

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

THIERRY HENRIQUE MACHADO GUMIERI

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM JUNTAS SOLDADAS
CIRCUNFERENCIAIS DE TUBULAÇÕES DE PROCESSO.

Guaratinguetá
2011



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

THIERRY HENRIQUE MACHADO GUMIERI

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM JUNTAS SOLDADAS
CIRCUNFERENCIAIS DE TUBULAÇÕES DE PROCESSO.**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá
2011

G974a	Gumieri, Thierry Henrique Machado Avaliação da tenacidade à fratura em juntas soldadas circunferenciais de tubulações de processo / Thierry Henrique Machado Gumieri – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 73 f : il. Bibliografia: f. 68-69 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento 1. Mecânica da fratura 2. Juntas soldadas I. Título CDU 620.172.24
-------	---

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM JUNTAS SOLDADAS
CIRCUNFERENCIAIS DE TUBULAÇÕES DE PROCESSO

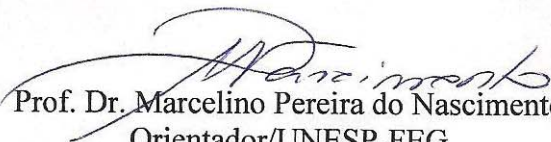
THIERRY HENRIQUE MACHADO GUMIERI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
UNESP/FEG


Prof. Dr. Fernando de Azevedo Silva
UNESP/FEG

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida.

Aos meus familiares pelo apoio em todas as etapas da minha vida.

Aos amigos Uilton (Caldeiraria Jambeiro), Renato (LABMETAL), Marcelo Ricci (CWI) pelo e auxílio no desenvolvimento deste projeto.

Ao meu orientador Marcelino, pelos conhecimentos transmitidos

“Ama-se mais o que se conquista com esforço”.

Benjamin Disraeli

GUMIERI, T. H. M. **Avaliação da tenacidade à fratura em juntas soldadas circunferenciais de tubulações de processo.** 2011. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Este trabalho visa analisar a tenacidade de uma junta soldada na presença de uma trinca considerando a máxima tensão que o material pode suportar na presença desse tipo de defeito, visto que é uma descontinuidade comum de ocorrer nesse tipo de junta e sua detecção por meio de ensaios não destrutivos é simples, possibilitando inclusive seu dimensionamento. O estudo será realizado através do ensaio CTOD – *Crack-Tip Opening Displacement*, com corpos de prova tipo SE(B) – *Single Edge Bend* retirados de uma junta soldada e do metal base na posição L-C em relação ao plano do comprimento de um tubo de teste. A idéia principal é simular as condições de soldagem para a fabricação de tubulações industriais, realizadas em oficinas de caldeiraria (*pipe-shop*) dentro de plantas petroquímicas. Essas tubulações estão freqüentemente sujeitas à operação com produtos inflamáveis e tóxicos submetidos a grandes pressões e temperaturas, onde um possível rompimento da linha pode causar danos irreparáveis à planta industrial, ao meio ambiente e à saúde das comunidades vizinhas. Esse estudo apresenta a importância da utilização de um procedimento de soldagem qualificado para a realização de soldas de qualidade, mantendo as propriedades de tenacidade à fratura do metal de base. Constatou-se através dos resultados dos ensaios que a utilização de um procedimento de soldagem qualificado para a realização de soldas garante propriedades mecânicas muito próximas as do metal base, o que em termos de projeto é ótimo, pois pode-se garantir que a solda terá as mesmas características do metal base especificado para a montagem da tubulação.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica da Fratura. Junta soldada.

GUMIERI, T. H. M. Evaluation of fracture toughness in circumferential welds process piping. 2011. Graduate Work (Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

This work aims to analyze the toughness of a welded joint in the presence of a crack through the analysis of maximum tension the material can withstand the presence of this type of defect, since a discontinuity is likely to occur in this type of joint and its detection and its design is simple, using non-destructive testing techniques. The study will be conducted through the CTOD test - Crack-Tip Opening Displacement, with type specimens SE (B) - Single Edge Bend taken from a weld in the L-C position in relation to the length (longitudinal axis) of a test tube. The main idea is to simulate the welding conditions for the manufacture of industrial pipes, made in boiler shops (pipe-shop) within petrochemical plants. These pipes are often subject to operation with flammable and toxic subjected to high pressures and temperatures, where one can break the line can cause irreparable damage to the plant, the environment and the health of surrounding communities. With this study we evaluate whether the weld metal has the same properties as fracture toughness of the base material. This study shows the importance of using a qualified welding procedure for performing quality welds while maintaining the properties of the fracture toughness of the base metal. It was found from the results of tests using a welding procedure described for carrying out welding ensures mechanical properties very close to the base metal, which in terms of design is great, since one can ensure that the weld will the same characteristics of the base metal specified for the assembly of the pipe.

