



Luciana Martins Esteves

**Levantamento da Curva-R de um Aço de Alta
Ductilidade de Geometria SE(B) com Base no
Método *Compliance*.**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marcos Venicius S. Pereira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelo dom da vida, por sua fidelidade, amor e por preparar para mim um caminho de possibilidades, as quais por mim mesma nunca poderia alcançar.

Agradeço à minha mãe, Regina, por me dar à vida, por todo o apoio durante todo este tempo e por não medir esforços para que eu conseguisse concluir a minha graduação.

Um agradecimento especial ao meu pai já falecido Lucio, que me apoiou durante toda a sua vida, me ensinou sobre a importância dos estudos e me mostrou o que é ser um pai de verdade. Gostaria muito de tê-lo ao meu lado neste momento para compartilhar esta vitória, mas sei que onde quer que esteja está muito feliz com o meu sucesso.

Ao meu orientador Marcos Venicius Soares Pereira, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pelo conhecimento compartilhado comigo e por toda disponibilidade e paciência.

Aos meus amigos de curso, Felipe Marques, Louise Ramos, Marcelo Rodrigues e Juliana Leão que me incentivaram e vivenciaram comigo a dificuldades associadas à Faculdade de Engenharia Mecânica. Graças a vocês o caminho até aqui se tornou um pouco mais leve.

Aos funcionários e a todos que contribuem com o FESP, pois sem o mesmo, não seria possível a minha permanência na universidade.

Por último mas não menos importante, gostaria de agradecer a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio pela disposição em compartilhar o conhecimento. Foi uma honra ter tido a oportunidade de aprender com profissionais tão brilhantes.

RESUMO

O estudo da resistência à fratura dos materiais é de grande importância para desenvolvimentos de projetos, seleção de materiais e avaliação do comportamento de materiais estruturais na presença de defeitos. Há inúmeras normas que padronizam corpos de prova para a determinação desta propriedade, mas com geometrias diferentes daquelas encontradas em dutos, geralmente estruturas de paredes finas e elevada pressão interna. Neste trabalho foi estudada a resistência à propagação de trinca de um aço estrutural de alta ductilidade, adotando-se um único corpo de prova de geometria SE(B), desenvolvida para dutos, no levantamento da curva-R com base no método *compliance*, que se caracteriza por submeter o corpo de prova a rampas de carregamento monotônico.

Palavras-Chave: resistência à fratura; integral J; crescimento de trinca; aço estrutural; ASTM E1820-17

ABSTRACT

The study of the fracture resistance of materials is of great importance for the development of projects, selection of materials and evaluation of the behavior of structural materials in the presence of defects. Numerous standards propose test specimens for the determination of this property, but with geometries different from those found in ducts, usually thin-walled structures and high internal pressure. In this work, the resistance to crack propagation of a high ductility structural steel was studied, adopting a single SE(B) specimen, developed for ducts, making use of R-curve based on the *compliance* method, which is characterized by subjecting the specimen to monotonic loading ramps.

Keywords: fracture resistance; J integral; crack growth; structural steel; ASTM E1820-17

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 2 |
| 2.1. Aços | 2 |
| 2.1.1. Classificação dos Aços | 2 |
| 2.2. Fundamentos da Mecânica da Fratura | 3 |
| 2.2.1. Ductilidade | 4 |
| 2.2.2. Tenacidade à Fratura | 4 |
| 2.2.3. Tipos de Falhas | 4 |
| 2.2.3.1. Deflexão excessiva | 4 |
| 2.2.3.2. Escoamento | 5 |
| 2.2.3.3. Flambagem | 5 |
| 2.2.3.4. Fluência | 6 |
| 2.2.3.5. Desgaste | 6 |
| 2.2.3.6. Fratura | 6 |
| 2.2.3.7. Fadiga | 7 |
| 2.2.4. Mecânica da Fratura Linear-Elástica | 7 |
| 2.2.4.1. Balanço de Energia de Griffith | 10 |
| 2.2.4.2. Taxa de Liberação de Energia | 11 |
| 2.2.4.3. Fator de Intensidade de Tensões | 12 |
| 2.2.5. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) | 15 |
| 2.2.5.1. Integral J | 15 |
| 2.2.5.2. A Curva R | 19 |
| 3. Procedimento Experimental | 22 |
| 3.1. Materiais | 22 |
| 3.2. Ensaio de Tração | 22 |
| 3.3 Ensaio de Tenacidade à Fratura | 25 |
| 3.3.1. Pré-trinca de fadiga | 25 |
| 3.3.2. O Método <i>Compliance</i> | 28 |
| 4. Resultados | 35 |

| | |
|--|----|
| 4.1. Ensaio de Tração | 35 |
| 4.2. Ensaio de Tenacidade à Fratura | 36 |
| 4.2.1. Cálculos para obtenção de J e levantamento da curva R | 36 |
| 4.2.2. Cálculo de J e levantamento da curva R | 43 |
| 4.3. Fractografia | 47 |
| 5. Conclusão | 53 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Viga deformada de vidro ao excesso de carga [6] | 5 |
| Figura 2 - Flambagem em pilar de sustentação [7] | 6 |
| Figura 3 - Concentração de Tensão em Torno de um Furo circular [8]. | 8 |
| Figura 4 - Placa com trinca em forma de elipse, sujeita a tensões de tração uniformes [10]. | 9 |
| Figura 5 - Variação da energia com o comprimento da trinca (c_c é o comprimento crítico do entalhe) [8]. | 11 |
| Figura 6 - Modos fundamentais de deformação [4]. | 13 |
| Figura 7 - Distribuição de tensões na vizinhança da ponta de uma trinca [4]. | 14 |
| Figura 8 - Curva σ versus ϵ elastoplástica [4]. | 16 |
| Figura 9 - Caminho de integração para o cálculo da integral J ao redor da ponta da trinca [15]. | 17 |
| Figura 10 - Esquema de crescimento de trinca controlado por J [16]. | 18 |
| Figura 11 - Esquema da curva de resistência em termos de J, mostrando os diferentes estágios do crescimento da trinca [4]. | 19 |
| Figura 12 - Corpo de prova SE(B) (a); Corpo de prova CT(T) (b); Corpo de prova DC(T) (c) [20]. | 21 |
| Figura 13 - Corpo de prova utilizado no ensaio de tração: representação esquemática cujas dimensões podem ser observadas na tabela 3 (a); corpo de prova (b). ... | 23 |
| Figura 14 - Máquina Instron 5500 (a); CP posicionado para o ensaio de tração (b); Controle da sequência do teste pelo computador (c); CP após fratura (d). | 24 |
| Figura 15 - Dimensão do entalhe [23]. | 26 |
| Figura 16 - CP posicionado na máquina Instron para ensaio da abertura da pré-trinca. | 26 |
| Figura 17 - Pré-trinca de fadiga. | 28 |
| Figura 18 - Registro carga (P) x deslocamento (V) com as linhas de descarregamento elástico do método <i>compliance</i> (C_i), para monitoramento do crescimento de trinca [21]. | 29 |
| Figura 19 - CP posicionado na máquina Instron para ensaio de tenacidade (a); Controle do ensaio (b); Extensômetro (clip gage) utilizado para medida do CMOD do CP | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 - Gráfico carga versus CMOD após utilização da técnica do <i>compliance</i> . | 32 |
| Figura 21 - CP após o ensaio de tenacidade..... | 32 |
| Figura 22 - Forno para aquecer e oxidar a parte fraturada do CP | 33 |
| Figura 23 - CP submerso no nitrogênio líquido (a); máquina usada para quebrar o CP após o nitrogênio líquido (b); Secagem do CP (c); CP pronto para análise de propagação de trinca e fractografia a ser realizado no MEV(d). | 34 |
| Figura 24 - Curva tensão versus deformação do material..... | 35 |
| Figura 25 - Curva R teórica [20]. | 40 |
| Figura 26 - Determinação das linhas de construção para qualificação dos dados [20]. | 41 |
| Figura 27 - Definição da região de qualificação dos dados [20]. | 42 |
| Figura 28 - Curva R experimental..... | 47 |
| Figura 29 - Regiões do CP com as superfícies de fratura. | 48 |
| Figura 30 - Análise fractográfica da região (1) da figura 29. Aumento de 1000x..... | 48 |
| Figura 31 - Análise fractográfica da região (2) da figura 29. Aumento de 1000x..... | 49 |
| Figura 32 - Análise fractográfica da região (3) da figura 29. Aumento de 1000x..... | 50 |
| Figura 33 - Análise fractográfica da região (4) da figura 29. Aumento de 1000x..... | 50 |
| Figura 34 - Representação da região de medições de propagação de trinca [24]. .. | 51 |
| Figura 35 - Medições da propagação de trinca. | 52 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Denominação e teor (% em peso) dos elementos de liga dos principais aços AISI [3]..... | 3 |
| Tabela 2 - Elementos químicos presentes no material. | 22 |
| Tabela 3 - Dimensões do CP antes do ensaio de tração..... | 23 |
| Tabela 4 - Dimensões do CP após ensaio de tração..... | 25 |
| Tabela 5 - Dados para abertura da pré-trinca..... | 27 |
| Tabela 6 - Rampas de carregamentos/descarregamentos..... | 30 |
| Tabela 7 - Propriedades mecânicas do material..... | 36 |
| Tabela 8 - Valores da carga e CMOD obtidos no ensaio de tenacidade pela técnica do compliance..... | 43 |
| Tabela 9 - Valores de CMOD..... | 43 |
| Tabela 10 - Valores de u , a_i/W e a_i | 44 |
| Tabela 11 - Valores de b_i , C_i , $V_{pl}(i)$ e $A_{pl}(i)$ | 44 |
| Tabela 12 - Valores de $f(a_i/W)$, K_i e J_{ell} | 45 |
| Tabela 13 - Valores de J_{pl} | 45 |
| Tabela 14 - Valores de J_i e Δa_i | 46 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------|---|
| ASTM | <i>American Society Testing and Materials</i> |
| BS | <i>British Standard</i> |
| C(T) | Corpo de Prova Compacto com aplicação de carga trativa para ensaio de tenacidade à fratura |
| SE(B) | Corpo de Prova de Flexão em Três Pontos para ensaio de tenacidade à fratura |
| SE(T) | <i>Single Edge-Notched Tension</i> – Corpo de Prova de Tração para ensaio de tenacidade à fratura |
| D(T) | Corpo de Prova Compacto de geometria circular para ensaio de tenacidade à fratura sob carga de tração |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| MFLE | Mecânica da Fratura Linear-Elástica |
| MFEP | Mecânica da Fratura Elasto-Plástica |
| CMOD | <i>Crack Mouth Opening Displacement</i> – Deslocamento da Abertura da Boca da Trinca |
| CTOD | <i>Crack-Tip Opening Displacement</i> – Deslocamento da Abertura da Ponta da Trinca |
| LLD | <i>Load-Line Displacement</i> – Deslocamento da Linha de Carga |
| LE | Limite de Escoamento |
| LRM | Limite de Resistência Mecânica |
| PA | Porcentagem de Alongamento |
| PRA | Porcentagem de Redução de Área |
| CP | Corpo de prova |
| HRR | Hutchinson, Rice e Rosengren |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|---|
| J | Integral J |
| K_t | Fator do concentrador de tensão |
| K | Intensificador de Tensão |
| ρ | Raio da raiz do entalhe |
| σ_x | Tensão na Direção x No Campo de Tensões ao Redor da Ponta da Trinca |
| σ_y | Tensão na Direção y No Campo de Tensões ao Redor da Ponta da Trinca |
| S | Distância entre os apoios |
| E | Módulo de Elasticidade do Material |
| Γ | Caminho Arbitrário em Torno da Ponta da Trinca |
| w | Densidade de Energia de Deformação |
| ds | Incremento de Comprimento ao Longo do Contorno Γ |
| dy | Componente de ds na Direção y |
| T_i | Componentes do Vetor de Tração |
| u_i | Componentes do Vetor de Deslocamento |
| σ_{ij} | Tensor de Tensão |
| ε_{ij} | Tensor de Deformação |
| I_n | Constante de Integração que Depende do Expoente de Encruamento |
| σ | Tensão Verdadeira |
| ε | Deformação Verdadeira |
| σ_0 | Tensão de Referência |
| ε_0 | Deformação de Referência |
| α | Constante Adimensional da Equação de Ramberg-Osgood |
| n | Coeficiente de Encruamento |
| r | Distância da Ponta da Trinca |
| θ | Ângulo em Relação ao Plano de Propagação da Trinca |
| Δa | Incremento da Trinca |
| b | Ligamento Remanescente a Frente da Ponta da Trinca |
| B | Espessura do Corpo de Prova |

| | |
|-------------------|---|
| W | Largura do Corpo de Prova |
| a | Dimensão do Entalhe Usinado |
| a_0 | Dimensão Inicial da Trinca |
| b_0 | Ligamento Remanescente Inicial à Frente da Ponta da Trinca |
| M^* | Dimensão da Pré-Trinca de Fadiga |
| B_N | Espessura Líquida do Corpo de Prova na Raiz do <i>Side-Groove</i> |
| B_e | Espessura Efetiva |
| P_m | Carga Cíclica Inicial Máxima |
| P_{min} | Carga Cíclica Final Máxima |
| R | Razão entre P_{min} e P_m |
| σ_y | Média entre σ_{LE} e σ_{LRM} |
| σ_{LE} | Tensão Limite de Escoamento |
| σ_{LRM} | Tensão Limite de Resistência Mecânica |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| L_f | Comprimento Final |
| L_0 | Comprimento Inicial |
| A_f | Área Final da Seção do Corpo de Prova de Tração |
| A_0 | Área Inicial da Seção do Corpo de Prova de Tração |
| η e γ | Fatores Geométricos Plásticos Dependentes de a/W |
| J_{pl} | Componente Plástica da Integral-J |
| J_{el} | Componente Elástica da Integral J |
| LLD | Deslocamento da Linha de Carga |
| CMOD | Deslocamento da Abertura da Boca da Trinca |
| Δa_{max} | Máxima Extensão de Trinca |
| C_i | <i>Compliance</i> Experimental Corrigido no Tamanho de Trinca a_i |
| $A_{pl(i)}$ | Área Plástica no Ponto Incremental i |
| P_i | Carga Aplicada Máxima no Ponto Incremental i |
| $v_{pl(i)}$ | Parte Plástica do Deslocamento da Boca da Trinca |
| θ | Coordenada Polar |
| u | <i>Compliance</i> Normalizado |
| $K_{(i)}$ | Fator de Intensidade de Tensão no Incremento |

1. Introdução

O estudo da resistência dos materiais como o aço, por exemplo, é de extrema importância para os engenheiros, pois são largamente utilizados na indústria na fabricação de diversos componentes mecânicos.

O aço é uma liga de ferro-carbono, além de elementos residuais [1]. O conhecimento de suas ligas, microestrutura, tratamentos térmicos e termoquímicos são relevantes para que se possa desenvolver materiais de melhor qualidade e com diferentes propriedades que atentam a demanda do mercado.

As propriedades e comportamento mecânico dos materiais são determinados a partir de ensaios, onde o corpo de prova é submetido a esforços externos, gerando respostas diferentes para cada tipo de esforço aplicado. A normalização dos ensaios mecânicos é utilizada para que haja uma padronização entre fornecedores e usuários dos materiais [2].

Um exame fractográfico do material é realizado após a sua fratura total. Trata-se da utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) que serve para auxiliar na investigação da causa de falhas mecânicas e também para comparar a previsão teórica da falha com a falha real.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Aços

O aço é uma liga constituída principalmente de ferro-carbono, mas outros elementos podem compor esta liga. Existem dois tipos de aço: os aços-carbono e os aços-liga.

Aço-carbono: possui entre 0,008 e 2,11% de carbono e elementos residuais. A quantidade de carbono, define a característica do aço.

Baixo carbono: possui baixa resistência e dureza, porém alta tenacidade e ductilidade.

Médio carbono: Possui maior resistência e dureza, porém menor tenacidade e ductilidade do que o aço de baixo carbono.

Alto carbono: é o de maior resistência e dureza, porém apresentam menor ductilidade entre os aços-carbono.

