σ_{nom} (MPa)	σ_{max} (MPa)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)	ΔR (%)
média	1.556	30.72	31.36	14.40	16.31	787.4	9.26	47%	2.73	9.91	27.09	0.95	
stdev	0.046	0.15	0.36	0.19	0.13	15.5	0.31	0%	0.03	0.21	0.70	0.02	
c.var.	2.96%	0.47%	1.15%	1.35%	0.81%	1.97%	3.37%	1.05%	1.20%	2.16%	2.58%	2.03%	
mín	1.502	30.38	30.77	13.92	16.12	763.1	8.79	46%	2.68	9.58	26.17	0.91	
máx	1.635	30.85	32.24	14.70	16.70	814.5	9.72	48%	2.78	10.33	28.49	0.99	

Tabela A.54 – Distribuição de Weibull com a serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 15$ mm

i	# cp	$\sigma_{nom}(MPa)$	$PF = \frac{i - 0.5}{n}$	$X = \ln(\sigma_{nom})$	$Y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - Pf}\right)\right)$	Sxx	Syy	Sxy
1	312	9.58	0.02	2.26	-3.77	0.00	10.29	0.11
2	303	9.59	0.07	2.26	-2.65	0.00	4.35	0.07
3	306	9.68	0.11	2.27	-2.12	0.00	2.40	0.04
4	319	9.69	0.16	2.27	-1.75	0.00	1.41	0.03
5	305	9.73	0.20	2.28	-1.47	0.00	0.83	0.02
6	301	9.76	0.25	2.28	-1.25	0.00	0.46	0.01
7	308	9.79	0.30	2.28	-1.05	0.00	0.24	0.01
8	307	9.79	0.34	2.28	-0.87	0.00	0.10	0.00
9	317	9.83	0.39	2.28	-0.72	0.00	0.02	0.00
10	309	9.85	0.43	2.29	-0.57	0.00	0.00	0.00
11	302	9.89	0.48	2.29	-0.43	0.00	0.02	0.00
12	313	9.90	0.52	2.29	-0.30	0.00	0.07	0.00
13	322	9.92	0.57	2.29	-0.17	0.00	0.15	0.00
14	310	9.95	0.61	2.30	-0.05	0.00	0.26	0.00
15	304	9.96	0.66	2.30	0.07	0.00	0.41	0.00
16	315	9.96	0.70	2.30	0.20	0.00	0.58	0.00
17	318	10.03	0.75	2.31	0.33	0.00	0.79	0.01
18	320	10.09	0.80	2.31	0.46	0.00	1.05	0.02
19	314	10.11	0.84	2.31	0.61	0.00	1.38	0.02
20	311	10.22	0.89	2.32	0.78	0.00	1.80	0.04
21	321	10.33	0.93	2.34	0.99	0.00	2.41	0.07
22	316	10.33	0.98	2.34	1.33	0.00	3.59	0.08
N =	22		Médias	2.29	-0.56			
					Somas	0.01	32.63	0.53

Tabela A.55 – Análise da serra de 3,2 mm, $a_0 \approx 15$ mm

Parâmetro	Valor
Coef. Ang.	54.41
Coef. Lin.	-125.34
m	54.41
$\ln(\sigma_0)$	2.30
σ_0	10.01
Equação	$y = 54.41x + (-125.35)$
R^2	0.88

A.4.8 Dados dos CPs utilizados para produção da Curva-R

Tabela A.56 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios visando produzir a curva-R.

CP	Ratio (ρ) (mm)	Alt.(H) (mm)	Esp.(b) (mm)	Entalhe(a_0) (mm)	Res.(d) (mm)	P_{rup} (N)	Deform. (ϵ) ($\mu\epsilon$)	M.Young (E) (GPa)	Compl.liso (λ_0) ($\mu\epsilon/N \cdot 10^8$)	Compl.máx. (λ_{rup}) ($\mu\epsilon/N \cdot 10^8$)	Tensão Ref. (σ) (MPa)	Tensão Net (σ_n) (MPa)	Along.Máx. (δ_{max}) (mm · 10 ⁸)	Flecha Máx. (ϵ_{max}) (mm · 10 ⁸)	$\frac{\delta_0}{H}$ (adim.)	$F(a/H)$ (adim.)	K_f (MPa · \sqrt{m})
s02eN-liso	0.000	31.28	31.90	0.00	31.28	4356.3	434	46.34	7.967465	9.962842	14.66	14.66	0.000062	0.000045	0.00	1.12	0.000
s02eN-401	0.200	31.01	31.96	3.23	27.78	2569.8	363	37.22	8.711983	14.125624	10.94	8.78	0.000053	0.000034	0.10	1.04	0.922
s02eN-402	0.200	30.97	31.88	5.76	25.21	2041.8	340	31.97	7.135556	16.651827	10.58	7.01	0.000049	0.000032	0.19	1.05	0.988
s02eN-403	0.200	30.86	31.75	9.40	21.46	1543.0	359	25.36	12.842795	23.266515	11.08	5.36	0.000052	0.000031	0.30	1.13	1.037
s02eN-404	0.200	31.13	31.85	12.21	18.92	1192.9	331	24.18	13.267071	27.748669	10.99	4.06	0.000048	0.000024	0.39	1.24	0.988
s02eN-405	0.200	30.99	31.72	15.90	15.09	719.5	352	15.38	25.155498	48.921836	10.46	2.48	0.000051	0.000023	0.51	1.54	0.852
s02eN-406	0.200	30.97	31.80	18.32	12.65	522.8	348	10.03	30.497785	66.569669	10.78	1.80	0.000050	0.000026	0.59	1.87	0.805
s02eN-407	0.000	31.28	31.90	0.00	31.28	4938.7	464	46.09	8.140030	9.395265	16.62	16.62	0.000067	0.000052	0.00	1.12	0.000
CP	Ratio (ρ)	Alt.(H)	Esp.(b)	Entalhe(a_0)	Res.(d)	P_{rup}	Deform. (ϵ)	M.Young (E)	Compl.liso (λ_0)	Compl.máx. (λ_{rup})	Tensão Ref. (σ)	Tensão Net (σ_n)	Along.Máx. (δ_{max})	Flecha Máx. (ϵ_{max})	$\frac{\delta_0}{H}$	$F(a/H)$	K_f
Média	0.15	31.06	31.84	8.10	22.96	2235.59	373.88	29.57	14.21	27.08	12.01	7.60	0.00	0.00	0.26	1.26	0.70
Desv.Pad.	0.09	0.15	0.08	7.01	7.10	1636.75	48.12	13.35	8.82	20.47	2.31	5.48	0.00	0.00	0.23	0.29	0.44
C.V.	0.62	0.00	0.00	0.87	0.31	0.73	0.13	0.45	0.62	0.76	0.19	0.72	0.12	0.31	0.87	0.23	0.63
Mín.	0.00	30.86	31.72	0.00	12.65	522.76	331.00	10.03	7.14	9.40	10.46	1.80	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00
Máx.	0.20	31.28	31.96	18.32	31.28	4938.66	464.00	46.34	30.50	66.57	16.62	16.62	0.00	0.00	0.59	1.87	1.04