KEYWORDS: Fracture Mechanics. Welded joint.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escopo de aplicação dos códigos ASME.	18
Figura 2 – Representação esquemática do processo TIG (GTAW).....	19
Figura 3 – Representação esquemática do processo Arame Tubular (FCAW).	20
Figura 4 – Definições mais comuns de CTOD	26
Figura 5 – Representação esquemática do parâmetro δ_c	27
Figura 6 - Representação da abertura na ponta da trinca	27
Figura 7 - Representação esquemática da abertura da trinca durante um ensaio de flexão em um corpo de prova do tipo SE(B)	28
Figura 8 - Modos básicos de deslocamento da superfície da trinca	31
Figura 9 - Dimensões e tolerâncias proporcionais para CP de Flexão em três pontos.....	32
Figura 10 - Clip gauge – Transdutor de deslocamento com extensômetros.	33
Figura 11 - Curvas características obtidas no ensaio CTOD.....	34
Figura 12 - Representação da posição de soldagem “6G”	38
Figura 13 - Ilustração da soldagem do tubo de teste.....	39
Figura 14 - Ilustração da soldagem do tubo de teste.....	40
Figura 15 - Ilustração da soldagem do tubo de teste.....	40
Figura 16 - Representação de juntas soldadas circunferenciais para tubulações industriais de processo.....	41
Figura 17 - Representação de retirada e dimensional dos CP's de Flexão por três pontos – SE(B).....	42
Figura 18 - Orientação de retirada dos CP's.	43
Figura 19a - Orientação de retirada dos CP's de tração.....	44
Figura 19b - Requisitos de preparação para o CP tração.	45
Figura 20 - Ilustração dos CP's preparados para o ensaio de tração.....	45
Figura 21 - Corpos de Prova SE (B) antes do ataque químico..	46

Figura 22 - Corpos de Prova SE (B) antes do ataque químico..	46
Figura 23 - Corpos de Prova SE (B) (solda) após o ataque químico.	47
Figura 24 - Corpos de Prova SE (B) (solda) após o ataque químico.	47
Figura 25 - Corpos de Prova SE (B) (solda) após o ataque químico	48
Figura 26 - Corpos de Prova SE (B) (solda) após o ataque químico – Seção transversal.	48
Figura 27 - Corpos de Prova SE (B) (solda) após o ataque químico – Seção transversal + Vista superior.....	49
Figura 28 – Identificação do plano da trinca.....	50
Figura 28a - Corpos de Prova SE (B) (solda) após realização do entalhe – Vista superior.....	50
Figura 29 - Corpos de Prova SE (B) (solda) após realização do entalhe – Vista superior + Seção transversal.....	51
Figura 30 - Corpos de Prova SE (B) (solda) após realização do entalhe – Vista superior + Seção transversal.....	51
Figura 31 - Corpo de Prova SE (B) (Metal base) após realização da pré-trinca.....	52
Figura 32 - Corpos de Prova SE (B) (Solda) após realização da pré-trinca	52
Figura 33 - Corpos de Prova SE (B) – Dimensões padrões finais para o ensaio.	53
Figura 34 - Representação do dispositivo para ensaio CTOD.....	54
Figura 35 - Corpo-de-prova montado no dispositivo de flexão.	54
Figura 36 - Corpo-de-prova pronto para o início dos ensaios	55
Figura 37 - Início do processo de flexão e propagação da trinca.....	55
Figura 38 - Corpos-de-prova de tração.	56
Figura 39 - Corpos-de-prova CP1, CP2, CP3 após rompimento..	57
Figura 40 - Corpos-de-prova CP4, CP5, CP6 após rompimento.	57
Figura 41 - Comparação entre os corpos-de-prova.....	58
Figura 42 - Comparação entre os corpos-de-prova.....	58
Figura 43 - Registro carga x deslocamento para o CP 1.....	59

Figura 44 - Registro carga x deslocamento para o CP 2.....	60
Figura 45 - Registro carga x deslocamento para o CP 3.....	61
Figura 46 - Registro carga x deslocamento para o CP 4.....	62
Figura 47 - Registro carga x deslocamento para o CP 5.....	63
Figura 48 -Registro carga x deslocamento para o CP 6.....	64
Figura 49 - Figura 49– Registro carga x deslocamento para todos os CP's - Comparativo.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações utilizadas para o cálculo do CTOD utilizando-se CP's do tipo SE(B).....	35
Tabela 2 – Dados registrados, relativos à soldagem dos tubos.....	37
Tabela 3 – Requisitos mecânicos para tubos [API 5L – PSL1]	38
Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração..	39
Tabela 5 – Dados “fixos” para o cálculo do CTOD.....	56
Tabela 6 – Cálculo do CTOD para os CP1 / CP2 / CP3..	65
Tabela 7 – Cálculo do CTOD para os CP4 / CP5 / CP6.....	66
Tabela 8 – Cálculo do CTOD para os CP4 / CP5 / CP6.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Campos de aplicação para normas e códigos de tubulação.....	17
Quadro 2 – Principais ensaios não destrutivos	22
Quadro 3 – Comparativo entre categorias da mecânica da fratura	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
AWS	AMERICAN WELDING SOCIETY
BS	BRITISH STANDARD INSTITUTE
CTOD	CRACK-TIP OPENING DISPLACEMENT
EPS	ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
FCAW	FLUX CORED ARC WELDING
GMAW	GAS METAL ARC WELDING
GTAW	GAS TUNGSTEN ARC WELDING
RQPS	REGISTRO DE QUALIF. DE PROCED. DE SOLDAGEM
SE(B)	SINGLE EDGE BEND
SMAW	SINGLE EDGE BEND
TIG	TUNGSTEN INERT GAS

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Tenacidade à Fratura – Considerações Gerais	21
2.2	Mecânica da Fratura - Generalidades	22
2.3	Ensaios de Tenacidade à Fratura	24
2.4	Crack Tip Opening Displacement - CTOD	26
2.5	Determinação do CTOD crítico	29
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA	37
3.1	Seleção do Metal Base e Soldagem.....	37
3.2	Preparação dos Corpos-de-Prova	40
3.3	Execução dos entalhes e pré-trinca	49
3.4	Ensaio dos CP's.....	53
4.	RESULTADOS	56
4.1	Ensaio de tração	56
4.2	Ensaio de flexão por três pontos	57
5.	CONCLUSÕES.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

