

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGE3M

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA TENACIDADE FRENTE A UMA FALHA
DINÂMICA NO AÇO API 5L X70

Bill Paiva dos Santos

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2017

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGE3M

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DA TENACIDADE FRENTE A UMA FALHA
DINÂMICA NO AÇO API 5L X70

BILL PAIVA DOS SANTOS
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2017

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Reguly
Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros
Dr.^a. Mariane Chludzinski

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Valdireni Florêncio, minha psicóloga e companheira.

Agradeço aos meus pais, meus irmãos, meus avós, a todos os meus afilhados, a meus familiares e amigos.

Agradeço ao Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, em especial aos colegas do Grupo de Ensaios Mecânicos.

Agradeço ao amigo Diego Belato Rosado, pela ajuda na reta final do trabalho.

Agradeço ao professor Luiz Carlos Pereira pela fundamental ajuda na interpretação dos resultados e motivação na reta final do trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker pelos anos de convívio e aprendizado.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS | VIII |
| LISTA DE TABELAS | XI |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS | XII |
| RESUMO | XIV |
| ABSTRACT | XV |
| 1.0 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)..... | 4 |
| 2.2 Ensaio de Impacto Charpy | 5 |
| 2.2.1 Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado | 9 |
| 2.3 Mecânica da Fratura..... | 13 |
| 2.3.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)..... | 14 |
| 2.3.2 Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) | 15 |
| 2.3.3 Integral J | 15 |
| 2.4 Fratura Dinâmica e Dependente doTempo | 18 |
| 2.4.1 Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica (J_{Id} , $J_{0,2}$, J_m)..... | 19 |
| 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 24 |
| 3.1 Material Analisado..... | 24 |
| 3.2 Preparação dos Corpos de Prova | 24 |
| 3.3 Análise da Composição Química..... | 28 |
| 3.4 Ensaio Metalográficos..... | 28 |
| 3.5 Ensaio de Microdureza..... | 28 |
| 3.6 Ensaio de Tração | 30 |
| 3.7 Ensaio de Tenacidade..... | 30 |
| 3.8 Ensaio de Tenacidade à Fratura Estático ($J_{0,2}$, J_m) | 31 |
| 3.9 Ensaio de Tenacidade à Fratura Dinâmica ($J_{0,2}$, J_m)..... | 32 |
| 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 4.1 Análise Química | 34 |

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 4.2 | Ensaio Metalográfico | 34 |
| 4.3 | Ensaio de Microdureza..... | 37 |
| 4.4 | Ensaio de Tração | 38 |
| 4.5 | Ensaio de Tenacidade à Fratura | 40 |
| 4.6 | Análise da Superfície de Fratura..... | 46 |
| 5.0 | CONCLUSÕES | 48 |
| 6.0 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 49 |
| 7.0 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 50 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Idade de Oleodutos (Belalia, Rahmani, Lenkey, Pluvinage, & Azari, 2012)..... | 2 |
| Figura 2 – Distribuição de casos de acidentes nos oleodutos europeus no periodo de 1970-2001. | 3 |
| Figura 3. Evolução dos dos aços API 5L (Malcoln, 2007). | 4 |
| Figura 4. Curva CCT do aço API 5L X70 (ASTM Internatinal, 1991)..... | 5 |
| Figura 5. Equipamento para ensaio Charpy clássico (Garcia, Spim, & Santos, 2012)..... | 6 |
| Figura 6. Corpos de prova Charpy, dos tipos A, B e C (ASTM E23-12c, 2012). | 7 |
| Figura 7. Corpo de prova Charpy com entalhe em V..... | 7 |
| Figura 8. Configuração do equipamento de ensaio necessárias para os cálculos quantitativos (Garcia, Spim, & Santos, 2012). | 8 |
| Figura 9. Curva esquemática Força-Tempo do ensaio de Charpy instrumentado. | 11 |
| Figura 10. Resposta Força-Tempo para um aço de média resistência mecânica (Shockey, 1995). | 11 |
| Figura 11. Curvas características força vs deslocamento classificadas pela norma ISO (Rodrigues, 2001)..... | 13 |
| Figura 12. Representação esquemática do parâmetro Integral J (Zhu & Joyce, 2012) | 17 |
| Figura 13.Singularidade HRR (ANDERSON, 2005; Zanon, 2009) | 18 |
| Figura 14. Determinação da trinca de iniciação na curva Força-deslocamento (Chaouadi, R; Puzzolante, J. L., 2008). | 22 |
| Figura 15.Segmento de tubo de aço API 5L X70 sem costura, utilizado no estudo..... | 24 |
| Figura 16. Identificação do plano de fratura (ISO 12135, 2002) | 25 |
| Figura 17. Representação esquemática da posição e orientação dos corpos de prova no tubo, contendo descrições e quantidades..... | 25 |
| Figura 18. Dimensões para usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tração. ... | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 19. Dimensões para usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tenacidade à fratura quase estática. | 27 |
| Figura 20. Dimensões para usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tenacidade à fratura dinâmica..... | 27 |
| Figura 21. Espectro de emissão ótica, Spectro Lab. | 28 |
| Figura 22. Perfis de microdureza Vickers em tubo sem costura (API Spec 5L, 2007) | 29 |
| Figura 23. Equipamento utilizado para medição dos perfis de microdureza Vickers, marca Instron, modelo Tukon 2100 B. | 29 |
| Figura 24. Máquina de ensaios universal, marca Instron, modelo 5585H utilizada nos ensaios de tração. | 30 |
| Figura 25. Fluxograma de ensaios de tenacidade a fratura e resultados. | 31 |
| Figura 26. Máquina de ensaios, marca MTS, modelo 810 utilizada nos ensaios de tenacidade quase estática..... | 32 |
| Figura 27. Máquina de ensaios de impacto charpy, marca Instron, modelo SI-1D3, utilizada nos ensaios de tenacidade dinâmica. | 33 |
| Figura 28. Metalografias do aço API X70..... | 35 |
| Figura 29. Micrografias do aço API X70..... | 36 |
| Figura 30. Desenho esquemático das direções dos perfis de microdureza Vickers. | 37 |
| Figura 31. Perfil de microdureza Vickers trasnversal ao eixo do tubo. | 38 |
| Figura 32. Perfil de microdureza Vickers radial ao eixo do tubo..... | 38 |
| Figura 33. Curvas tensão-deformação de engenharia do aço API 5L X70. | 39 |
| Figura 34. Curvas <i>P-CMOD</i> do aço API X70 sem costura, na geometria <i>SE(B)</i> | 40 |
| Figura 35. Curvas Força-Deslocamento do aço API X70 sem costura, na orientação X-Y. | 42 |
| Figura 36. Curvas Força-Deslocamento do aço API X70 sem costura, na orientação X-Z. | 42 |
| Figura 37. Parâmetro de tenacidade $J_{\Delta_{init}}$ versus ensaios estáticos e dinâmicos..... | 45 |
| Figura 38. Tenacidade a fratura dinamica x tenacidade a fratura estatica. | 45 |
| Figura 39. Fraturas representativas com descrições de cada região da superfície de fratura, para os ensaios quase-estáticos e dinâmicos. | 46 |

Figura 40. Superficies de fratura de amostra de ensaios estaticos e dinamicos..... 47

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Estatísticas de acidentes de vários modos de transporte de 1998 a 2003. | 1 |
| Tabela 2. Composição Química do aço estudado e e especificação para Tubos PSL 2 com espessura de parede $\leq 25\text{mm}$ (API Spec 5L, 2007). | 34 |
| Tabela 3. Requisitos para os resultados dos ensaios de tração para tubos PSL 2 (API Spec 5L, 2007). | 39 |
| Tabela 4. Resultados dos ensaios de tração para o aço API 5L X70. | 40 |
| Tabela 5. Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (<i>Integral J</i>) da geometria de amostra <i>SE(B)</i> | 41 |
| Tabela 6. Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura dinâmica. | 43 |
| Tabela 7. Propriedades mecânicas para carregamento estático e dinâmico. | 44 |
| Tabela 8. Parâmetros de tenacidade analisados. | 44 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|-----------|---|
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| API | American Petroleum Institute |
| K_{Id} | Fator de intensidade de tensões dinâmico |
| H_q | Altura de liberação do pêndulo |
| h_r | Altura menor que a altura de liberação do pêndulo |
| NBR | Norma brasileira regulamentadora |
| S | Distância do centro do peso até a extremidade do pêndulo |
| B | Ângulo de queda |
| A | Ângulo de rebote |
| E | Energia |
| V | Velocidade do pêndulo no instante do impacto |
| M | Massa do pêndulo |
| G | Aceleração da gravidade |
| P_{GY} | Força que causa o limite de escoamento |
| P_{max} | Força máxima |
| P_F | Força de fratura |
| E_1 | Energia total na fratura baseada na velocidade constante do pêndulo |
| V_0 | Velocidade inicial do pêndulo |
| P | Força instantânea |
| T | Tempo |
| t_0 | Tempo para o início da deformação do corpo de prova |
| S | Deslocamento equivalente |
| MFLE | Mecânica da fratura linear elástica |
| K_{Ic} | Valor crítico do fator de intensidade de tensões |
| Σ | Tensão aplicada |
| Y | Fator de forma |
| K | Fator de intensidade de tensões |
| A | Tamanho da trinca |

| | |
|-----------------|--|
| MFEP | Mecânica da fratura elasto-plástica |
| CTOD | <i>Crack tip opening displacement</i> |
| W | Densidade de energia de deformação |
| T_i | Componentes do vetor de tração |
| u_i | Componentes do vetor de deslocamento |
| Ds | Incremento do comprimento ao longo do contorno |
| A | Constante adimensional |
| ε_0 | σ_0/E |
| σ_0 | Tensão de escoamento |
| H | Expoente de encruamento |
| J_{Id} | Tenacidade à fratura dinâmica |
| K_{Id} | Fator de intensidade de tensões dinâmica |
| w_M | Energia até a força máxima |
| C_{ND} | Compliância adimensional do corpo de prova |
| C_T | Compliância total do sistema |
| t_{GY} | Tempo para carga de escoamento |
| E_T | Energia total de fratura |
| P_M | Força máxima |
| W | Largura do corpo de prova |
| B | Espessura do corpo de prova |
| \dot{K} | Taxa de intensidade de tensão |
| K_{Jd} | Intensidade de tensão dinâmica em condições elasto-plásticas |
| t_M | Tempo para a ocorrência do escoamento dinâmico |
| ARBL | Alta resistência e baixa liga |
| kN | Kilonewton |
| HV | Dureza Vickers |
| CMOD | Abertura na boca da trinca |
| SE(B) | Single edge bending |
| MEV | Microscópio eletrônico de varredura |

RESUMO

Os ensaios mecânicos são mundialmente empregados para caracterização e implementação de diversos materiais. Dentre a vasta gama de ensaios existentes, o ensaio de impacto convencional é consagrado no meio científico, industrial e na indústria do óleo e gás onde a sua função básica é determinar a energia total absorvida na fratura de um corpo-de-prova entalhado conforme as recomendações da norma ASTM E23. Entretanto, a energia global absorvida possui um valor de uso muito limitado e ela normalmente não é aceita como um indicador quantitativo da resistência à fratura do material. Assim, com a utilização de uma máquina de ensaios de impacto instrumentada, torna-se possível a aquisição de um maior número de informações obtidas através de um ensaio de impacto clássico, como por exemplo, o estudo detalhado da integridade estrutural de materiais utilizados na fabricação de dutos. Desta maneira, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a tenacidade de um duto de aço API 5L X70 sem costura, com 11 polegadas de diâmetro externo e ½ polegada de parede, frente a uma falha dinâmica, através da tenacidade a fratura, comparando carregamento estático com dinâmico através dos resultados de $J_{0,2}$ e J_m . Entretanto a tenacidade a fratura é consideravelmente afetada para altas taxas de deformação, com redução de aproximadamente 30% nas amostras com orientação de entalhe X-Y (defeito lateral passante) e de aproximadamente 40% nas amostras com orientação de entalhe X-Z (defeito superficial), demonstrados através do $J_{\Delta ini}$.

Palavras chave: Degradação, aço API 5L X70 sem costura, tenacidade à fratura, tenacidade a fratura dinâmica.

ABSTRACT

Mechanical testing are worldwide employed for materials characterization and implementation. Among the large group of the existing tests, the conventional impact test has been used for industry and academic fields, especially oil and gas engineering in order to evaluate the energy absorbed of a notched sample, according to the ASTM E23 standard. However, the energy absorbed has a limited use and is not usually accepted as a quantitative indicator of the fracture toughness. Thus, by using an instrumented impact test, there will be an increasing in the amount of information obtained than the traditional impact test and, therefore, a detailed study of the structural integrity of materials can be carried out for manufacturing of pipes. Hence, this study aims to characterize a pipe steel API 5L X70 seamless, with 11 inches outside diameter and ½ inch of wall, against dynamic failure through fracture toughness, comparing static loading with dynamic through the results of $J_{0,2}$ and J_m . However, fracture toughness is considerably affected at high deformation rates, with a reduction of approximately 30% in X-Y notch (through thickness defect) and approximately 40% in X-Z notch (surface defect) samples, demonstrated for $J_{\Delta limit}$.

Key words: Degradation, steel API 5L X70 seamless, fracture toughness, dynamic fracture toughness.

1.0 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1970, o ensaio de Charpy instrumentado tem sido muito estudado, Ireland (1977), nos Estados Unidos, aprofundou o estudo da instrumentação aplicada ao ensaio Charpy convencional, tornando-se um ícone no assunto. Conhecer a resposta do ensaio de impacto instrumentado era fundamental para aplicar os resultados obtidos na Mecânica da Fratura e conseguindo assim, determinar o fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id} . Porém, o grande obstáculo para determinar o fator, ainda era a metodologia a ser transposto, já que considerações monotônicas foram aplicadas nos resultados do impacto instrumentado e não considerava os efeitos inerciais no corpo de prova (Kruger, 2009).

No ano de 1982, Böhme e Kalthoff desenvolveram uma metodologia que se baseia no tempo de fratura e no conceito da *Impact Response Curve* (Curva de resposta ao impacto) que determinava o fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id} . Atualmente, esta é largamente utilizada na comunidade científica e em aplicações de engenharia. O estudo do fator K_{Id} é extremamente necessário na análise de estruturas ou componentes mecânicos submetidos a carregamentos dinâmicos. Normalmente estes carregamentos ocorre em gradientes de temperatura elevados, queda de pressão acentuada e movimentos de fluídos em dutos (Kruger, 2009).

Dutos constituem uma via massiva para o transporte de óleo e gás (derivados de petróleo) com o menor número de acidentes em relação as quantidades transportadas. Além deste alto grau de segurança, os dutos enterrados no solo, não têm impactos visuais ou acústicos e não produzem vapores ou vapores que possam ser responsáveis pela poluição do ar (7th EGIG-report 1970-2007, 2008).

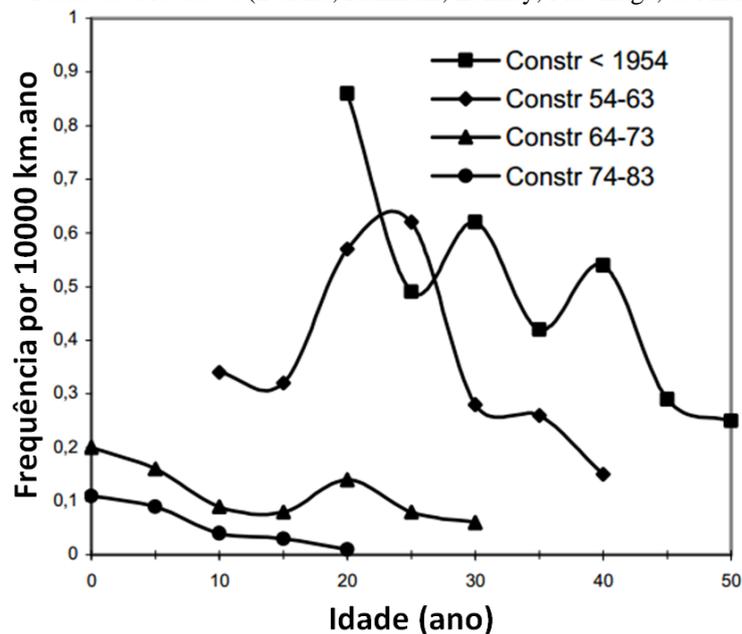
Tabela 1. Estatísticas de acidentes de vários modos de transporte de 1998 a 2003.

| Modo de Transporte | Acidentes (Acid./ano) | Quantidades Transportadas (Milhões de toneladas/ano) | Relação (Acid./Milhões de Toneladas) |
|---------------------------|---------------------------------|--|--|
| Estrada | 19 | 27 | 0,70 |
| Ferrovia | 3,5 | 8,5 | 0,41 |
| Marítimo | 1,2 | 6,1 | 0,20 |
| Fluvial | 0,2 | 1,3 | 0,15 |
| Oleodutos | 0,2 | 7,7 | 0,03 |

No entanto, até hoje muitos oleodutos antigos ainda estão operando e atingiram ou superaram sua idade limite definida pelo projeto. Estudos estatísticos mostram que:

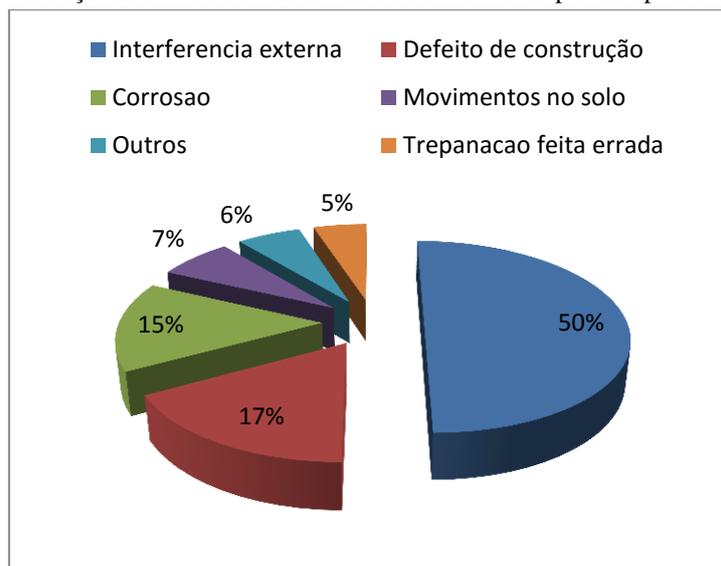
- A frequência de ruptura de dutos construídos antes de 1964 é significativamente maior do que dos dutos construídos após essa data, Figura 1.