Aço-liga: também chamado de aços especial, é uma liga ferro-carbono com elementos de adição como níquel, cromo silício, entre outros, cujo objetivo é mudar as características do material de acordo com o que se deseja.

2.1.1. Classificação dos Aços

A nomenclatura utilizada é a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que é baseada nas classificações normativas americanas AISI (American Iron and Steel Institute) e SAE (Society of Automotive Engineers) que consideram a composição química dos aços. A nomenclatura utiliza 4 ou 5 (yyxx) números da seguinte maneira:

yy: são os elementos de liga

xx: é o teor de carbono em peso

| Aços Carbono: <ul style="list-style-type: none"> • 10xx: se aplica aos aços com 0.xx%C mais Mn < 1.0% + Si e Cu < 0.6% + P < 0.04% + S < 0.05% + elementos residuais não controlados • 11xx: como os 10xx + 0.08-0.35S, para ter melhor usinabilidade • 12xx: como os 10xx + 0.10-0.35S + 0.07-0.12P | Aços Si: 92xx: 1.80-2.20Si | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------------|-------------|----|----|----------------|-----------|-------------|-------------|----------------|-----------|-------------|-------------|----------------|-----------|-------------|-------------|----------------|-----------|-------------|-------------|----------------|-----------|-------------|-------------|----------------|-----------|-------------|-------------|
| Aços Mn: <ul style="list-style-type: none"> • 13xx: 1.60-1.90Mn • 15xx: 1.00-1.60Mn | Aços Ni-Cr: <ul style="list-style-type: none"> • 31xx: 1.10-1.40Ni + 0.55-0.75Cr • 33xx: 3.25-3.75Ni + 1.40-1.75Cr | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aços Ni: <ul style="list-style-type: none"> • 23xx: 3.25-3.75Ni • 25xx: 4.75-5.25Ni | Aços Ni-Mo: <ul style="list-style-type: none"> • 46xx: 1.65-2.00Ni + 0.20-0.30Mo • 48xx: 3.25-3.75Ni + 0.20-0.30Mo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aços Mo: <ul style="list-style-type: none"> • 40xx: 0.15-0.30Mo • 44xx: 0.35-0.45Mo • 45xx: 0.45-0.60Mo | Aços Cr-Mo: <ul style="list-style-type: none"> • 41xx: 0.80-1.10Cr + 0.15-0.25Mo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aços Cr: <ul style="list-style-type: none"> • 50xx: 0.30-0.60Cr • 51xx: 0.70-1.15Cr • 501xx: 0.40-0.60Cr • 511xx: 0.90-1.15Cr • 521xx: 1.30-1.60Cr | Aços Cr-V: <ul style="list-style-type: none"> • 61xx: 0.70-1.10Cr + 0.10-0.15V | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Aços Ni-Cr-Mo: <table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Mo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>• 43xx:</td> <td>1.65-2.00</td> <td>+ 0.70-0.90</td> <td>+ 0.20-0.30</td> </tr> <tr> <td>• 47xx:</td> <td>0.90-1.20</td> <td>+ 0.35-0.55</td> <td>+ 0.30-0.40</td> </tr> <tr> <td>• 86xx:</td> <td>0.40-0.70</td> <td>+ 0.40-0.60</td> <td>+ 0.15-0.25</td> </tr> <tr> <td>• 87xx:</td> <td>0.40-0.70</td> <td>+ 0.40-0.60</td> <td>+ 0.20-0.30</td> </tr> <tr> <td>• 93xx:</td> <td>3.00-3.50</td> <td>+ 1.00-1.40</td> <td>+ 0.08-0.15</td> </tr> <tr> <td>• 98xx:</td> <td>0.85-1.15</td> <td>+ 0.70-0.90</td> <td>+ 0.20-0.30</td> </tr> </tbody> </table> | | Ni | Cr | Mo | • 43xx: | 1.65-2.00 | + 0.70-0.90 | + 0.20-0.30 | • 47xx: | 0.90-1.20 | + 0.35-0.55 | + 0.30-0.40 | • 86xx: | 0.40-0.70 | + 0.40-0.60 | + 0.15-0.25 | • 87xx: | 0.40-0.70 | + 0.40-0.60 | + 0.20-0.30 | • 93xx: | 3.00-3.50 | + 1.00-1.40 | + 0.08-0.15 | • 98xx: | 0.85-1.15 | + 0.70-0.90 | + 0.20-0.30 |
| | Ni | Cr | Mo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| • 43xx: | 1.65-2.00 | + 0.70-0.90 | + 0.20-0.30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| • 47xx: | 0.90-1.20 | + 0.35-0.55 | + 0.30-0.40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| • 86xx: | 0.40-0.70 | + 0.40-0.60 | + 0.15-0.25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| • 87xx: | 0.40-0.70 | + 0.40-0.60 | + 0.20-0.30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| • 93xx: | 3.00-3.50 | + 1.00-1.40 | + 0.08-0.15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| • 98xx: | 0.85-1.15 | + 0.70-0.90 | + 0.20-0.30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Letras adicionais: <ul style="list-style-type: none"> • yyBxx: adição de B • yyLxx: adição de Pb • yy(1)xxH: propriedades garantidas • Eyy(1)xx: fabricados em forno elétrico. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabela 1 - Denominação e teor (% em peso) dos elementos de liga dos principais aços AISI [3].

Por exemplo:

Classe 1023: aço-carbono com 0,23% de carbono [3].

2.2. Fundamentos da Mecânica da Fratura

A Mecânica da Fratura é o estudo de processos que levam à propagação de trincas e/ou defeitos no material por descuido do projeto, construção, operação incorreta da estrutura ou pela escolha incorreta de material e geometria que favoreça algum tipo de dano à peça, além do histórico de tensões e deformações aplicados. Os estudos sobre Mecânica da Fratura começaram ainda na época da Segunda Guerra Mundial, quando vários acidentes catastróficos devido às falhas em estruturas ocorreram no EUA e na Europa. Segundo um estudo econômico feito em 1978, os EUA tiveram um prejuízo de bilhões de dólares devido à falhas mecânicas [4].

Pesquisadores como Griffith e Irwin, desenvolveram estudos importantes na área de mecânica da fratura e foram uns dos responsáveis pelos grandes avanços tecnológicos e de prevenção de falhas que temos nos dias de hoje.

2.2.1. Ductilidade

A ductilidade representa uma medida do grau de deformação plástica que o material suporta antes de ocorrer a fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma deformação plástica antes de sofrer a ruptura é chamado de frágil. Por outro lado, o material que apresenta uma considerável deformação plástica antes da ruptura é chamado de dúctil. Materiais de engenharia podem fraturar de forma frágil ou dúctil, dependendo de sua capacidade de tolerar deformação plástica [5].

2.2.2. Tenacidade à Fratura

Tenacidade é definida como a capacidade de um material absorver energia até a ruptura. A tenacidade cresce com a área total sob a curva de tensão x deformação, a qual é uma indicação da quantidade de trabalho por unidade de volume que pode ser realizado no material sem causar a fratura.

Na mecânica da fratura, a tenacidade à ruptura é definida como sendo a capacidade do material resistir à propagação de uma trinca [5].

2.2.3. Tipos de Falhas

Segundo Castro e Meggiolaro [3], a perda da capacidade operação total ou parcial de um equipamento denomina-se falha e os processos que contribuem para a falha, denominam-se mecanismos de dano.

- *Principais mecanismos de dano:*

2.2.3.1. Deflexão excessiva

Ocorre quando a rigidez da estrutura não é capaz de suportar às cargas ou sobrecargas elásticas, plásticas ou de fluência que podem alterar a forma da estrutura.



Figura 1 - Viga deformada de vidro ao excesso de carga [6]

2.2.3.2. escoamento

Quando a resistência elástica do material é atingida e ele passa a se deformar plasticamente, dizemos que houve escoamento. O escoamento local, da raiz do entalhe, por exemplo, não é uma falha grave. Entretanto, o escoamento global de toda seção resistente, pode levar ao colapso plástico de toda estrutura.

2.2.3.3. Flambagem

Tensões compressivas aliadas à instabilidade estrutural, podem causar flambagem, que em geral ocorre em estruturas onde o diâmetro transversal é muito menor que o comprimento.



Figura 2 - Flambagem em pilar de sustentação [7]

2.2.3.4. Fluência

É um mecanismo de falha que causa variação contínua de deformação plástica quando a estrutura é submetida por um longo período de tempo à carga constante, podendo leva-la à fratura. Ocorre principalmente devido à temperatura elevada. Entre os equipamentos que estão sujeitos a falha por fluência estão as turbinas e as caldeiras.

2.2.3.5. Desgaste

O desgaste é a perda de material superficial que ocorre com o tempo, causado pelo rolamento ou deslizamento entre superfícies. Existem desgastes abrasivos, adesivos, erosivos e desgaste por fadiga superficial. O desgaste pode ser minimizado com a utilização de superfícies mais duras, cargas adequadas e boa lubrificação.

2.2.3.6. Fratura

A fratura pode ocorrer no âmbito microscópico e macroscópico. Fendas, fissuras e outros tipos de defeitos, diminuem a resistência do material e provocam a

fratura do mesmo. Microscopicamente, clivagem e a geração e coalescência de microporos estão associadas à fratura dúctil. Macroscopicamente, a fratura ocorre por propagação brusca de trincas nas estruturas frágeis ou esgotamento da ductilidade nas tenazes.

2.2.3.7. Fadiga

A fadiga é provocada após a aplicação de um determinado número de cargas variáveis na peça, provocando a geração e/ou propagação de uma trinca até o eventual colapso da estrutura.

Procedimentos como a análise de tensões e a fractografia, são essenciais para a investigação de falhas e mecanismos de danos.

Neste trabalho serão vistos dois tipos de mecanismos de fratura, decorrentes dos ensaios mecânicos feitos em laboratório e que serão descritos em breve.

2.2.4. Mecânica da Fratura Linear-Elástica

As trincas são entalhes afiados usualmente encontradas em estruturas, que podem ser geradas durante a fabricação do material ou na montagem da peça. A primeira solução analítica envolvendo concentração de tensões foi analisada por Kirsh (1898) que calculou as tensões tangenciais em torno de um furo circular [3].

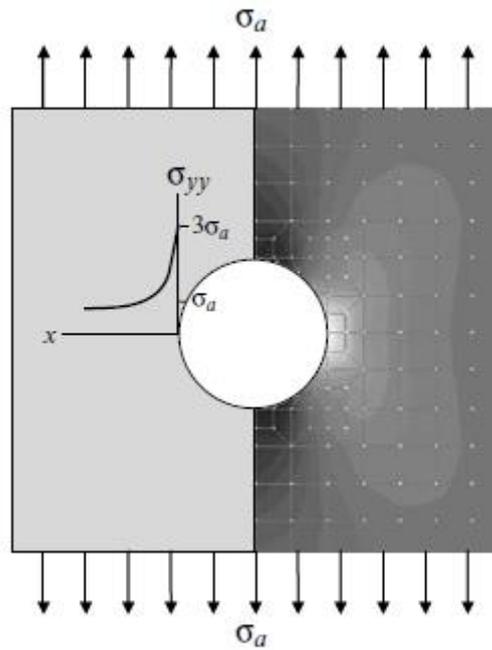


Figura 3 - Concentração de Tensão em Torno de um Furo circular [8].

Segundo Castro e Meggiolaro [3] um furo circular em uma placa plana infinita não altera a tensão global, porém aumenta a tensão máxima local na borda do furo em três vezes a tensão nominal.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} = 3 \quad (2.1)$$

onde σ_{max} é a tensão máxima na extremidade do eixo maior da elipse.

De acordo com Fisher-Cripps [8], em 1913, Inglis através de seus estudos, comprovou que um furo elíptico em uma placa infinita tracionada por tensões normais (σ_n) gera uma fator de concentração de tensão dado por:

$$K_t = 1 + \frac{2a}{b} = 1 + \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.2)$$

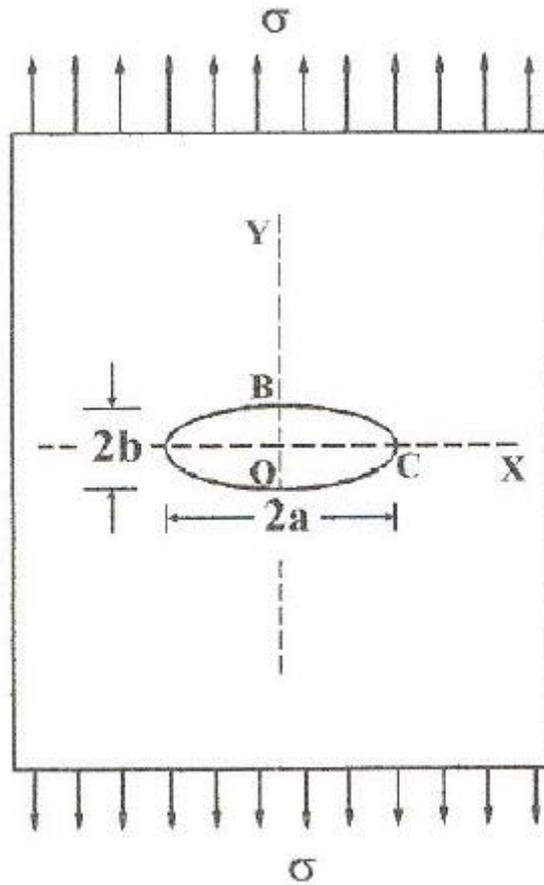


Figura 4 - Placa com trinca em forma de elipse, sujeita a tensões de tração uniformes [10].

A tensão no ponto C é dada por:

$$\sigma_c = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (2.3)$$

Inglis mostrou que se uma peça possui cantos, entalhes ou fissuras afiados, nestes locais haverá uma concentração de tensão K_t . Ele provou também, através da teoria da elasticidade, que o fator de concentração cresce à medida que o raio ρ da ponta do entalhe diminui, conforme à equação (2.2).

2.2.4.1. Balanço de Energia de Griffith

Em 1920, Griffith realizou experimentos em materiais idealmente frágeis baseado em um conceito de balanço energético, onde verificou que se a variação da energia liberada for maior do que a energia necessária para formar novas superfícies de trinca, ocorrerá o crescimento instável da fratura.

Griffith determinou a perda da energia de deformação, em função do tamanho da fratura de uma placa carregada sob tensão constante, a partir da solução de Inglis, obtendo para o estado plano de tensões [9]:

$$U_S = \frac{\pi c^2 \sigma^2}{2E} \quad (1.4)$$

A energia de superfície foi dada como:

$$U_\gamma = 2(2c\gamma) \quad (2.5)$$

onde γ é a energia específica de superfície livre, considerada como uma propriedade do material.

Assim o balanço energético será:

$$U_T = U_S + U_\gamma = U_0 - \frac{\pi c^2 \sigma^2}{2E} + 4c\gamma \quad (2.6)$$

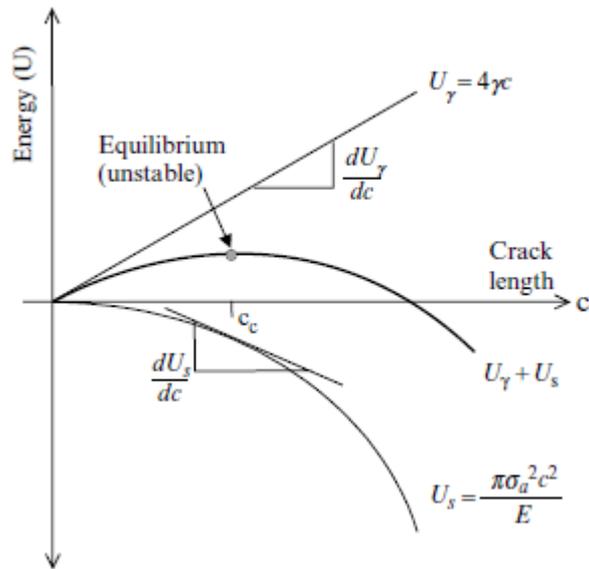


Figura 5 - Variação da energia com o comprimento da trinca (c_c é o comprimento crítico do entalhe) [8].