Tubos são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluidos. Todos os tubos são de seção circular, apresentando-se como cilindros ocos. A grande maioria funciona como condutos forçados, isto é, sem superfície livre, com o fluido tomando toda a área da seção transversal. Fazem exceção apenas as tubulações de esgoto e, às vezes, as de água, que trabalham com superfícies livres como canais. Chama-se de “tubulação” um conjunto de tubos e seus diversos acessórios. A necessidade da existência das tubulações decorre principalmente do fato de o ponto de geração ou de armazenagem dos fluidos estar, em geral, distante do seu ponto de utilização. Usam-se tubulações para o transporte de todos os materiais capazes de escoar, isto é, todos os fluidos conhecidos, líquidos ou gasosos, assim como materiais pastosos e fluidos com sólidos em suspensão, todos em toda a faixa de variação de pressões e temperaturas usuais na indústria: desde o vácuo absoluto até cerca de 1000 MPa, e desde próximo do zero absoluto até as temperaturas de metais em fusão. (TELLES, 1932, p.1)

A importância das tubulações na indústria é enorme; todas as indústrias têm redes de tubulações de maior ou menor importância, e quase todas essas redes são essenciais ao funcionamento da indústria. A importância é ainda maior nas chamadas indústrias de processo, nas quais as tubulações são os elementos físicos de ligação entre os equipamentos (vasos de pressão, reatores, tanques, bombas, trocadores de calor, etc.), por onde circulam os fluidos de processo e utilidades. Nessas indústrias, o valor das tubulações representa, em média, 20 à 25% do custo total da instalação industrial, a montagem das tubulações atinge, em média, 45 à 50% do custo total de montagem de todos os equipamentos, e o projeto das tubulações vale, em média, 20% do custo total do projeto da indústria. (TELLES, 1932, p.1)

Chamam-se tubulações de processo as tubulações do fluido ou dos fluidos que constituem a finalidade básica da indústria, nas indústrias cuja atividade principal é o processamento, a armazenagem ou a distribuição de fluidos. Tais são, por exemplo, as tubulações de óleos e gás em refinarias, terminais e instalações de armazenagem ou distribuição de petróleo, tubulações de vapor em centrais termelétricas, tubulações de produtos químicos em indústrias químicas, etc. (TELLES, 1932, p.2)

Entre todos os materiais industriais existentes, o aço carbono é o que apresenta menor relação custo/resistência mecânica, além de ser um material fácil de soldar e de conformar, e também fácil de ser encontrado no comércio. Por todos esses motivos, o aço carbono é chamado “material de uso geral” em tubulações industriais, isto é, só se deixa de empregar o

aço carbono quando houver alguma circunstância especial que o proíba, e desta forma todos os outros materiais são utilizados apenas em alguns casos especiais, como exceção. Em uma refinaria de petróleo, por exemplo, mais de 90% de toda a tubulação é de aço carbono. Emprega-se o aço carbono para água-doce, vapor de baixa pressão, condensado, ar comprimido, óleos, gases e muitos outros fluidos pouco corrosivos, em temperaturas a partir de -45°C, e a qualquer pressão. As propriedades do aço carbono são grandemente influenciadas por sua composição química e pela temperatura. O aumento na quantidade de carbono no aço produz basicamente um aumento nos limites de resistência mecânica e de escoamento e na dureza e temperabilidade do aço; em compensação, esse aumento prejudica bastante a ductilidade e a soldabilidade do aço. Por esse motivo, em aços para tubos limita-se a quantidade de carbono até 0,35%, sendo que até 0,30% de C a solda é bastante fácil, e até 0,25% de C os tubos pode ser facilmente dobrados à frio. O aço carbono apresenta uma transição de comportamento de dúctil para frágil em baixas temperaturas, ficando sujeito a fraturas frágeis repentinas, que podem ser catastróficas, com perda total do equipamento. A temperatura de transição não é um valor definido para um determinado tipo de aço, sendo muito influenciada pela composição química, tamanho dos grãos, espessura da peça, nível de tensões, e principalmente pela existência de irregularidades geométricas na peça. (TELLES, 1932, p.9)

A aplicação básica deste estudo será direcionada para tubulações de processo utilizadas em refinarias de petróleo e gás. A Petrobras é líder absoluta nesse tipo de atividade no Brasil e possui inclusive, atividades no ramo petrolífero em 28 países espalhados pelo mundo. Devido à sua participação no mercado e a grande dimensão de suas atividades no setor, a Petrobras lança mão de normas técnicas elaboradas pelo CENPES (Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello) que é a unidade da Petrobras responsável pelas atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e engenharia básica da empresa. Foi criado em 4 de dezembro de 1963 e tem como missão prover e antecipar soluções tecnológicas com visão de inovação e sustentabilidade para a companhia.

Segundo umas dessas normas, a N-1673 (REV. D – Out. 1999), os campos de aplicação das normas de projeto, cálculo, especificação de material e montagem de tubulações industriais, devem estar conforme o quadro 1 e a Figura 1. Desta forma utilizaremos como normas de referência, no que se refere ao projeto de tubulações industriais, as normas citadas na primeira coluna do quadro 1, pois referem-se a **Instalações de Produção e Refinarias**.

O código ASME B31.3 (Process Piping – 2008) é amplamente utilizado no ambiente industrial de processo, pois apresenta todos os requisitos para projeto, fabricação, montagem e

inspeção de tubulações industriais. Possui em seu escopo a seguinte descrição: “Este código foi desenvolvido considerando tubulações tipicamente encontradas em refinarias de petróleo, química, farmacêutica, têxtil, semicondutores, papel, e as plantas criogênicas e relacionados plantas de processamento e terminais. Prescreve os requisitos para materiais e componentes, projeto, fabricação, montagem, exame, inspeção e teste dos fluidos”.