Figura 1 – Idade de Oleodutos (Belalia, Rahmani, Lenkey, Pluvillage, & Azari, 2012).



- O risco de falha de um gasoduto aumenta com o tempo de exploração por uma contínua degradação do material.
- Durante a vida útil do duto, podem ocorrer eventos imprevisíveis, tais como interferência externa, movimento de solo, defeitos de construção, corrosão, etc. A partir dos acidentes registrados durante o período de 1970/2001, a maior parte das falhas foram causadas por interferências externas, Figura 2.

Figura 2 – Distribuição de casos de acidentes nos oleodutos europeus no período de 1970-2001.



Fonte: Modificado de (Belalia, Rahmani, Lenkey, Pluvinage, & Azari, 2012).

Os dutos estão sob várias ações de carregamentos, como cargas estáticas (compactação e reação de fundação), cargas cíclicas (cargas de tráfego e pressão de serviço) e cargas de impacto devido a interferência externa, além da influência do ambiente envolvente e dos processos de construção (Belalia, Rahmani, Lenkey, Pluvinage, & Azari, 2012).

Tendo em vista o equipamento instrumentado e o interesse do LAMEF no estudo de dutos, este trabalho versa avaliar a degradação da tenacidade de um duto de aço API 5L X70 sem costura, frente a uma falha dinâmica, através da tenacidade a fratura, comparando carregamento estático com dinâmico através dos resultados $J_{0,2}$ e J_m e J_{Ainit} .

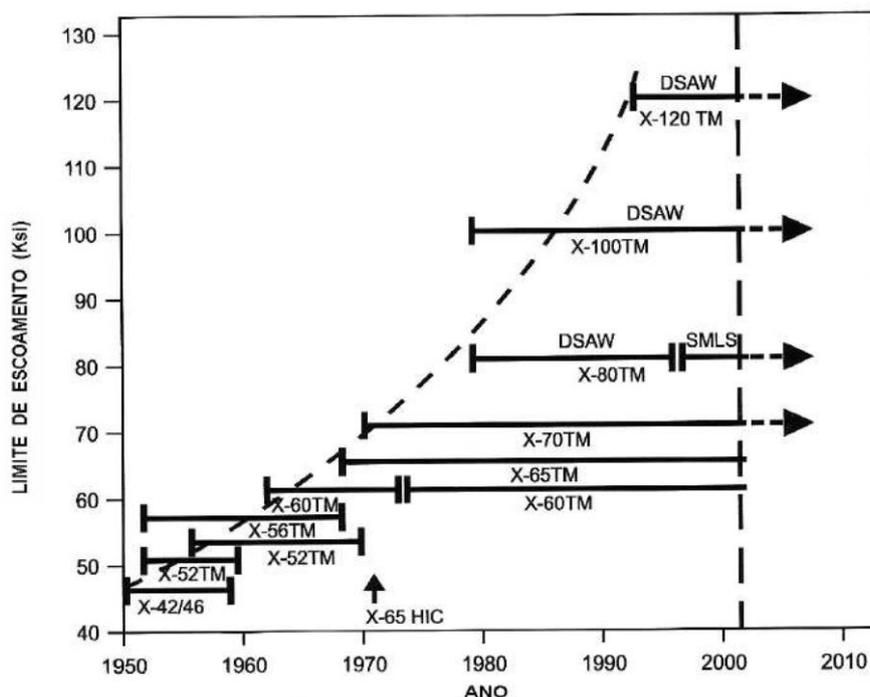
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Os aços ARBL são constituídos por aços com uma composição química especialmente desenvolvida, para obtenção de elevados valores em suas propriedades mecânicas, formando assim, um grupo específico. O emprego destes aços oferece uma redução de custos devido a eliminação de tratamentos térmicos posteriores, com a finalidade de melhorar a qualidades das propriedades mecânicas destes (Rosa L. B., 2011).

A norma *API 5L Specification*, descreve os ARBL utilizados na fabricação de tubos para utilização em gasodutos e oleodutos. Para o aço API 5L X70, por exemplo, a norma especifica que este apresenta um limite de escoamento mínimo igual 70 Ksi (485 Mpa) (API Spec 5L, 2007). Observa-se que a evolução dos processos termomecânicos e das técnicas de fabricação dos tubos, se refletiu no contínuo aumento da resistência mecânica destes aços, desde a utilização do API 5L X42 na década de 1950, até o API 5L X120 dos dias atuais (Rosa L. B., 2011).

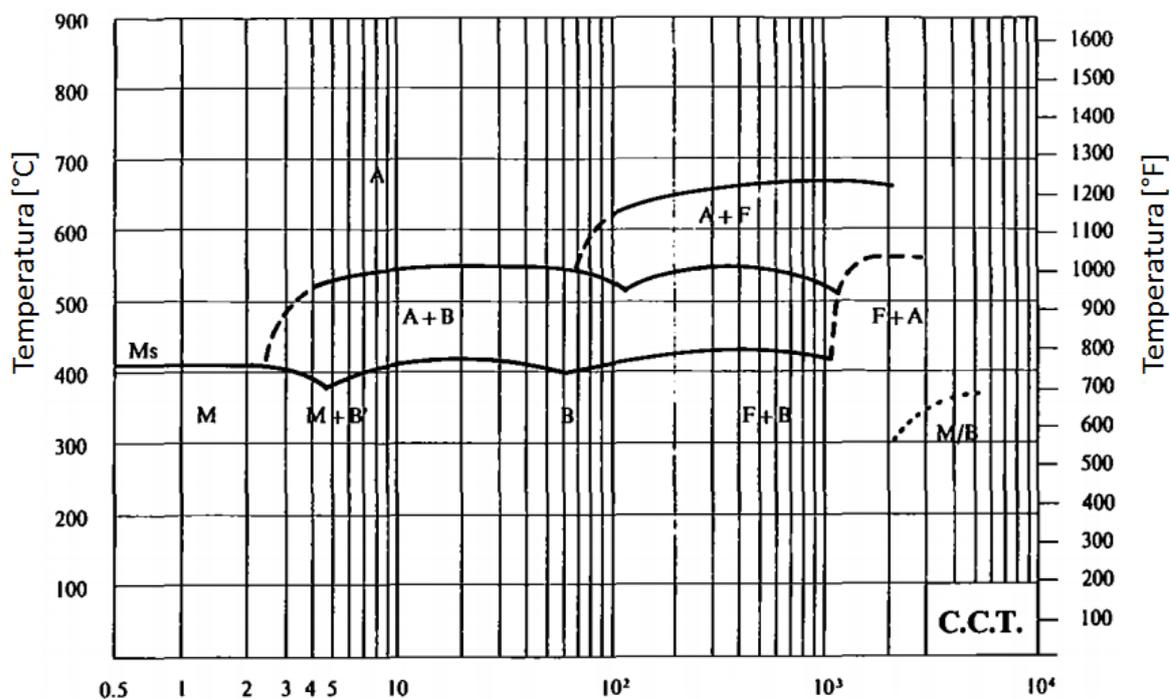
Figura 3. Evolução dos dos aços API 5L (Malcoln, 2007).



TM = Processo Termomecânico. **SMLS** = (Seamless) Processo sem costura. **DSAW** = (Double Sided Arc Welding Process). Solda por Arco em dois Lados.

Transformações metalúrgicas podem ser observadas durante a deformação a quente, mecanismos de endurecimento (como o encruamento) e mecanismos de amaciamento (como a recuperação e a recristalização) que podem operar conjuntamente na estrutura do material metálico (Malcoln, 2007). Esses mecanismos influenciam diretamente os níveis de ductilidade e de resistência mecânica que os materiais metálicos apresentam durante a deformação a quente e previstas as fases do material no diagrama CCT (Figura 4).

Figura 4. Curva CCT do aço API 5L X70 (ASTM International, 1991).
 Microestruturas do aço Mn-V (como laminado)
 Composição: 0,07% C – 1,90% Mn – 0,24% Si – 0,006% S – 0,010% P
 – 0,43% V – 0,06% Al – 0,009% N
 Austenitizado a 1150°C (2102°F)



Fonte: ASTM International: Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels (modificado pelo autor).

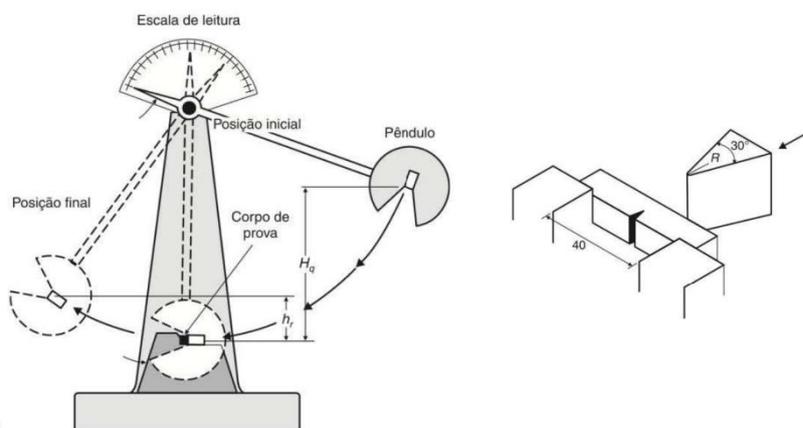
2.2 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado o estudo da fratura frágil de materiais. O resultado é representado pela quantidade de energia absorvida pelo corpo de prova, mas não fornece indicações seguras do comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Por outro lado, permite a observar diferenças de comportamento entre materiais que não podem ser observadas através de um ensaio de tração (Garcia, Spim, & Santos, 2012).

Um martelo pendular é liberado a partir de uma posição padronizada e de uma altura fixada (H_q). Após ser liberado, sua ponta choca-se e fratura o corpo de prova no entalhe, que atua como um concentrador de tensões. O pêndulo continua seu movimento após o choque, até uma altura (h_r) menor que a altura de liberação do pêndulo (H_q). A energia absorvida no impacto é determinada a partir da diferença entre H_q e h_r , ambas medidas na escala do equipamento (Figura 5).

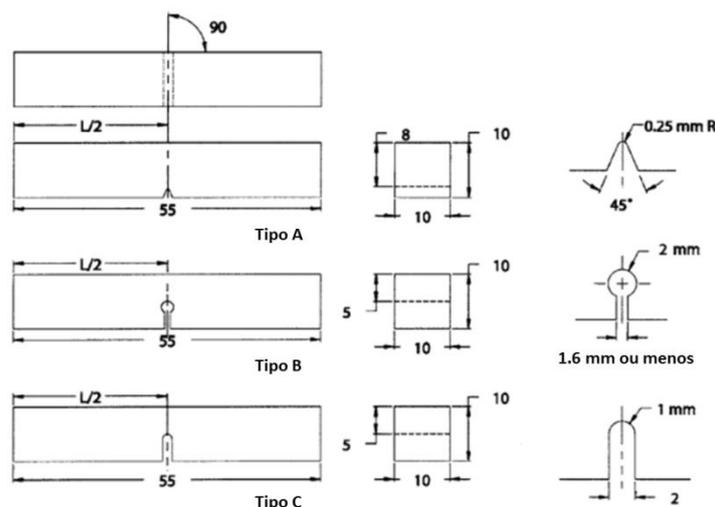
Os requisitos essenciais para a realização do ensaio são: corpo de prova padronizado, suporte rígido no qual o corpo de prova é apoiado ou engastado, pêndulo com massa conhecida solto de uma altura suficiente para fraturar totalmente o material e um dispositivo de escala para medir as alturas antes e depois do impacto do pêndulo. As energias de impacto, no ensaio convencional, são de interesse no aspecto comparativo, entretanto, seus valores absolutos isoladamente não representam informação quantitativa das características dos materiais (Garcia, Spim, & Santos, 2012).

Figura 5. Equipamento para ensaio Charpy clássico (Garcia, Spim, & Santos, 2012)



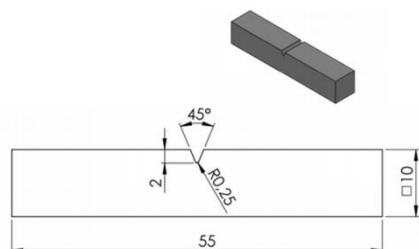
Uma grande variedade de geometrias de corpos de prova são utilizadas nos ensaios de impacto Charpy. A norma ASTM E23 indica o emprego de algumas geometrias mais utilizadas e geralmente mais satisfatórias (Figura 6).

Figura 6. Corpos de prova Charpy, dos tipos A, B e C (ASTM E23-12c, 2012).



O corpo de prova Charpy mais utilizado, possui comprimento de 55mm, uma seção quadrada de lado de 10mm e apresenta um entalhe em V, com ângulo de abertura igual a 45° e comprimento de 2mm, o raio da raiz do entalhe mede 0,25mm (Figura 7). A amostra é apoiada como uma viga no suporte de apoio. O impacto ocorre no lado oposto ao do entalhe por um pêndulo. O corpo de prova é forçado a se dobrar a uma elevada taxa de deformação (Kruger, 2009).

Figura 7. Corpo de prova Charpy com entalhe em V.

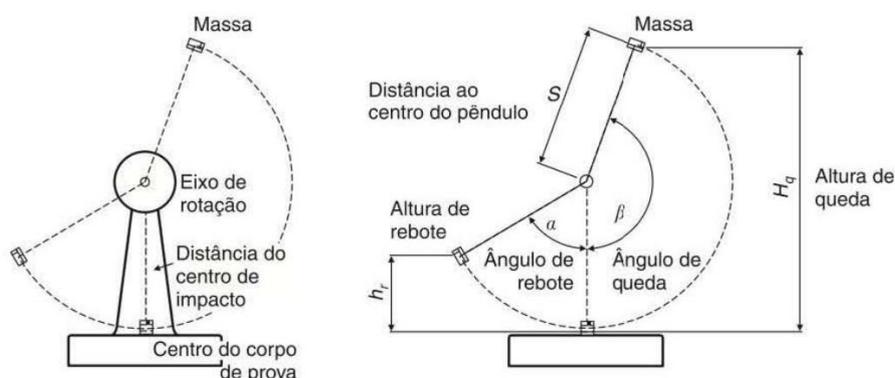


Fonte: O autor.

Quando o interesse do ensaio reside na determinação das transformações sofridas pelo material em função da variação da temperatura, o ensaio Charpy mostra-se mais apropriado e versátil, devido à facilidade de posicionamento do corpo de prova na máquina. Para esse procedimento de ensaio, o corpo de prova deve ser mantido na temperatura desejada por pelo menos 10 minutos (NBR 6157, 1980), no caso de meios de aquecimento líquidos, e 30 minutos para o caso de meios gasosos, com o ensaio realizado em tempos inferiores a cinco segundos, desde a retirada do corpo de prova e sua colocação na máquina (ASTM E23-12c, 2012). O dispositivo empregado para manusear os corpos de

prova não deve alterar a temperatura do mesmo, e são recomendadas tenazes, pinças ou outros dispositivos com pequena área de contato (Garcia, Spim, & Santos, 2012).

Figura 8. Configuração do equipamento de ensaio necessárias para os cálculos quantitativos (Garcia, Spim, & Santos, 2012).



A determinação da altura do pêndulo após a fratura do corpo de prova pode ser feita diretamente pela sua elevação ou por cálculos baseados no ângulo do pêndulo (Figura 8), por (Garcia, Spim, & Santos, 2012):

$$H_q = S \times (1 - \cos\beta)$$

$$H_q = S \times (1 - \cos\beta) \quad \text{em função do ângulo de queda} \quad \text{Equação 1}$$

e

$$h_r = (1 - \cos\alpha) \quad \text{em função do ângulo de rebote} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

S = distância do centro do peso até a extremidade do pêndulo (m);

β = ângulo de queda (rad);

α = ângulo de rebote (rad).

Para determinar a velocidade de impacto, desprezando-se o atrito do peso com o ar, utiliza-se a seguinte relação de energia no instante de impacto:

$$E_{potencial} = E_{cinética} \quad \text{Equação 3}$$

ou

$$M \times g \times H_q = \frac{M \times V^2}{2} \quad \text{Equação 4}$$

ou

$$V = \sqrt{2 \times g \times S \times (1 - \cos\beta)} = \sqrt{2 \times g \times H_q} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

E = energia (J);

V = velocidade do pêndulo no instante do impacto (m/s);

M = massa do pêndulo (kg);

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

A energia absorvida no impacto corresponde à diferença entre a energia potencial do pêndulo na altura de queda e a energia potencial do pêndulo na altura de rebote, dada por (Garcia, Spim, & Santos, 2012):

$$E_{\text{impacto}} = M \times g \times (H_q - h_r) \quad \text{Equação 6}$$

Em relação às informações que podem ser obtidas do ensaio de impacto, tem-se:

- energia absorvida: medida diretamente pela máquina;
- contração lateral: quantidade de contração em cada lado do corpo de prova fraturado;
- aparência da fratura: determinação da porcentagem de fratura frágil ocorrida durante o processo de ruptura por métodos como medida direta em função do aspecto da superfície de fratura, comparação com resultados de outros ensaios ou ensaios-padrão, ou através de fotografias da superfície e interpretação adequada (Garcia, Spim, & Santos, 2012).