A.4.9 Dados dos CPs referentes aos ensaios de busca pelo Raio crítico

Tabela A.57 – Dados referentes aos ensaios de busca pelo Raio Crítico

CP	Raio (ρ) (mm)	Alt.(H) (mm)	Esp.(b) (mm)	Entalhe (mm)	Res.(d) (mm)	P_rup (N)	Deform (ϵ) ($\mu\epsilon$)	M.Young (E) (GPa)	λ_p ($\mu\epsilon/N$)	λ_{max} ($\mu\epsilon/N$)	σ_{ref} (MPa)	σ_{net} (MPa)	δ_{max} ($mm \cdot 10^6$)	ν_{max} ($mm \cdot 10^6$)	a/H (adim.)	$F(a/H)$ (adim.)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
cpsNe9_02	0.203	31.02	31.83	9.63	21.39	1516.6	324	26.06	13.386803	21.362886	5.20	10.94	0.000047	0.000029	0.31	1.13	1.025
cpsNe9_05_001	0.300	31.01	31.81	8.79	22.22	1648.1	358	24.47	14.517415	21.722207	5.66	11.02	0.000052	0.000033	0.28	1.11	1.040
cpsNe9_05_002	0.300	31.15	31.71	8.70	22.45	1731.3	356	35.94	49.007199	20.563011	5.91	11.37	0.000051	0.000024	0.28	1.10	1.077
cpsNe9_14	0.758	31.03	31.92	9.36	21.66	1751.5	370	30.94	10.115956	21.124316	5.99	12.28	0.000054	0.000028	0.30	1.12	1.153
cpsNe9_24	1.135	30.95	31.78	9.37	21.58	1777.7	370	26.91	12.062663	20.813528	6.13	12.62	0.000054	0.000033	0.30	1.12	1.183
cpsNe9_32	1.556	31.17	30.47	8.97	22.21	1509.8	374	23.79	14.482194	24.770935	5.36	10.55	0.000054	0.000032	0.29	1.11	0.998
Média	0.71	31.05	31.59	9.14	21.92	1655.84	358.67	28.02	18.93	21.73	5.71	11.46	0.00	0.00	0.29	1.12	1.08
Desv.Pad.	0.55	0.09	0.55	0.37	0.43	118.70	18.45	4.62	14.83	1.55	0.37	0.81	0.00	0.00	0.01	0.01	0.07
C.V.	0.77	0.00	0.02	0.04	0.02	0.07	0.05	0.16	0.78	0.07	0.06	0.07	0.05	0.13	0.04	0.01	0.07
Mín.	0.20	30.95	30.47	8.70	21.39	1509.83	324.00	23.79	10.12	20.56	5.20	10.55	0.00	0.00	0.28	1.10	1.00
Máx.	1.56	31.17	31.92	9.63	22.45	1777.69	374.00	35.94	49.01	24.77	6.13	12.62	0.00	0.00	0.31	1.13	1.18

A.4.10 Dados dos CPs utilizados para verificação da profundidade do entalhe

Tabela A.58 – Dados referentes ao experimento para verificação da profundidade real do entalhe

CP	Raio (ρ) (mm)	Alt.(H) (mm)	Esp.(b) (mm)	Entalhe (a_0) (mm)	Res.(d) (mm)	P _{rup} (N)	Deform (ϵ) ($\mu\epsilon$)	M.Young (E) (GPa)	λ_p ($\mu\epsilon/N$)	λ_{max} ($\mu\epsilon/N$)	σ_{ref} (MPa)	σ_{net} (MPa)	δ_{max} ($mm \cdot 10^8$)	ν_{max} ($mm \cdot 10^8$)	a/H (adim.)	$F(a/H)$ (adim.)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
cp4566N	0.000	31.26	31.97	0.00	31.26	4566.9	411	48.27	7.362614	8.999564	15.35	15.35	0.000059	0.000046	0.00	1.12	0.000
cp4668N	0.000	31.24	31.79	0.00	31.24	4668.8	420	49.43	5.591229	8.995936	15.81	15.81	0.000060	0.000046	0.00	1.12	0.000
cp4572N	0.000	31.17	31.68	0.00	31.17	4572.4	458	48.42	8.208389	10.016558	15.60	15.60	0.000066	0.000046	0.00	1.12	0.000
cp04	0.200	30.98	31.96	6.27	20.70	2010.9	319	35.34	8.572286	15.863828	6.89	15.42	0.000046	0.000028	0.20	1.05	1.019
cp05	0.200	31.10	31.96	9.41	20.06	1883.6	337	31.00	8.801957	17.891177	6.40	15.38	0.000049	0.000030	0.30	1.12	1.238
cp06	0.203	31.05	31.79	9.15	24.25	1779.7	354	30.97	10.231204	19.891295	6.10	10.00	0.000051	0.000028	0.29	1.12	1.155
cp07	0.200	31.20	31.86	11.94	21.61	1556.6	351	27.31	11.389764	22.549725	5.27	10.98	0.000051	0.000028	0.38	1.23	1.253
cp08	0.203	31.22	31.75	11.87	21.69	1604.3	318	26.31	11.289055	19.822310	5.45	11.28	0.000046	0.000030	0.38	1.22	1.286
cp09	0.203	31.09	31.84	12.06	21.38	1492.2	327	28.77	11.361040	21.913409	5.09	10.76	0.000047	0.000026	0.39	1.24	1.225
cp10	0.203	31.24	31.86	14.85	18.74	1095.3	296	23.14	15.886054	27.024708	3.70	10.28	0.000043	0.000023	0.48	1.42	1.137
cp11	0.203	31.25	31.87	14.63	18.97	1209.4	331	21.72	23.962566	27.369939	4.08	11.07	0.000048	0.000027	0.47	1.40	1.229
cp12	0.203	31.09	31.78	15.04	18.39	1130.4	332	19.46	154.228755	29.370680	3.86	11.04	0.000048	0.000029	0.48	1.45	1.215
Média	0.15	31.15	31.84	8.77	23.29	2297.53	354.50	32.51	23.07	19.14	7.80	12.75	0.00	0.00	0.28	1.22	0.90
Desv.Pad.	0.09	0.09	0.09	5.87	5.04	1418.69	48.94	10.68	41.58	7.11	4.80	2.47	0.00	0.00	0.19	0.14	0.54
C.V.	0.60	0.00	0.00	0.67	0.22	0.62	0.14	0.33	1.80	0.37	0.61	0.19	0.14	0.27	0.67	0.11	0.61
Mín.	0.00	30.98	31.68	0.00	18.39	1095.29	296.00	19.46	5.59	9.00	3.70	10.00	0.00	0.00	0.00	1.05	0.00
Máx.	0.20	31.26	31.97	15.04	31.26	4668.78	458.00	49.43	154.23	29.37	15.81	15.81	0.00	0.00	0.48	1.45	1.29

A.4.11 Dados dos CPs utilizados na apuração do defeito intrínseco do material

Tabela A.59 – Dados referentes ao experimento para verificação do defeito intrínseco do material

CP	Raio (ρ) (mm)	Alt.(H) (mm)	Esp.(b) (mm)	Entalhe (a_0) (mm)	Res.(d) (mm)	P_rup (N)	σ_{ref} (MPa)	σ_{net} (MPa)	a/H (adim.)	$F(a/H)$ (adim.)	K_{Ic} ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
cplp2-01	0.200	31.04	31.86	3.14	27.90	2844.3	9.73	12.05	0.10	1.04	1.008
cplp2-02	0.250	31.06	31.89	3.16	27.90	2760.6	9.42	11.68	0.10	1.04	0.980
cplp2-03	0.200	31.13	32.05	3.23	27.89	2910.6	9.84	12.26	0.10	1.04	1.034
cplp2-04	0.250	31.17	31.70	3.26	27.91	2550.9	8.70	10.85	0.10	1.04	0.917
cplp2-05	0.200	31.15	31.78	3.19	27.96	2659.5	9.06	11.24	0.10	1.04	0.946
cplp2-06	0.250	31.43	31.81	2.17	29.26	2996.8	10.02	11.56	0.07	1.06	0.874
cplp2-07	0.250	31.28	31.85	1.84	29.43	3350.2	11.29	12.75	0.06	1.06	0.913
cplp2-08	0.250	31.09	31.87	1.64	29.44	3075.3	10.49	11.69	0.05	1.07	0.803
cplp2-09	0.250	31.13	31.77	1.66	29.47	3217.9	10.97	12.25	0.05	1.07	0.845
cplp2-10	0.250	31.51	31.98	2.10	29.41	2658.6	8.79	10.09	0.07	1.06	0.756
cplp2-11	0.250	31.85	31.17	3.20	28.65	2869.6	9.53	11.78	0.10	1.04	0.998
cplp2-12	0.250	31.16	31.73	0.64	30.52	3767.0	12.84	13.39	0.02	1.10	0.630
cplp2-13	0.250	31.32	31.79	1.57	29.75	3121.0	10.51	11.65	0.05	1.07	0.789
cplp2-14	0.250	31.15	31.86	0.89	30.26	3897.3	13.24	14.03	0.03	1.09	0.762
cplp2-16	0.350	31.04	31.89	0.97	30.06	3918.4	13.40	14.28	0.03	1.09	0.803
cplp2-17	0.350	31.06	31.79	0.80	30.26	3752.3	12.85	13.54	0.03	1.09	0.704
cplp2-18	0.350	30.93	31.84	0.71	30.22	3864.8	13.33	13.96	0.02	1.09	0.686
cplp2-19	0.350	31.04	31.89	0.74	30.30	3854.1	13.18	13.82	0.02	1.09	0.692
cplp2-20	0.300	31.13	31.73	0.82	30.31	3736.6	12.76	13.47	0.03	1.09	0.708
CP	Raio (ρ)	Alt.(H)	Esp.(b)	Entalhe (a_0)	Res.(d)	P_rup	σ_{ref}	σ_{net}	a/H	$F(a/H)$	K_{Ic}
Média	0.266	31.19	31.80	1.88	29.31	3252.94	11.05	12.44	0.06	1.07	0.83
Desv.Pad.	0.050	0.21	0.18	1.03	0.98	490.94	1.73	1.20	0.03	0.02	0.12
C.V.	18.87%	0.68%	0.55%	54.73%	3.33%	15.09%	15.65%	9.67%	54.62%	1.94%	14.89%
Mín.	0.200	30.93	31.17	0.64	27.89	2550.89	8.70	10.09	0.02	1.04	0.63
Máx.	0.350	31.85	32.05	3.26	30.52	3918.40	13.40	14.28	0.10	1.10	1.03