O capítulo 5 (Fabricação e Montagem) deste código apresenta os requisitos para a montagem das tubulações, entre eles os requisitos para soldagem dos tubos e acessórios. Procedimentos de soldagem (EPS/RQPS) devem ser previamente elaborados e qualificados pela empresa montadora seguindo os requisitos do Código ASME Sec. IX.

Quadro 1 - Campos de aplicação para normas e códigos de tubulação (N-1673 D, 1999)

Instalação Objeto	Instalações de Produção e Refinarias	Áreas Reservadas em Refinarias, Plantas de Processo para Instalação de Dutos	Bases, Terminais e Estações	Linha Tronco de Dutos
Cálculo	PETROBRAS N-1673	PETROBRAS N-1673	PETROBRAS N-1673	PETROBRAS N-1744
Projeto	PETROBRAS N-57	PETROBRAS N-57	PETROBRAS N-57	PETROBRAS N-1744
Material	PETROBRAS N-76	PETROBRAS N-2444	PETROBRAS N-2444	PETROBRAS N-2444
Montagem	PETROBRAS N-115	PETROBRAS N-464	-	PETROBRAS N-464
Norma ASME	B 31.3	B 31.4 e B 31.8	B 31.4 e B 31.8	B 31.4 e B 31.8

O Código ASME Sec. IX (*Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators - 2010*) estabelece todos os requisitos técnicos para a qualificação de procedimentos conforme descrição em seu escopo: “Este Código refere-se à qualificação de soldadores, operadores de soldagem, e os procedimentos que eles empregam em brasagem e soldagem de acordo com a norma de projeto do equipamento. É dividido em duas partes: QW, parte que apresenta os requisitos para soldagem e QB contém os requisitos para brasagem”.

A Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) é um documento escrito que fornece orientação para o soldador ou operador de soldagem para fazer soldas de produção de acordo com os requisitos do código. O principal objetivo da EPS é especificar as condições em

que a soldagem deve ser executada. Estas condições incluem os metais de base que são permitidos, os metais de adição que devem ser usados (se houver), pré-aquecimento e requisitos de tratamento térmico de alívio de tensões, etc. Tais condições são referidas nesta Seção como "variáveis" de soldagem.

O Registro de Qualificação de Procedimento de soldagem (RQPS) documenta o que ocorreu durante a soldagem do cupom de teste e os resultados dos ensaios mecânicos e testes realizados. No mínimo, a RQPS deve documentar as variáveis essenciais e outras informações para cada processo utilizado durante a soldagem do cupom de teste.

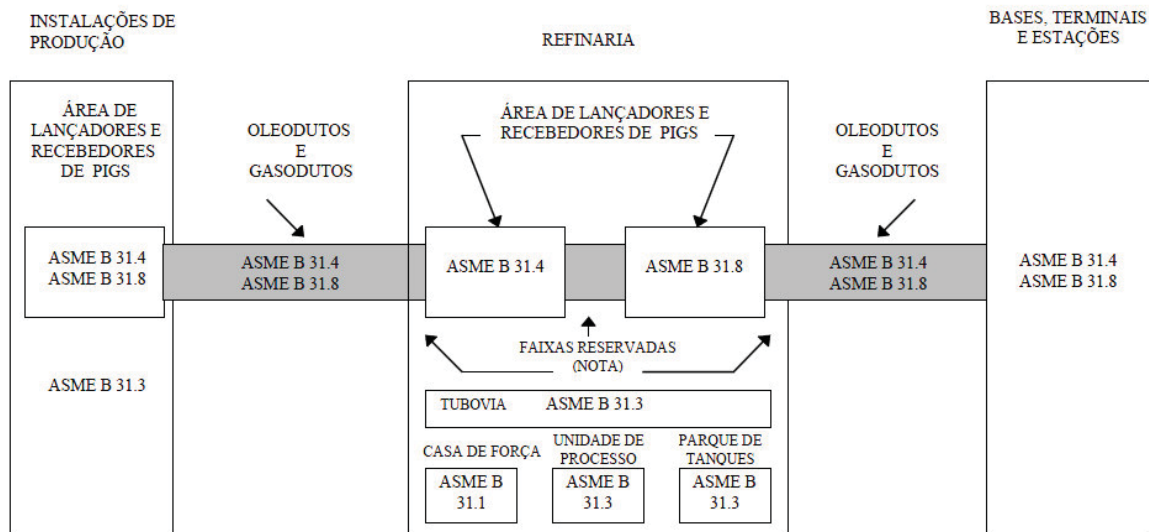


Figura 1 - Escopo de aplicação dos códigos ASME (N-1673 D, 1999);

Existem basicamente três situações em que a soldagem de tubos é realizada:

1) Solda de costura (longitudinal / helicoidal): São realizadas pelas fabricantes dos tubos seguindo os critérios das normas de fabricação em que eles serão especificados. Normalmente são usados os processos ERW - LONGITUDINAL (solda por resistência elétrica) e SAW - HELICOIDAL (solda por arco submerso);

2) Solda circunferencial (Soldagem realizada no *pipe-shop*): São as juntas soldadas para a emenda das barras de tubo para posterior montagem no campo. São realizadas em oficinas localizadas dentro das próprias unidades de refino / processo. As variáveis de soldagem são controladas de forma mais eficaz do que as juntas soldadas no campo. Além disso, as soldas realizadas em oficina, geralmente possuem melhor acabamento e qualidade pois são realizadas em posição mais adequada, além de não estarem sujeitas à intempéries

como vento, chuva, etc. Geralmente são utilizados processos de soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*);

3) Solda circunferencial (Soldagem realizada em campo): É a mais crítica das situações pois geralmente é executada em posição inadequada, dificultando as condições de trabalho do soldador e está sujeita a possível resfriamento brusco, ou até mesmo contato com água ou vapor. As variáveis de soldagem são mais difíceis de serem controladas nesse caso. Processos de soldagem mais comuns: GTAW e Eletrodo revestido – (SMAW).