2.2.1 Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado

A instrumentação adicional, aplicada à máquina de ensaio Charpy, permite o monitoramento da resposta força-tempo da deformação e fratura do corpo de prova. A vantagem desta instrumentação baseia-se no aumento do número de informações obtidas com um baixo custo, facilidade de execução dos corpos de prova e ensaios simples. A forma de instrumentação mais comumente utilizada é a aplicação de extensômetros elétricos no martelo pendular, que funciona como elemento sensível do comportamento força em função do tempo de deformação e fratura do corpo de prova ensaiado (Kruger, 2009).

A curva típica *Força-Tempo* pode trazer como informações a força no escoamento dinâmico, força máxima e força na fratura, e tempo para início da fratura frágil (Figura 9). A parte da curva P_{GY} que corresponde a carga que causa um escoamento geral no corpo de prova, e o início da deformação plástica, que só existe quando o material rompe de forma dúctil. A força máxima P_{max} corresponde ao início da contração do entalhe. A força de fratura P_F é a carga de ruptura, que cai subitamente quando a fratura ocorre por clivagem. Quanto menor for a ductibilidade do material, menos distintas são essas cargas. P_F pode ocorrer em qualquer estágio, não obrigatoriamente na posição onde é mostrada na Figura 9. A fratura frágil ocorre quando uma tensão crítica de clivagem é atingida sob a raiz do entalhe, que poderá ocorrer mesmo antes de P_{GY} quando a temperatura do ensaio for muito baixa (Souza, 1995).

Para determinar a energia na fratura de uma amostra deve-se integrar a curva *Força-Deslocamento* adquirida. No entanto, só é possível calcular a energia de fratura de uma curva *Força-Tempo*, se a velocidade do pêndulo é conhecida (Hertzberg, 1995). Assumindo que esta velocidade seja constante durante todo o ensaio, a energia de fratura é calculado por (Rodrigues, 2001):

$$E_1 = V_0 \int_0^t P dt \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

E_1 = energia total na fratura baseada na velocidade constante do pêndulo (J);

V_0 = velocidade inicial do pêndulo (m/s);

P = força instantânea (N);

t = tempo (s).

Na realidade, o pressuposto da velocidade constante do pêndulo V não é válida. Em vez disso, V diminui proporcionalmente ao carregamento instantâneo da amostra (Hertzberg, 1995). Através disso:

$$E_t = E_1 \times (1 - \alpha) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

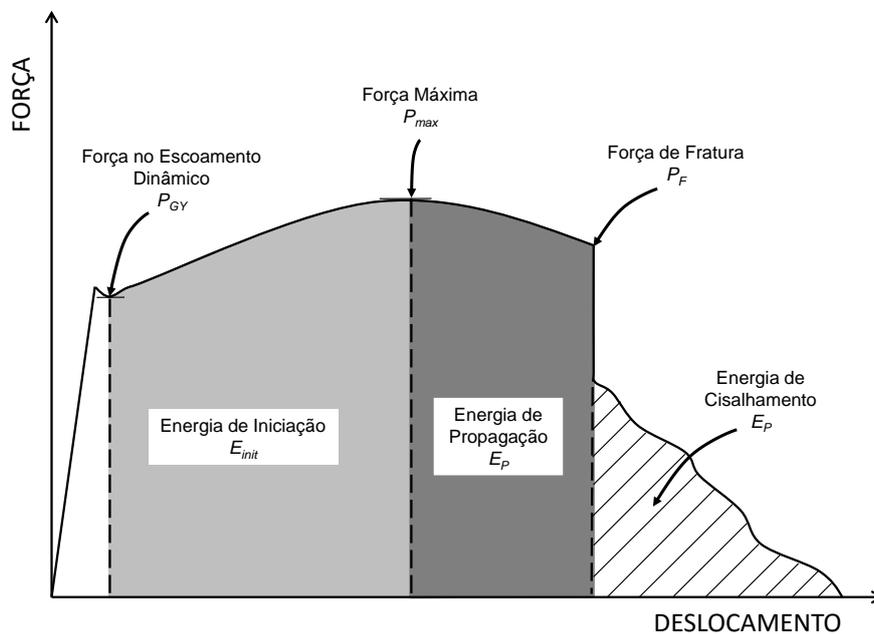
E_t = energia total na fratura;

$$E_1 = V_0 \int_0^t P dt$$

$$\alpha = \frac{E_1}{4 \times E_0}$$

E_0 = energia inicial do pêdulo

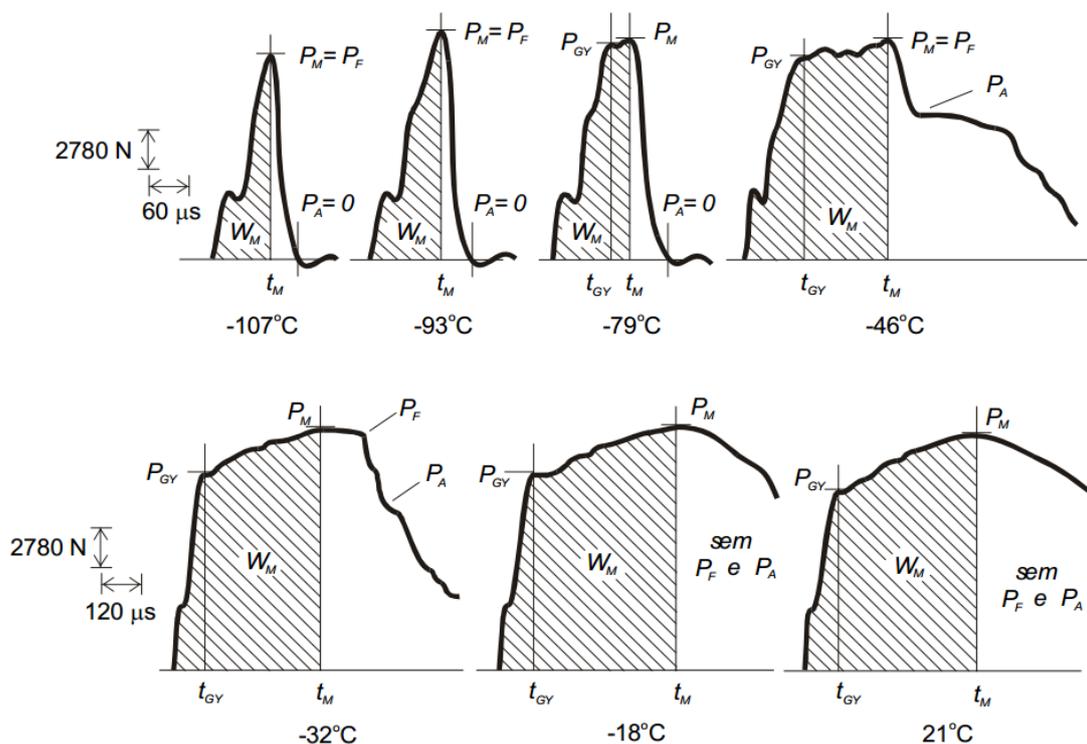
Figura 9. Curva esquemática Força-Tempo do ensaio de Charpy instrumentado.



Fonte: O autor.

A possibilidade de separar a energia total absorvida em componentes distintas aumenta o número de informações obtidas por meio da instrumentação. As curvas Força-Tempo-Temperatura (Figura 10) ilustram os estágios de fratura (Kruger, 2009).

Figura 10. Resposta Força-Tempo para um aço de média resistência mecânica (Shockey, 1995).



Assumindo o pêndulo como um elemento suficientemente rígido de massa m , o deslocamento é obtido numericamente da seguinte forma:

$$v(t) = V_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

V_0 = velocidade de impacto no momento em que o martelo atinge o corpo de prova;

t_0 = tempo para o início da deformação do corpo de prova.

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

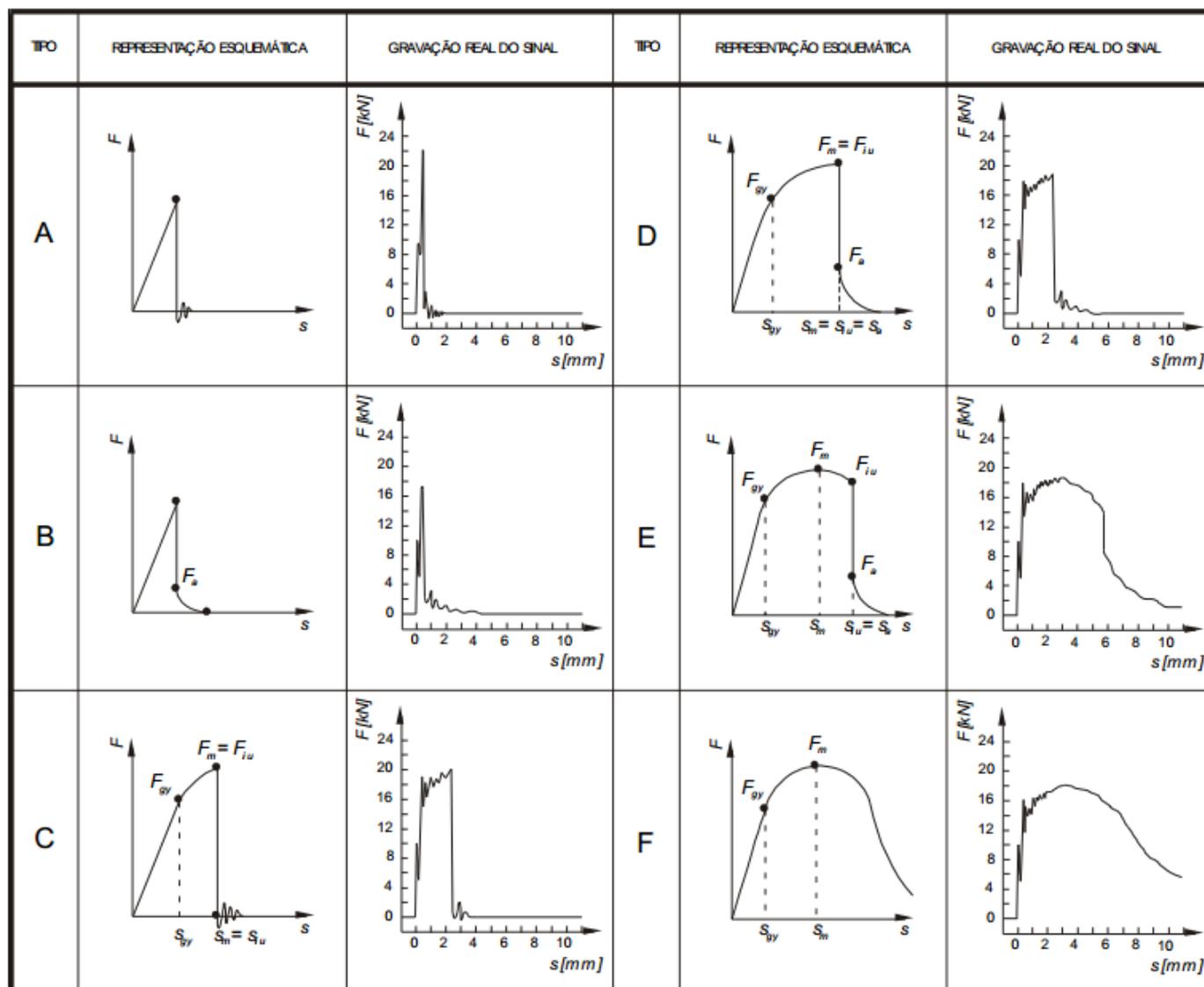
S = deslocamento equivalente.

A instrumentação permite separar duas componentes de energia e medir a força aplicada por todo o evento da fratura, mas não é possível a determinação direta da componente responsável pela iniciação da trinca para casos dúcteis. A avaliação das curvas força vs deslocamento para a determinação das forças utilizadas nos cálculos da tenacidade é feita considerando-se a classificação dos diversos formatos dos sinais, enquadrados pela própria ISO como do tipo A ao F (Figura 11). Os tipos A e B indicam que a energia do

material ensaiado encontra-se no patamar inferior da curva de transição dúctil-frágil do ensaio Charpy clássico. As curvas do tipo C, D e E indicam que a energia encontra-se na região de transição. Finalmente, na curva do tipo F, a energia localiza-se no patamar superior.

Nas curvas do tipo A, ocorre apenas a propagação instável da trinca. Para os tipos B, C, D e E, podem ocorrer as propagações estáveis e instáveis da trinca. Com as curvas do tipo F, apenas a propagação estável da trinca acontece (Rodrigues, 2001).

Figura 11. Curvas características força vs deslocamento classificadas pela norma ISO (Rodrigues, 2001).



2.3 Mecânica da Fratura

A mecânica da fratura é a parte da ciência que se habilitou no estudo do comportamento de materiais, sujeitos a carregamentos conhecidos, na presença de um

defeito. Com a crescente responsabilidade dos projetos de alto risco, como por exemplo, estruturas submarinas para prospecção de petróleo, tem-se exigido das equipes de engenharia, uma maior responsabilidade e grau de confiabilidade na capacidade dos materiais de suportarem as solicitações em serviço, sem que ocorra fratura frágil.

A engenharia convencional leva em consideração em projetos estruturais, basicamente a tensão máxima aplicada e a resistência mecânica do material. Essa abordagem é largamente empregada e considera o material como um meio contínuo (isento de defeitos), isotrópico e homogêneo. Assim, assumindo-se que o material seja adequado para o emprego em serviço (tenha resistência mecânica adequada), considerando-se que a solicitação externa seja menor do que o critério de escoamento adotado mais um fator de segurança.

Considerando os conceitos da abordagem de mecânica da fratura em projetos, foi possível considerar que os materiais estruturais não são contínuos e incorporou-se uma variável na análise que é o tamanho do defeito no sólido ou na estrutura. Foi a partir de então que definiu-se a propriedade tenacidade como aquela que descreve a resistência a propagação de um defeito do tipo trinca, que representa a capacidade do material em absorver energia mecânica sem fraturar. Neste contexto, “a tenacidade é uma propriedade tão relevante do material quanto a própria tensão limite de escoamento” (Hippert Jr, 2004).

Até a primeira metade do século XX, os estudos sobre fratura dos materiais foram baseados na abordagem proposta por Griffith (1923) para materiais frágeis. Para Griffith, taxa que aumenta a energia de superfície do sólido (resultante da criação de novas superfícies livres pelo avanço da trinca) é igual à soma da taxa de diminuição da energia elástica armazenada ao redor do defeito, e do trabalho realizado pelas cargas externas aplicadas. Assim, a fratura ocorre sempre que a tensão aplicada for suficiente para compensar as parcelas de energia consumidas com o avanço da trinca. Entretanto, “esta abordagem é de aplicação restrita em Engenharia porque envolve grandezas cuja determinação experimental não é trivial (energia superficial do material), e de difícil utilização como dado de projeto” (ANDERSON, 2005; Hippert Jr, 2004).

2.3.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

A MFLE, de modo geral, permite a determinação do tamanho crítico de trincas, apenas em casos em que o escoamento localizado à frente da trinca está restrito a uma região muito reduzida com relação às dimensões do componente que a contém. A restrição

é função de propriedades do material, fatores geométricos ou fatores ambientais. Nessas condições, a trinca propagar-se-a muito rapidamente e a deformação plástica na sua ponta será nula ou muito restrita. Caracteriza-se por ser uma falha catastrófica do componente.

O parâmetro para avaliar a tenacidade à fratura de materiais metálicos na MFLE é o valor crítico do fator de intensidade de tensões (K_{IC}), sendo este intrínseco do material. Com o K_{IC} , depende diretamente do fator geométrico do componente ou corpo de prova avaliado (Y), da tensão aplicada (σ), e do tamanho da trinca (a). A Equação 11 define o fator de intensidade de tensões para uma forma genérica de trinca, cujo fator de forma é $Y=1$ (ANDERSON, 2005).

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Equação 11

Onde:

K é o fator de intensidade de tensões;

Y é o fator de forma;

σ é a tensão aplicada;

a é o tamanho da trinca.

2.3.2 Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP)

“A MFEP é a alternativa desenvolvida para o estudo de fratura em materiais de comportamento não-linear, que exibem considerável plasticidade na ponta da trinca” (Hippert Jr, 2004). Para materiais com este comportamento, os critérios vistos anteriormente (de K), impossibilitam o emprego das soluções da MFLE.

A integral J representa um parâmetro de energia na MFEP, que descreve a distribuição de tensões e deformações na região ao redor da trinca. Sendo um dos principais métodos que procuram resolver problemas de fratura em materiais com tenacidade elevada, que apresentam deformação plástica na ponta da trinca (ANDERSON, 2005).

2.3.3 Integral J

A Integral de contorno J vem sendo muito empregada como um parâmetro de caracterização de fratura de materiais. considerando a deformação elasto-plástica como uma deformação elástica não linear, *Rice* (Rice, 1968) forneceu a base para uma melhor

compreensão da metodologia da mecânica da fratura fora das condições de contorno válidas na MFLE (ANDERSON, 2005).

Baseado no conceito de energia, *Rice* apresentou uma integral de contorno com caminho independente pra a análise de trincas. Ele mostrou que o valor dessa integral, na qual ele chamou de J , é igual à taxa de alívio de energia em um corpo elástico não linear que contenha uma trinca. Além disso, *Hutchinson*, *Rice* e *Rosengren* também mostraram que o J caracteriza unicamente as tensões e as deformações na ponta da trinca em materiais não lineares. Assim, a Integral J pode ser vista tanto como um parâmetro energético, comparável com o G (*Griffith*), quanto com um parâmetro de intensidade de tensões, comparável com o K (ANDERSON, 2005).