A segunda derivada da equação (2.6), diz que se:

- $\frac{d^2 U_S}{dc^2} < 0$: a propagação da trinca é instável.
- $\frac{d^2 U_S}{dc^2} > 0$: a propagação da trinca é estável.

Através do critério de equilíbrio energético é necessário mas não é suficiente para saber se ocorrerá o crescimento da entalhe. O crescimento da entalhe só ocorre se a tensão na ponta da trinca for suficiente para quebrar as ligações neste ponto [8].

2.2.4.2. Taxa de Liberação de Energia

A Teoria de Griffith, não funciona para metais dúcteis, onde a energia de fratura é maior que a energia de superfície. Pensando nisso, Irwin (1956) propôs que a equação de Griffith fosse modificada para incluir a energia de deformação plástica no processo de fratura. Irwin analisou a taxa de liberação de energia potencial

armazenada por unidade de área de trinca (G), que é obtida através da derivada do potencial total:

$$G = - \frac{dE_p}{dA} \quad (2.7)$$

Para uma plana infinita com um furo central em forma de elipse, como a utilizada por Inglis e Griffith, a taxa de liberação é dada por:

$$G = - \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (2.8)$$

O processo de análise através do critério de energia liberada, fica muito mais fácil: determina-se G de um corpo fraturado (função da rigidez e geometria do corpo, das tensões aplicadas e do tamanho da fratura) e compara-se com o G_c do material constituinte. Se $G > G_c$, a fratura se propaga de maneira instável. A ruptura ocorre quando $G = G_c$. Esta taxa crítica de liberação de energia elástica pode ser interpretada como um parâmetro do material e pode ser medida em laboratório com corpos de prova contendo trincas agudas [9].

2.2.4.3. Fator de Intensidade de Tensões

Westgaard (1927) publicou um método analítico para resolver o problema da determinação de tensões e deformações em corpos fraturados. Ele determinou a natureza das distribuições de tensão na ponta da trinca, utilizando conceitos da teoria da elasticidade. Os campos de tensões circundando a ponta da trinca podem ser divididos em três modos principais de carregamento que envolvem deslocamentos diferentes das superfícies da trinca, como mostrado abaixo [4]:

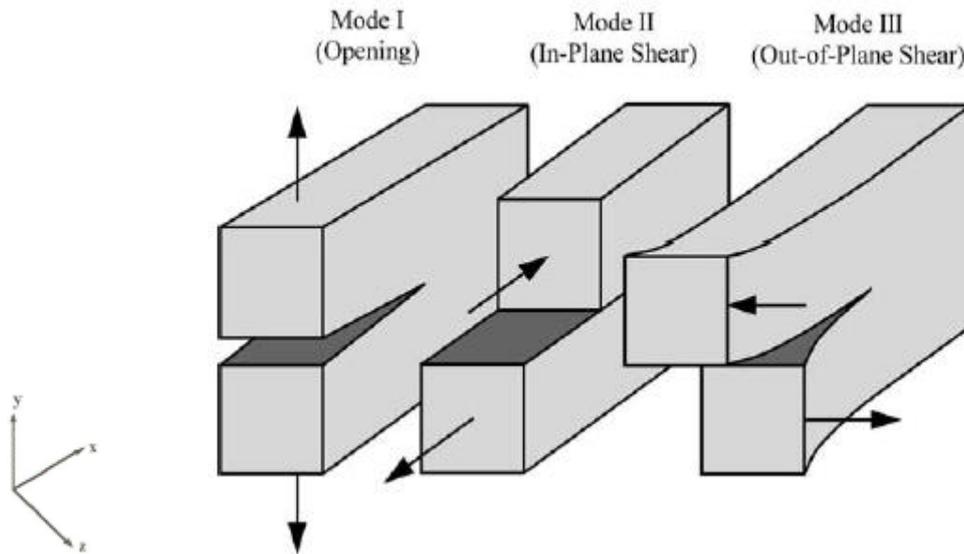


Figura 6 - Modos fundamentais de deformação [4].

Modo I (Tração): Ocorre a separação normal das paredes da fratura sob a ação de tensões de tração (abertura da fissura) neste caso a fratura será propagada em seu próprio plano.

Modo II (cisalhamento longitudinal e deslizamento): As duas superfícies de fratura deslizam uma sobre a outra ao longo da linha da fratura (direção x).

Modo III (cisalhamento transversal, torsão, rasgamento): Uma superfície desliza sobre a outra perpendicular à linha da fratura (direção z).

Um corpo fraturado pode sofrer carregamento em qualquer um destes três modos, bem como uma combinação de dois ou três deles.

Destes três modos básicos, o modo I é o mais importante, pois é a condição de carregamento predominante na maioria das situações práticas, além disso é o modo de propagação mais simples de ser analisado. Este modo de propagação será levado em consideração na análise deste trabalho [4].

Irwin (1957) concluiu que o processo de propagação da trinca ocorre em uma zona pequena próxima à ponta da trinca, a qual denominou de zona plástica, onde pelo efeito da deformação, absorve grande quantidade de energia e mantém as

tensões dentro de um valor finito. Assim, o campo de tensões à frente da trinca é escrito como:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (2.9)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \quad (2.10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad (2.11)$$

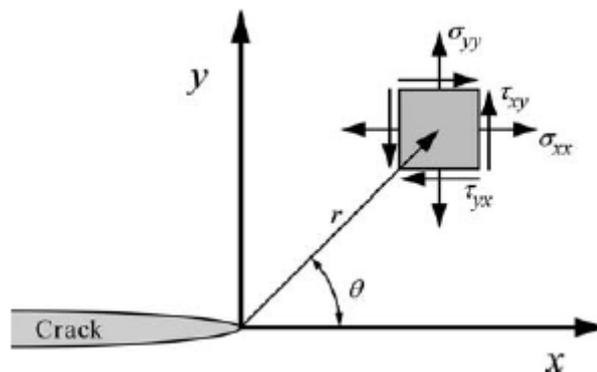


Figura 7 - Distribuição de tensões na vizinhança da ponta de uma trinca [4].

Onde r e θ são as coordenadas polares em relação à ponta da trinca e K é função da forma e tamanho da trinca, tipo de carregamento, configuração e geometria do componente estrutural.

A espessura CP definirá o estado de tensões na ponta da trinca. Se a chapa é fina, tal que a tensão na direção da espessura seja nula, isto é, $\sigma_z = 0$, tem-se um estado plano de tensão. Se a chapa tem uma espessura considerável, em que a tensão transversal não é desprezível, haverá uma restrição à deformação ao longo da espessura. No limite, tem-se a condição de estado plano de deformação [3]:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.12)$$

Quando $r \rightarrow 0$, as tensões das equações (2.9), (2.10) e (2.11) tendem ao infinito na ponta da trinca e as tensão σ_y que deveria tender ao valor da tensão externa σ quando $\theta = 0$ e r assume valores grandes, tende a zero. Pensando nisso, Irwin adotou K apenas para a avaliação na ponta da trinca e definiu o fator de intensidade de tensão no modo I como sendo:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.13)$$

Onde a é o comprimento inicial da trinca e σ é a tensão externa.

2.2.5. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP)

A mecânica da fratura linear elástica é aplicável em materiais que apresentam fratura predominantemente no regime elástico e o tamanho da zona plástica na ponta da trinca é muito pequeno em comparação à espessura do espécime. Em materiais que possuem elevada tenacidade e resistência mecânica moderada, a mecânica da fratura elastoplástica deve ser aplicada. Dois são os parâmetros amplamente utilizados para descrever o comportamento da fratura de materiais no regime elastoplástico: o CTOD (proposto por Weels em 1961) e a Integral J (proposta inicialmente por J.R. Rice em 1968) [12,13].

2.2.5.1. Integral J

A integral J, desenvolvida inicialmente por Rice (1968), tem o objetivo de analisar o efeito das trincas com base em peças planas cujo comportamento elastoplástico é obtido a partir de carregamento monotônico. A metodologia fornece um meio para determinar a taxa de liberação de energia nos casos em que os efeitos da plasticidade não são desconsiderados. A região a frente da ponta da trinca gera diferentes componentes de tensão pois possui um carregamento não linear, ou seja a

integral J não pode ser utilizada para descrever as condições de crescimento da trinca. Para que a integral J possa descrever tais condições, esta região deve estar incluída na região de dominância J, de acordo com o gráfico [3,4,14]:

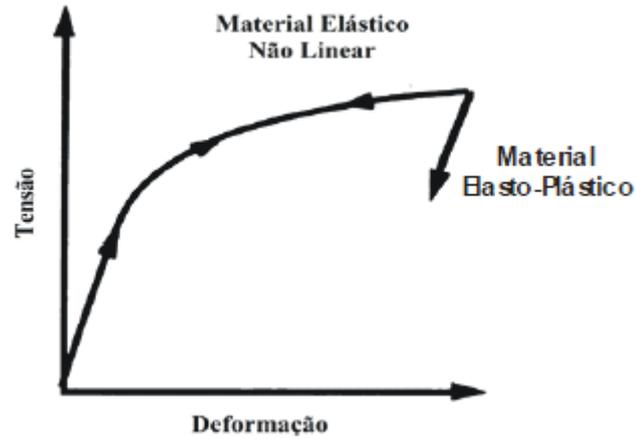


Figura 8 - Curva σ versus ε elastoplástica [4].

A integral J é definida como:

$$J = \oint_{\Gamma} (W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds) \quad (2.14)$$

Onde Γ é o caminho da integração percorrido no sentido anti-horário, u_i é o vetor de deslocamento, T_i é o vetor de tração, ds é o incremento do comprimento aos longo do contorno Γ e W é a densidade de energia de deformação elástica e é definida por:

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (2.15)$$

Onde σ_{ij} e ε_{ij} são os tensores de tensão e deformação infinitesimal, respectivamente.

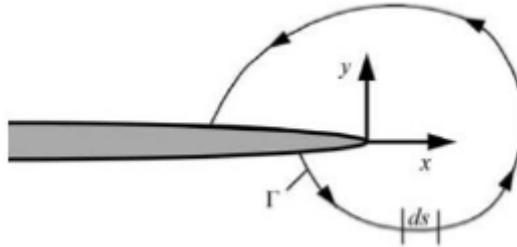


Figura 9 - Caminho de integração para o cálculo da integral J ao redor da ponta da trinca [15].

Hutchinson, Rice e Rosengren, mostraram em diferentes trabalhos que a integral J tem relação com o campos de tensões na região vizinha à ponta da trinca. Esta região foi denominado como campo HRR. Eles propuseram que o comportamento mecânico dos metais no regime elastoplástico pode ser descrito com grande precisão pelo método de Ramberg-Osgood, através da equação:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2.16)$$

onde, σ_0 é uma tensão de referência (usualmente a tensão de limite de escoamento), ε_0 é uma deformação de referência (σ_0/E), α é uma constante adimensional e n é o expoente de encruamento do material.

Para que a integral J permaneça independente as trajetória de caminho, a tensão e a deformação devem variar com $1/r$ na proximidade da ponta da trinca.

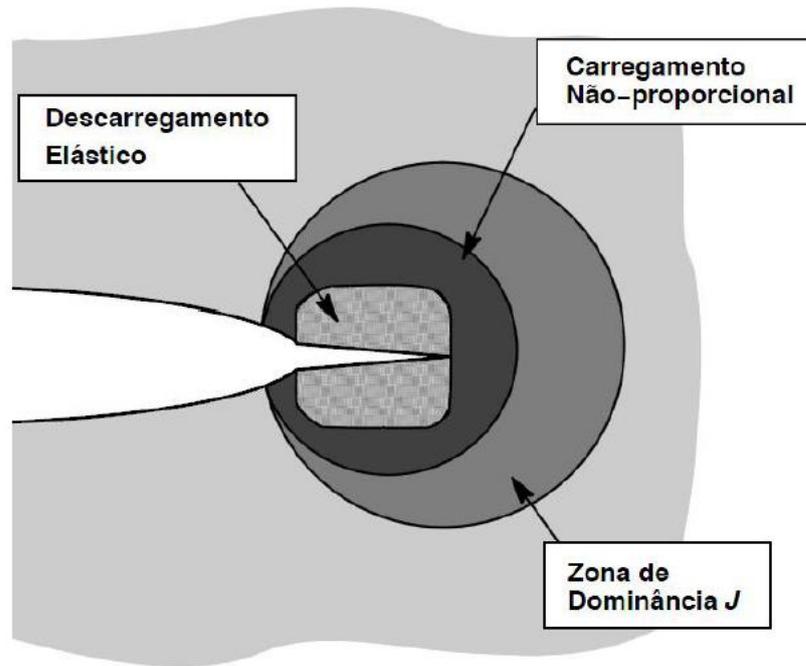


Figura 10 - Esquema de crescimento de trinca controlado por J [16].

Considerando que para curtas distâncias as deformações elásticas são pequenas se comparadas com a deformação total, as soluções para os campos de tensão e deformação podem ser calculadas como:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{1+n}} \tilde{\sigma}_{ij}(n, \theta) \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\alpha \sigma_0}{E} \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{1+n}} \tilde{\varepsilon}_{ij}(n, \theta) \quad (2.18)$$

onde I_n é uma constante de integração dependente de n , $\tilde{\varepsilon}_{ij}$ e $\tilde{\sigma}_{ij}$ são funções adimensionais dependentes de n e θ [4].

2.2.5.2. A Curva R

O conceito de curvas de resistência ao crescimento de trincas em sólidos elastoplásticos, ou curvas R, foi desenvolvido inicialmente por Kraft et al., sendo amplamente descrito em normas técnicas e livros [17]. A curva R expressa a relação entre a propagação estável da trinca (Δa) e a integral J. A figura a seguir representa uma curva de resistência típica de uma material dúctil, apresentando os diferentes estágios durante o crescimento de trinca.

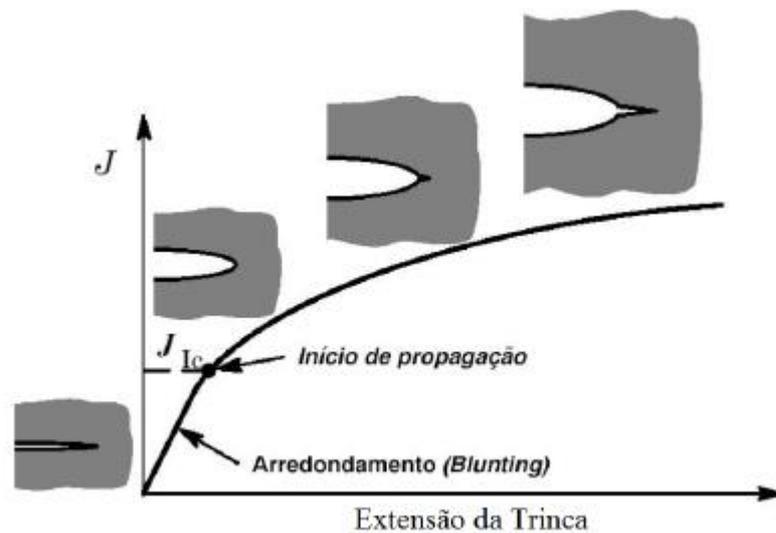


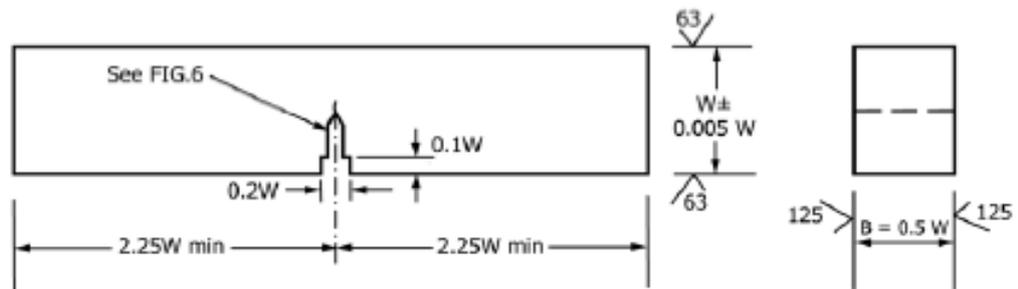
Figura 11 - Esquema da curva de resistência em termos de J, mostrando os diferentes estágios do crescimento da trinca [4].