O processo de soldagem GTAW, ou TIG (*Tungsten Inert Gas*) como é mais conhecido atualmente, é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. Conforme pode-se notar na Figura 2, a poça de soldagem, o eletrodo e parte do cordão são protegidos através do gás de proteção que é soprado pelo bocal da tocha. No processo, pode-se utilizar adição ou não (solda autógena), e seu grande desenvolvimento deveu-se à necessidade de disponibilidade de processos eficientes de soldagem para materiais difíceis, como o alumínio e magnésio, notadamente na indústria da aviação no começo da Segunda Grande Guerra Mundial. Assim, com o seu aperfeiçoamento, surgiu um processo de alta qualidade e relativo baixo custo, de uso em aplicações diversas. O GTAW funciona através do eletrodo de tungstênio (ou liga de tungstênio) preso a uma tocha. Por essa mesma tocha é alimentado o gás que irá proteger a soldagem contra a contaminação da atmosfera. O arco elétrico é criado pela passagem de corrente elétrica pelo gás de proteção ionizado, estabelecendo-se o arco entre a ponta do eletrodo e a peça. As variáveis que determinam basicamente o processo são a tensão do arco, a corrente de soldagem, velocidade de avanço e o gás de proteção. Deve-se considerar que as variáveis não agem especificamente de forma independente, havendo forte interação entre elas. (Bracarense, 2000, p. 1).

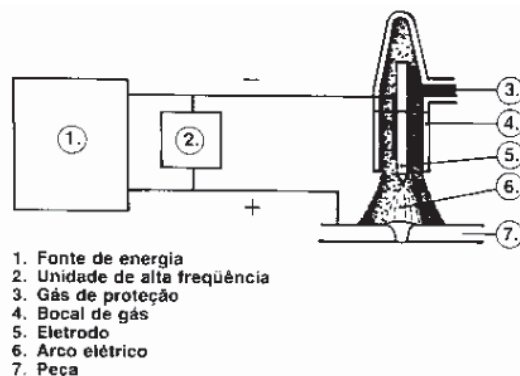


Figura 2 – Representação esquemática do processo TIG (Bracarense, 2000, p.1).

O processo de soldagem por Arame Tubular – *Flux Cored Arc Welding* (FCAW) é definido como sendo um processo de soldagem por fusão, onde o calor necessário a ligação das partes é fornecido por um arco elétrico estabelecido entre a peça e um Arame alimentado continuamente. É um processo semelhante ao processo MIG/MAG, diferindo deste pelo fato de possuir um Arame no formato tubular, que possui no seu interior um fluxo composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, entre as quais a melhoria das características do arco elétrico, a transferência do metal de solda a proteção do banho de fusão e em alguns casos a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória. A utilização de arame tubular deu uma alta qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos e possibilidade de solda em todas as posições. (JOAQUIM, 2002, p.2) A Figura 3 ilustra esse processo.

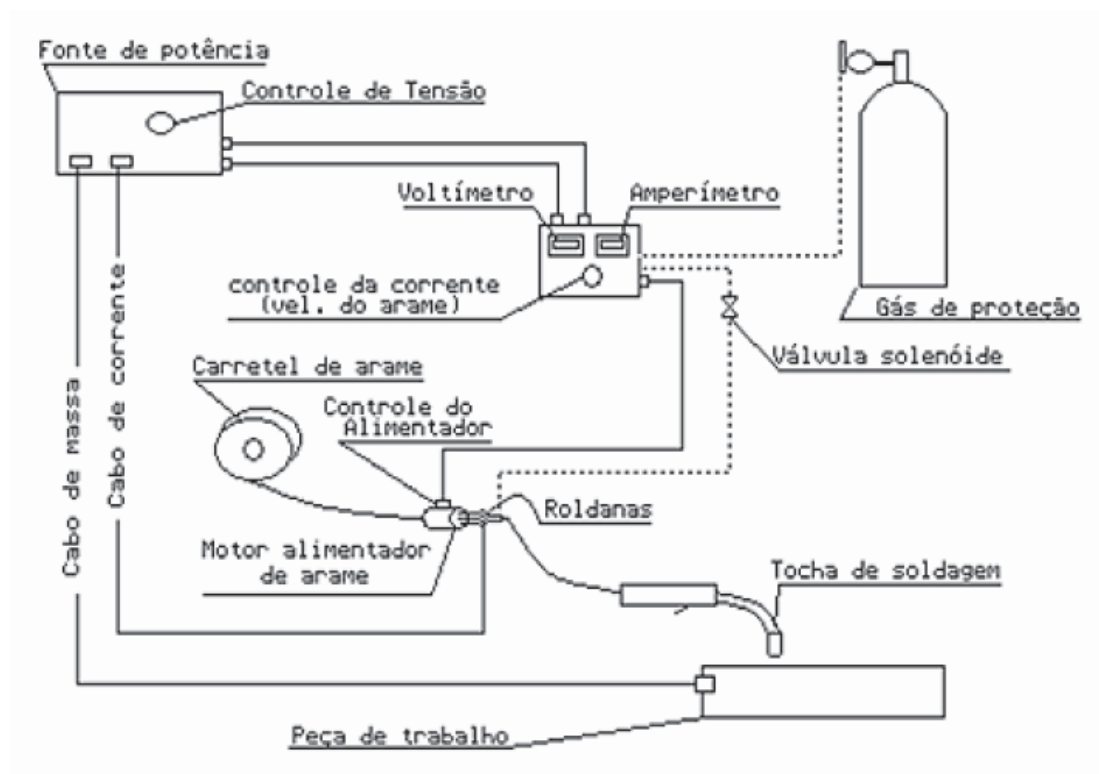


Figura 3 – Representação esquemática do processo Arame Tubular (FCAW) (JOAQUIM, 2002, p.3).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tenacidade à fratura – Considerações Gerais

O conceito de tenacidade à fratura é estudado pela mecânica da fratura, e representa a resistência do material à propagação de uma trinca pré-existente. A tenacidade à fratura é considerada uma propriedade do material, assim como o limite de escoamento e o módulo de elasticidade, dependendo de algumas variáveis como a taxa de deformação, temperatura, microestrutura, etc.