Na Figura 9, o caminho arbitrário ao redor da ponta da trinca utilizado para definir a Integral J é apresentado. Foi através da integração da densidade de energia de deformação na ponta da trinca que *Rice* (*Rice*, 1968) desenvolveu os cálculos para mostrar que a Integral J independente do caminho ao redor da ponta da trinca Γ , baseando-se inicialmente na Equação 12 (Haag, 2012; ANDERSON, 2005):

$$J = \oint_{\Gamma} \left(w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

w = densidade de energia de deformação;

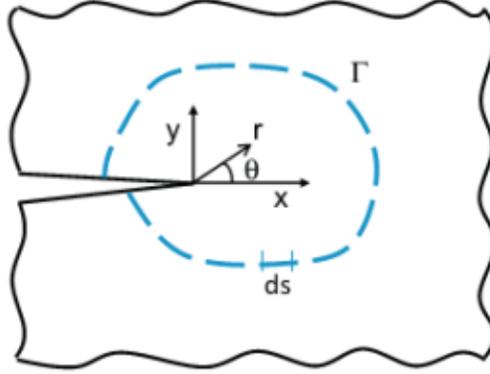
T_i = componentes do vetor de tração;

u_i = componentes do vetor de deslocamento;

ds = incremento do comprimento ao longo do contorno;

x e y = coordenadas retangulares com a direção y tomada normal a linha da trinca.

Figura 12. Representação esquemática do parâmetro Integral J (Zhu & Joyce, 2012)



A partir dos trabalhos realizados independentemente por *Hutchinson* (1968) e por *Rice* e *Rosengren* (1968), as tensões e as deformações na ponta da trinca podem ser expressas em termos de J de acordo com a, assim chamada, solução HRR (Equação 13).

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

Equação 13

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

Eles assumiram que o encruamento segundo uma relação de potência, ou seja, a relação uniaxial σ e a deformação ε é dada por $y = Ax^B$ e conhecida como relação de Ramberg-Osgood, Equação 14.

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

Equação 14

Onde:

α = constante adimensional;

$\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$;

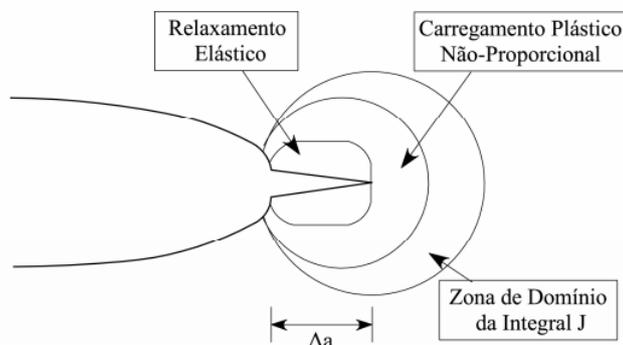
σ_0 = tensão de escoamento;

η = expoente de encruamento.

As Equação 13 implicam que o campo de tensão/deformação na proximidade da ponta da trinca é completamente caracterizado pelo parâmetro único J . Para geometrias

diferente, mas idêntico valor de J , espera-se os mesmos valores de tensão e deformação na ponta da trinca e, assim, uma resposta idêntica.

Figura 13. Singularidade HRR (ANDERSON, 2005; Zanon, 2009)



Desta maneira, J pode ser considerado como sendo um parâmetro único da mecânica da fratura para um regime elasto-lástico análogo ao K para o regime linear elástico (Zanon, 2009).

2.4 Fratura Dinâmica e Dependente do Tempo

Em certos problemas de fratura, o tempo é uma variável importante. Em taxas de carregamento mais elevadas, por exemplo, efeitos de inércia e dependência da taxa no material podem ser significativas. Metais e cerâmicas também apresentam deformação dependente da taxa (em fluência) a temperaturas que estão próximas do ponto de fusão do material. As propriedades mecânicas de polímeros são altamente sensíveis à taxa de deformação, particularmente quando acima da temperatura de transição vítrea. Nestes casos em que a mecânica da fratura linear elástica e elasto-plástica, que assumem a deformação quasiestática, independente da taxa, são inadequados (ANDERSON, 2005).

Recentemente pesquisadores de mecânica da fratura passaram a considerar os efeitos dinâmicos, mas apenas em casos especiais do comportamento do material linear elástico. Mas recentemente, a mecânica da fratura foi expandida para incluir o comportamento do material dependente do tempo, como viscoplasticidade e viscoelasticidade. A maioria destas abordagens mais recentes, são baseados em generalizações da Integral de contorno J (ANDERSON, 2005).

2.4.1 Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica (J_{Id} , $J_{0,2}$, J_m)

A mecânica da fratura dinâmica analisa o crescimento, a interrupção e a ramificação do movimento de trincas em estruturas submetidas a cargas dinâmicas, onde o campo de tensão na vizinhança da trinca normalmente é caracterizado pelos fatores de intensidade de tensão dinâmica, os quais geralmente são funções do tempo (Figueiredo, 2004; Fedelinsky, Aliabadi, & Rooke, 1996; Haskel, 2013).

Entre os principais parâmetros de solitação dinâmica estão a tenacidade à fratura dinâmica J_{Id} e o fator de intensidade de tensões K_{Id} . De acordo com a mecânica da fratura elasto-plástica um ponto de início de trinca deve ser determinado para avaliar os valores de J_{Id} (Angamuthu, Guha, & Achar, 2009).

Na literatura, existem vários métodos para estimar valores de tenacidade à fratura dinâmica. Dentre eles, destacam-se adaptações feitas por Angamuthu (Angamuthu, Guha, & Achar, 2009). Em um dos métodos, quando o início da trinca ocorria antes do ponto de carregamento máximo e com escoamento generalizado, o mecanismo de fratura elasto-plástica é utilizada para calcular o valor de J_{Id} e a ocorrência de fratura de modo dúctil. Se o início da trinca ocorre no pico da carga, sem escoamento generalizado, o mecanismo da mecânica da fratura linear elástico é utilizado para calcular o valor de K_{Id} , propiciando uma fratura essencialmente frágil (Figueiredo, 2004; Angamuthu, Guha, & Achar, 2009; Haskel, 2013).

A propriedade da tenacidade à fratura dinâmica pode ser obtida através do ensaio com Charpy instrumentado, utilizando-se corpos de prova pré-trincados por fadiga. A grande vantagem da pré trinca por fadiga, é a transformação do tradicional corpo de prova de ensaios de impacto com entalhe V em corpos de prova de ensaio da mecânica da fratura dinâmica. O cálculo direto da tenacidade à fratura, portanto, baseia-se na informação força vs tempo fornecida pela instrumentação (Rodrigues, 2001).

Se tem-se o início da fratura na força máxima, como por clivagem, os valores de energia W_M podem ser considerados como uma energia de iniciação. Entretanto, W_M inclui outras contribuições causadas pela deflexão dos corpos de prova. Portanto, é necessária uma correção da energia por meio da compliância para determinar o verdadeiro valor da energia (Rodrigues, 2001). Assim, para os casos nos quais a fratura ocorre com a força máxima, o valor de E_M pode ser calculado diretamente:

$$E_M = \frac{C_{ND}(P_M)^2}{2EB} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

C_{ND} = compliância adimensional do corpo de prova.

Valores típicos podem ser encontrados em Server, W. L. *Impact three-point bend testing for notched and precracked specimens* (1978) publicado no *Journal of Testing and Evaluation*. Para os casos onde há escoamento generalizado, E_M é obtida corrigindo-se W_M através da equação:

$$E_M = W_M - \left\{ \left(\frac{P_M^2}{2} \right) \left[C_T - \left(\frac{C_{ND}}{EB} \right) \right] \right\} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

C_T = compliância total do sistema (calculada no escoamento generalizado e corrigida devido ao decréscimo da velocidade).

$$C_T = \left(\frac{V_0 t_{GY}}{P_{GY}} \right) - \left(\frac{V_0^2 t_{GY}^2}{8E_0} \right) \quad \text{Equação 17}$$

Esta correção da compliância é assumida ser linear com o carregamento, mas a correção atual não é tão simples. Entretanto, admitida uma relação linear, o erro resulta num valor de E_M ligeiramente menor, isto é, mais conservativo (Rodrigues, 2001; Server, 1978). Assumindo-se que a iniciação ocorra à força máxima, a energia de propagação E_P é:

$$E_P = E_T - E_M \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

E_T = energia total de fratura (obtida no mostrador da máquina).

Quando a fratura se dá devido à força máxima, a tenacidade à fratura dinâmica em deformação plana, dada pelo parâmetro K_{Id} , pode ser calculada aplicando-se a mecânica da fratura linear elástica, norma ASTM E399-12. A fórmula empírica de recorrência depende da geometria de corpo de prova e do ensaio utilizado.

$$K_{Id} = \frac{3P_M S \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1,99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \frac{a^2}{W^2}\right) \right\}}{BW^{\frac{3}{2}} \left[2 \left(1 + \frac{2a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}} \right]}$$

Equação 19

Onde:

P_M = força máxima;

a = tamanho da trinca;

W = largura do corpo de prova;

B = espessura do corpo de prova.

Portanto, se o escoamento generalizado não ocorrer, um valor elástico linear dinâmico de tenacidade à fratura, K_{Id} , pode ser calculado.

A taxa de intensidade de tensão \dot{K} é determinada por:

$$\dot{K} = \frac{K_{Id}}{t_M}$$

Equação 20

Onde:

t_M = tempo para ocorrência da força máxima.

Esta taxa de carregamento reflete o aspecto dinâmico do próprio carregamento, pois o valor mais baixo de \dot{K} para corpos de prova Charpy pré trincados é da ordem de $11 \times 10^4 MPa\sqrt{m} \cdot s^{-1}$.

Quando ocorre o escoamento generalizado, pode ser considerado um valor da energia baseado na integral J para se obter a medida da tenacidade à fratura dinâmica. O cálculo da tenacidade à fratura dúctil dinâmica, J_{Id} , é incerto sobre o ponto de iniciação da fratura conhecido na curva força vs tempo. Para a fratura iniciada por clivagem, este ponto geralmente corresponde à força máxima. Entretanto, para a iniciação dúctil, a força máxima é geralmente uma hipótese não conservativa. Quando o ponto de iniciação é conhecido ou é determinado experimentalmente e quando $a/W \geq 0,5$, então (Rodrigues, 2001; Server, 1978):

$$J_{Id} = \frac{2E_M}{Bb}$$

Equação 21

Onde:

b = comprimento ($W - a$).

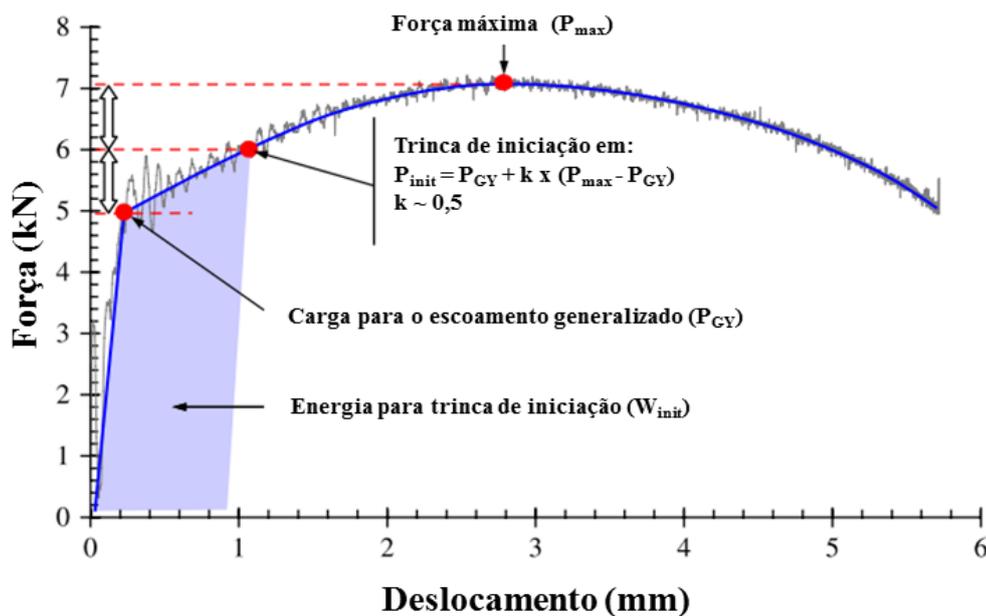
A Figura 14 mostra uma curva típica que é utilizada para determinação dos parâmetros de tenacidade abordados neste trabalho (J_I , $J_{0,2}$ e J_m), neste procedimento assume-se que a trinca de iniciação ocorre entre a força equivalente ao escoamento generalizado e a força máxima. Então (Chaouadi, R; Puzzolante, J. L., 2008):

$$P_{init} \approx P_{GY} + \kappa \times (P_{max} - P_{GY}) \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

$\kappa = 0,5$ é uma constante ($0 \leq \kappa \leq 1$).

Figura 14. Determinação da trinca de iniciação na curva Força-deslocamento (Chaouadi, R; Puzzolante, J. L., 2008).



Definindo-se o valor de P_{GY} , é possível calcular a energia de iniciação da trinca (W_{init}), que corresponde a área abaixo da curva força-deslocamento até P_{GY} , representada na Figura 14. Substituindo W_M e P_M na Equação 16 por W_{init} e P_{GY} , obtem-se o J_I (J de iniciação).

É importante ressaltar que o J_{init} não é a tenacidade de iniciação, mas caracteriza o conjunto de iniciação de trincas que correspondem ao primeiro processo de coalescimento de microcavidades no interior do espécime. A tenacidade de iniciação é definida, quando se tem uma extensão de trinca de 0,2mm (Chaouadi, R; Puzzolante, J. L., 2008):

$$J_{0,2} = J_{init} + J_m \times \sqrt{0,2} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$J_{0,2}$ = Valor de J valido para extensão de trinca de 0,2mm (tenacidade de iniciação).

0,2 = extensão da trinca.

Para carregamento dinâmico, o limite de escoamento σ_e e o limite de resistencia σ_R podem ser estimados após o escoamento generalizado como:

$$\sigma_{GY} = (2,85 \times P_{GY} \times W)/(B \times b^2) \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

σ_{GY} = Limite de escoamento dinamico.

2,85 = constante para corpo de prova com entalhe pre-trincado por fadiga.

e

$$\sigma_M = [2,85 \times (P_{GY} + P_M) \times W]/[2 \times (B \times b^2)] \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

σ_M = Limite de resistencia dinamico.

Os valores de tensão obtidos com estas equações podem ser utilizados favoravelmente como aproximações de valores de ensaios de tração realizados a alta taxa de deformação (Server, 1978).

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Material Analisado

O material de estudo deste neste trabalho (Figura 15), é um segmento de tubo fabricado de aço microligado da classe API 5L X70 sem costura, com diâmetro externo 11'' (279,4 mm), 22 mm de parede por 115 mm de comprimento. Este pertence ao grupo de materiais ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga).

Figura 15.Segmento de tubo de aço API 5L X70 sem costura, utilizado no estudo.



Fonte: O autor.

3.2 Preparação dos Corpos de Prova

Foram retirados para caracterização mecânica do tubo, um total de 21 amostras, contendo corpos de prova para determinação de propriedades de tração, com orientação longitudinal ao tubo e corpos de prova para ensaios de tenacidade quase estática e tenacidade à fratura dinâmica, com duas orientações diferentes, caracterizando defeitos do tipo passantes (plano de orientação X-Y) e defeitos do tipo superficial (plano de orientação X-Z) como representado na Figura 16.

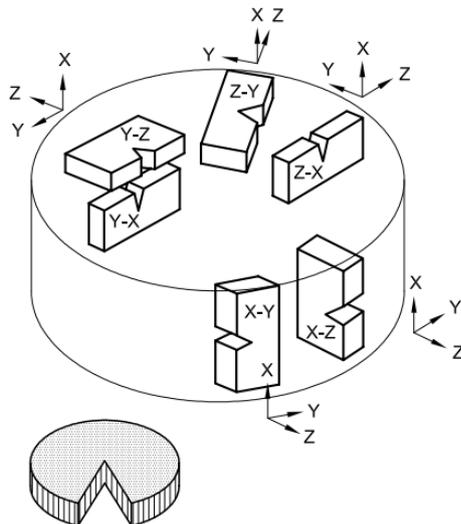
Onde:

X = direção de máxima deformação (máximo fluxo de grãos).

Z = direção de menor deformação.

Y = representa a direção normal ao plano X-Z

Figura 16. Identificação do plano de fratura (ISO 12135, 2002)



As amostras foram distribuídas ao longo do tubo, de maneira que se possa aproveitar ao máximo o material. A Figura 17, ilustra esquematicamente a distribuição dos corpos de prova com posições, descrição/orientações e quantidades.

Figura 17. Representação esquemática da posição e orientação dos corpos de prova no tubo, contendo descrições e quantidades.

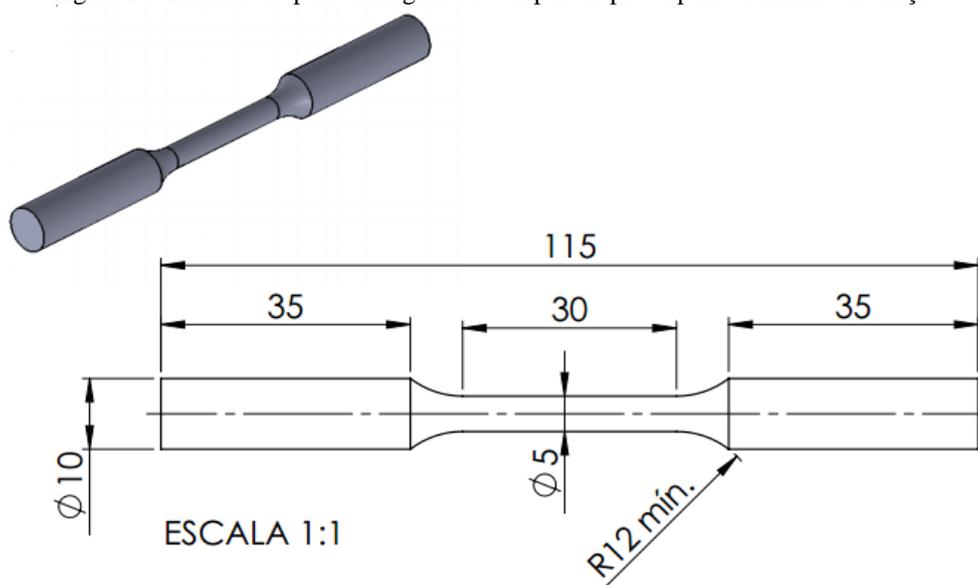
| Nº do Item | Descrição | Quantidade |
|------------|--|------------|
| 1 | 10x10x55 - plano orientação X-Z | 6 |
| 2 | 10x10x55 - plano orientação X-Y | 6 |
| 3 | <i>Tamanho pequeno proporcional - espécime 3</i> | 3 |
| 4 | 10x20x90 - plano orientação X-Z | 3 |
| 5 | 10x10x90 - plano orientação X-Y | 3 |

Fonte: O autor.