No início da deformação, a curva é aproximadamente linear e ocorre um pequeno crescimento da trinca devido ao embotamento. Com o acréscimo de J, há um aumento de deformação plástica na ponta da trinca e a partir de um certo momento a trinca avança [18].

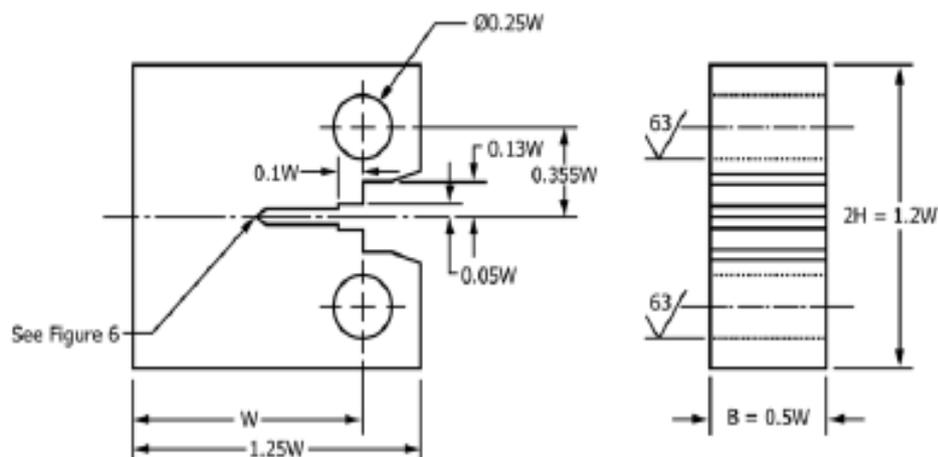
Inicialmente, a avaliação experimental de uma curva R era realizada através de ensaios com múltiplos corpos de prova do mesmo material e com as mesmas dimensões, onde eram permitidos crescimentos de trinca diferentes, porém era uma metodologia cara e demorada. Atualmente a avaliação simultânea de J e comprimento de trinca, a , são feitas a partir de um único corpo de prova [19].

Um dos métodos mais usuais é o método *compliance*, no qual um único corpo de prova sofre uma sequência parciais em intervalos regulares para a medição da flexibilidade elástica do CP. O registro dos dados pode ser feito através do controle do deslocamento da linha de carga (LLD) ou pela abertura da boca da trinca (CMOD).

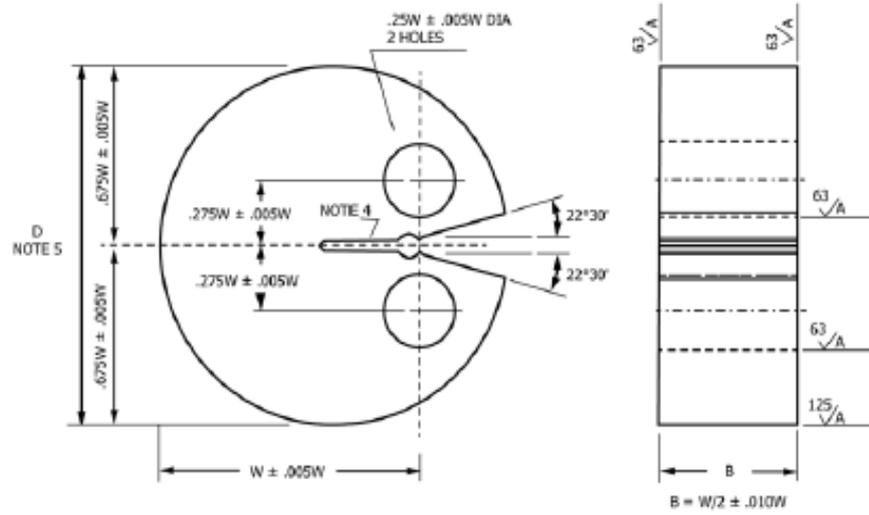
A norma ASTM E1820-17 [20] utilizada neste trabalho, fornece métodos para obter os parâmetros necessários para confecção da curva R utilizando os corpos de prova do tipo *single edge notched bend specimen* SE(B), *compact tension specimen* C(T) e DC(T). Existe ainda o corpo de prova do tipo SE(T). Neste trabalho será usado o corpo de prova normalizado do tipo SE(B) de flexão em três pontos. As figuras 12(a), 12(b) e 12(c) ilustram os corpos de prova cobertos pela norma.



(a)



(b)



(c)

Figura 12 - Corpo de prova SE(B) (a); Corpo de prova CT(T) (b); Corpo de prova DC(T) (c) [20].

3. Procedimento Experimental

3.1. Materiais

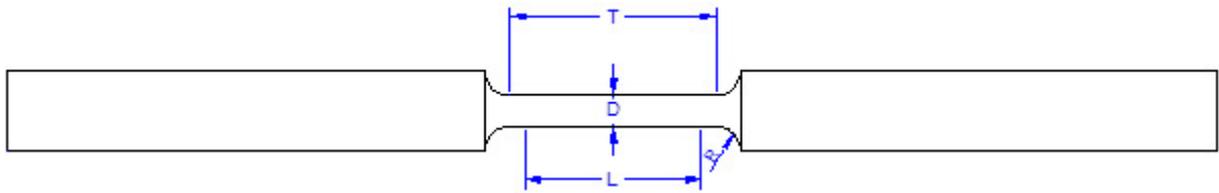
O aço utilizado nos ensaios é composto pelos seguintes elementos químicos:

| Elemento Químico | % em Peso |
|------------------|-----------|
| C | 0,24 |
| Mn | 1,06 |
| Si | 0,28 |
| P | 0,02 |
| S | 0,01 |
| Cr | 1,05 |
| Ni | 0,55 |
| Mo | 0,22 |
| Fe | restante |

Tabela 2 - Elementos químicos presentes no material.

3.2. Ensaio de Tração

As propriedades de tração podem variar conforme o modo de ensaio dos corpos de prova, assim a temperatura ambiente e velocidade de teste deverão ser cuidadosamente controladas para garantir uma medição precisa destas propriedades. O CP foi usinado com geometria cilíndrica segundo a norma ASTM E8M-16 [22]. As dimensões do CP antes do ensaio estão apresentadas na figura 13 (a) e na tabela 3, medidas com um paquímetro antes do ensaio de tração, enquanto que a tabela 4 apresenta as dimensões do CP após o ensaio.



(a)



(b)

Figura 13 - Corpo de prova utilizado no ensaio de tração: representação esquemática cujas dimensões podem ser observadas na tabela 3 (a); corpo de prova (b).

| | Valor (mm) |
|---|------------|
| T | 35 |
| D | 6 |
| L | 28 |
| R | 6 |

Tabela 3 - Dimensões do CP antes do ensaio de tração.

Para a realização do ensaio de tração, primeiramente foram marcados pontos equidistantes no comprimento útil do CP. Foi utilizada a máquina Instron 5500R com capacidade de 10 toneladas do laboratório de ensaios mecânicos da PUC-Rio. Prendeu-se o CP na máquina pelas suas extremidades para em seguida acoplar o extensômetro com capacidade de abertura de 25 mm no comprimento útil do CP. Todo o ensaio foi conduzido a temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C.

Na figura 14 são mostradas a máquina de teste durante o ensaio e uma representação da sequência do teste.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 14 - Máquina Instron 5500 (a); CP posicionado para o ensaio de tração (b); Controle da sequência do teste pelo computador (c); CP após fratura (d).

| | Valor (mm) |
|---|------------|
| T | 42,8 |
| D | 3,65 |
| L | 34,2 |

Tabela 4 - Dimensões do CP após ensaio de tração.

Após estes resultados é possível calcular o percentual de alongamento e a porcentagem de redução de área do espécime:

$$\text{Porcentagem de alongamento} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\text{Porcentagem de redução de área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (3.2)$$

3.3 Ensaio de Tenacidade à Fratura

A aquisição dos dados do ensaio de tenacidade à fratura para levantamento da curva R, foi obtida através do ensaio da abertura de pré-trinca e posteriormente do ensaio *compliance*, ambos realizados no laboratório de ensaios mecânicos da PUC-Rio.

3.3.1. Pré-trinca de fadiga

O CP utilizado para os testes e confecção da curva R é do tipo SE(B) de flexão em 3 pontos, como ilustrado na figura 12 (a) e suas dimensões estão na tabela 5.

No CP foi usinado um entalhe, a partir do qual uma pré-trinca irá se propagar. Como foi mencionado anteriormente, segundo a norma seguida neste trabalho, valor de a_0/W deve estar na faixa de $0,45 \leq a_0/W \leq 0,70$. Na figura 15 estão presentes

as dimensões do entalhe do CP, onde a é o comprimento do entalhe, M^* é o comprimento da pré-trinca de fadiga e $a_0 = a + M^*$.

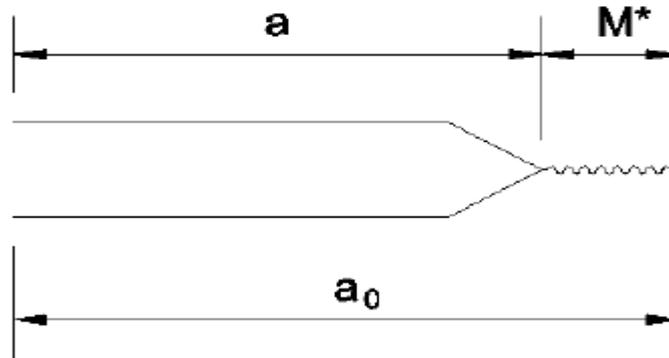


Figura 15 - Dimensão do entalhe [23].

O objetivo de realizar a pré-trinca de fadiga é um defeito (trinca) no CP, para posterior propagação no ensaio monotônico. O CP colocado em uma máquina servo-hidráulica Instron 8502 disponível no laboratório de ensaios mecânicos da PUC-Rio. O ensaio foi realizado seguindo as exigências da norma ASTM E1820-17 [20], onde o CP foi submetido a um carregamento de flexão em três pontos (Figura 16).

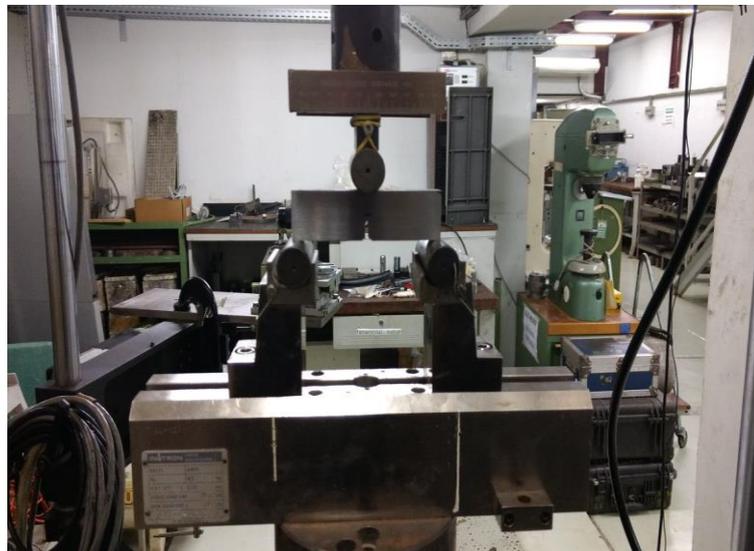


Figura 16 - CP posicionado na máquina Instron para ensaio da abertura da pré-trinca.

A determinação da carga máxima do carregamento cíclico de fadiga foi determinada através das equações (3.3) e (3.4) para CP tipo SE(B) e se encontra apresentada na tabela 5.

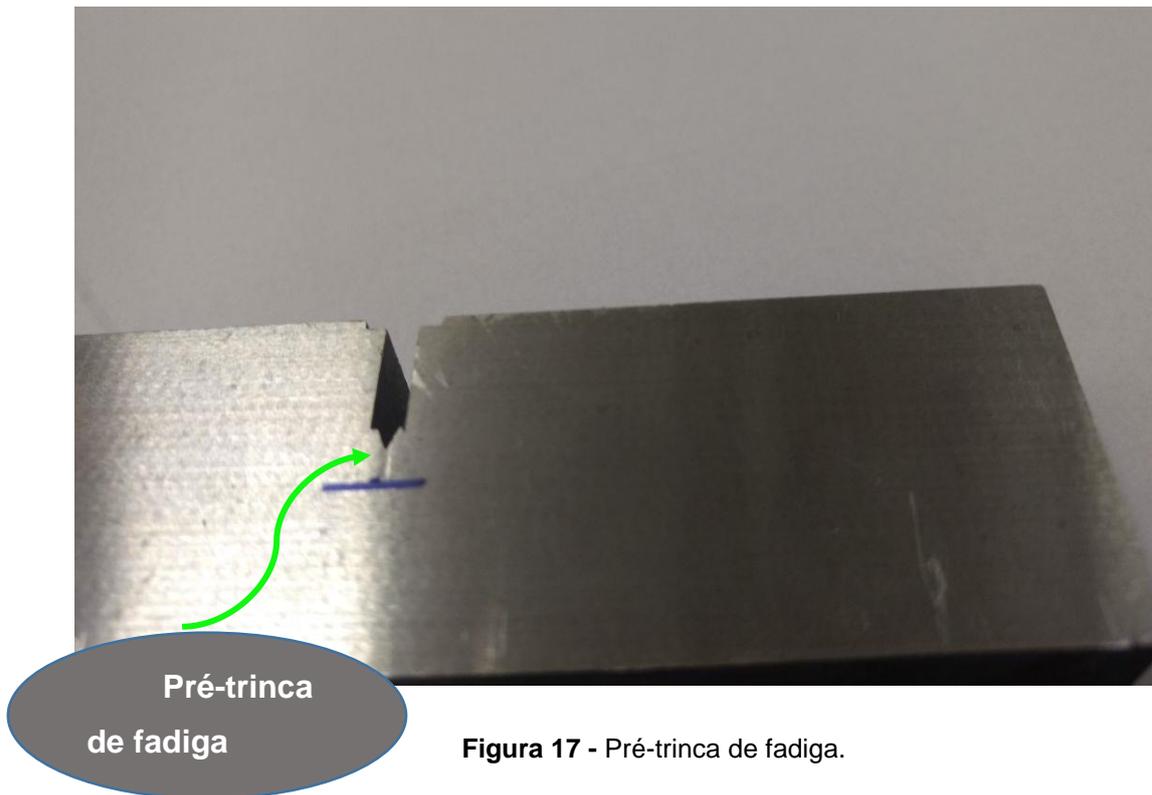
$$P_m = \frac{0,5Bb_0^2 \sigma_y}{S} \quad (3.3)$$

onde,

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{LE} + \sigma_{LRM}}{2} \quad (3.4)$$

| Dados do ensaio para abertura de Trinca de Fadiga | | |
|---|----------|----|
| Dados CP | | |
| W = | 30 | mm |
| B = | 15 | mm |
| b ₀ = | 15 | mm |
| S = | 110 | mm |
| a _{entalhe} = | 12 | mm |
| L _{entalhe} = | 3 | mm |
| Dados ensaio | | |
| a ₀ /W = | 0,5 | |
| a ₀ = | 15 | mm |
| a _{fadiga} = | 3 | mm |
| P _M = | 9733,807 | N |
| P _M /P _{min} = | 0,1 | |
| P _{Min} = | 973,3807 | N |
| W/B = | 2 | |

Tabela 5 - Dados para abertura da pré-trinca.



3.3.2. O Método Compliance

O método de descargas parciais (“*unloading compliance*”) permite determinar o comprimento da trinca ao longo dos testes por meio de descargas parciais em intervalos regulares para medição da flexibilidade elástica do CP. Um gráfico típico do método *compliance* pode ser visto na Figura 18. A inclinação ($1/C$) das linhas de descarregamento parcial está relacionada com as medidas da flexibilidade do CP. Assim, o comprimento da trinca é calculada em intervalos regulares de teste, através da medição da flexibilidade do CP após o respectivo descarregamento parcial. Devido à variação do tamanho da trinca durante o teste para levantamento da curva R, a integral J deve ser calculada incrementalmente a cada descarregamento. O intervalo de incremento varia de $1 \leq i \leq n$, onde n é o total de pontos de medição.