A.5 Curva-R

A.5.1 Curva-R (serra $T = 0,2$ mm; $a_0 \approx 9$ mm)

Tabela A.60 – Curva-R do CP225 (serra $a_0 = 8,98$ mm)

σ_{net} (MPa)	λ (ϵ/N)	λ/λ_0 (ad.)	a/h (ad.)	a_{ef} (mm)	Δa (mm)	K_{Ic} (MPa $\cdot\sqrt{m}$)	$K_{Ic,ef}$ (MPa $\cdot\sqrt{m}$)
1.152	0.15	1.59	0.28	8.98	0.00	0.21	0.21
1.207	0.15	1.61	0.29	9.02	0.05	0.22	0.23
1.264	0.15	1.62	0.29	9.10	0.12	0.24	0.24
1.327	0.16	1.62	0.29	9.12	0.14	0.25	0.25
1.383	0.16	1.63	0.29	9.19	0.21	0.26	0.26
1.445	0.16	1.63	0.29	9.20	0.22	0.27	0.27
1.509	0.16	1.63	0.29	9.21	0.23	0.28	0.29
1.563	0.16	1.65	0.30	9.28	0.30	0.29	0.30
1.627	0.16	1.67	0.30	9.42	0.44	0.30	0.31
1.695	0.16	1.66	0.30	9.39	0.41	0.32	0.33
1.756	0.16	1.69	0.30	9.53	0.55	0.33	0.34
1.821	0.16	1.70	0.31	9.63	0.65	0.34	0.36
1.896	0.16	1.69	0.30	9.56	0.59	0.35	0.37
1.959	0.16	1.71	0.31	9.67	0.69	0.36	0.39
2.028	0.16	1.72	0.31	9.74	0.76	0.38	0.40
2.098	0.17	1.73	0.31	9.80	0.82	0.39	0.42
2.173	0.17	1.73	0.31	9.83	0.85	0.40	0.43
2.242	0.17	1.74	0.32	9.89	0.91	0.42	0.45
2.316	0.17	1.75	0.32	9.92	0.94	0.43	0.47
2.381	0.17	1.76	0.32	9.98	1.01	0.44	0.48
2.459	0.17	1.78	0.32	10.08	1.10	0.46	0.50
2.533	0.17	1.78	0.32	10.10	1.12	0.47	0.52
2.615	0.17	1.79	0.32	10.17	1.19	0.49	0.54
2.686	0.17	1.80	0.32	10.20	1.22	0.50	0.55
2.770	0.17	1.82	0.33	10.32	1.34	0.52	0.58
2.843	0.18	1.83	0.33	10.41	1.43	0.53	0.59
2.922	0.18	1.83	0.33	10.40	1.42	0.54	0.61
2.999	0.18	1.86	0.34	10.53	1.55	0.56	0.63
3.084	0.18	1.86	0.34	10.57	1.59	0.57	0.65
3.158	0.18	1.87	0.34	10.63	1.65	0.59	0.67
3.244	0.18	1.89	0.34	10.72	1.74	0.60	0.70
3.323	0.18	1.90	0.34	10.76	1.78	0.62	0.71
3.403	0.18	1.91	0.35	10.86	1.88	0.63	0.74
3.487	0.18	1.93	0.35	10.94	1.96	0.65	0.76
3.571	0.19	1.93	0.35	10.96	1.98	0.67	0.78
3.647	0.19	1.95	0.35	11.05	2.07	0.68	0.80
3.728	0.19	1.97	0.36	11.18	2.20	0.69	0.83
3.807	0.19	1.99	0.36	11.25	2.27	0.71	0.85
3.889	0.19	2.00	0.36	11.32	2.34	0.72	0.88
3.966	0.19	2.02	0.36	11.43	2.45	0.74	0.90
4.049	0.20	2.04	0.37	11.53	2.55	0.75	0.93
4.131	0.20	2.06	0.37	11.63	2.65	0.77	0.95
4.208	0.20	2.08	0.37	11.73	2.75	0.78	0.98
4.281	0.20	2.11	0.38	11.88	2.90	0.80	1.01
4.358	0.20	2.13	0.38	11.97	2.99	0.81	1.03
4.438	0.21	2.17	0.39	12.12	3.14	0.83	1.07
4.502	0.21	2.20	0.39	12.27	3.29	0.84	1.10
4.580	0.21	2.22	0.39	12.38	3.40	0.85	1.13
4.643	0.22	2.25	0.40	12.51	3.53	0.86	1.15
4.711	0.22	2.29	0.40	12.67	3.69	0.88	1.19
4.780	0.22	2.33	0.41	12.84	3.86	0.89	1.22
4.837	0.23	2.37	0.41	12.99	4.02	0.90	1.25
4.889	0.23	2.41	0.42	13.19	4.21	0.91	1.29
4.960	0.24	2.46	0.43	13.36	4.38	0.92	1.33
5.008	0.24	2.50	0.43	13.53	4.56	0.93	1.36
5.053	0.25	2.56	0.44	13.74	4.76	0.94	1.40
5.093	0.25	2.62	0.44	13.96	4.98	0.95	1.44
5.114	0.26	2.71	0.45	14.25	5.27	0.95	1.48
5.130	0.27	2.79	0.46	14.51	5.53	0.96	1.52
5.141	0.28	2.88	0.47	14.78	5.80	0.96	1.56

APÊNDICE B – Aquecimento dos equipamentos e do CP

Em todos os experimentos desta pesquisa foi utilizada a célula de carga de 100 kN. Sendo assim, antes de ligar a máquina de ensaios universais (Instron) esta célula de carga deve ser instalada. Após ligar a máquina, ainda sem as garras ou pratos de compressão instalados, a célula de carga deve passar pelo processo de calibração, conforme previsto no manual da máquina. Após a calibração, as garras ou os pratos de compressão podem ser instalados.

Cada SG deve ser ligado em um circuito da caixa P3, sendo necessários portanto dois circuitos. Os fios de cada SG devem ser ligados em configuração de *quarter bridge*, conforme descrito no caixa (Figura B.1).