Inicialmente, foram cortados 15 (quinze) prismas, do tubo, contendo dimensões suficientes para usinagem dos corpos de prova e mais 02 (dois) prismas com dimensões suficientes para realização de análise da composição química do material, ensaios metalográficos e realização de ensaios de microdureza.

Após esta etapa, foram usinados corpos de prova para os ensaios de tração, em torno mecânico convencional, onde suas dimensões foram especificadas conforme norma ASTM E8/8M - *Test Method for Tension Testing of Metallic Materials (small size proportional - specimen 3)*.

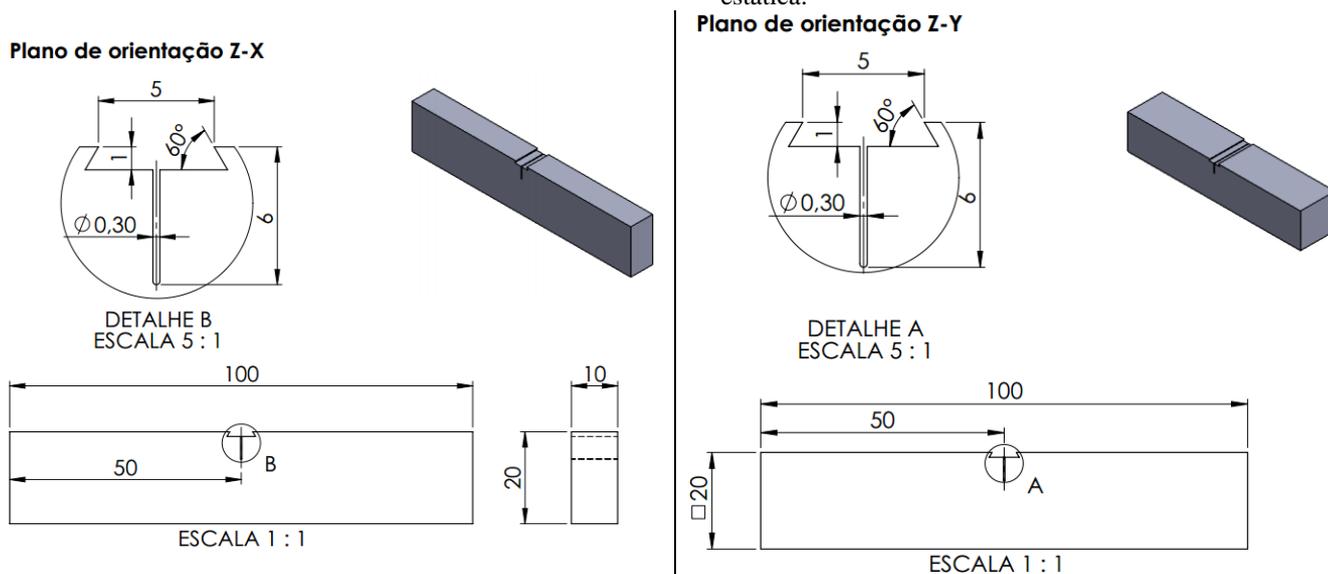
Figura 18. Dimensões para usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tração.



Fonte: O autor.

Os corpos de prova para realização dos ensaios de tenacidade à fratura quase estática, foram usinados em fresadora mecânica convencional, onde suas dimensões foram especificadas conforme norma ASTM E1820 - *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, sendo todos do tipo *Single Edge Bend (SE(B))*.

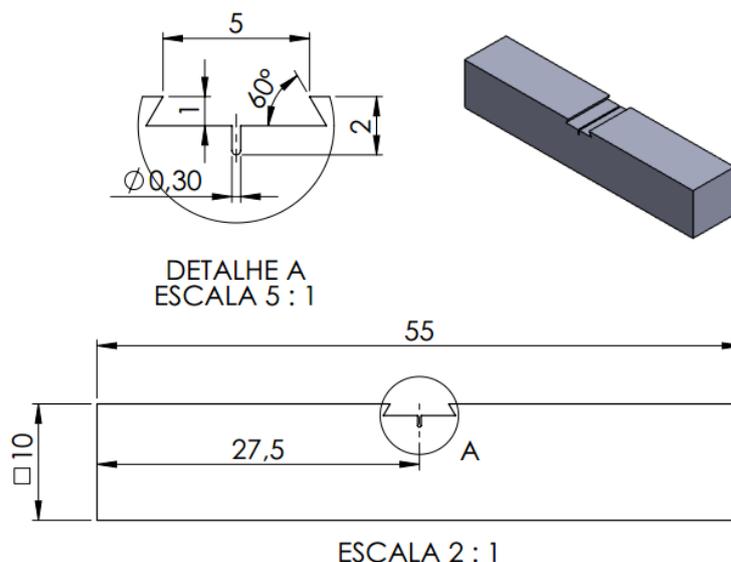
Figura 19. Dimensões para usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tenacidade à fratura quase estática.



Fonte: O autor.

Os corpos de prova para realização dos ensaios de tenacidade à fratura dinâmica, foram usinados em fresadora mecânica convencional, onde suas dimensões foram especificadas conforme norma ASTM E2298 - *Standard Test Method for Instrumented Impact Testing of Metallic Materials*.

Figura 20. Dimensões para usinagem dos corpos de prova para os ensaios de tenacidade à fratura dinâmica.



Fonte: O autor.

3.3 Análise da Composição Química

A análise da composição química do material de estudo, foi realizada em um espectro de emissão ótica da marca Spectro Lab, Figura 21.

Figura 21. Espectro de emissão ótica, Spectro Lab.



Fonte: Acervo de fotos LAMEF.

3.4 Ensaio Metalográficos

Para a análise metalográfica, foram preparadas 02 (duas) amostras, onde estas foram cortadas em orientações diferentes. Uma com corte longitudinal a direção de maior deformação no tubo e outra com corte transversal a direção de maior deformação no tubo. As amostras foram embutidas em baquelite e lixadas obedecendo a seguinte ordem de granulometria das lixas: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*. Após terminada esta etapa, as amostras foram atacadas quimicamente em capela, com reagente Nital 2%, com tempo de imersão de 10 segundos

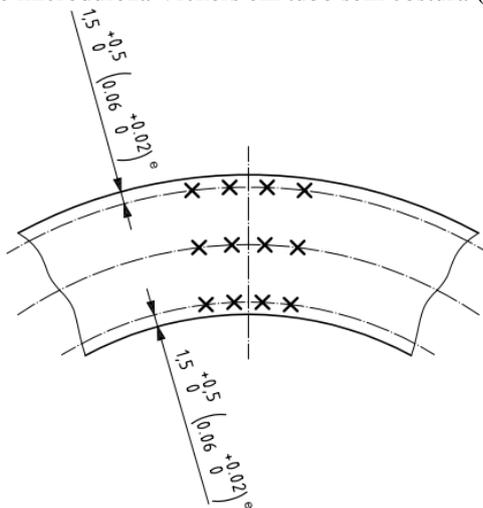
Depois de atacadas, as mostras foram analisadas através de microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura, com o intuito de identificar as formas e microestrutura do material de estudo.

3.5 Ensaio de Microdureza

A partir das amostras embutidas e polidas, usadas nas análises metalográficas, foram realizados os perfis de microdureza Vickers. Os perfis foram realizados em duas

orientações, um longitudinal a direção de maior deformação no tubo e outro transversal a direção de maior deformação no tubo.

Figura 22. Perfis de microdureza Vickers em tubo sem costura (API Spec 5L, 2007)



Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em um durometro automático, modelo Tukon 2100 B, da marca Instron (Figura 23). A carga utilizada foi de 300 gramas, aplicada por 10 segundos e com distância entre pontos de 0,2 milímetros.

Figura 23. Equipamento utilizado para medição dos perfis de microdureza Vickers, marca Instron, modelo Tukon 2100 B.



Fonte: Acervo de fotos LAMEF.

3.6 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no GEM (Grupo de Ensaio Mecânicos), pertencente ao LAMEF-UFRGS. Estes ensaios visaram caracterizar as propriedades de mecânicas e para classificar o material em estudo.

Os ensaios foram realizados em um ambiente com temperatura e umidade controladas, em uma máquina eletromecânica de ensaios universal, da marca Instron, modelo 5585H, com capacidade de 250 kN em tração e compressão (Figura 24). Todos equipamentos utilizados são calibrados e o ensaio de tração acreditado pelo CGCRE-INMETRO.

Como parâmetros de ensaio, foram adotados como base de medida para alongamento percentual L_0 de 25 mm e taxa de deslocamento da máquina de 0,375 mm/min.

Figura 24. Máquina de ensaios universal, marca Instron, modelo 5585H utilizada nos ensaios de tração.



Fonte: Acervo de fotos LAMEF.

3.7 Ensaio de Tenacidade

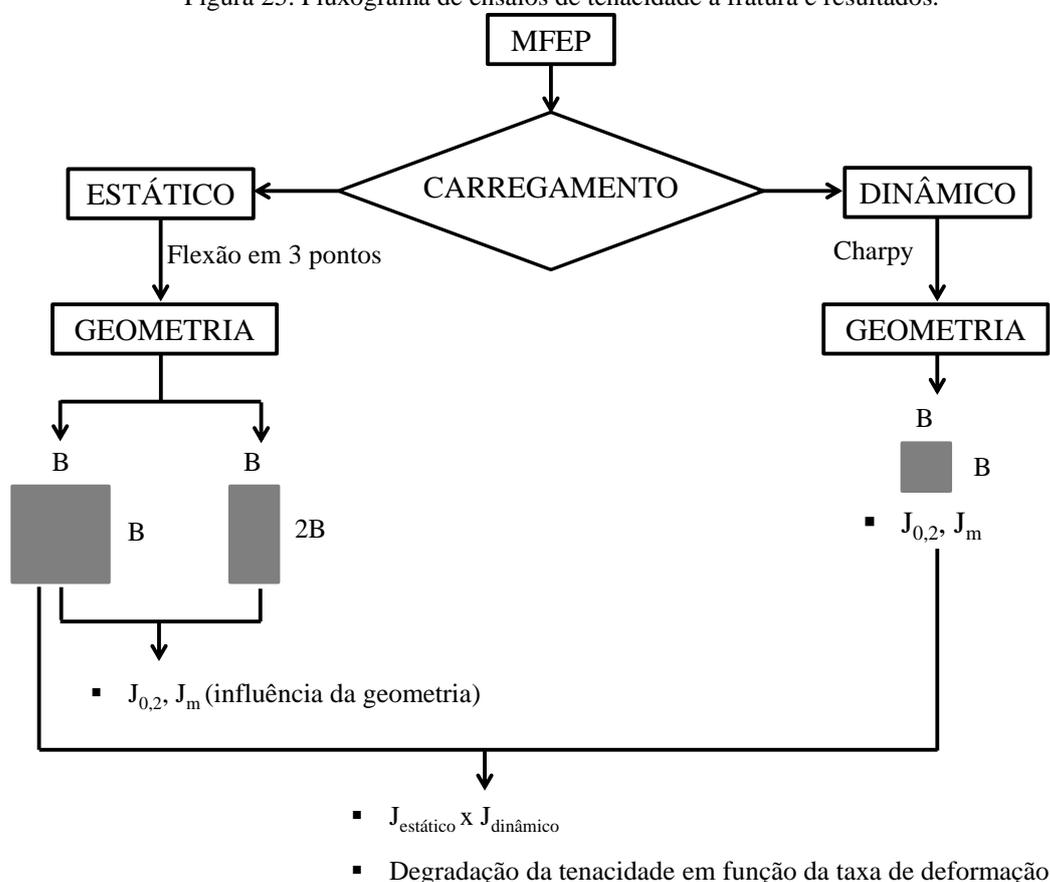
Os ensaio de tenacidade à fratura apresentam resultados diferentes em função da geometria dos corpos de prova e das condições do ensaio (temperatura, taxa de deformação aplicada, etc). Para avaliar a degradação da propriedade de tenacidade frente a uma falha

dinâmica, foram realizados ensaios estáticos (conforme parâmetros utilizados para projetos dos componentes) e dinâmicos (conforme a falha real dos componentes).

Nos ensaios estáticos, foram realizados em flexão em três pontos, com duas configurações de corpos de prova, já para os dinâmicos, foram empregados apenas um tipo de configuração em função das limitações do equipamento.

O Fluxograma abaixo, Figura 25. Fluxograma de ensaios de tenacidade a fratura e resultados., mostra a matriz de ensaios para se chegar na comparação da tenacidade estática e dinâmica para um mesmo material.

Figura 25. Fluxograma de ensaios de tenacidade a fratura e resultados.



3.8 Ensaio de Tenacidade à Fratura Estático ($J_{0,2}$, J_m)

Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados no GEM (Grupo de Ensaio Mecânicos), pertencente ao LAMEF-UFRGS. Estes ensaios visaram caracterizar as propriedades de tenacidade à fratura estático, intrínsecos ao material em estudo.

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, em uma máquina de ensaios servo-hidráulica, da marca MTS, modelo 810, com capacidade de 100 kN em tração e

compressão (Figura 26). Todos equipamentos utilizados são calibrados dentro dos prazos estabelecidos pelo INMETRO.

Os parâmetros de ensaio são estabelecidos em função da dimensão do material (espaçamento entre roletes de apoio) e a taxa de deslocamento utilizada da máquina foi de 0,5 mm/min.

Figura 26. Máquina de ensaios, marca MTS, modelo 810 utilizada nos ensaios de tenacidade quase estática.



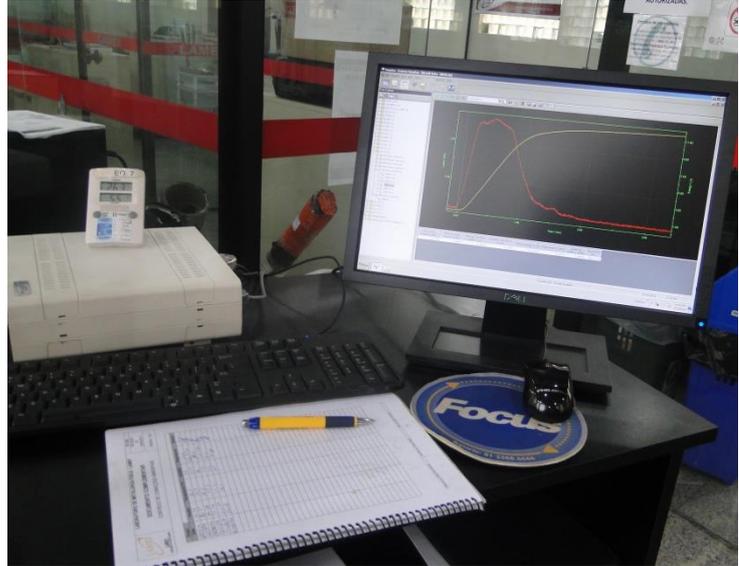
Fonte: Acervo de fotos LAMEF.

3.9 Ensaio de Tenacidade à Fratura Dinâmica ($J_{0,2}$, J_m)

Estes ensaios visaram caracterizar as propriedades de tenacidade à fratura dinâmica, intrínsecas ao material em estudo.

Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, em um ambiente com temperatura e humidade controladas, em uma máquina de ensaios de impacto Charpy, instrumentada, da marca INSTRON, modelo SI-1D3, com capacidade de 406,6J (Figura 27).

Figura 27. Máquina de ensaios de impacto charpy, marca Instron, modelo SI-1D3, utilizada nos ensaios de tenacidade dinâmica.



Fonte: Acervo de fotos LAMEF.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Química

A composição química do material estudado é apresentado na Tabela 2

Tabela 2. Composição Química do aço estudado e e espessificação para Tubos PSL 2 com espessura de parede $\leq 25\text{mm}$ (API Spec 5L, 2007).

| Elemento Químico | % C _{máx.} | % Si _{máx.} | % Mn _{máx.} | % P _{máx.} | % S _{máx.} | % V _{máx.} | % Nb _{máx.} | % Ti _{máx.} | % Outros _{máx.} |
|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| X70 | 0,18 ^f | 0,45 ^f | 1,80 ^f | 0,025 ^f | 0,015 ^f | g | g | g | h |
| Aços estudado | 0,114 | 0,271 | 1,36 | 0,0087 | <0,001 | 0,0399 | 0,0281 | 0,0026 | -- |

^f - salvo acordo.

^g - salvo acordo, adição de Nióbio, Vanádio e Titâneo em concentração deve ser $\leq 0,15\%$.

^h - salvo acordo, 0,50% de Cobre máximo, 0,50% de Níquel máximo, 0,50% de Cromo máximo e 0,50% de Molibdênio máximo.

Comparando a Tabela 2, com a composição estabelecida pela norma *API 5L specification* (API Spec 5L, 2007), observamos que os elementos químicos estão dentro do estabelecido, ou seja, não aparece nenhum elemento fora do especificado que possa interferir na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas do material.

4.2 Ensaio Metalográficos

Nesta seção são apresentadas as metalografias e micrografias realizadas em microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura, referentes ao material de estudo, o aço API 5L X70 do grau PSL 2. As imagens que seguem abaixo estão dispostas da seguinte forma nas linhas e colunas.

Linhas: em grau de aumento

Colunas: esquerda com corte longitudinal a seção do tubo e direita com corte transversal a seção do tubo.

Figura 28. Metalografias do aço API X70.