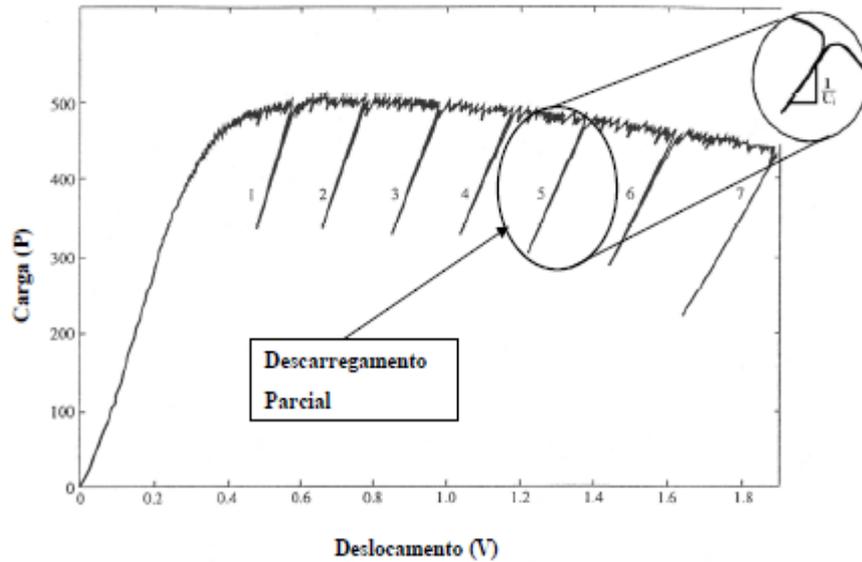


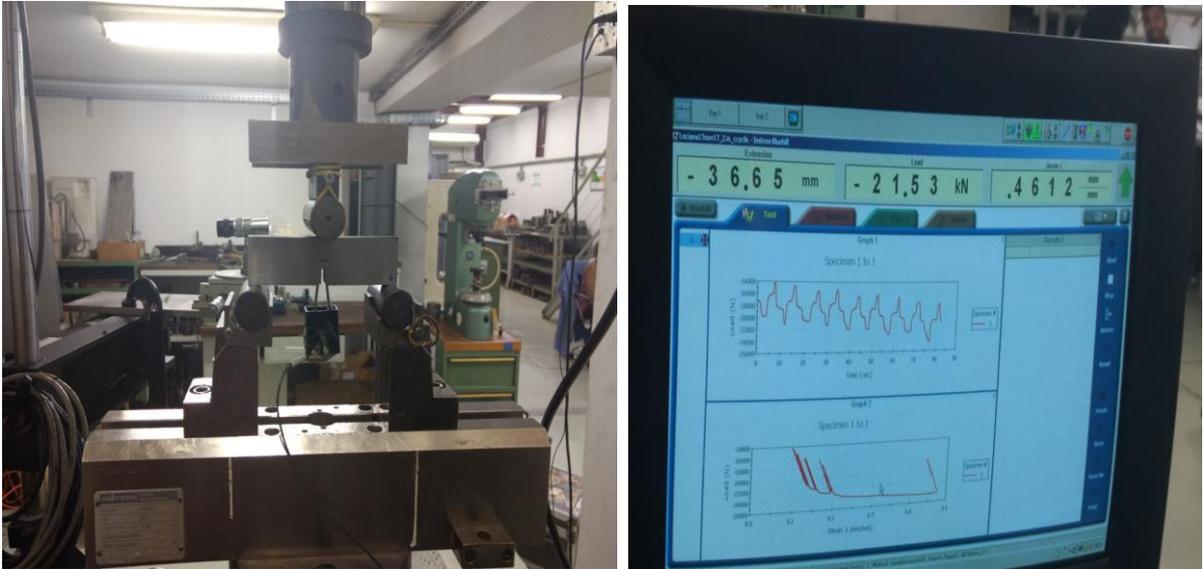
Figura 18 - Registro carga (P) x deslocamento (V) com as linhas de descarregamento elástico do método *compliance* (C_i), para monitoramento do crescimento de trinca [21].

Após a abertura da pré-trinca de fadiga, foram realizados os cálculos para controle do método *compliance*, utilizando uma carga inicial incremental de 50% P_m até atingir 150% de P_m , totalizando 11 rampas de carregamentos/descarregamentos.

| RAMPAS | ETAPAS | INCREMENTO | Pmáx | | Pmín | |
|-----------------|---------------|-------------------|-------------|-----|-------------|-----|
| RAMPA 1 | 1 | 0,5 | 14600,71 | [N] | 11680,57 | [N] |
| | 2 | 0,5 | 14600,71 | [N] | 11680,57 | [N] |
| | 3 | 0,5 | 14600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 2 | 1 | 0,60 | 15600,71 | [N] | 12480,57 | [N] |
| | 2 | 0,60 | 15600,71 | [N] | 12480,57 | [N] |
| | 3 | 0,60 | 15600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 3 | 1 | 0,71 | 16600,71 | [N] | 13280,57 | [N] |
| | 2 | 0,71 | 16600,71 | [N] | 13280,57 | [N] |
| | 3 | 0,71 | 16600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 4 | 1 | 0,81 | 17600,71 | [N] | 14080,57 | [N] |
| | 2 | 0,81 | 17600,71 | [N] | 14080,57 | [N] |
| | 3 | 0,81 | 17600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 5 | 1 | 0,91 | 18600,71 | [N] | 14880,57 | [N] |
| | 2 | 0,91 | 18600,71 | [N] | 14880,57 | [N] |
| | 3 | 0,91 | 18600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 6 | 1 | 1,01 | 19600,71 | [N] | 15680,57 | [N] |
| | 2 | 1,01 | 19600,71 | [N] | 15680,57 | [N] |
| | 3 | 1,01 | 19600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 7 | 1 | 1,12 | 20600,71 | [N] | 16480,57 | [N] |
| | 2 | 1,12 | 20600,71 | [N] | 16480,57 | [N] |
| | 3 | 1,12 | 20600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 8 | 1 | 1,22 | 21600,71 | [N] | 17280,57 | [N] |
| | 2 | 1,22 | 21600,71 | [N] | 17280,57 | [N] |
| | 3 | 1,22 | 21600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 9 | 1 | 1,32 | 22600,71 | [N] | 18080,57 | [N] |
| | 2 | 1,32 | 22600,71 | [N] | 18080,57 | [N] |
| | 3 | 1,32 | 22600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 10 | 1 | 1,42 | 23600,71 | [N] | 18880,57 | [N] |
| | 2 | 1,42 | 23600,71 | [N] | 18880,57 | [N] |
| | 3 | 1,42 | 23600,71 | [N] | - | [N] |
| RAMPA 11 | 1 | 1,53 | 24600,71 | [N] | 19680,57 | [N] |
| | 2 | 1,53 | 24600,71 | [N] | 19680,57 | [N] |
| | 3 | 1,53 | 24600,71 | [N] | - | [N] |

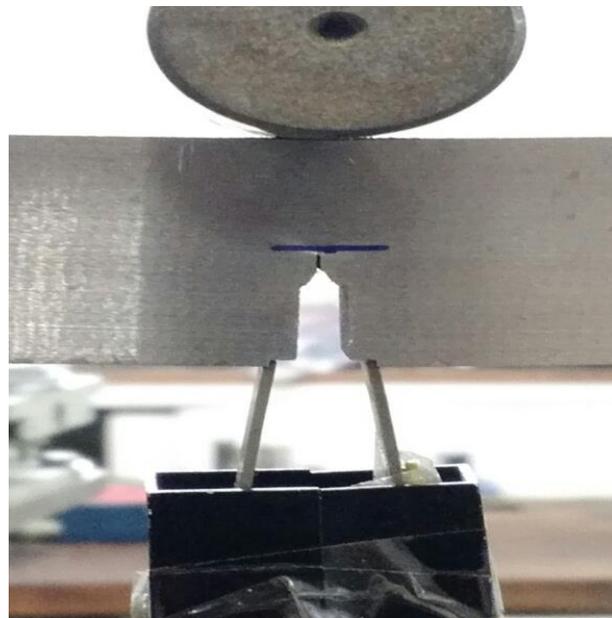
Tabela 6 - Rampas de carregamentos/descarregamentos

As figuras 19 – 21 apresentam documentações do ensaio de tenacidade, gráfico obtido no ensaio e aspecto do CP após ensaio.



(a)

(b)



(c)

Figura 19 - CP posicionado na máquina Instron para ensaio de tenacidade (a); Controle do ensaio (b); Extensômetro (clip gage) utilizado para medida do CMOD do CP

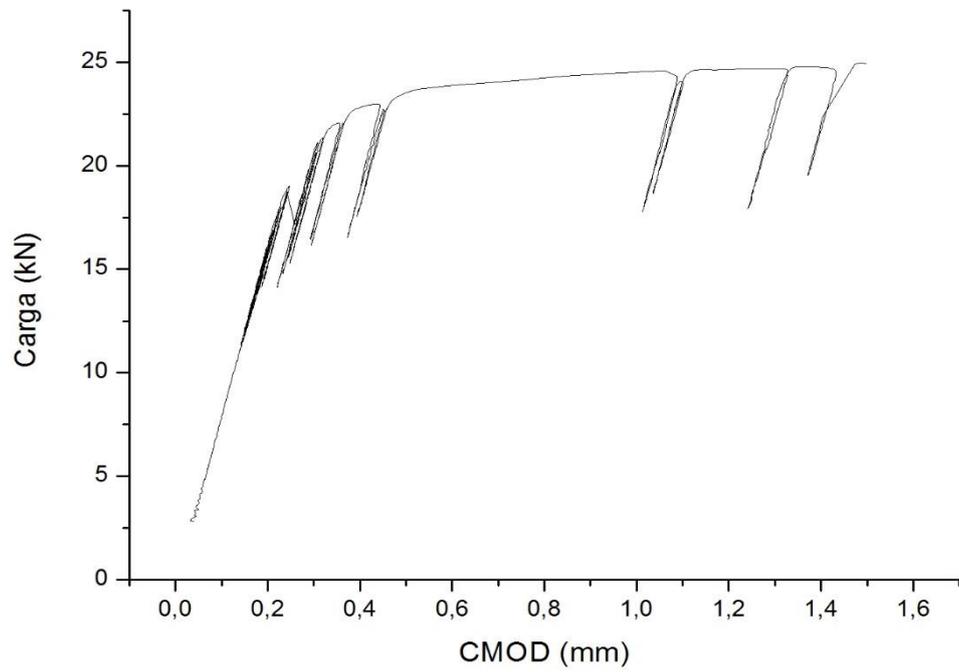


Figura 20 - Gráfico carga versus CMOD após utilização da técnica do *compliance*.

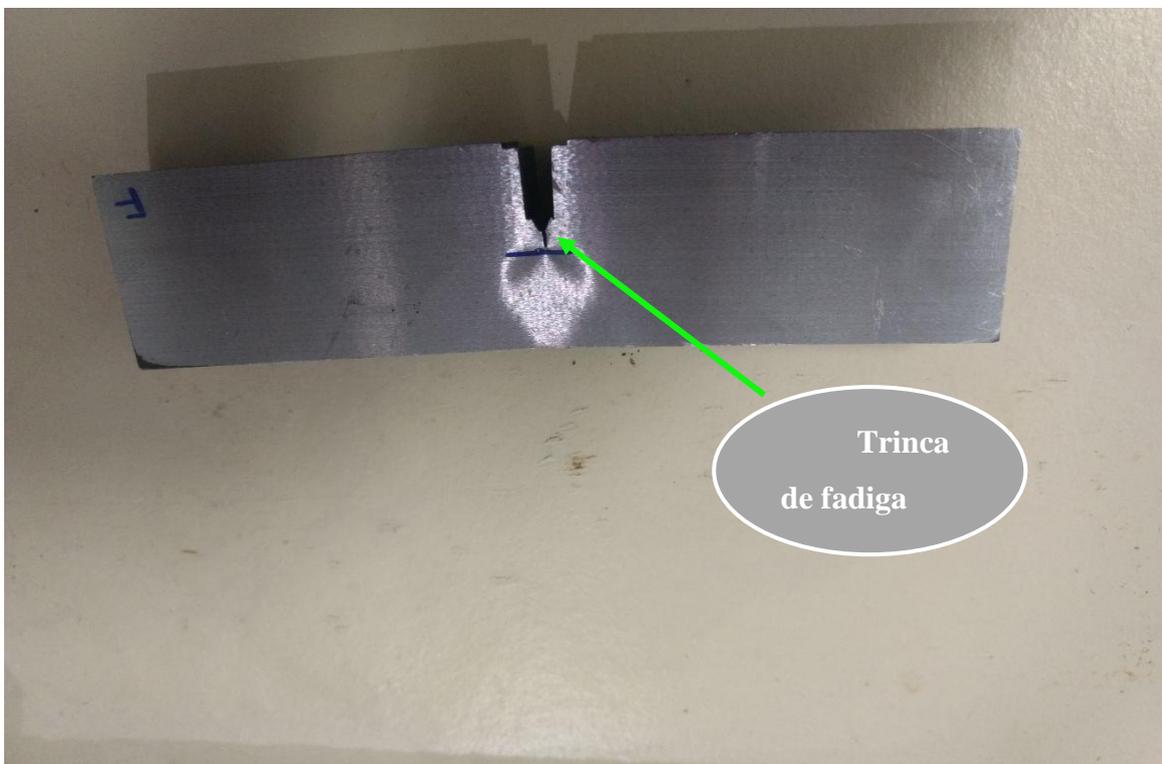


Figura 21 - CP após o ensaio de tenacidade.

Após o ensaio, o corpo de prova foi levado a um forno (Figura 22) e aquecido a 300 °C durante aproximadamente 30 minutos para que a superfície de fratura ficasse oxidada. Em seguida foram resfriados em nitrogênio líquido e quebrados por impacto, ocorrendo uma fratura frágil na superfície fechada (onde a trinca não se propagou durante o ensaio) do corpo de prova, todos documentados na Figura 23.



Figura 22 - Forno para aquecer e oxidar a parte fraturada do CP



(a)



(b)



(b)



(d)

Figura 23 - CP submerso no nitrogênio líquido (a); máquina usada para quebrar o CP após o nitrogênio líquido (b); Secagem do CP (c); CP pronto para análise de propagação de trinca e fractografia a ser realizado no MEV(d).

4. Resultados

4.1. Ensaio de Tração

O CP foi testado com o objetivo de medir a resistência ao escoamento S_y , resistência à tração S_u e módulo de elasticidade (E). A curva de tensão x deformação é mostrada na figura 24.

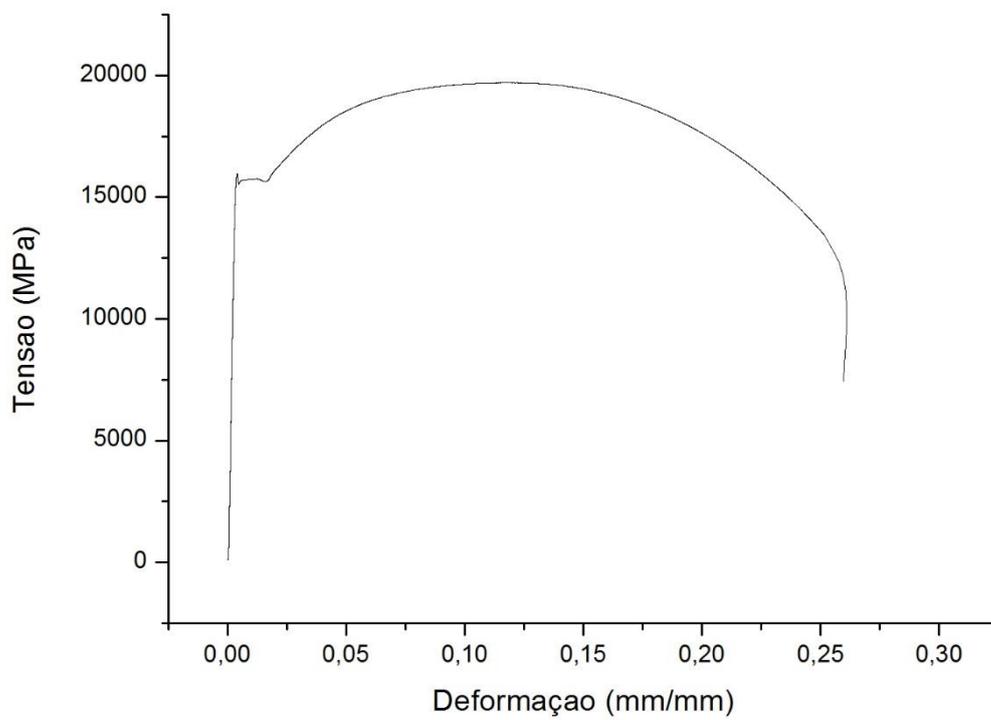


Figura 24 - Curva tensão versus deformação do material.

| σ_{LE} (Mpa) | σ_{LRM} (Mpa) | PA (%) | PRA (%) |
|---------------------|----------------------|--------|---------|
| 560 | 710 | 23 | 64 |

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do material.