Os principais fatores que devem ser considerados para o projeto de um componente e a seleção de materiais para situações com a possível presença de trinca são: a máxima tensão de trabalho que o material deverá suportar (σ) e o máximo-tamanho de trinca admissível (2a). Conhecendo-se essas variáveis, pode-se selecionar um material com determinada tenacidade à fratura para suportar condições de tensões com um tamanho de trinca máximo, pode-se determinar o máximo comprimento da trinca que pode ser tolerada para que não ocorra a fratura. Assim, ao projetar-se um determinado componente, deve-se decidir quais das variáveis serão fixadas ou limitadas pela aplicação ou projeto e quais poderão sofrer mudanças e ser acompanhadas ou sujeitas ao controle do projeto. Atualmente, uma grande variedade de técnicas de ensaios não-destrutivos – os principais são apresentados no quadro 2 – tem sido desenvolvida para permitir a detecção e a medida de trincas em componentes mecânicos, sejam superficiais ou internas ao material. É importante destacar que a utilização de tais inspeções é essencial para que não ocorra uma fratura inesperada quando o tamanho do defeito superar o valor crítico. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 1999, p.165).

Quadro 2 – Comparativo entre as principais técnicas de ensaios não destrutivos.

ENSAIO NÃO DESTRUTIVO	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL	PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS DESVANTAGENS
LÍQUIDO PENETRANTE	Ensaio para detecção de descontinuidades superficiais através do princípio da capilaridade	Baixo custo	Não aplicável em materiais porosos
		Fácil aplicação	Superfície mal preparada pode mascarar as indicações
		Aplicável a geometrias complexas	Detecta somente defeitos abertos à superfície
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	Ensaio para detecção de descontinuidades superficiais e sub-superficiais através de aplicação de fluxo magnético	Fácil interpretação	Aplicável somente em materiais ferromagnéticos
		Detecta descontinuidades sub-superficiais	Pode haver necessidade de desmagnetização da peça
ULTRA-SOM	Ensaio volumétrico baseado no fenômeno da reflexão (eco) da energia sonora (ultrasom) pelas descontinuidades na peça	Detecta descontinuidades internas à peça	Dificuldade de inspeção de peças com baixa espessura
		Facilidade de aplicação em campo	Não fornece registro permanente
GAMAGRAFIA	Ensaio volumétrico baseado na absorção diferenciada de radiação pela matéria	Detecta descontinuidades internas à peça	Utiliza fontes radioativas contaminantes
		Alta sensibilidade	Dificuldade de aplicação em campo
		Fornece registro permanente	Exige mão-de-obra altamente especializada

2.2 Mecânica da fratura – Generalidades

Segundo Strohaecker, o objetivo da Mecânica da Fratura é determinar se um defeito tipo trinca irá ou não levar o componente a fratura catastrófica para tensões normais de serviço, permitindo ainda, determinar o grau de segurança efetivo de um componente trincado. O grande mérito da mecânica da fratura é a de possibilitar ao projetista valores quantitativos de tenacidade do material permitindo projetos que aliem segurança e viabilidade econômica. A Mecânica da Fratura quando aplicada à fadiga e à corrosão sob tensão permite a operação segura de componentes com defeitos prévios e/ou trincas nucleadas em serviço. É a ferramenta matemática que possibilita a análise de defeitos permissíveis fornecendo os conceitos e equações utilizadas para determinar como as trincas crescem e quanto podem afetar a resistência de estruturas.

Embora todo cuidado possa ser tomado durante a fabricação, é quase sempre inevitável que estruturas de aço soldadas venham a apresentar alguma forma de defeito, mesmo pequenos, é essencial para ambos, projetista e executor, conhecerem qual a periculosidade da presença de tais defeitos em um dado material sob dadas condições externas de tensão e temperatura. Assim

Burdekin, justificava a necessidade do desenvolvimento de técnicas que conseguissem prever o comportamento de estruturas com defeitos prévios. Os conceitos da Mecânica da Fratura provaram ser adequados para a predição das condições de falhas de estruturas e foram divididos em dois ramos: o regido pelo comportamento Linear-Elástico e o regido pelo comportamento Elasto-Plástico. Suas principais características estão resumidas no quadro 3.

Conforme Strohaecker, a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) é a metodologia a ser empregada em situações onde há possibilidade de ocorrer fratura sem ser precedida de extensa deformação plástica. Esta restrição à deformação plástica pode ser decorrência das próprias propriedades do material, aços de altíssima resistência mecânica, por exemplo, ou de fatores geométricos como as dimensões da estrutura. Mesmo para aços de média resistência mecânica o estado de deformação plana pode ser alcançado, se houver espessura suficiente ou se a temperatura for suficientemente baixa.