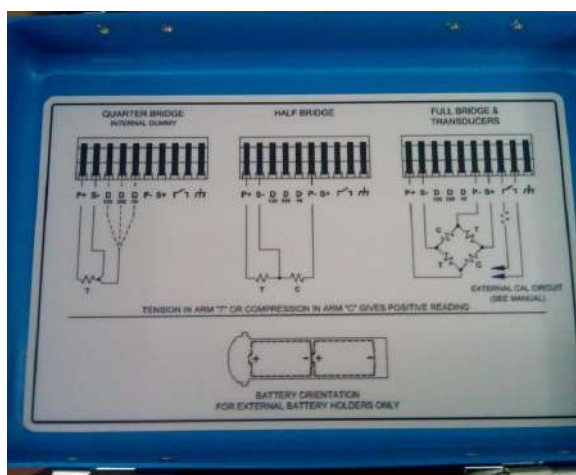


Figura B.1 – Protocolos de ligação de fios dos *strain gages* na caixa Vishay P3.

A caixa P3 deve ser configurada para gravação dos dados lidos automaticamente a cada segundo.

Deve-se aguardar 20 min com os equipamentos ligados para aquecer os circuitos tanto da caixa P3, quanto da Instron.

Os pratos de compressão devem ser aproximados até tocar no corpo de prova.

Os valores de deformação apresentados no visor da caixa P3 devem ser zerados.

A posição do barramento em milímetros (mm) e o valor de carga em Newtons (N) na máquina de ensaios universais deve ser novamente zerados.

Inicialmente é feito um aquecimento no corpo de provas, que é experimentado manualmente até um carregamento considerado baixo, aproximadamente 1 kN, aguardando 30 sec (segundos) antes de liberar o carregamento.

Os valores de deformação apresentados na caixa P3 são conferidos a cada liberação do carregamento para verificar se a deformação voltou a zero.

Cabe esclarecer que se o *strain gage* não estiver bem fixado este valor não irá retornar a zero. Ao mesmo tempo ocorrem acomodações iniciais entre o SG, a cola utilizada e o CP, sendo necessários normalmente cinco (5) carregamentos iniciais para que o SG esteja pronto para uso e apresente valores de deformação confiáveis.

Após este aquecimento do corpo de prova, o barramento deve ser novamente afastado do corpo de provas. O prato de compressão deve ser aproximado do corpo de provas até o contato. Ao perceber a mudança de carga referente ao contato com o corpo de provas, os indicadores de carga e extensão do barramento devem ser zerados. O valor de deformação apresentado na caixa P3 também deve ser zerado.

APÊNDICE C – Calibração

A força aplicada sobre os corpos de prova é realizada pelo deslocamento do barramento da máquina de ensaios universais e monitorada por sua célula de carga. Os valores medidos são transmitidos para o computador e armazenados pelo programa *Bluehill*, indicado para operação da máquina de ensaios Instron 5582.

Durante a realização de alguns ensaios foi possível observar que a célula de carga sofria interferência, como pode ser visto na Figura C.1.

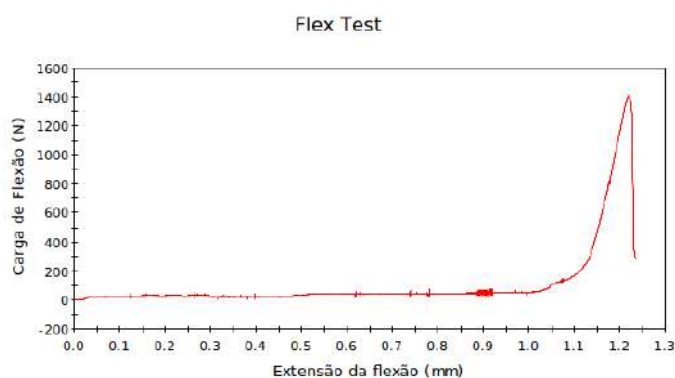


Figura C.1 – Ensaio de corpo de prova que sofreu interferência eletromagnética.

Sendo assim, foi necessário realizar um experimento visando monitorar os dados vindos da máquina de ensaios, para compreender as interferências e garantir a relação entre os dados obtidos e o fenômeno real monitorado.

C.1 Definição do ensaio

Em um ensaio convencional a Máquina Universal de Ensaios Instron modelo 5582 desloca seu barramento visando aplicar uma força, seja ela compressiva ou trativa sobre um corpo a ser avaliado. Enquanto o barramento móvel superior se desloca, sua base inferior é estática. Durante a movimentação do barramento uma célula de carga monitora a força que este barramento aplica contra o corpo.

Sendo assim, este ensaio teve como objetivo aferir a resposta do sistema (máquina de ensaios) dado que sua resposta deveria ser zero.

C.2 Metodologia

A máquina de ensaios foi ligada e suas garras e pratos foram desacoplados da célula de carga.

O equipamento foi ligado e deixado para equilíbrio e aquecimento durante 30 minutos, conforme recomendação do manual.

No programa de operação da máquina de ensaios, *Bluehill*, foi criado um ensaio para esta investigação com as características descritas na Tabela C.1.

Tabela C.1 – Especificação do teste de deriva de zero criado na máquina Instron 5584.

Parâmetro	Valor
Tipo de ensaio	flexão
Controle	deslocamento do barramento
Velocidade	0 milímetros por segundo
Frequência de leitura	50 por segundo

Este ensaio foi configurado para flexão por conveniência, por não haver diferença entre as várias opções neste caso, onde não haverá deslocamento do barramento. O controle do ensaio foi configurado para deslocamento visando poder definir a velocidade zero para o deslocamento do barramento. Outras formas de controle do ensaio fazem referência ao uso de sensores como *clip gage* por exemplo, no entanto estes poderiam apresentar oscilação de valores, o que poderia tornar mais complicado o teste, desnecessariamente. A frequência de leitura foi configurada para 50 Hz por ser a taxa mais alta disponível na máquina de ensaios.

O ensaio foi salvo com o nome de "Deriva de Zero", e foi imediatamente realizado um teste para verificar se o seu comportamento seria o desejado. Após alguns segundos o teste foi encerrado, os valores obtidos foram salvos, o programa BlueHill foi encerrado e os arquivos de dados brutos raw foram copiados para serem importados em uma planilha de cálculos para verificação.

Dada a taxa de captura de dados de 50 Hz, a equação de frequência de Nyquist (Equação C.1), propõem que poderiam ser detectadas no máximo frequências de até 25 Hz.

$$0 < f < f_s/2, \quad (C.1)$$

onde:

f frequência calculada de eventos

f_s frequência de amostragem

Ainda, segundo a taxa de amostragem, foi possível estimar o número de observações para o ensaio, calculado pela Equação C.2.

$$N_{obs} = f * T, \quad (C.2)$$

onde:

N_{obs}	número de observações
f	frequência calculada de eventos
T_t	tempo total de duração do ensaio

A quantidade N_{obs} de observações igual à 180 kobs, que foi considerado um número grande, uma vez que normalmente não é bem tratado por programas convencionais como planilhas de cálculo.

Após 30 min de aquecimento a máquina foi desligada e, após 30 s foi ligada novamente, visando iniciar um ciclo de uso de duas horas livre do sintoma de *watchdog*. Cabe esclarecer que esta máquina possui uma configuração de segurança, aqui referenciada como "*watchdog*", que causa a perda de comunicação entre o computador e o barramento a cada duas horas de funcionamento. Este fato ocorreu em alguns ensaios, causando o descarte de alguns corpos de prova.

A célula de carga foi calibrada automaticamente utilizando a função de calibração disponível no software. Os valores de carga aplicada lidos da célula de carga e os de extensão do barramento foram zerados. O ensaio de deriva de zero foi iniciado e o horário de início foi anotado, visando encerrar o teste pouco antes de duas horas depois do início. Ao término do teste os dados foram salvos e o *software Bluehill* encerrado. Os dados brutos copiados para um computador de trabalho do laboratório para serem tratados.

C.3 Processamento dos dados

Conforme previsto, a quantidade de registros tornou a manipulação destes dados em planilha de cálculo inviável. Neste caso, o programa utilizado conseguiu carregar os registros, no entanto tornou-se extremamente lento ao criar gráficos ou realizar operações matemáticas em cada colunas completas.

Para operar estes dados foi desenvolvido um programa que filtra os dados produzidos pelo sistema *BlueHill* da máquina de ensaios. Este programa produziu dados estatísticos básicos e gerou também um *script* para calcular e plotar uma transformada de Fourier rápida (FFT) destes dados. Este programa foi registrado e encontra-se no seção E.1.