4.2. Ensaio de Tenacidade à Fratura

4.2.1. Cálculos para obtenção de J e levantamento da curva R

Para que os ciclos de carregamento e descarregamento ocorram sempre de forma elástica, a máxima variação recomendada pela norma em cada sequência não pode ser superior a 50% da carga máxima de pré-trincamento (P_m), cuja equação (3.3) está no item 3.3.1.

Para o cálculo de J, as componentes elástica e plástica podem ser calculadas a partir das seguintes equações:

$$J_{total(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (4.1)$$

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1 - \nu^2)}{E} \quad (4.2)$$

$$\nu = 0,3$$

$$J_{pl(i)} = \frac{\eta_{pl(i)} A_{pl(i)}}{B_N b_0} \quad (4.3)$$

Segundo a norma ASTM E1820-17 [20], se o CP não possui side-groove (entalhe lateral), então $B_N = B$.

$$b_0 = W - a_0 \quad (4.4)$$

A determinação do fator K é fornecida pela norma como sendo:

$$K_i = \left[\frac{P_i S}{(B B_N)^{\frac{1}{2}} W^{\frac{3}{2}}} \right] f(a_i/W) \quad (4.5)$$

$$f\left(\frac{a_i}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a_i}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left[1,99 - \left(\frac{a_i}{W}\right) \left(1 - \frac{a_i}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \left(\frac{a_i}{W}\right) + 2,7 \left(\frac{a_i}{W}\right)^2 \right) \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a_i}{W} \right) \left(1 - \frac{a_i}{W} \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.6)$$

$$\frac{a_i}{W} = [0,999748 - 3,9504 u + 2,9821 u^2 - 3,21408 u^3 + 51,51564 u^4 - 113,031 u^5] \quad (4.7)$$

Como condição de aceitação de resultados, a ASTM E1820-17 [20] recomenda que na fabricação do CP SE(B) a proporção entre os valores da largura (W) e da espessura (B) seja $1 \leq W/B \leq 4$. Além disso, a razão entre a_0 e W deve estar em uma faixa de $0,45 \leq a_0/W \leq 0,70$.

$$u = \frac{1}{\left[\frac{B_e W E C_i}{S/4} \right]^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (4.8)$$

$$C_i = \frac{\Delta v_m}{\Delta P} \quad (4.9)$$

onde $B_e = B - (B - B_N)$

Para determinação do fator η em corpos de prova do tipo SE(B), além da dimensão do CP, também é importante o modo de medição da área plástica A_{pl} , se é por CMOD ou por LLD. Quando a determinação da A_{pl} for obtida por LLD, então $\eta_{pl(i-1)} = 1,9$. Obtendo a A_{pl} por CMOD $\eta_{pl(i-1)}$ será obtido pela equação abaixo:

$$\eta_{pl(i-1)} = 3,667 - 2,199 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right) + 0,437 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right)^2 \quad (4.10)$$

O fator γ define a correção da energia de deformação do comportamento plástico de integral J pelo pequeno incremento do tamanho da trinca para uma trinca em propagação. Quando a determinação de γ_{pl} for obtida por LLD, então $\gamma_{pl(i-1)} = 0,9$. Obtendo γ_{pl} por CMOD $\gamma_{pl(i-1)}$ será obtido pela equação abaixo:

$$\gamma_{pl(i-1)} = 0,131 + 2,131 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right) - 1,465 \left(\frac{a_{(i-1)}}{W} \right)^2 \quad (4.11)$$

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + [P_{(i)} + P_{(i-1)}][v_{(i)} - v_{(i-1)}]/2 \quad (4.12)$$

$$v_{pl(i)} = v_{(i)} - (P_{(i)} C_{(i)}) \quad (4.13)$$

$$C_{(i)} = \frac{6S}{EWB_e} \left(\frac{a_i}{W} \right) \left[0,76 - 2,28 \left(\frac{a_i}{W} \right) + 3,87 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 - 2,04 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 + \frac{0,66}{\left(1 - \frac{a_i}{W} \right)^2} \right] \quad (4.14)$$

Para determinar a integral J, é necessário que os valores de J e do crescimento de trinca (Δa) estejam entre J_{max} e Δa_{max} que são dados pelas equações (4.15) ou (4.16) e (4.17). A figura 25 mostra o exemplo de uma curva com esses requerimentos. As retas limitadoras foram definidas com os dados das coordenadas J_{max} e Δa_{max} . A curva R é obtida com valores de J calculados em (4.1) e Δa calculado em (4.18).

$$J_{max} = b_0 \sigma_y / 10 \quad (4.15)$$

ou

$$J_{max} = B \sigma_y / 10 \quad (4.16)$$

$$\Delta a_{max} = 0,25 b_0 \quad (4.17)$$

$$\Delta a_i = a_i - a_{0q} \quad (4.18)$$

onde a_{0q} é a média de pelo menos três sequencias de carregamento e descarregamento do *compliance*, onde nenhum valor de a_i deve diferir da média em mais de 0,002W.

Após os cálculos dos limites de J e Δa , os pontos obtidos no ensaio da integral J são plotados para a obtenção de uma curva na qual é ajustada por uma lei de potência, e a curva de resistência R é obtida. A finalidade da obtenção da curva R é determinar o valor de J crítico J_{Ic} , característico do material, através do qual podemos avaliar se ocorrerá ou não crescimento estável da trinca no regime elasto-plástico durante uma dada situação de carregamento. Caso o valor de $J \geq J_{Ic}$, ocorrerá o crescimento estável da trinca.

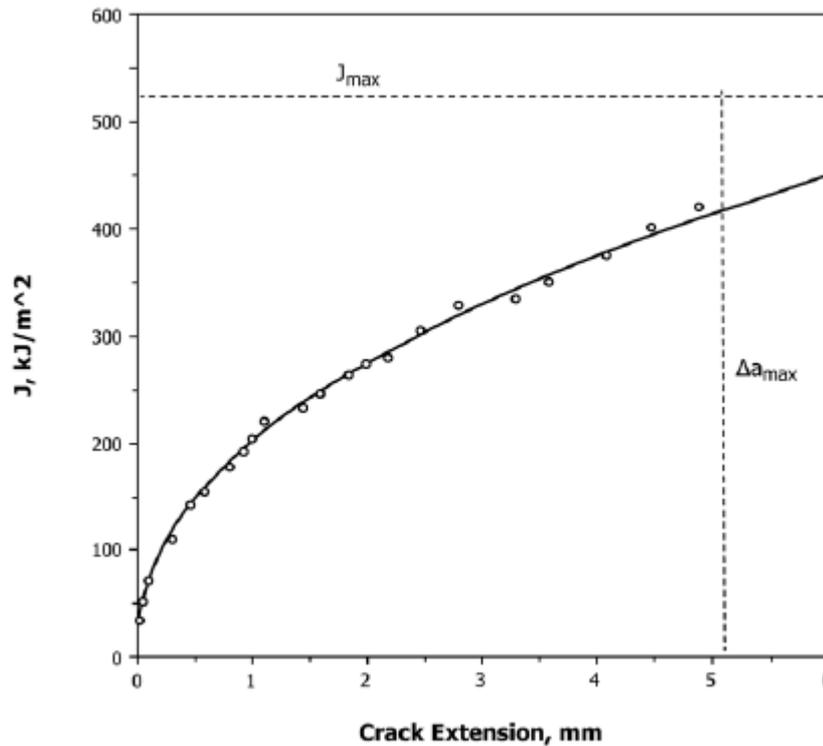


Figura 25 - Curva R teórica [20].

A figura 26 mostra o modelo de curva R obtida após a realização do ensaio de acordo com a norma ASTM E1820-17 [20]. Na curva são traçadas as seguintes linhas:

- Linha de embotamento ou construção: traçada a partir da origem da curva experimental da integral J, e é obtida a partir da seguinte equação:

$$J = 2\sigma_y \Delta a \quad (4.19)$$

A finalidade da linha de embotamento é representar os primeiros estágios subcríticos de propagação da trinca.

- Linhas de exclusão: são paralelas à linha de construção e cruzam o eixo das abscissas em 0,15 mm e 1,5 mm. Os valores de Δa_{min} e Δa_{lim} são obtidos pela intersecção das linhas de exclusão com a curva experimental J. Os pontos que ficarem abaixo de 0,15 mm são excluídos, pois se considera que abaixo deste valor não ocorre crescimento efetivo de trinca. Valores que ficarem acima de 1,5 mm também serão excluídos.

- Linha Offset: É traçada a 0,2 mm da linha de construção para determinação de J_{Ic} .

A linha J_{lim} é obtida através da equação:

$$J_{lim} = b_0 \sigma_y / 7,5 \quad (4.20)$$

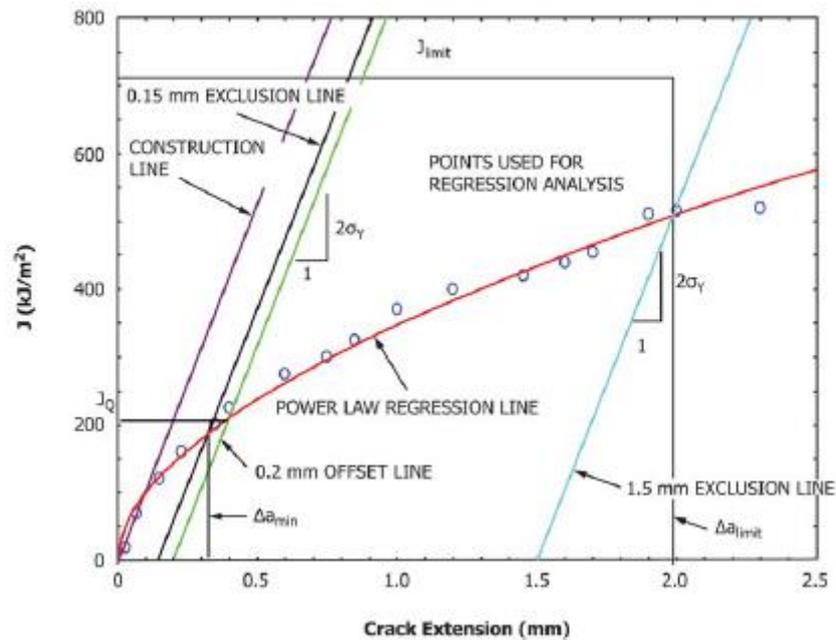


Figura 26 - Determinação das linhas de construção para qualificação dos dados [20].

Especificações da norma para validação dos dados:

1. Pelo menos um ponto da curva R deve situar-se entre a linha de exclusão de 0,15 mm e a linha paralela com deslocamento de 0,5 mm.
2. Pelo menos um ponto da curva R deve situar-se entre a linha de deslocamento 0,5 mm e a linha de exclusão de 1,5 mm. Os dados aceitáveis são mostrados na figura 27.
3. Os outros pontos da curva R podem estar em qualquer lugar dentro da região de dados qualificados [20].

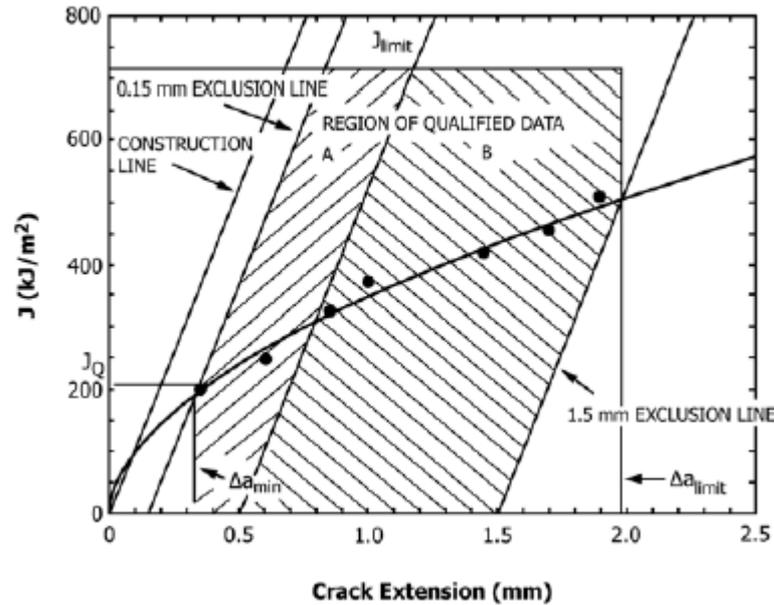


Figura 27 - Definição da região de qualificação dos dados [20].

A linha de regressão linear de dados pode ser obtida por:

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \left(\frac{\Delta a}{k} \right) \quad (4.21)$$

onde $k = 1$ mm.

A figura 27 ilustra uma região denominada de região de dados válidos localizada a 0,15 mm e a 1,5 mm das linhas de embotamento entre Δa_{min} e Δa_{lim} e J_{lim} . É traçada nesta região uma curva de regressão de potência nos pontos da curva experimental para determinação do J_Q candidato a se tornar J_{lc} . O valor de J_Q obtido será confirmado como sendo J_{lc} se forem satisfeitas algumas condições exigidas pela norma. É necessário que tenha pelo menos um ponto experimental entre Δa_{min} e 0,5 mm no eixo das abscissas (região A) e no mínimo cinco pontos experimentais entre 0,5 mm e 1,5 mm (região B), na região de dados qualificados para poder traçar a curva de regressão linear.

4.2.2. Cálculo de J e levantamento da curva R

A partir da curva obtida na Figura 20, foi possível realizar o tratamento dos dados para desenvolvimento dos cálculos.

| | CMOD | CARGA | Delta CMOD | Delta Carga |
|-----------------|----------|----------|-------------|-------------|
| | Máximo | Máxima | | |
| DESCARREGAMENTO | [mm] | [kN] | [mm] | [N] |
| 1 | 0,180652 | 14,91478 | 4,05719E-05 | 3472,787145 |
| 2 | 0,189053 | 15,68035 | 4,21247E-05 | 3611,31131 |
| 3 | 0,202793 | 16,81928 | 4,52971E-05 | 3832,85284 |
| 4 | 0,217404 | 17,84379 | 3,40036E-05 | 3034,96122 |
| 5 | 0,236014 | 18,74299 | 5,13293E-05 | 4365,64982 |
| 6 | 0,287243 | 19,83634 | 5,70375E-05 | 4627,54667 |
| 7 | 0,314701 | 21,39325 | 5,71046E-05 | 5200,39797 |
| 8 | 0,358088 | 22,14038 | 6,96828E-05 | 5779,46007 |
| 9 | 0,447364 | 22,73675 | 6,94705E-05 | 5670,93789 |
| 10 | 1,068231 | 23,65347 | 5,77413E-05 | 4318,112135 |
| 11 | 1,447699 | 24,95507 | 1,11E-04 | 6113,22224 |

Tabela 8 - Valores da carga e CMOD obtidos no ensaio de tenacidade pela técnica do compliance.

| <u>COMPLIANCE CMOD</u> | |
|------------------------|------------|
| COMPLIANCE 1 | 1,1683E-08 |
| COMPLIANCE 2 | 1,1665E-08 |
| COMPLIANCE 3 | 1,1818E-08 |
| COMPLIANCE 4 | 1,1204E-08 |
| COMPLIANCE 5 | 1,1758E-08 |
| COMPLIANCE 6 | 1,2326E-08 |
| COMPLIANCE 7 | 1,0981E-08 |
| COMPLIANCE 8 | 1,2057E-08 |
| COMPLIANCE 9 | 1,2250E-08 |
| COMPLIANCE 10 | 1,3372E-08 |
| COMPLIANCE 11 | 1,8140E-08 |

Tabela 9 - Valores de CMOD.