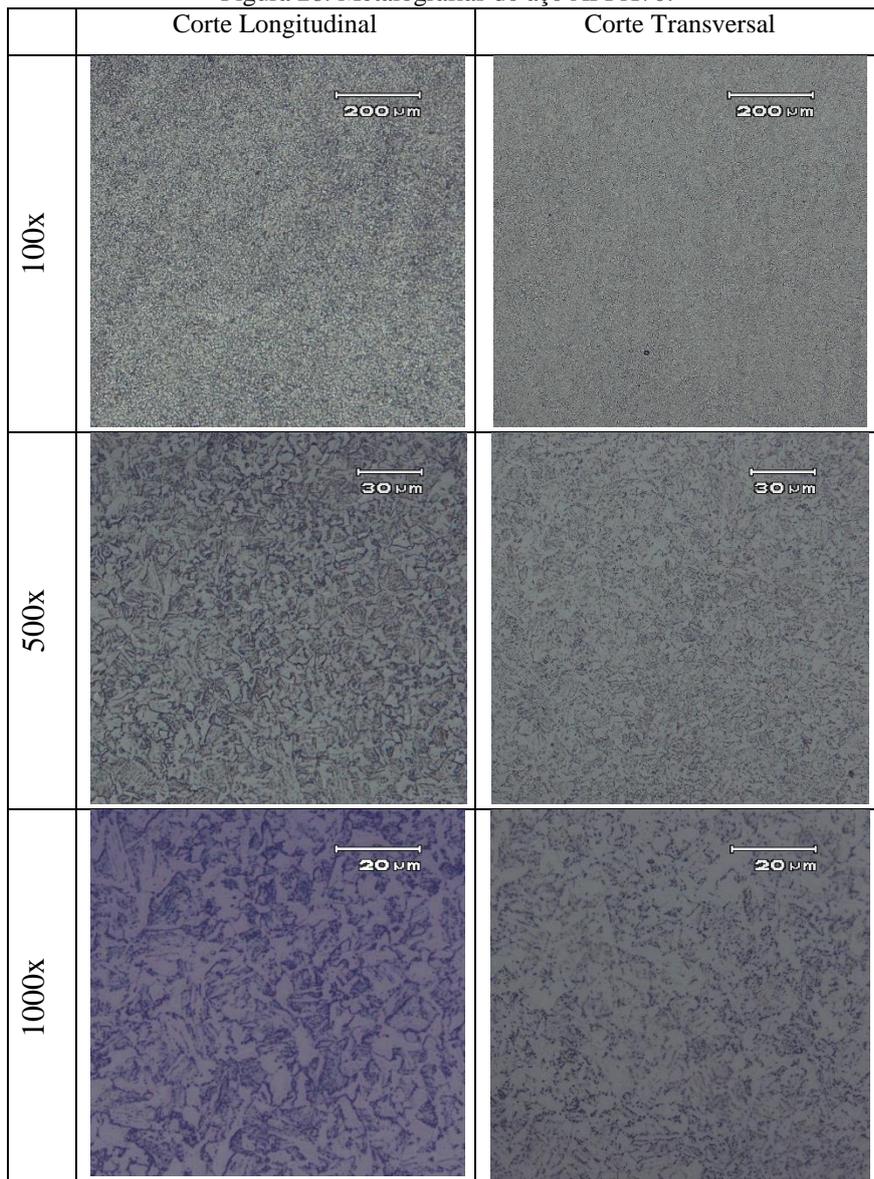
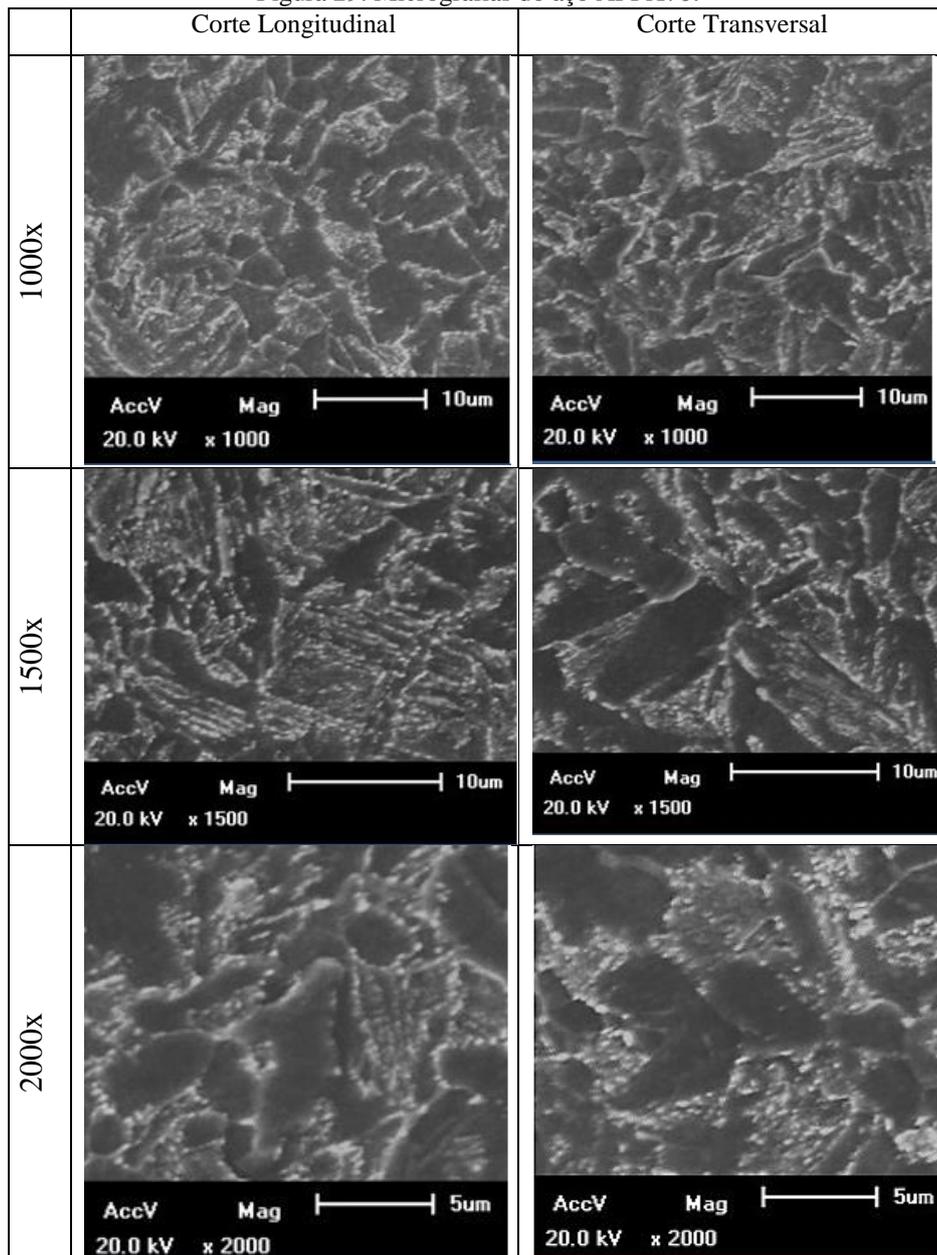


Figura 29. Micrografias do aço API X70.

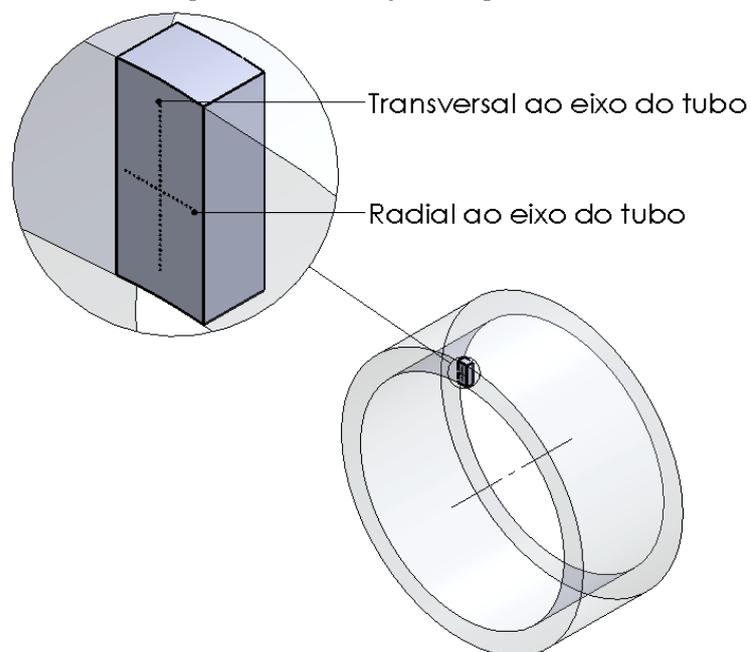


Observa-se nas metalografias e micrografias uma microestrutura de grãos refinados de bainita e ferrita. Esse arranjo microestrutural é devido à combinação entre composição química e o processamento termomecânico realizado, com a finalidade de se obter endurecimento intrínseco e microestrutural para diminuir a temperatura de transição dúctil-frágil, assim como aumentar a resistência em tensões elevadas. A ferrita tem a função de absorver a maior quantidade das energias do sistema e a segunda fase formada por bainita atua como barreira, aumentando assim a resistência à propagação de trincas além de aumentar a resistência mecânica (Koo & Bangaru, 2000).

4.3 Ensaio de Microdureza

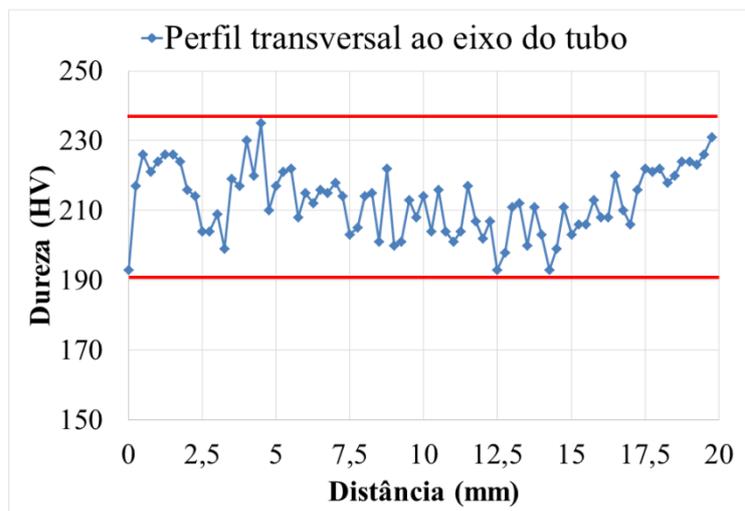
Visto a homogeneidade do material, foram realizados dois perfis de microdureza. Um na direção transversal ao eixo do tubo e outro na direção radial ao eixo do tubo, conforme a Figura 30.

Figura 30. Desenho esquemático das direções dos perfis de microdureza Vickers.



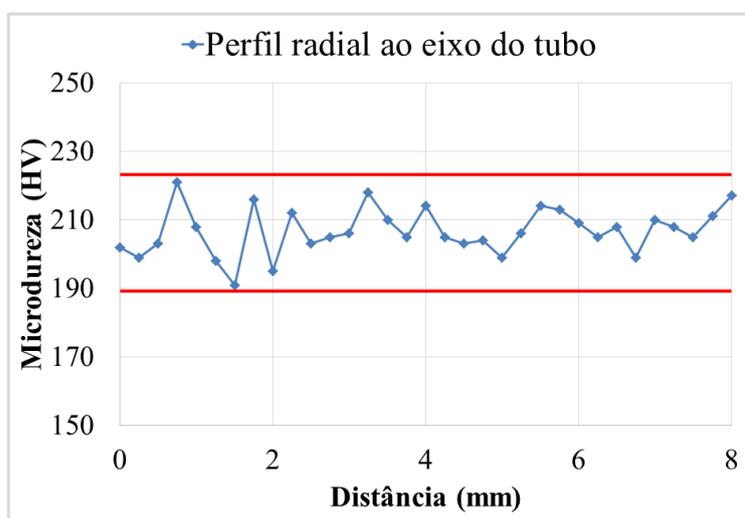
A Figura 31, apresenta um gráfico com perfil de microdureza Vickers, transversal ao eixo do tubo, contendo 80 pontos e com incremento de 0,25mm/ponto ao longo de 20mm. Pode-se observar uma amplitude de 41HV ao longo do perfil, delimitados pelas linhas horizontais vermelhas no gráfico e que nenhum ponto excedeu 300HV conforme recomendação da norma *API Spec 5L* (2007).

Figura 31. Perfil de microdureza Vickers trasversal ao eixo do tubo.



A Figura 32, apresenta um gráfico com perfil de microdureza Vickers, radial ao eixo do tubo, contendo 32 pontos e com incremento de 0,25mm/ponto ao longo de 8mm. Pode-se observar uma amplitude de 30HV ao longo do perfil, delimitados pelas linhas horizontais vermelhas no gráfico e que nenhum ponto excedeu 300HV conforme recomendação da norma *API Spec 5L* (2007).

Figura 32. Perfil de microdureza Vickers radial ao eixo do tubo.



4.4 Ensaio de Tração

A Tabela 3 apresenta propriedades do material conforme especificado na *API Spec 5L*, para limite de escoamento, limite de resistência, razão LE/LR (razão elástica) e alongamento percentual.

Tabela 3. Requisitos para os resultados dos ensaios de tração para tubos PSL 2 (API Spec 5L, 2007).

| Grau do Tubo | Tubo sem costura | | | | | |
|--------------|--|--------|--------------------------------|--------|-----------------------------|-------------------|
| | Limite de escoamento LE _{0,5} (MPa) | | Limite de resistência LR (MPa) | | Razão LE _{0,5} /LR | Alongamento % |
| | mínimo | máximo | mínimo | Máximo | máximo | mínimo |
| X70 | 485 | 635 | 570 | 760 | 0,93 | 11,6 ^f |

^f – a especificação de alongamento mínimo, A_f , pode ser determinada pela equação:

$$A_f = C \frac{A_{xc}^{0,2}}{U^{0,9}}$$

Onde:

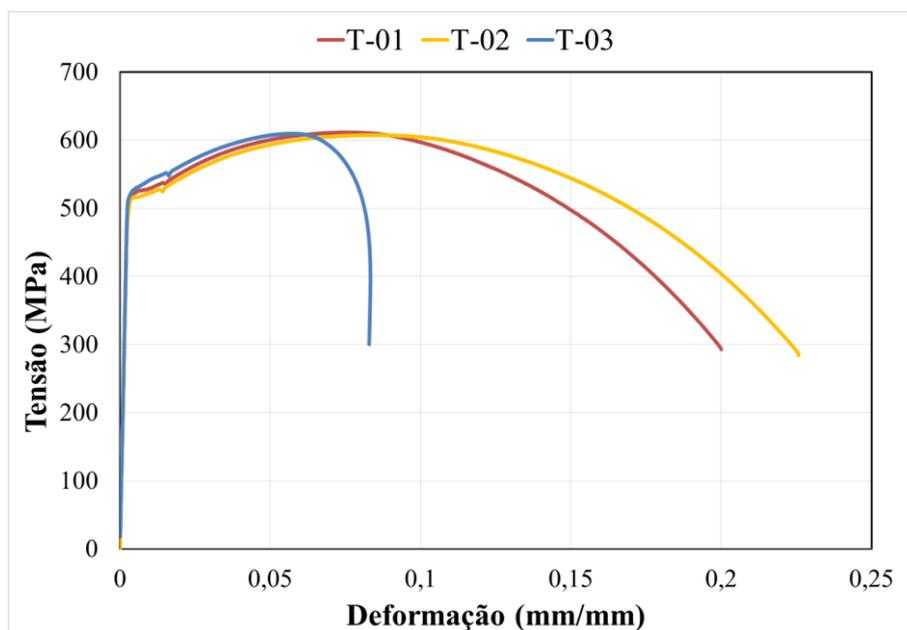
C é 1940 para cálculos usando unidades SI.

A_{xc} é a área para corpos de prova de seção circular.

U é a especificação mínima do limite de resistência, expressa em MPa.

A Figura 33 apresenta as curvas tensão-deformação de engenharia dos 3 (três) ensaios de tração realizados em corpos de prova do aço API 5L X70Q. A amostra T-03 fraturou em uma região fora do extensômetro e das marcações para medição do alongamento, sendo assim, a curva apresentou comportamento atípico após a carga máxima e o resultado de alongamento foi descartado.

Figura 33. Curvas tensão-deformação de engenharia do aço API 5L X70.



Os resultados dos ensaios de tração do aço API 5L X70 são apresentados na Tabela 4 para o limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento. Os valores obtidos estão em conformidade com as especificações da *API Spec 5L grau PSL 2*, a qual defini os

requisitos para o limite de escoamento (485 a 636 MPa), o limite de resistência (570 a 760 MPa), e o alongamento (mínimo de 11,6%).

Tabela 4. Resultados dos ensaios de tração para o aço API 5L X70.

| Amostra | Limite de escoamento $LE_{0,5}$ (MPa) | Limite de resistência LR (MPa) | $LE_{0,5}/LR$ | Alongamento % | |
|--------------|---|--------------------------------------|---------------|---------------|-------------|
| | | | | Uniforme | Total |
| T-01 | 523,0 | 611,9 | 0,85 | 7,2 | 18,2 |
| T-02 | 516,3 | 607,9 | 0,85 | 8,2 | 21,7 |
| T-03 | 528,7 | 610,1 | 0,87 | * | * |
| Média | 522,7 | 610,0 | 0,86 | 7,7 | 19,9 |

* Fratura ocorreu fora das marcações do L_0 .