C.4 Resultados obtidos e análise

A partir da execução do *script* produzido automaticamente no software livre Octave, foi possível observar o gráfico do ensaio de Deriva de zero (Figura C.2).

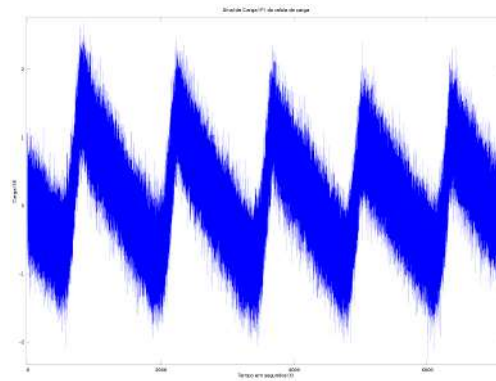


Figura C.2 – Gráfico referente aos dados obtidos no ensaio de deriva de zero, na máquina de ensaios universais Instron 5582, utilizando a célula de carga de 100 kN

Estas leituras originais apresentam sinais periódicos, sendo necessária uma transformação do domínio de tempo para o domínio de frequências. O *script* executou uma FFT nos dados, filtrou somente as frequências com maiores amplitudes, apresentando como resposta a Figura C.3.

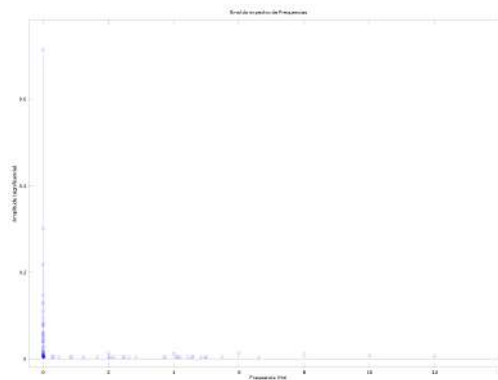
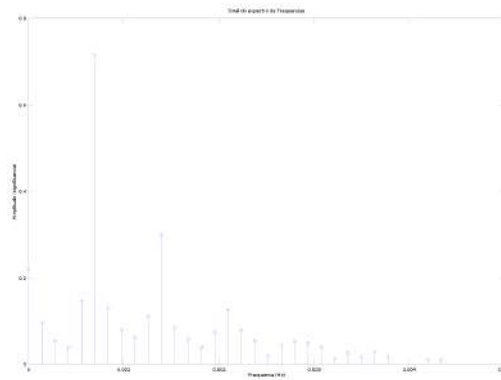


Figura C.3 – Dados transformados para o domínio de frequência

Como os eventos observados se repetem ao longo de grandes períodos de tempo, sua frequência é muito baixa. Foi possível estimar a frequência observada na Figura C.2 pelo recíproco de seu comprimento de onda, aproximadamente $1/1500\text{segundos} \approx 0.000667\text{Hz}$. Ao analisar as frequência mais baixas, filtrando pelas que mais ocorrem obtém-se a Figura C.4, onde se destaca a 6a frequência da FFT, com valor de $0,000699\text{e}05\text{ Hz}$.

Figura C.4 – Dados específicos de baixa frequência.



Transformando esta frequência para o domínio do tempo, obteve-se o período de sua repetição, $1/0,000699e05 \text{ Hz} = 1430.51 \text{ segundos} = 23 \text{ minutos} + 50.51 \text{ segundos}$. Este período de ativação para o fenômeno foi associado aos episódios de entrada e saída em funcionamento do ar condicionado da sala.

Em outro ensaio, ainda com o aparelho de ar condicionado ligado, no dia seguinte foram obtidos os dados apresentados na Figura C.5:

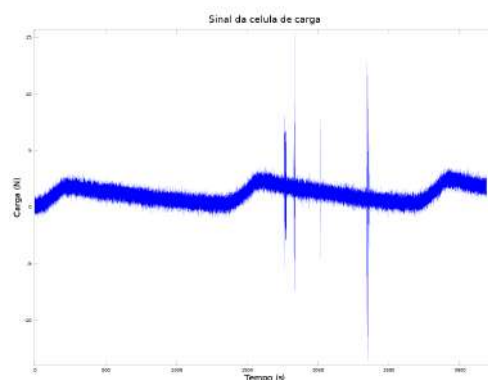


Figura C.5 – Gráfico referente aos dados obtidos no ensaio de deriva de zero, com o ar-condicionado desligado.

Pode-se perceber o efeito do ar condicionado ainda presente, no entanto, durante este ensaio um aparelho celular foi ativado, recebeu dados e duas chamadas telefônicas, uma acidentalmente e outra propositalmente.

A partir da execução da FFT obtiveram-se os dados da Figura C.6, filtrados em baixa frequência maiores amplitudes na Figura C.7.

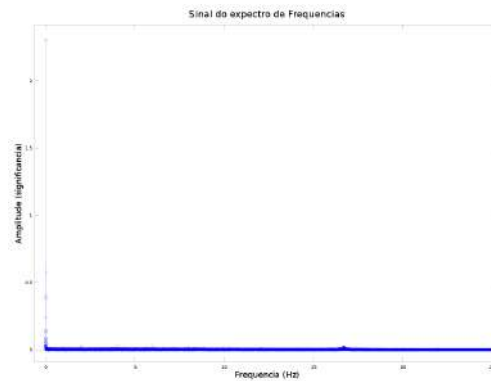


Figura C.6 – Gráfico à deriva de zero, com o ar-condicionado desligado, no domínio do tempo.

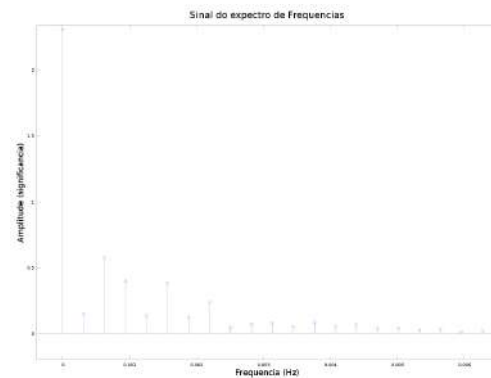


Figura C.7 – Gráfico de dados do domínio do tempo, interferência, somente maiores amplitudes.

Neste ensaio, realizado no dia seguinte, estimando o comprimento da maior onda como 1400 sec, pode-se calcular uma frequência tão baixa quanto $1/144 \text{ sec} = 0,0006944 \text{ Hz}$.

As frequências menores que 0,0008 Hz, foram filtradas e assim foram encontrados somente 3 picos, e dentre estes o de maior amplitude mede 0.0006269, onde o comprimento de onda vale $\lambda = 1/v = 1/0.0006269 = 1595.15$ segundos.

Portanto, o período de repetição deste evento foi calculado em $\lambda = 26 \text{ min e } 35 \text{ seg}$.

C.5 Interferências detectadas

pela rede elétrica e por radio frequência.

A interferência via radio frequência pode ser comprovada, por exemplo, durante ligações de telefones celulares e recebimento de mensagens de texto (SMS). A interferência via rede elétrica pode ser comprovada com o acionamento do compressor do ar condicionado da sala onde a máquina está instalada.

C.6 Conclusões

A partir desta análise o ar condicionado foi desligado preventivamente durante os experimentos, visando diminuir as interferências em leitura, apesar de sua interferência ser considerada baixa (em torno de 10 N para mais ou para menos). Os aparelhos celulares, fonte de interferência maior detectada neste caso, foram afastados da máquina de ensaios durante os experimentos.

Este experimento e estas orientações para uso da máquina de ensaios foram consideradas também importantes para que longos ensaios pudessem ser realizados, visando avaliar acúmulo de danos e ciclos de vida em materiais.

A variação da leitura do equipamento foi detectada durante o tempo de ensaio, sem que houvesse um carregamento (força) real sendo aplicado.

Apesar das interferências terem sido mapeadas, grande parte dos dados obtidos através da FFT foram inconclusivos.