Com as equações (4.7), (4.8) e (4.9) foram obtidos os dados da tabela 10.

| u | Valor | a_i/W | Valor | a_i | Valor | |
|-------|----------|---------|----------|-------|----------|-----|
| u1 = | 0,137161 | a(1)/W | 0,518462 | a1 | 0,015554 | [m] |
| u2 = | 0,137253 | a(2)/W | 0,518187 | a2 | 0,015546 | [m] |
| u3 = | 0,136481 | a(3)/W | 0,520492 | a3 | 0,015615 | [m] |
| u4 = | 0,139656 | a(4)/W | 0,511049 | a4 | 0,015331 | [m] |
| u5 = | 0,136784 | a(5)/W | 0,519586 | a5 | 0,015588 | [m] |
| u6 = | 0,134022 | a(6)/W | 0,527867 | a6 | 0,015836 | [m] |
| u7 = | 0,140869 | a(7)/W | 0,507466 | a7 | 0,015224 | [m] |
| u8 = | 0,135306 | a(8)/W | 0,524008 | a8 | 0,01572 | [m] |
| u9 = | 0,134379 | a(9)/W | 0,526795 | a9 | 0,015804 | [m] |
| u10 = | 0,129364 | a(10)/W | 0,541987 | a10 | 0,01626 | [m] |
| u11 = | 0,11314 | a(11)/W | 0,592664 | a11 | 0,01778 | [m] |

Tabela 10 - Valores de u , a_i/W e a_i .

Com as equações (4.10) a (4.14), foram obtidos os dados da tabela 11.

| b(i) | Valor | Medida | C(i) | Valor | Vpl(i) | Valor | Apl(i) | Valor | |
|-------|----------|--------|-------|-------------|---------|----------|---------|----------|--------------------|
| b(0) | 1,50E-02 | [mm] | C(0) | 1,05306E-08 | Vpl(0) | 2,36E-05 | Apl(0) | 0 | [mm ²] |
| b(1) | 1,44E-02 | [mm] | C(1) | 1,16823E-08 | Vpl(1) | 6,41E-06 | Apl(1) | 0,18 | [mm ²] |
| b(2) | 1,45E-02 | [mm] | C(2) | 1,16642E-08 | Vpl(2) | 6,15E-06 | Apl(2) | 0,226203 | [mm ²] |
| b(3) | 1,44E-02 | [mm] | C(3) | 1,18178E-08 | Vpl(3) | 4,03E-06 | Apl(3) | 0,277962 | [mm ²] |
| b(4) | 1,47E-02 | [mm] | C(4) | 1,1203E-08 | Vpl(4) | 1,75E-05 | Apl(4) | 0,313878 | [mm ²] |
| b(5) | 1,44E-02 | [mm] | C(5) | 1,17572E-08 | Vpl(5) | 1,57E-05 | Apl(5) | 0,477885 | [mm ²] |
| b(6) | 1,42E-02 | [mm] | C(6) | 1,23259E-08 | Vpl(6) | 4,27E-05 | Apl(6) | 0,633105 | [mm ²] |
| b(7) | 1,48E-02 | [mm] | C(7) | 1,09796E-08 | Vpl(7) | 7,98E-05 | Apl(7) | 1,090296 | [mm ²] |
| b(8) | 1,43E-02 | [mm] | C(8) | 1,20569E-08 | Vpl(8) | 9,11E-05 | Apl(8) | 1,97383 | [mm ²] |
| b(9) | 1,42E-02 | [mm] | C(9) | 1,22505E-08 | Vpl(9) | 1,69E-04 | Apl(9) | 3,009973 | [mm ²] |
| b(10) | 1,37E-02 | [mm] | C(10) | 1,33734E-08 | Vpl(10) | 7,52E-04 | Apl(10) | 5,006659 | [mm ²] |
| b(11) | 1,22E-02 | [mm] | C(11) | 1,81454E-08 | Vpl(11) | 9,95E-04 | Apl(11) | 14,38856 | [mm ²] |

Tabela 11 - Valores de b_i , C_i , $V_{pl(i)}$ e $A_{pl(i)}$.

Com os dados das equações (4.2), (4.5) e (4.6), foram obtidos os dados da tabela 12.

| | $f(a(i)/W)$ | $K(i)$ | Jelastico | |
|----|-------------|----------|------------|----------------------|
| 1 | 16,91265 | 24,9726 | 2,7416E-12 | [kJ/m ²] |
| 2 | 16,883 | 26,2084 | 3,0196E-12 | [kJ/m ²] |
| 3 | 17,13382 | 28,52968 | 3,5782E-12 | [kJ/m ²] |
| 4 | 16,13571 | 28,5043 | 3,5718E-12 | [kJ/m ²] |
| 5 | 17,0347 | 31,60885 | 4,3923E-12 | [kJ/m ²] |
| 6 | 17,96976 | 35,28897 | 5,4746E-12 | [kJ/m ²] |
| 7 | 15,77677 | 33,41411 | 4,9083E-12 | [kJ/m ²] |
| 8 | 17,52597 | 38,41513 | 6,4875E-12 | [kJ/m ²] |
| 9 | 17,84496 | 40,1679 | 7,093E-12 | [kJ/m ²] |
| 10 | 19,72398 | 46,18752 | 9,3782E-12 | [kJ/m ²] |
| 11 | 28,2136 | 69,70316 | 2,1359E-11 | [kJ/m ²] |

Tabela 12 - Valores de $f(a_i/W)$, K_i e J_{el} .

Com a equação (4.1) foram obtidos os valores de J_{pl} da tabela 13.

| $J_{pl}(i)$ | Total | |
|--------------|----------|----------------------|
| $J_{pl}(0)$ | 0 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(1)$ | 2,868174 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(2)$ | 6,328238 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(3)$ | 13,28886 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(4)$ | 27,01829 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(5)$ | 56,01833 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(6)$ | 113,9349 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(7)$ | 233,5259 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(8)$ | 477,6709 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(9)$ | 968,0879 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(10)$ | 1960,836 | [kJ/m ²] |
| $J_{pl}(11)$ | 4040,185 | [kJ/m ²] |

Tabela 13 - Valores de J_{pl} .

Com as equações (4.1) e (4.18) foram obtidos os valores de J_i e Δa_i da tabela 14.

| J(i) | Valor | | Delta a(i) | Incremental | |
|-------|----------|----------------------|-------------|-------------|------|
| J(1) | 2,868174 | [kJ/m ²] | Delta a(1) | 0,55 | [mm] |
| J(2) | 6,328238 | [kJ/m ²] | Delta a(2) | 0,55 | [mm] |
| J(3) | 13,28886 | [kJ/m ²] | Delta a(3) | 0,61 | [mm] |
| J(4) | 27,01829 | [kJ/m ²] | Delta a(4) | 0,33 | [mm] |
| J(5) | 56,01833 | [kJ/m ²] | Delta a(5) | 0,59 | [mm] |
| J(6) | 113,9349 | [kJ/m ²] | Delta a(6) | 0,84 | [mm] |
| J(7) | 233,5259 | [kJ/m ²] | Delta a(7) | 0,22 | [mm] |
| J(8) | 477,6709 | [kJ/m ²] | Delta a(8) | 0,72 | [mm] |
| J(9) | 968,0879 | [kJ/m ²] | Delta a(9) | 0,80 | [mm] |
| J(10) | 1960,836 | [kJ/m ²] | Delta a(10) | 1,26 | [mm] |
| J(11) | 4040,185 | [kJ/m ²] | Delta a(11) | 2,78 | [mm] |

Tabela 14 - Valores de J_i e Δa_i .

Após os tratamento dos dados em planilhas eletrônicas, utilizou-se os resultados de J_{total} e Δa_i para a plotagem da curva R. No entanto, observa-se no gráfico uma curva nada convencional ao formato teórico da curva R.

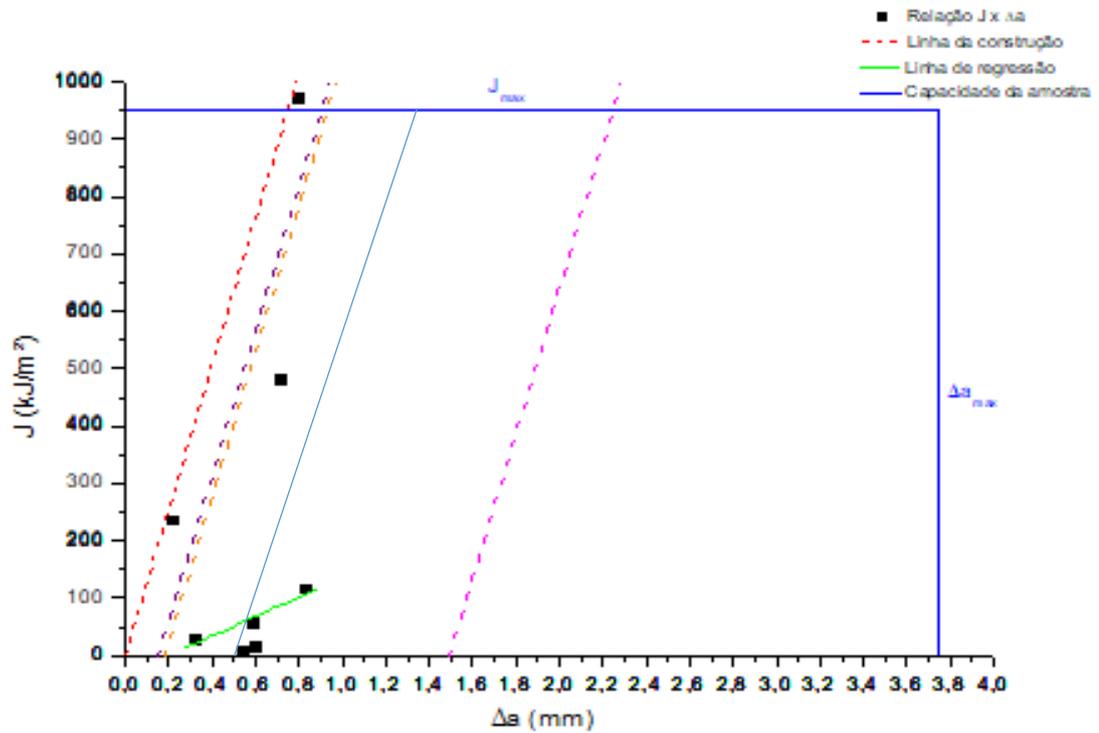


Figura 28 - Curva R experimental.

4.3. Fractografia

A análise fractográfica realizada no MEV da PUC-Rio tem como finalidade a comparação das diferentes regiões do CP fraturado: pré-trinca, propagação da trinca e fratura frágil.

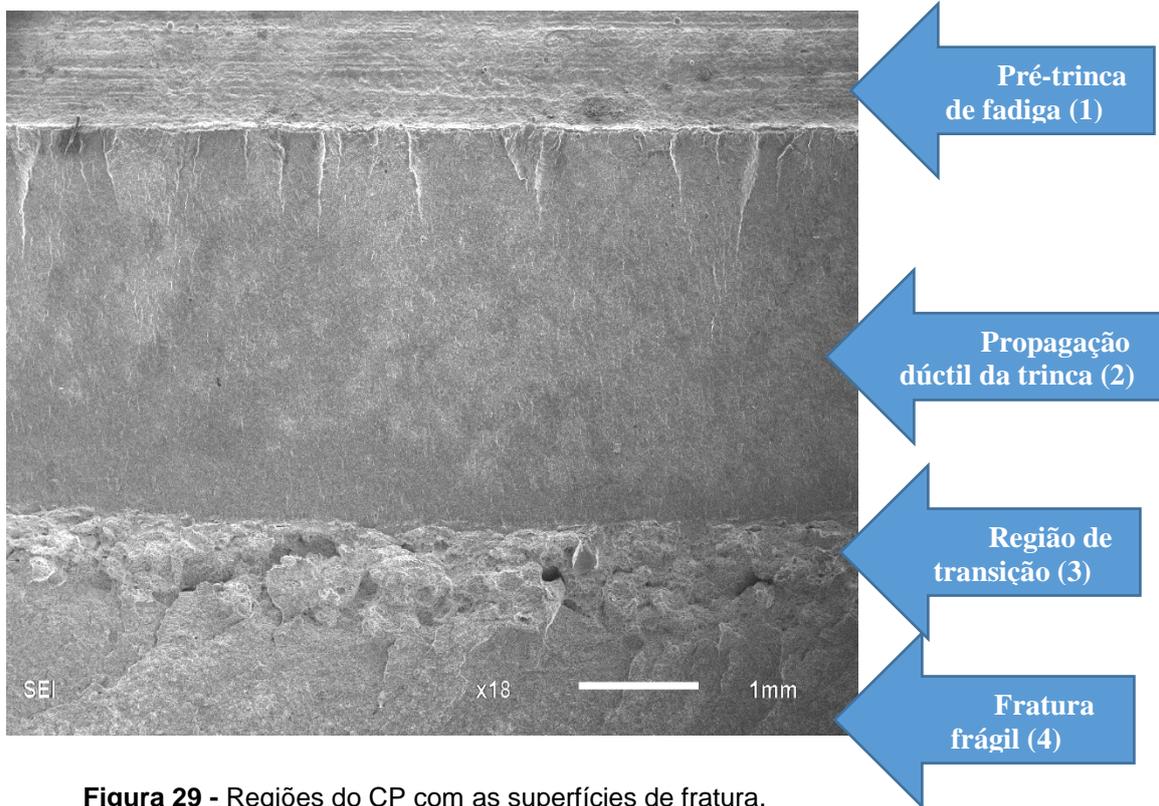


Figura 29 - Regiões do CP com as superfícies de fratura.

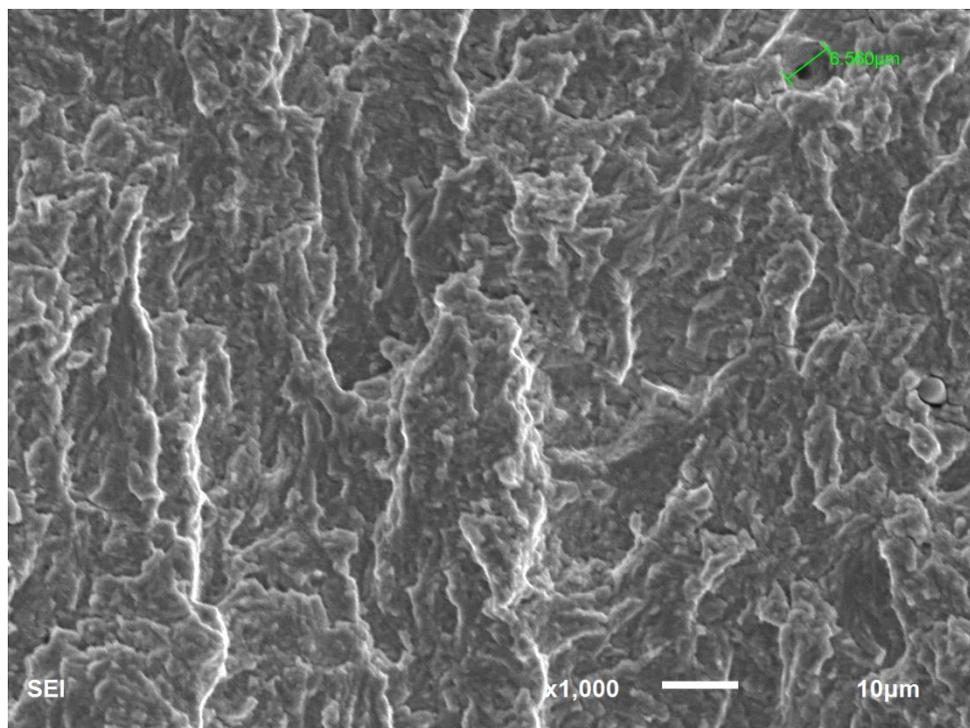


Figura 30 - Análise fractográfica da região (1) da figura 29. Aumento de 1000x.