A MFLE pode ser empregada com sucesso à medida que a zona plástica for pequena em relação ao tamanho da trinca e às dimensões da estrutura que a contém. O sucesso da MFLE em estabelecer um tamanho de trinca crítico, desenvolvida teoricamente e comprovada na prática, fica restrita para casos em que não há deformação plástica apreciável acompanhando a fratura. A MFLE surgiu em função das limitações na aplicação dos conceitos tradicionais para prever o comportamento dos materiais quanto à presença de descontinuidades internas e superficiais. (STROHAECKER, p. 18)

Segundo Fortes (2003), a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) surgiu em função das limitações na aplicação do critério de K_{IC} da Mecânica da Fratura Linear Elástica em materiais dúcteis, onde a existência de uma zona plástica de tamanho significativo em relação à espessura invalida as considerações de tensões elásticas na ponta da trinca controlando o processo de fratura. Boa parte dos materiais empregados em construção mecânica apresenta plasticidade considerável quando solicitado, principalmente nas extremidades de defeitos eventualmente existentes. Entre os métodos de avaliação desenvolvidos na MFEP encontram-se a técnica do CTOD ("Crack Tip Opening Displacement") e a Integral J.

No caso de aços estruturais de baixa para média resistência mecânica pode-se pensar em termos da tradicional curva de transição dúctil-frágil com a mudança de temperatura, pois estes materiais apresentam definida esta região. Para materiais relativamente frágeis, no patamar inferior da curva de transição, ou para estruturas submetidas a tensões essencialmente elásticas, a tenacidade é expressa em termos de K_{IC} . Já a partir da transição dúctil-frágil a tenacidade é preferencialmente expressa pelos parâmetros da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica. (STROHAECKER, p.18)

Quadro 3 – Comparativo entre categorias da mecânica da fratura

ITEM	LINEAR - ELÁSTICA (MFLE)	ELASTO-PLÁSTICA (MFEP)
ESTADO	Deformação plana	Tensão plana
PROPAGAÇÃO DA TRINCA	Instável	Estável
DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NA PONTA DA TRINCA	Pequena	Grande
TIPO DE MATERIAL	Frágeis	Dúcteis
PARÂMETRO DE M.F.	K_{IC}	CTOD OU J_{IC}

2.3 Ensaios de Tenacidade à fratura

O ensaio de tenacidade à fratura consiste na aplicação de uma tensão de tração ou flexão em um corpo de prova confeccionado com um entalhe ou uma pré-trinca obtida por fadiga, induzindo um ponto de triaxialidade ou de concentração de tensões. Graças aos resultados do ensaio na forma de curvas, é possível determinar o valor da intensidade de tensão que causa o crescimento da trinca e a consequente fratura do material. Entre os principais parâmetros intrínsecos que exercem influência na tenacidade à fratura dos metais podem ser destacados a configuração geométrica do material estudado, as propriedades do material e o fator de intensidade de tensão. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 1999, p.165).

Cada categoria da mecânica da fratura apresenta ensaios e parâmetros característicos correspondentes. Através desses parâmetros podemos verificar o mecanismo de propagação da trinca e consequentemente avaliar a resistência desse material na presença dessa trinca pré-existente.

K_{IC} é o fator crítico de intensidade de tensões, baseado nas equações que descrevem o campo das tensões e deformações elásticas à frente de uma trinca. Assim, valores válidos de K_{IC} se restringem aos casos de fraturas frágeis que ocorrem sob regime elástico linear, ou seja, a presença de deformação plástica na ponta da trinca deve ser pequena o suficiente para não alterar significativamente a predominância do campo de tensões elásticas. Os procedimentos para a determinação de K_{IC} são normalizados (*American Society for Testing and Materials-*

ASTM; British Standards Institution-BSI, 2001a, 1997), e estabelecem restrições dimensionais para garantir a predominância de um estado de deformação plana nas amostras. Além disso, nas curvas de carga x deslocamento, permite-se um desvio da linearidade equivalente a um crescimento de trinca aparente de apenas 2% em relação ao tamanho da trinca inicial. A não linearidade permitida nessas curvas pode ser devida tanto a um crescimento subcrítico da trinca, quanto ao crescimento da zona plástica na ponta da trinca. O valor medido de K_{IC} é, portanto, associado apenas à energia gasta nos processos de iniciação que antecedem a propagação frágil instável da fratura, não tendo nenhuma relação direta com a etapa de propagação da fratura em si. (GRAÇA, 2002, p.19).

Semelhante ao K_{IC} , o ensaio J_{IC} (INTEGRAL J) caracteriza a resistência à fratura, porém é utilizado em condições elasto-plásticas onde ocorre propagação estável da trinca antes da fratura final. O processo de fratura em materiais dúcteis é precedido de um crescimento lento e estável da trinca. Durante o ensaio J_{IC} a fratura se inicia a partir de uma trinca aguda obtida por fadiga, que quando solicitada sofrerá, inicialmente, um processo de arredondamento e em seguida um crescimento estável da trinca. O valor de J que corresponde ao início de crescimento estável da trinca é chamado de J_{IC} (GUIMARÃES, 2008, p.28).

Segundo Graça (2002), **CTOD** é um parâmetro que representa o deslocamento de abertura da ponta de uma trinca, e foi introduzido como uma medida da tenacidade à fratura em regime elasto-plástico. **CTOD** é fisicamente relacionado aos processos de formação da zona plástica na ponta da trinca e o consequente adoçamento (blunting) da mesma. A Figura 4 mostra as duas definições mais comuns para **CTOD**.

Devido à possibilidade das medidas do **CTOD** serem realizadas mesmo quando houver deformação plástica na frente da trinca, esta técnica também pode ser utilizada na determinação de comprimentos críticos de trincas e de tensões de projeto de maneiras similares às aquelas propostas pela mecânica da fratura linear elástica. (GUIMARÃES, 2008, p.33)

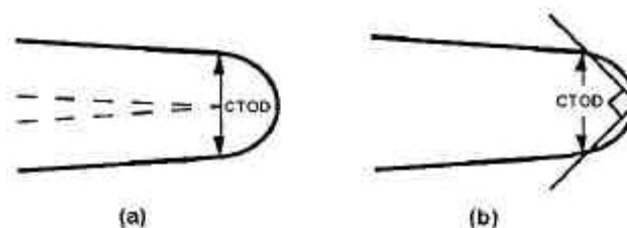


Figura 4 – Definições mais comuns de **CTOD**. (GRAÇA, 2002, p.22)

a) deslocamento na ponta da trinca original.

b) deslocamento na interseção com um vértice de 90°.