APÊNDICE D – Colar strain gage

O posicionamento do SG é de extrema importância para que se possa monitorar a deformação, sem desalinhamentos. Cabe ressaltar também que o SG funciona integrando a deformação que ocorre na área de superfície onde foi colado, portanto deve ser colado em local estratégico para que possa perceber a deformação mais representativa possível.

A seguir uma lista dos materiais necessários para o processo de colagem do SG:

- Papel absorvente para a limpeza do CP;
- Uma pinça de laboratório que possibilite manusear o SG;
- Fita Durex transparente e larga (aproximadamente 5 cm de largura);
- Um paquímetro para encontrar o meio de cada dimensão.
- Lupa articulada, para ajudar ver o local exato indicado pelo paquímetro;
- Uma caneta marcadora permanente, para marcar pontos de referência ;
- Um esquadro marca Mitutoyo, para ligar os pontos de marcação, e traçar uma reta ortogonal às laterais do corpo de prova;
- Acetona para apagar alguma marcação incorreta, caso necessário.
- Super-cola Loctite 496, mantida em geladeira.

O processo deve ser executado conforme os seguintes passos:

1. Primeiro deve-se verificar a cor e a liquidez da cola. Não pode estar espessa nem amarelada.
2. A resistência do SG em *Ohm* deve ser verificada com um multímetro. Neste caso deve apresentar resistência de 120Ω . Outros SG podem possuir valores diferentes;
3. Usar acetona e papel para a limpeza da face lisa do CP;
4. Medir a dimensão vertical do CP;
5. Calcular a metade da dimensão vertical;
6. Usar o paquímetro, a lupa e a caneta para fazer marcações;
7. Usar a lupa, o esquadro e a caneta, traçar uma linha horizontal, ortogonal à lateral do CP, sobre as marcações;
8. Usar o paquímetro medir a largura do CP;
9. Calcular a metade da largura;
10. Usando o paquímetro, a lupa e a caneta, marcar o CP na parte de cima e de baixo;
11. Usando a lupa, a caneta e o esquadro, marcar uma linha entre as marcações;
12. Retirar uma porção de 10 cm de fita transparente e fixar somente um dos lados na parte de cima do CP;
13. Usar a pinça para pegar o SG e posicioná-lo sobre as linhas de marcação, usando a lupa e suas referências para alinhamento;
14. Dobrar a fita durex sobre o SG;

15. Verificar o alinhamento do SG com as linhas marcadas na superfície do CP;
16. Caso seja necessário, retirar a fita totalmente, reposicionando o SG sobre a linha marcada na superfície do CP;
17. Levantar a fita Durex o suficiente para expor a face inferior do SG;
18. Abrir a cola e despejar uma gota no meio do SG;
19. Espalhar a cola usando o bico do recipiente, rapidamente, visando deixar somente um filme fino da cola em toda a área do SG;
20. Refixar a fita Durex sobre o CP, fixando novamente o SG;
21. Exercer pressão sobre o SG recém fixado durante os primeiros 60 segundos;
22. Deixar algum peso sobre o SG durante mais um dia para uma cura completa.

APÊNDICE E – Softwares desenvolvidos durante esta tese

E.1 Cálculo de estatísticos para grandes lotes de dados

Este software foi desenvolvido em função da demanda de criar valores estatísticos para grandes lotes de dados. Cabe esclarecer que os dados produzidos durante ensaios mecânicos com baixa velocidade e alta taxa de leitura se acumulam em arquivos grandes demais para planilhas de cálculo e programas afins. Sendo assim, foi desenvolvido e registrado (**número BR 51 2016 000760 5**) um software para avaliação destes dados estatísticos, que foi denominado Lotmin 3.0.

Este *software* é capaz de entender diretamente o formato de dados produzidos pela máquina de ensaios universais Instron, e produz estatísticos básicos úteis para análise de ensaios mecânicos.

O software requer que o nome do arquivo seja informado em linha de comando, e produz resultados também diretamente para o dispositivo de saída padrão, sem possuir interface com usuário gráfica até o momento.

E.2 Importação e análise de ensaio

Este software importa os valores dos ensaios realizados na máquina de ensaios universais Instron, no formato RAW. São realizados os seguintes procedimentos:

- Permite escolher um dos ensaios que conste do arquivo;
- Permite listar um resumo de todos os ensaios existentes no arquivo;
- Permite isolar procedimentos monitorados pela caixa Vishay P3;
- Encontra a carga máxima de um ensaio;
- Identifica a região Linear do regime elástico;
- Calcula o módulo de Young do CP;
- Determina o compliance no final da parte linear do regime elástico;
- Lista somente uma leitura de cada segundo em sincronismo com a carga máxima;
- Permite estimar a deformação a partir do módulo de Young;
- Permite estimar a flecha através da geometria do CP;
- Calcula K_{Uc} e K_{Ic} estimado;
- Calcula K_{Ic} ;
- Calcula a correção de K_{Ic} pela curva-R;
- Produz uma planilha no formato Excel com todos os cálculos.

E.3 Análise do Regime elástico

Este programa permite avaliar o módulo de elasticidade apresentando um gráfico e permitindo mudar o tamanho e a posição da região de avaliação desta propriedade. São disponíveis as funcionalidades:

- Identifica uma região linear de tamanho mínimo para avaliação do módulo de elasticidade;
- Calcula o módulo de elasticidade de uma dada região considerada linear;
- Calcula o coeficiente de adequação (R2) da janela estimada como linear;
- Permite mover o posicionamento da região estimada como linear;
- Permite aumentar ou diminuir o tamanho da região linear;
- Permite focar e ampliar uma região do gráfico;
- Permite observar todo o gráfico tensão/deformação em outras regiões;

A Figura E.1 apresenta um exemplo de uso do *software* onde é estimada a região linear de um CP. ensaiado nesta pesquisa.

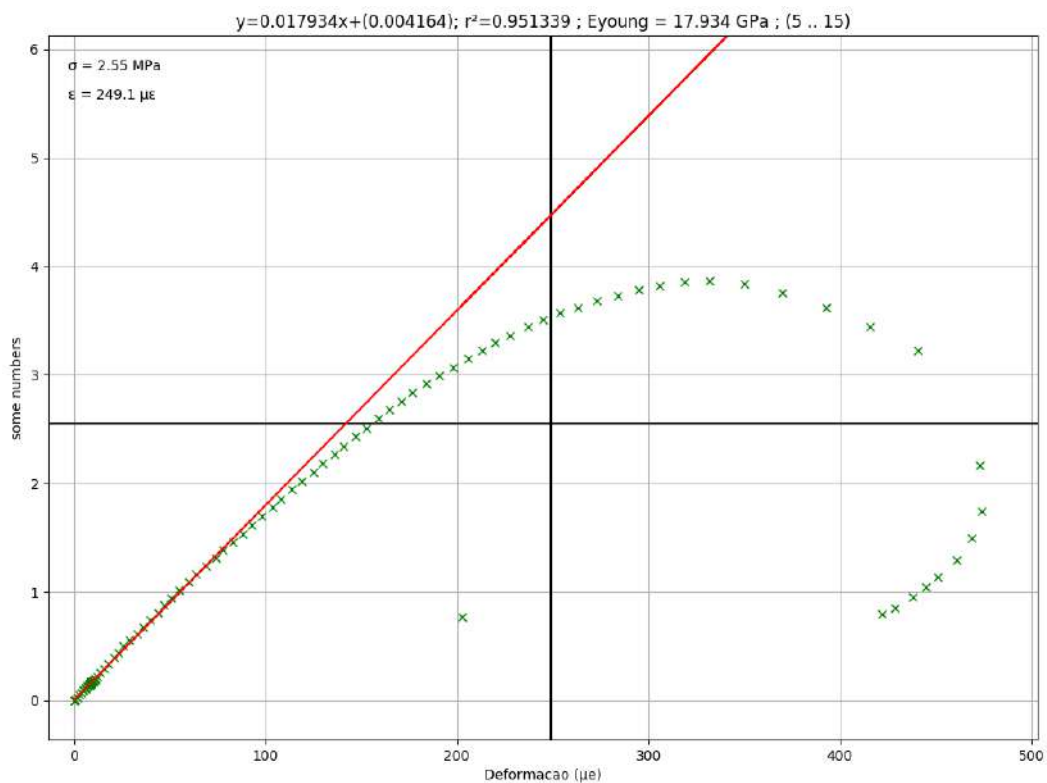


Figura E.1 – Interface do *software* utilizado para estimar a região linear do gráfico de Tensão vs Deformação do CP liso (sem entalhe) CP4668. Fonte: o autor.