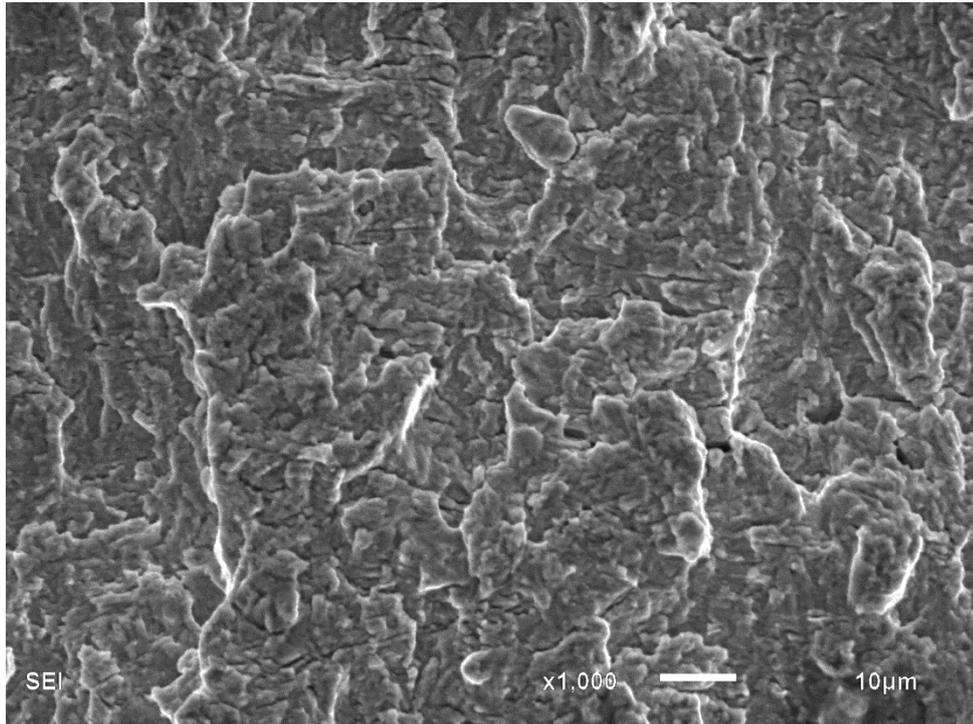


Figura 31 - Análise fractográfica da região (2) da figura 29. Aumento de 1000x.

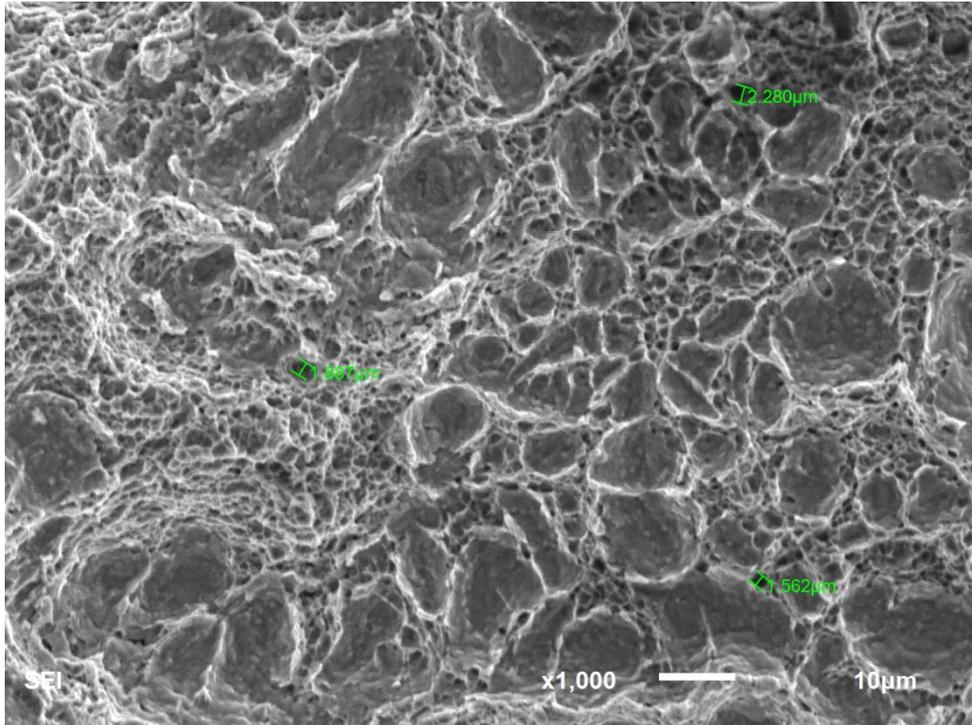


Figura 32 - Análise fractográfica da região (3) da figura 29. Aumento de 1000x.

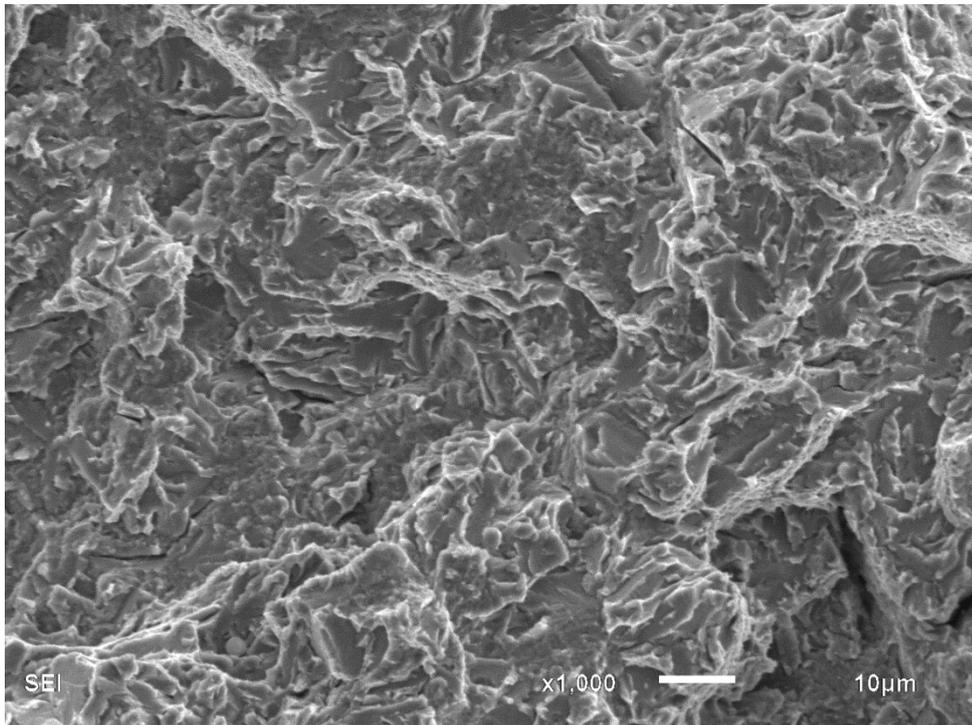


Figura 33 - Análise fractográfica da região (4) da figura 29. Aumento de 1000x.

A formação de pequenos *dimples* na figura 32 e de clivagem na figura 33 indicam que houve fratura frágil na região (4), como pode ser visto na parte mais clara da figura 23 (d).

Na região de separação das partes dos corpos de prova, foi medido o comprimento das trincas através de nove pontos igualmente espaçados ao longo da região fraturada, tal como recomentado pela norma ASTM E1820-17 [20].

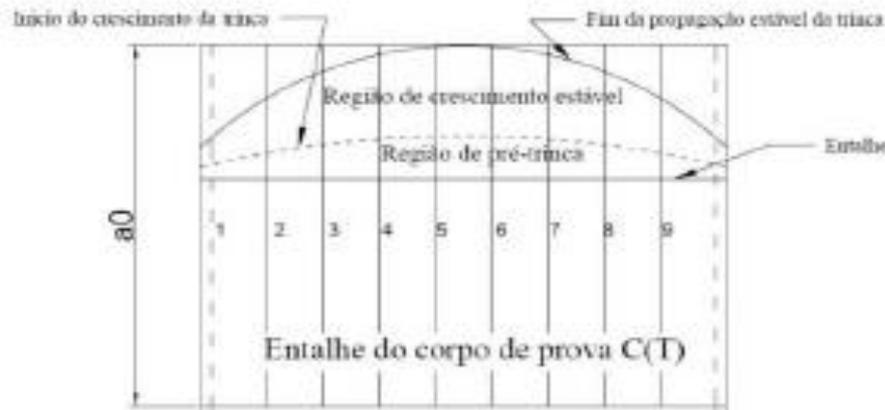


Figura 34 - Representação da região de medições de propagação de trinca [24].

$$m\u00e9dia = \frac{linha (1) + linha (9)}{2} \quad (4.22)$$

$$\Delta a_{real} = \frac{m\u00e9dia + linha (2) + (linha (3) + \dots + linha(8))}{8} \quad (4.23)$$

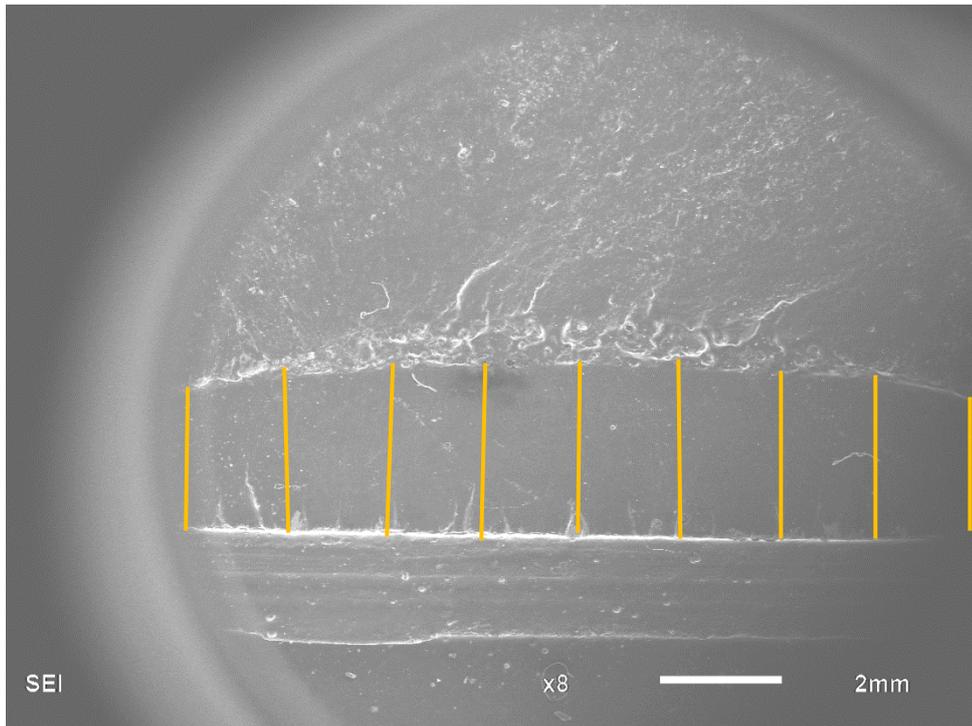


Figura 35 - Medições da propagação de trinca.

Após a análise dos nove pontos obtidos, observa-se que houve uma pequena diferença entre o valor teórico de propagação calculado na tabela 14 (2,78 mm) e o valor medido de forma experimental (aproximadamente 2,33 mm), obtido com as equações (4.22) e (4.23). Apesar desta diferença, o resultado de propagação da trinca é bem satisfatório.

5. Conclusão

O gráfico da curva R obtido experimentalmente (figura 28), não possui uma razão de aspecto em acordo com a curva R teórica, apresentada na figura 27. Possivelmente esta falta de conformidade entre as curvas teórica e experimental está associada com a aplicação de baixas cargas na técnica do *compliance* durante o ensaio de tenacidade, embora a aplicação da técnica tenha seguido o protocolo de rampas de carga estabelecido na norma ASTM E1820-17 [20].

Observa-se que o valor experimental para a propagação da trinca ficou próximo do valor teórico, o que torna satisfatório os critérios da norma para validação dos dados do teste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª ed. ABM, São Paulo, 1988. pg. 21
- [2] GARCIA A.; SPIM J.A.; SANTOS C.A. **Ensaio dos Materiais**. 2ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 2012. pg. 1-5.
- [3] CASTRO J.T.P.; MEGGIOLARO M.A. **Iniciação de Trincas**, vol 1, 2009, pg. 11-117
- [4] ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3ª ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005. 640p.
- [5] WILLIAM D. CALISTER, JR. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª ed. LTC, Rio de Janeiro, 2008.
- [6] **Dimensionamento de Estrutura em Concreto Armado**, 2006. (Apostila)
- [7] Tecnologia e Informações da Construção. Disponível em:
<http://www.consultoriaeanalise.com201102ruptura-de-pilar-devido-flambagem_26.html>
Acesso em: 17 set. 2017.
- [8] FISHER-CRIPPS, Antony C. **Introduction to Contact Mechanics**. 2ª ed. Springer, 2007. pg. 33-44.
- [9] KNOTT. J.F. **Fundamentals of Fracture Mechanics**. 1ª ed. London, Butterworths, 1973. Pg. 94-110.
- [10] EWALDS H.L.; WANHILL J.H. **Fracture Mechanics**. Ed. Edward Arnold, 1975.
- [11] FORTES, C. **Mecânica da Fratura**. ESAB BR. Assistência Técnica Consumíveis, 2003. (Apostila)
- [12] BASTIAN, F.L., CAMINHA, H.M., MORAES M., **Mecânica da Fratura Elasto-Plástica**. Capítulo 4, EMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (Apostila)
- [13] FONTES, O.H.P.M. **Curvas de Resistência e Tenacidade à Fratura de Laminado Fibra-Mtela GLARE em Baixa Temperatura**. Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, 2014, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [14] BROEK, DAVID. **Elementary Engineering Fracture Mechanics**. 3ª ed, Kluwer Academic Publishers, 1982.
- [15] XIAN-KUI ZHU; JAMES A. JOICE. **Review of Fracture Toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) Testing and Standardization**. Engineering Fracture Mechanics, v. 85, 2012.
- [16] CRAVERO, S. **Desenvolvimento de Procedimentos para Avaliação de Curvas J-R em espécimes à Fratura SE(T) Utilizando o Método da Variação da**

Flexibilidade Elástica. Tese de Doutorado em Engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[17] SUMPTER, J.D.G. **An Alternative View of R Curve Testing.** Engineering Fracture Mechanics, v.64, pp. 161-176, 1999.

[18] JANSSEN, M.; ZUIDEMA, J.; WANHILL, R.J.H. **Fracture Mechanics.** Spon Press, 2ª ed., 2004.

[19] SUMPTER, J.D.G.; TURNER, C.E. **Method for Laboratory Determination of J.** Cracks and Fracture, ASTM STP 601, American Society for Testing and Materials, pp, 3-18, 1976.

[20] AMERICAN SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1820:** Standard test for measurement of fracture toughness. Estados Unidos, 2017.

[21] VALIM, M.T. **Tenacidade a Fratura da Junta Soldada Obtida a Arco Submerso de Aço API 5L Grau X80.** Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

[22] AMERICAN SOCIETY FO TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 8M-16a:** Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2016

[23] Silva, T.M. **Aplicação da Integral J em Aços de Diferentes Limites de Escoamento.** Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

[24] **BS 7448** - Part 1: "Standard for Fracture Mechanics Toughness Tests – Method for Determination of KIC, Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials, BRITISH STANDARDS INSTITUTION, London, 1991.