4.5 Ensaio de Tenacidade à Fratura

Para o estudo da *tenacidade à fratura estática*, com o parâmetro de tenacidade *Integral J*, a Figura 34 apresenta as curvas força (P) versus abertura da boca da trinca ($CMOD$) para a geometria de corpo de prova $SE(B)$ nas configurações BxB (plano de orientação da trinca X-Y) e $Bx2B$ (plano de orientação da trinca X-Z) com valor normalizado de a_0/W de 0,5. Assim, para um melhor entendimento dos gráficos obtidos, a Tabela 5 mostra os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (*Integral J*), calculados conforme a norma ASTM E1820-15a.

Figura 34. Curvas P - $CMOD$ do aço API X70 sem costura, na geometria $SE(B)$.

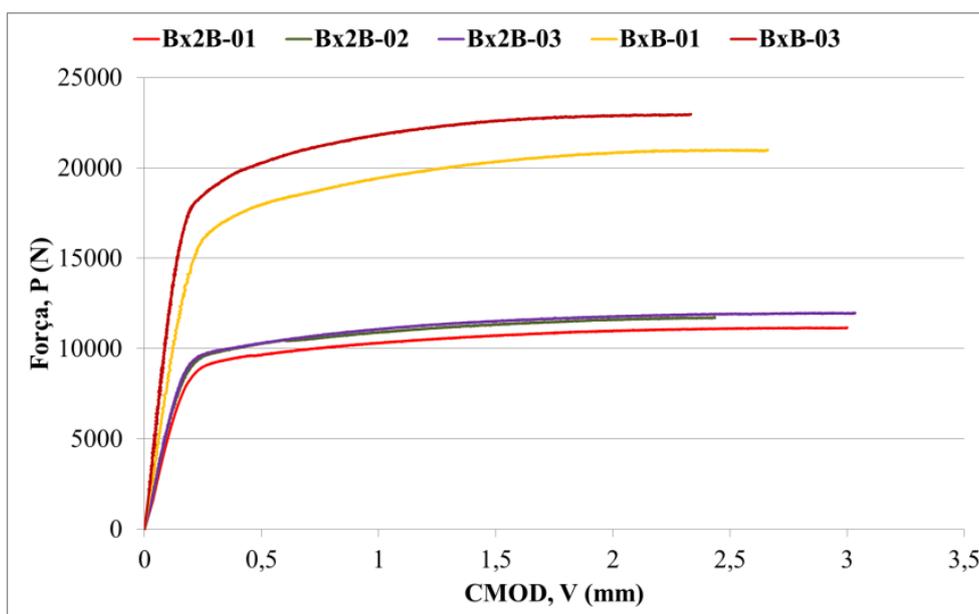


Tabela 5. Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (*Integral J*) da geometria de amostra *SE(B)*.

| Amostra | W [mm] | B [mm] | B _N [mm] | S [mm] | a [mm] | J _{init} [kJ/m ²] | J _{0,2} [kJ/m ²] | J _m [kJ/m ²] |
|--------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| BB XY-01 | 19,84 | 19,63 | 19,63 | 79,80 | 10,52 | 56 | 275 | 492 |
| BB XY-03 | 19,81 | 19,50 | 19,50 | 79,80 | 10,08 | 58 | 281 | 499 |
| Média | | | | | | 57 | 278 | 496 |

| Amostra | W [mm] | B [mm] | B _N [mm] | S [mm] | a [mm] | J _{init} [kJ/m ²] | J _{0,2} [kJ/m ²] | J _m [kJ/m ²] |
|--------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| B2B XZ-01 | 19,92 | 9,91 | 9,91 | 79,42 | 10,18 | 67 | 340 | 608 |
| B2B XZ-02 | 19,90 | 10,05 | 10,05 | 79,42 | 10,25 | 65 | 294 | 513 |
| B2B XZ-03 | 19,79 | 9,88 | 9,88 | 79,42 | 9,97 | 83 | 379 | 662 |
| Média | | | | | | 72 | 337 | 594 |

Observa-se pelos resultados, que para as duas configurações de corpo de prova, BxB (reproduzindo uma trinca lateral passante, X-Y) e Bx2B (reproduzindo uma trinca superficial, X-Z) o material apresentou considerável deformação plástica na frente da trinca antes de ela vir a propagar, evidenciadas na componente plástica do parâmetro J (ver Figura 34) e desejável para este material.

O efeito do aumento de espessura conferiu uma perda na tenacidade de aproximadamente 20% ao material. Este efeito já foi avaliado e comprovado em trabalhos, como no de Barbosa, L. H. S (2012) para o aço API 5L X70 (Barbosa, 2012), mas com uma melhora considerável, pois sem o efeito do bandejamento característico dos aços API, com microestrutura ferrita e perlita, observa-se na superfície de fratura, Figura 39, que este não apresentou delaminação, possível de se observada com aumento da espessura, melhorando a tenacidade do material por efeito da microestrutura formada por ferrita e bainita.

Para o caso da avaliação da *Tenacidade à Fratura Dinâmica*, também com parametro de tenacidade *Integral J*, as Figura 35 e Figura 36 representam as curvas força (*kN*) versus deslocamento (*mm*) para a geometria de corpo de prova *SE(B)* nos planos de orientação das trincas X-Y (reproduzindo uma trinca lateral passante) e X-Z (reproduzindo uma trinca superficial) com valor normalizado de a_0/W de 0,5. Desta maneira, os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura dinâmica, calculados de acordo com a norma ASTM E2298 (2013), são representados na Tabela 6.

Figura 35. Curvas Força-Deslocamento do aço API X70 sem costura, na orientação X-Y.

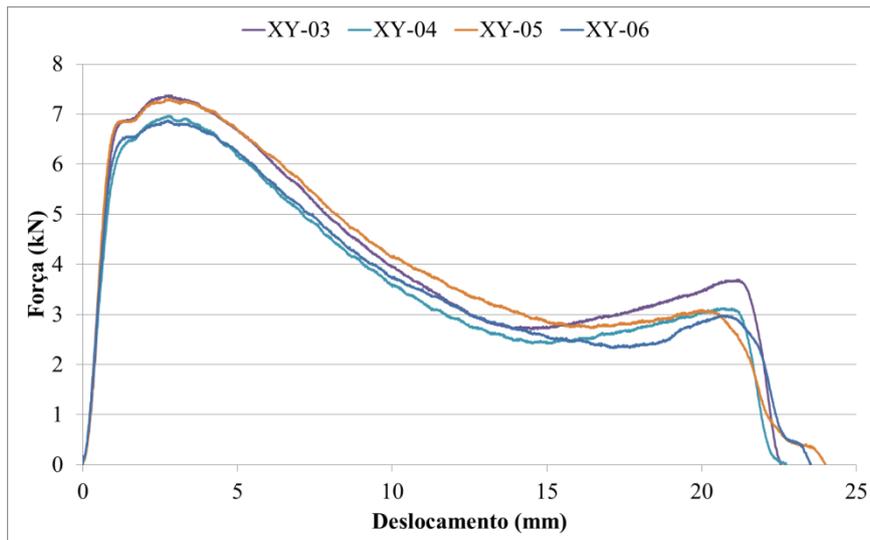
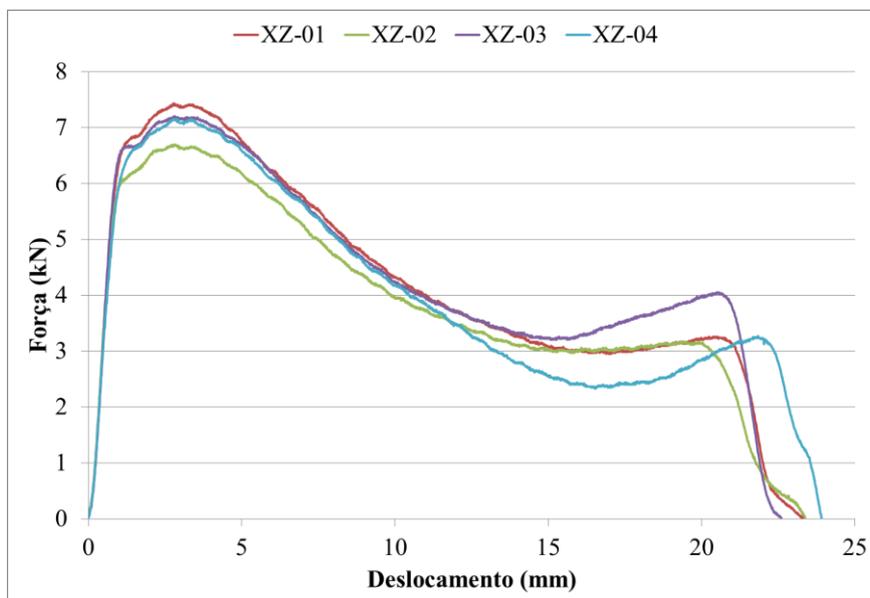


Figura 36. Curvas Força-Deslocamento do aço API X70 sem costura, na orientação X-Z.



Através das curvas *Força x Deslocamento* (Figura 35 e Figura 36) obtidas através do ensaio de Impacto com Charpy instrumentado, foram calculados os mesmos parâmetros de tenacidade avaliados nos ensaios estáticos, J para tamanho de defeito 0,2mm, $J_{0,2}$ (considerado como J de iniciação da trinca) e J_m de carga máxima. Também foram calculadas as tensões de escoamento, σ_{GY} e limites de resistência dinâmicos, σ_M .

Os resultados dos parâmetros de tenacidade avaliados e valores de σ_{GY} e σ_M estão representados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura dinâmica.

| Amostra | W [mm] | B [mm] | S [mm] | a [mm] | b [mm] | J _{init} [kJ/m ²] | J _{0,2} [kJ/m ²] | J _m [kJ/m ²] | σ _{GY} [MPa] | σ _M [MPa] |
|--------------|--------|--------|--------|--------|-------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| XY-03 | 10,01 | 10,08 | 40,00 | 5,19 | 5,19 | 126 | 326 | 446 | 585 | 645 |
| XY-04 | 9,97 | 9,93 | 40,00 | 5,28 | 5,27 | 106 | 295 | 422 | 527 | 577 |
| XY-05 | 10,12 | 10,06 | 40,00 | 5,37 | 5,37 | 106 | 306 | 447 | 566 | 613 |
| XY-06 | 10,04 | 9,98 | 40,00 | 5,37 | 5,37 | 116 | 300 | 411 | 504 | 566 |
| Média | | | | | | 114 | 307 | 432 | 545 | 600 |

| Amostra | W [mm] | B [mm] | S [mm] | a [mm] | b [mm] | J _{init} [kJ/m ²] | J _{0,2} [kJ/m ²] | J _m [kJ/m ²] | σ _{GY} [MPa] | σ _M [MPa] |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| XZ-01 | 10,05 | 10,16 | 40,00 | 5,03 | 5,21 | 118 | 304 | 416 | 607 | 656 |
| XZ-02 | 10,04 | 9,78 | 40,00 | 5,02 | 5,28 | 132 | 382 | 559 | 554 | 608 |
| XZ-03 | 9,97 | 9,97 | 40,00 | 4,99 | 5,07 | 104 | 394 | 647 | 622 | 683 |
| XZ-04 | 9,94 | 9,87 | 40,00 | 4,97 | 5,19 | 111 | 368 | 573 | 580 | 627 |
| Média | | | | | | 116 | 362 | 549 | 591 | 644 |

Observando trabalhos de caracterização da tenacidade dinâmica do API X70, como de *Haskel, H. L., 2013*, foi observado que o J de iniciação da fratura ($J_{0,2}$) para o API X70 com microestrutura formada por ferrita e bainita apresentou um aumento em relação ao material estudado por *Haskel, H. L., 2013* com microestrutura formada por ferrita e perlita para orientações as X-Y e X-Z, representando defeitos no material do tipo, lateral passante e superficial, respectivamente. Esse efeito de aumento da tenacidade ocorreu pelo fato do API 5L X70 apresentar a combinação de ferrita e bainita. A ferrita absorve grande quantidade de deformações e a bainita da resistência mecânica e sustentação para suportar o esforço, efeito este, comprovado por *Shin, S. Y. et al, 2006* que correlacionou a microestrutura com as propriedades de impacto do API 5L X70.

Comparando as propriedades mecânicas do material em função da taxa de carregamento estática e dinâmica, observa-se que o limite de escoamento dinâmico apresentou pequeno aumento em relação ao limite de escoamento estático (Tabela 7). Junto com limite de escoamento dinâmico, é possível fazer uma avaliação de uma característica que vem crescendo de importância em chapas grossas para fabricação de tubos, que é a razão elástica. Quanto mais baixo esse valor, menor a tendência do material de apresentar o efeito mola, também chamado de “*spring-back*”, durante a conformação do tubo. Por outro lado, um baixo valor de razão elástica proporciona uma maior capacidade de deformação plástica do aço (Gorni, 2002). Assim, observa-se que a razão elástica aumentou de 0,86 no ensaio estático, para 0,91 (X-Y) e 0,92 (X-Z), muito próximas ao limite máximo aceitável estabelecido na *API Specif 5L* que é de 0,93, diminuindo a capacidade do material se deformar plasticamente na frente da trinca.

Tabela 7. Propriedades mecânicas para carregamento estático e dinâmico.

| Estático | | Dinâmico X-Y | | Dinâmico X-Z | |
|---------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|
| σ_e [MPa] | σ_R [MPa] | σ_{GY} [MPa] | σ_M [MPa] | σ_{GY} [MPa] | σ_M [MPa] |
| 522 | 610 | 545 | 600 | 591 | 644 |
| σ_e/σ_R | | σ_{GY}/σ_M | | σ_{GY}/σ_M | |
| 0,86 | | 0,91 | | 0,92 | |

A Figura 37 e a Figura 38 apresentam uma análise detalhada dos parâmetros de tenacidade estudados no presente trabalho e que estão discriminados na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros de tenacidade analisados.

| Parâmetro de Tenacidade | Estático | | | | Dinâmico | | | |
|---|----------|----------|-------|----------|----------|----------|-------|----------|
| | X-Z | | X-Y | | X-Z | | X-Y | |
| | Media | Desv.Pad | Media | Desv.Pad | Media | Desv.Pad | Media | Desv.Pad |
| $J_{0,2}$ | 337 | 42,2 | 278 | 3,9 | 362 | 40,0 | 307 | 13,4 |
| J_m | 594 | 75,5 | 496 | 5,6 | 549 | 96,5 | 432 | 17,9 |
| $J_{\Delta init} = (J_m \cdot J_{0,2})$ | 257 | 33,9 | 217 | 1,6 | 187 | 38,6 | 125 | 15,3 |

É possível avaliar a influência do aumento da razão elástica através do parâmetro $J_{\Delta init}$, que representa a quantidade de energia por unidade de área (no regime plástico), que o material absorve para iniciar a trinca, ou seja, a capacidade do material se deformar antes de uma trinca se iniciar.

Para orientação da trinca X-Z (defeito lateral passante), o $J_{\Delta init}$ apresentou uma redução de aproximadamente 30%, enquanto que para orientação de trinca X-Y (defeito superficial), o $J_{\Delta init}$ apresentou uma redução de aproximadamente 40% (Figura 37). Esse efeito se deve ao aumento da razão elástica em comportamento dinâmico, que restringe a capacidade de o material se deformar, efeito avaliado por Gorni, A. A. em 2002, no trabalho “Fatores que Afetam a Razão Elástica de Chapas Grossas de Aços Microligados”.

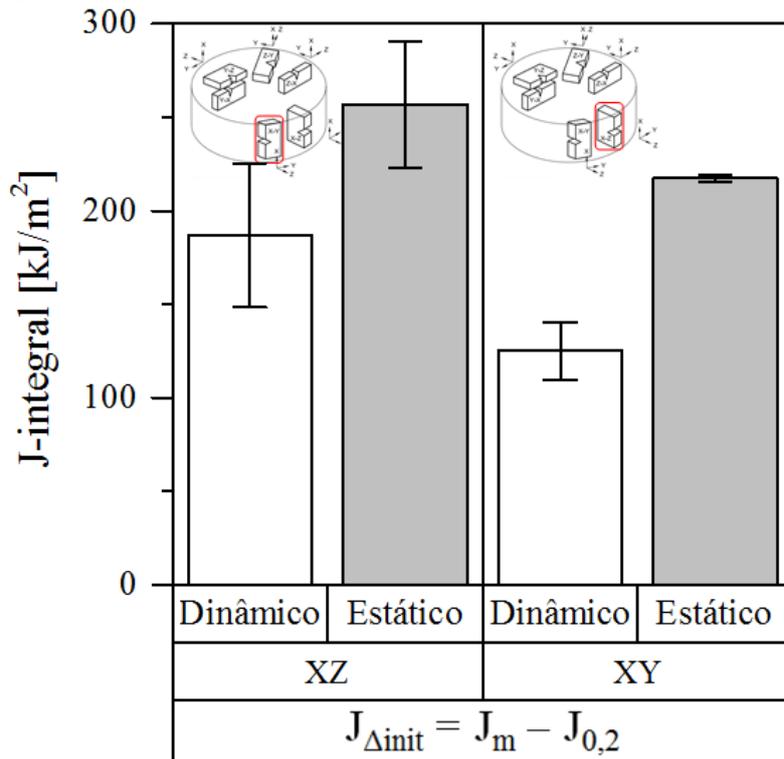
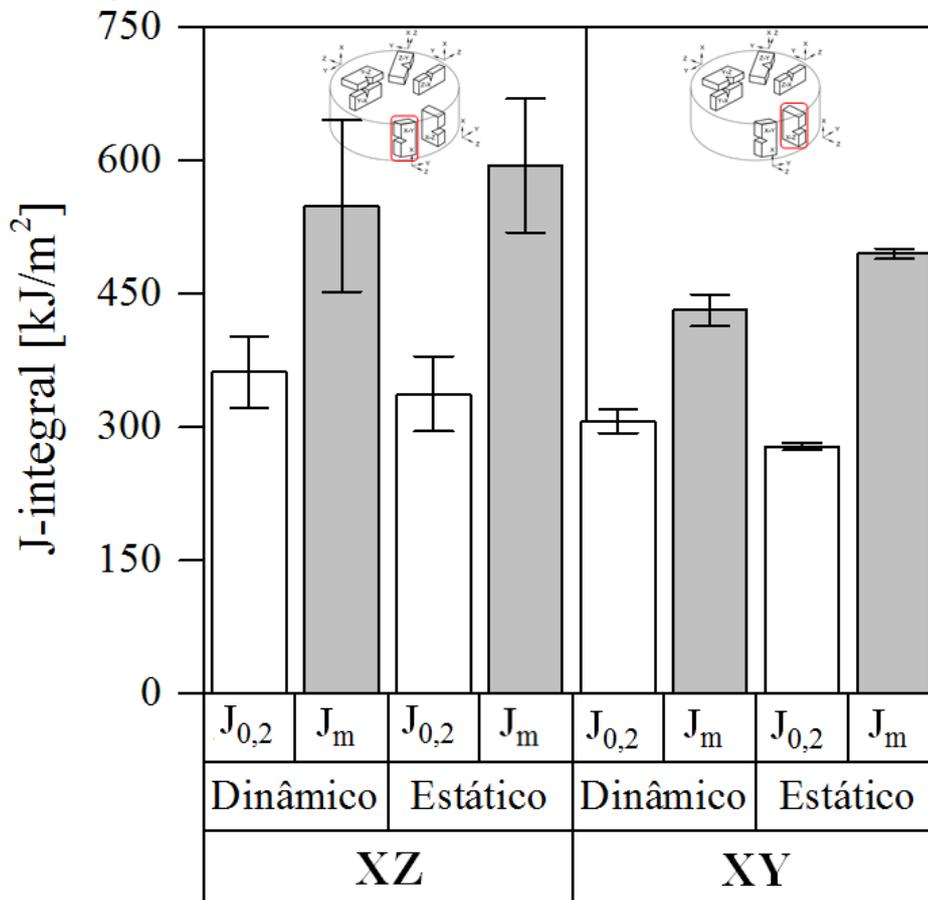
Figura 37. Parâmetro de tenacidade $J_{\Delta init}$ versus ensaios estáticos e dinâmicos