Nesta Figura pode-se observar o cursor (no formato de cruz) ocupando toda a área do gráfico, posicionado no centro do gráfico e sua posição indicada no canto superior esquerdo, bem como acima do gráfico.

E.4 Compila grupos de planilhas

Este software permite ler outras planilhas geradas e produzir um planilha de resumos contendo análise de resumo das demais.

- São obtidas as propriedades do corpo de prova de cada planilha;
- São importados dados básicos como: carga de ruptura, deformação máxima, tensão de ruptura;
- Permite a criação de um gráfico único a partir dos vários CPs ensaiados;
- Permite aplicar correção polinomial aos dados de todo o grupo de CPs;

E.5 Mede raios no fundo do entalhe

Este *software* permite avaliar fotos dos CPs com o objetivo de fazer a medição do raio do entalhe. São disponíveis as seguintes funcionalidades:

- Rotacionar a imagem ;
- Ampliar a imagem ;
- Utilizar um cursor retangular ou circular;
- Mudar as dimensões do cursor;
- Calibrar as dimensões X e Y do cursor;
- Gravar uma imagem da foto com o cursor sinalizando as dimensões medidas;
- Salvar o estado da análise para retomar medições posteriormente.

A Figura E.2 apresenta uma foto onde um retículo de microscopia com resolução de 0,1 mm é utilizado para calibração do *software*.

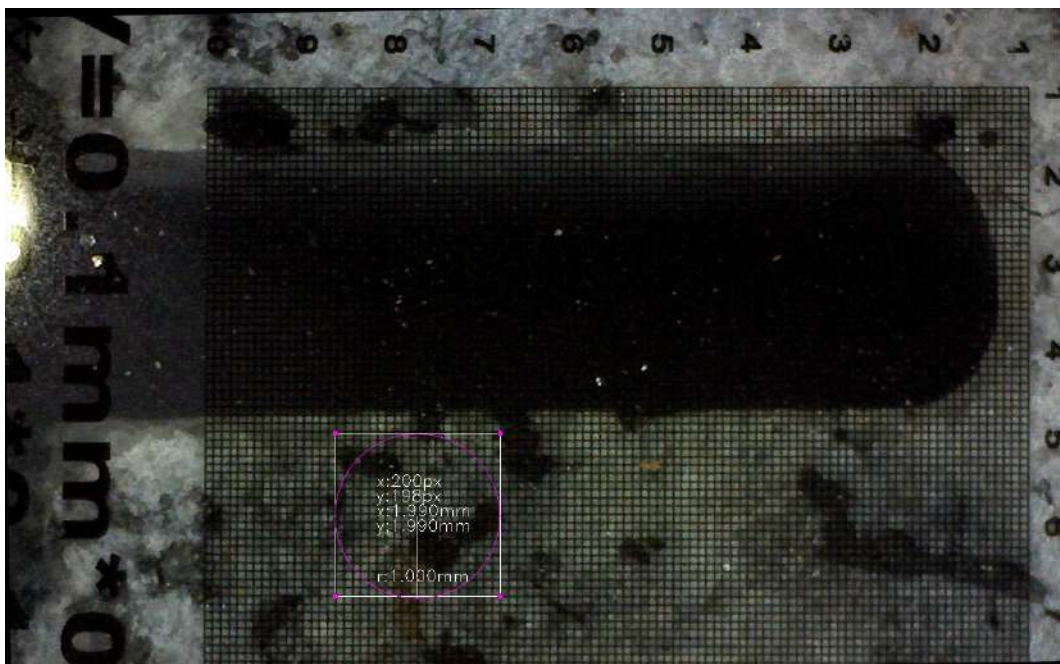


Figura E.2 – Foto do CP 201 da serra T 2,4 mm com o retículo de calibração. Fonte: o autor.

Nesta Figura aparecem os cursores retangular e circular e as medidas de suas dimensões.

Na Figura E.3 o *software* já calibrado, apresentando a medição do raio no fundo do entalhe do mesmo CP apresentado na Figura E.2.



Figura E.3 – Foto da medição do raio do CP 201 da serra T 2,4 mm. Fonte: o autor.

Na Figura E.3, o raio do CP foi estimado em 1,16 mm.

E.6 Rotinas para cálculo de $K_{t,gross}$

As Equações desenvolvidas por Atem de Carvalho (forthcoming 2018a) foram implementadas em código executável utilizando a linguagem Python, e são apresentadas no Quadro abaixo.

```

1  def interpolacao(self, z, zi, zf, ki, kf):
2      # (z - zi) / (zf - zi) = k - ki / (kf - ki)
3      # k = ( (z - zi) * (kf - ki) / (zf - zi) ) + ki
4      # Exemplo:
5      # 30 = ((3 - 1) * (50 - 10) / (5 - 1) ) + 10
6      #
7      k = ((z - zi) * (kf - ki) / (zf - zi) ) + ki
8      return k
9
10 def valor_ktg(self, params_ktg, i, rho, resist):
11     #
12     # Equação desenvolvida por Eduardo Atem de Carvalho (forthcoming, 2018)
13     #
14     ktg = params_ktg[i][1] + (params_ktg[i][2] / float(1 + ((rho/resist) / params_ktg[i][3] ) ** params_ktg[i][4] ) ) )
15     return ktg
16
17 def calcula_ktg_atem(rho, entalhe, altura):
18     #

```

```

19     # Equações desenvolvidas por Eduardo Atem de Carvalho (forthcomming, 2018)
20     #
21     params_ktg = []
22     params_ktg.append([(30/float(27)), 3.8078, 19.4105, 0.0032, 1.2446, 0.0028, 0.0333])
23     params_ktg.append([(30/float(24)), 4.2537, 38.2370, 0.0023, 1.0087, 0.0031, 0.0375])
24     params_ktg.append([(30/float(21)), 4.3596, 72.7996, 0.0013, 0.8453, 0.0036, 0.0429])
25     params_ktg.append([(30/float(18)), 5.7846, 92.4593, 0.0016, 0.8651, 0.0042, 0.0500])
26     params_ktg.append([(30/float(15)), 7.4606, 136.7875, 0.0016, 0.8374, 0.0050, 0.0600])
27     params_ktg.append([(30/float( 9)), 11.5285, 167.0494, 0.0025, 0.8898, 0.0062, 0.0750])
28     params_ktg.append([(30/float( 6)), 19.3960, 271.1861, 0.0030, 0.9011, 0.0081, 0.1000])
29
30     resist = altura - entalhe # d = H - a0
31     Hd_exato = altura / float(resist) # Hd = H / d
32     pd = rho / float(resist) # necessário para os critérios de validade
33
34     Hd_enc = -1 # default significa não encontrado
35     for i, p in enumerate(params_ktg):
36         if round(p[0],2) >= round(Hd_exato,2):
37             if pd >= params_ktg[i][5] and pd <= params_ktg[i][6]:
38                 Hd_enc = i
39                 break
40             else:
41                 # Razão de comprometimento encontrada, porém proporção do raio
42                 # fora do limite de validade para equações desenvolvidas
43                 return -1
44         else:
45             pass
46
47     if Hd_enc == -1:
48         # não foi possível calcular ktg pelas equações de Eduardo Atem
49         return 0.0
50     if Hd_enc > 0:
51         Hd_ant = params_ktg[i-1][0]
52         Hd_seg = params_ktg[i][0]
53         Ktg_ant = valor_ktg(params_ktg, i-1, rho, resist)
54         Ktg_seg = valor_ktg(params_ktg, i , rho, resist)
55         Kt_gross = interpolacao (Hd_exato, Hd_ant, Hd_seg, Ktg_ant, Ktg_seg)
56     else:
57         Kt_gross = valor_ktg(params_ktg, 0, rho, resist)
58     return Kt_gross

```

Anexos

ANEXO A – Dados de terceiros

A.1 Tabela de Chauvenet

Tabela A.1 – Tabela do Critério de Chauvenet (DALLY; RILEY, 2005)

Número de leituras, n	Razão entre o máximo desvio aceitável, e o desvio padrão d_{max}/σ
3	1.38
4	1.54
5	1.65
6	1.73
7	1.80
10	1.96
15	2.13
25	2.33
50	2.57
100	2.81
300	3.14
500	3.29
1000	3.48

ANEXO B – Algo - Chart Pilkey para cálculo de K_t do entalhe em U

Conforme descrito por Pilkey (2008), segue o gráfico e as equações para determinação dos valores de fator concentrador de tensão (K_t) (Figura B.1).