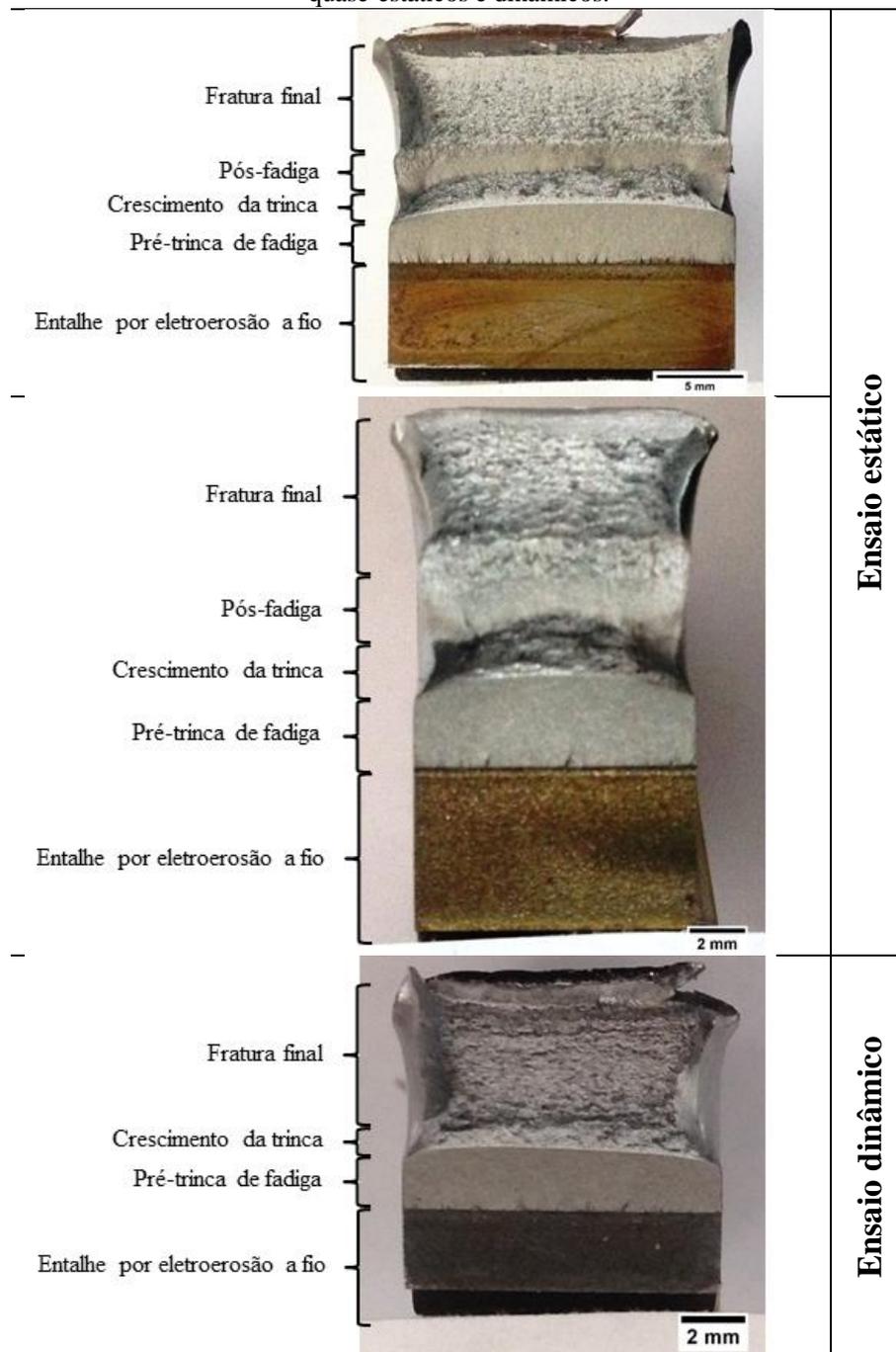
Figura 38. Tenacidade a fratura dinâmica x tenacidade a fratura estática.



4.6 Análise da Superfície de Fratura

A Figura 39 apresenta as regiões de fratura para cada tipo de amostra empregada nos ensaios de tenacidade. Estas apresentam as seguintes regiões (de baixo para cima): entalhe por eletroerosão a fio, pré-trinca de fadiga, crescimento da trinca (Δa), pós-fadiga e fratura final para fraturas dos ensaios quase-estáticos, diferindo das fraturas dos ensaios dinâmicos apenas pela ausência da região da pós-fadiga.

Figura 39. Fraturas representativas com descrições de cada região da superfície de fratura, para os ensaios quase-estáticos e dinâmicos.



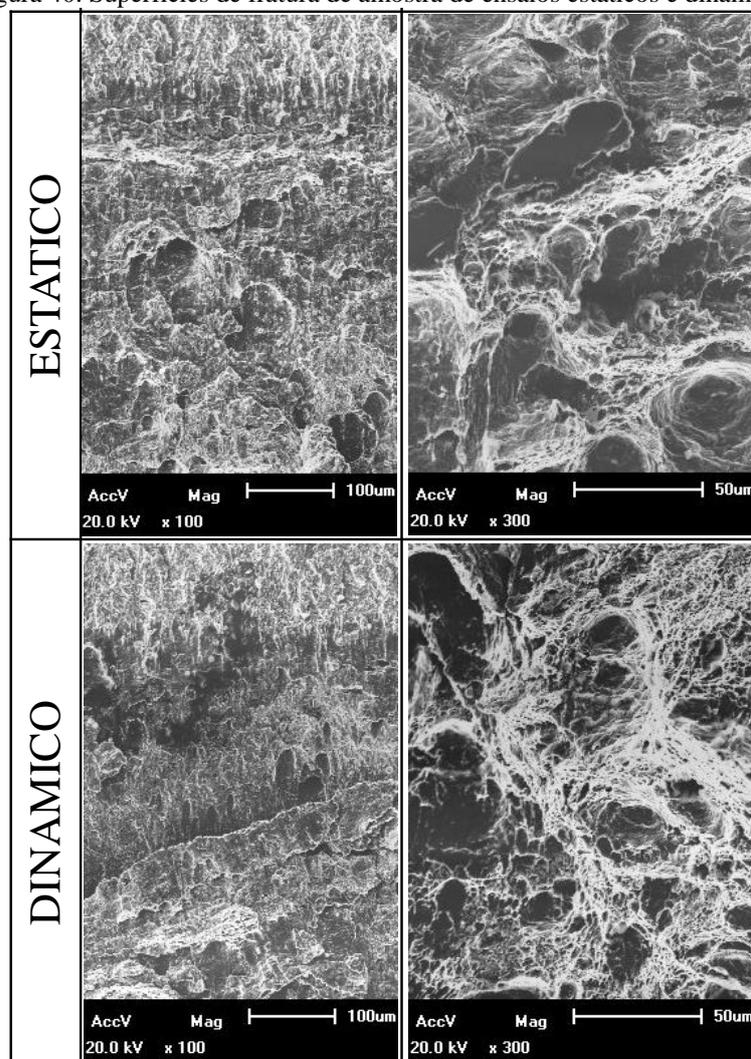
Pelas superfícies de fratura observadas em MEV, pode-se identificar características distintas nas regiões de fratura da amostra. As imagens das fraturas estão distribuídas da seguinte forma.

Linhas: Ensaio estático na linha superior e ensaio dinâmico na linha inferior.

Colunas: Aumento de 100x na esquerda e 300x na direita.

Na Figura 40 observam-se típicas fraturas dúcteis com propagação plana da trinca nas regiões analisadas das amostras (estado tendendo a triaxial de tensões), com micromecanismo de fratura por coalescimento de microcavidades (*dimples*) evidenciadas na coluna da direita.

Figura 40. Superfícies de fratura de amostra de ensaios estáticos e dinâmicos.



5.0 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho permitem as seguintes conclusões:

- O material apresenta microestrutura com grãos refinados de ferrita e bainita, não evidenciando direção de maior deformação dos grãos, onde a ferrita tem a função de absorver energia e a bainita atua como barreira, aumentando a resistência a propagação de trincas, além de aumentar a resistência mecânica.
- Com o aumento da severidade nos ensaios de tenacidade (aumentando a taxa de deformação com ensaio de impacto instrumentado), a razão elástica aumentou de 0,86 no ensaio estático, para 0,91 (defeito lateral passante, X-Y) e 0,92 (defeito superficial, X-Z), muito próximas ao limite máximo aceitável estabelecido na API Specif 5L que é de 0,93, diminuindo a capacidade do material se deformar plasticamente na frente da trinca.
- A tenacidade a fratura foi degradada com o aumento da taxa de deformação, sofrendo uma redução de aproximadamente 40% nas amostras com orientação de entalhe X-Y (defeito lateral passante) e de aproximadamente 30% nas amostras com orientação de entalhe X-Z (defeito superficial), demonstrados através do $J_{\Delta init}$.
- Mesmo com aumento da severidade do ensaio de impacto charpy instrumentado, as fraturas observadas se mantiveram tipicamente dúctil, com micromecanismo de fratura por coalescimento de microcavidades (*dimples*).

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes tópicos são sugeridos para a continuidade do trabalho apresentado nesta dissertação:

- Aplicação da metodologia do estudo de tenacidade dinâmica para caracterização da tenacidade do acos para fabricacao de dutos com outras microestruturas.
- Aplicação da metodologia do estudo de tenacidade dinâmica para caracterização da tenacidade dos materiais aplicados em dutos.
- Estender a metodologia aplicada, para caracterização da tenacidade dinâmica de juntas soldadas em dutos.
- Estender a metodologia aplicada, para caracterização da tenacidade dinâmica de materiais que apresentam variação desta propriedade em função da taxa de deformação.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7th EGIG-report 1970-2007. (Dezembro de 2008). *Gas Pipeline Incidents*.

ANDERSON, T. (2005). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Thrid Edition*. New York: CRC Press.

Angamuthu, K., Guha, B., & Achar, D. R. (08 de 2009). Investigation of Dynamic Fracture Toughness (JId) Behavior of Strength Mis-matched Q & T Steel Weldments Using Instrumented Charpy Impact Testing. *Engineering Fracture Mechanics*, V. 64, 417-432. India.

API Spec 5L. (2007). API 5L: Specification for Line Tubes. Washington, D. C., EUA.

ASTM E1820. (2013). Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. EUA.

ASTM E2298-13a. (2013). Standard Test Method for Instrumented Impact Testing of Metallic Materials. EUA.

ASTM E23. (2012). Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. EUA.

ASTM E23-12c. (2012). Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. EUA.

ASTM E8/8M. (2015). Test Method for Tension Testing Of Metallic Materials. EUA.

ASTM Internatinal. (1991). *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Iron and Steels*. USA.

Barbosa, L. S. (Outubro de 2012). Efeito da Espessura na Tenacidade à Fratura e no Crescimento de Trinca por Fadiga em um Aço do Tipo API 5L-X70. *Dissertação de Mestrado*. Ouro Preto, MG, Brasil.

- Belalia, A., Rahmani, A., Lenkey, G. B., Pluinage, G., & Azari, Z. (2012). DYNAMIC CHARACTERIZATION OF API 5L X52 PIPELINE STEEL. *Key Engineering Materials*, 498, 15-30.
- Chaouadi, R; Puzzolante, J. L. (2008). Loading rate effect on ductile crack resistance of steels using precracked Charpy specimens. *International Journal of Vessels and Piping*, 752-761.
- Costa, V. M. (2014). Análise da Tenacidade de Uma Junta Soldada de Um Aço Resistente à Abrasão da Série 450 HB . *Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre, RS, Brasil.
- Fedelinsky, P., Aliabadi, M. H., & Rooke, D. P. (1996). Boundary Elements Formulation of the Analysis of the Dynamic Fracture of Cracked Structures. *Engineering Analysis with Boundari Elements*, V. 17, 45-56. Great Britain.
- Figueiredo, K. (2004). Aplicação do Ensaio de Impacto Charpy Instrumentado no Estudo de Tenacidade à Fratura Dinâmica nas Soldas em Aço para Caldeiras. *Tese de Doutorado*. São Carlos, SP, Brasil.
- Garcia, A., Spim, J. A., & Santos, C. A. (2012). *Ensaio dos materiais* (2ª ed.). Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- Gorni, A. A. (10 de 2002). Fatores que Afetam a Razao Elastica de Chapas Grossas de Aço Microligado. *39 Seminario de Laminacao - Processos e Produtos Laminados e Revestimentos, ABM*. Ouro Preto, MG, Brasil.
- Haag, J. (2012). Propagação de Trincas por Fadiga em Arames de Alta Resistência Mecânica. *Trabalho de Conclusão (graduação)*. Porto Alegre, RS, Brasil.
- Haskel, H. L. (2013). Avaliação da Tenacidade à Fratura e do Efeito da Microtextura e Mesotextura na Curva de Transição Dúctil-Frágil do Aço API 5L X70. *Dissertação de Mestrado*. Ponta Grossa, PR, Brasil.
- Hertzberg, R. W. (1995). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. New Jersey: John Wley & Sons, Inc.
- Hippert Jr, E. (2004). Investigação Experimental do Comportamento Dúctil de Aços API-X70 e Aplicação de Curvas de Resistência J-Δa Para Investigação de Colapso em Dutos. *Tese de Doutorado*. São Paulo, SP, Brasil.

- ISO 12135. (2002). *Metallic Materials - Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness*.
- Koo, J., & Bangaru, N. V. (2000). *Ultra-High Strength Dual Phase Steels With Excellent Cryogenic Temperature Toughness*. Exxon Mobil Upstream Research Company.
- Kruger, E. L. (30 de Novembro de 2009). *Charpy Instrumentado: Análise da instrumentação e da influência de condições metalúrgicas de um aço de ultra-alta resistência mecânica na tenacidade à fratura dinâmica*. Tese de doutorado. Campinas, São Paulo, Brasil.
- Kvackaj, T. e. (2010). Influence of Strain rate on ultimate tensile of coarse-grained and ultrafine-grained copper. *Materials Letters*.
- Malcoln, J. G. (2007). *A Guide for understanding Specifying Chemical Composition*. Technical Report, EWI Microalloying.
- NBR 6157. (1980). *Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados simplesmente apoiados*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Nogueira, F. C. (Março de 2006). *Influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT-4340*. Dissertação de mestrado. Ilha Solteira, Rio de Janeiro, Brasil.
- Rice, J. R. (1968). A Path Independent Integral and the Aproximate Analyses of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, V. 35, 379-386.
- Rodrigues, A. R. (Abril de 2001). *Charpy Instrumentado - Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica de Materiais Metálicos*. Dissertação de mestrado. Ilha Solteira, RJ, Brasil.
- Rosa, E. (2002). *Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga)*. SC, Brasil: UFSC.
- Rosa, L. B. (Agosto de 2011). *ESTUDO DO COMPORTAMENTO TERMOMECAÂNICO DO AÇO API 5L MICROLIGADO AO Nb-V-Ti POR ENSAIOS DE TORÇÃO A QUENTE*. Dissertação de mestrado. Vitória, Espírito Santo, Brasil.

- Rosado, D. B. (2011). Comparação do Efeito da Fragilização por Hidrogênio em Aços com Resistência à Tração Acima de 1000 MPa. *Mestrado*. Porto Alegre, RS, Brasil.
- Server, W. L. (1978). Impact Three-Point Bend Testing for Notched and Precracked Specimens. *Journal of Testing and Evaluation, JTEVA*, 29-34.
- Shockey, D. A. (1995). Dynamic fracture testing. In: *ASM Handbook: mechanical testing* (pp. 259-261). Ohio: ASM.
- Souza, S. A. (1995). *Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Zanon, G. (2009). Comportamento à Fratura de defeitos Circunferenciais em Dutos Submarinos Instalados Por Bublinamento. *Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre, RS, Brasil.
- Zhu, X., & Joyce, J. (2012). Review of Fracture Toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) Testing and Standardization. *Engineering Fracture Mechanics*, V.85, 1-46.