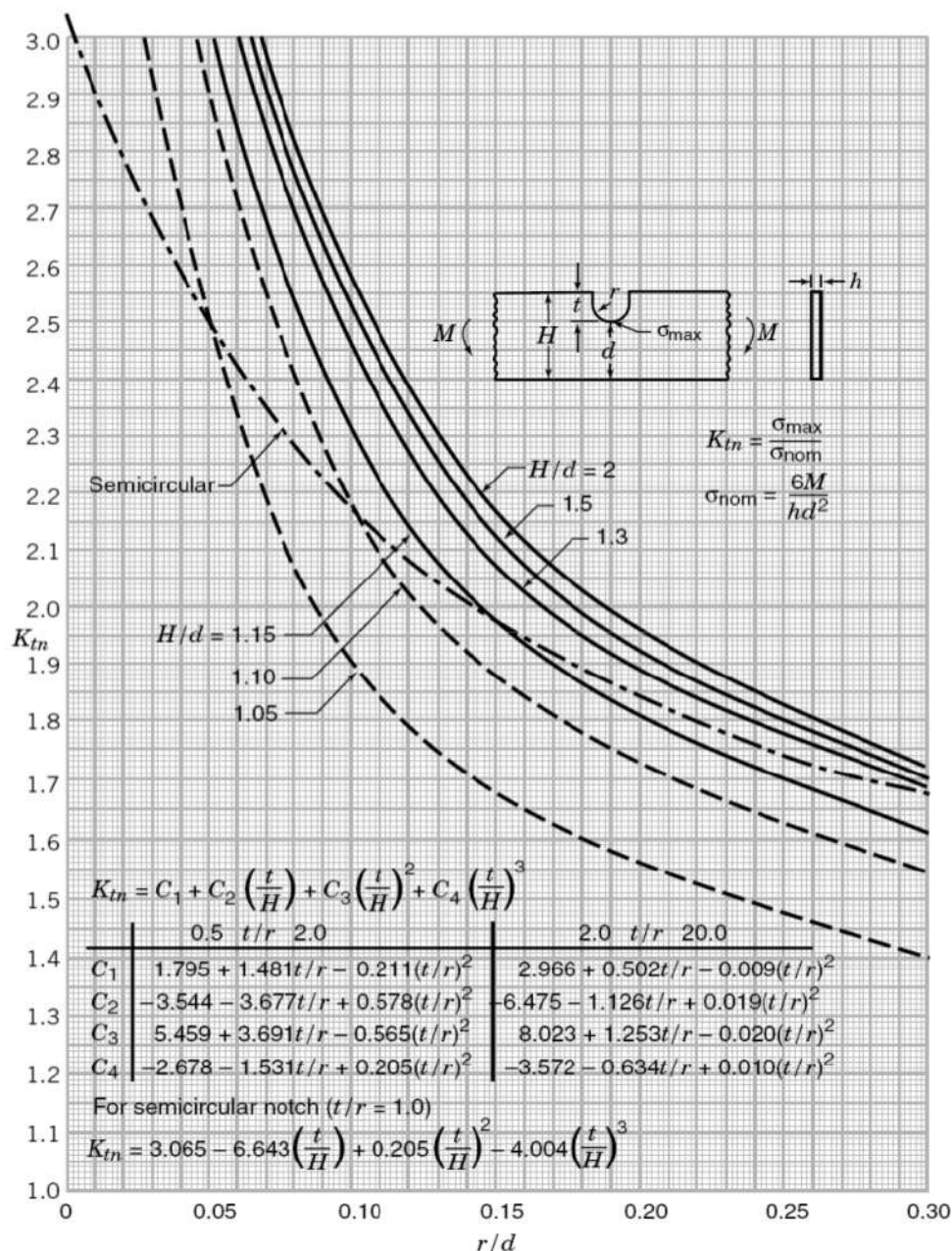


Figura B.1 – Chart para cálculo de K_t para uma barra retangular com entalhe em U submetida a flexão. Fonte: Pilkey (2008).

ANEXO C – Anexo C - Estimativa de tamanhos de lote por confiabilidade e C.V.

C.1 Tabelas utilizadas para a estimativa de tamanho de lote

A seguir são apresentadas Tabelas (C.1 e C.2) construídas por Friaes (2016) utilizadas na determinação de tamanho de lote para confiabilidades de 90 % e 95 % respectivamente.

Tabela C.1 – Tamanho do Lote por C.V. para a Confiabilidade de 90 %.

N	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
3	100	93	76	65	52	45	40	35
4	100	96	83	71	58	52	46	40
5	100	98	88	76	64	57	51	45
6	100	99	92	80	69	64	56	47
7	100	99	95	84	73	68	59	49
8	100	100	96	87	75	71	63	54
9	100	100	97	90	78	73	66	59
10	100	100	98	91	81	76	69	60
11	100	100	99	93	83	79	71	63
12	100	100	99	94	85	82	73	65
13	100	100	99	95	87	84	75	67
14	100	100	100	96	89	86	77	69
15	100	100	100	97	90	88	79	71
16	100	100	100	98	91	89	80	72
17	100	100	100	99	92	91	83	75
18	100	100	100	99	93	92	85	76
19	100	100	100	99	94	93	85	78
20	100	100	100	99	95	94	87	79
21	100	100	100	99	95	95	87	80
22	100	100	100	100	96	96	88	81
23	100	100	100	100	97	96	89	83
24	100	100	100	100	97	97	90	84
25	100	100	100	100	93	97	91	84

Pode-se observar que para obter 90 % ou mais de confiabilidade foi apresentado na cor verde, enquanto confiabilidade inferior foi apresentada em vermelho. Experimentos com coeficiente de variação de até 30 % podem facilmente ser representados por tamanhos de lote de até 17 peças. Para este nível de confiança, somente em fenômenos com um c.v. de 35 % foi necessário um lote de 24 amostras.

Tabela C.2 – Tamanho do Lote por C.V. para a Confiabilidade de 95 %.

N	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
3	92	63	44	37	27	24	20	18
4	95	69	51	42	31	27	24	21
5	98	74	57	47	34	31	27	23
6	99	79	63	50	38	35	29	24
7	100	82	68	53	41	38	34	27
8	100	86	72	55	44	40	36	27
9	100	88	74	59	47	44	36	29
10	100	91	77	62	49	46	37	33
11	100	92	80	66	51	49	39	33
12	100	94	82	68	54	51	41	35
13	100	95	84	70	55	53	42	37
14	100	96	85	72	56	55	44	39
15	100	97	87	75	58	58	45	40
16	100	97	89	76	61	58	47	42
17	100	98	91	77	63	59	48	43
18	100	99	92	78	64	62	49	44
19	100	99	93	80	65	64	50	47
20	100	99	94	81	67	66	51	48
21	100	99	95	82	69	67	54	49
22	100	99	96	84	70	68	55	50
23	100	100	96	85	70	70	57	51
24	100	100	97	86	72	72	58	52
25	100	100	97	88	73	72	59	54

Pode-se observar que para obter 95% ou mais de confiabilidade, experimentos com coeficiente de variação de até 10% podem facilmente ser representados por tamanhos de lote de até 13 peças. Para este nível de confiança entretanto, com um c.v. igual à 15% foi necessário um lote de 21 amostras.