Conforme Guimarães (2008), o conceito da abertura da ponta da trinca é análogo ao conceito apresentado pela equação 2.1, que relaciona a tenacidade à fratura em deformação plana, KIC, com o valor do CTOD – (δ).

$$\delta = \frac{K^2}{E \cdot \sigma_{ys}} = \frac{G}{\sigma_{ys}} \quad (2.1)$$

Onde:

K - Fator de intensificação de tensão;

E - Módulo de elasticidade;

σ_{ys} - Limite de escoamento;

G - Taxa de dissipação de energia de deformação elástica.

2.4 Crack Tip Opening Displacement – CTOD

Por se tratar do ensaio a ser utilizado como método experimental nesse trabalho, o **CTOD** será estudado e abordado com maior profundidade.

Pereira (1999) afirma que a tenacidade à fratura **CTOD** é um parâmetro que pretende descrever a capacidade do material, situado na vizinhança da extremidade da trinca, deformar-se antes que a trinca se estenda, ou melhor, o **CTOD** procura caracterizar a capacidade do material deformar-se plasticamente antes da fratura, medindo o afastamento das extremidades de duas faces da trinca pré-existente, como ilustrado na figura 5.

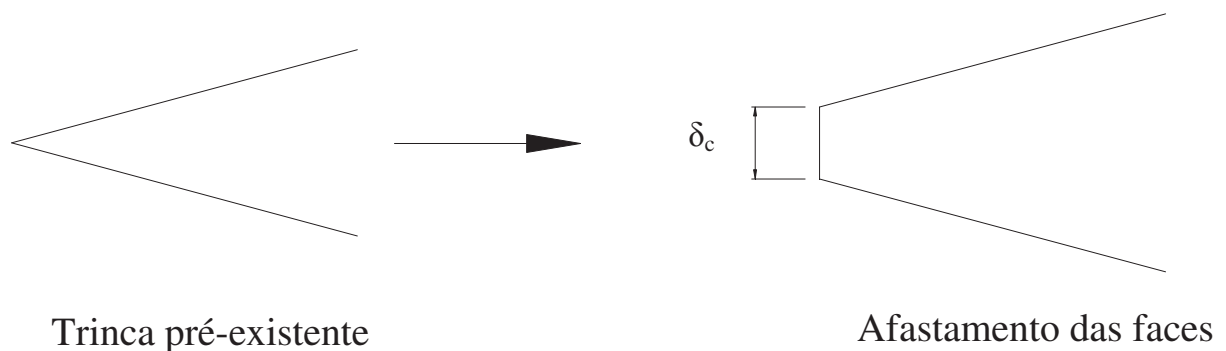


Figura 5 – Representação esquemática do parâmetro δ_c . (PEREIRA, 1999, p.39)

O uso do ensaio **CTOD** na avaliação da tenacidade de materiais baseia-se na hipótese de que existe, para cada material, um valor crítico de δ correspondente ao início da propagação da trinca pré-existente. Essa hipótese mostra-se na Figura 6, onde em (a) representa-se a trinca pré-existente, em (b) e (c) valores sucessivamente crescentes do **CTOD** (correspondendo a cargas aplicadas sucessivamente crescentes). Em (d) está representada a propagação da trinca (Δa). O valor crítico do CTOD é, portanto, o valor de δ que imediatamente antecede o início da propagação da trinca pré-existente. (PEREIRA, 1999, p.39)

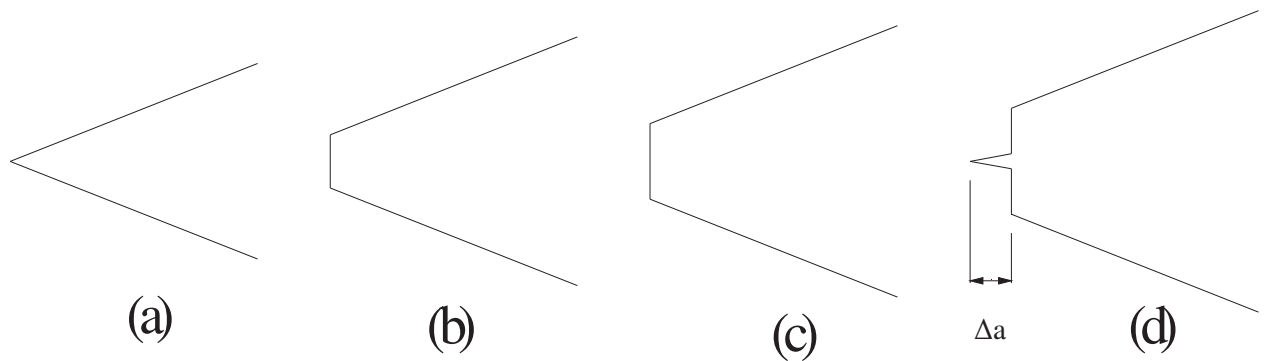


FIGURA 6 – Representação da abertura na ponta da trinca. (PEREIRA, 1999, p.39)

Sabendo que o **CTOD** é a medida do afastamento das faces de uma trinca, medido em sua extremidade, podemos relacionar geometricamente os deslocamentos medidos pelo transdutor obtidos na face do CP, com o valor de δ , conforme Figura 7.

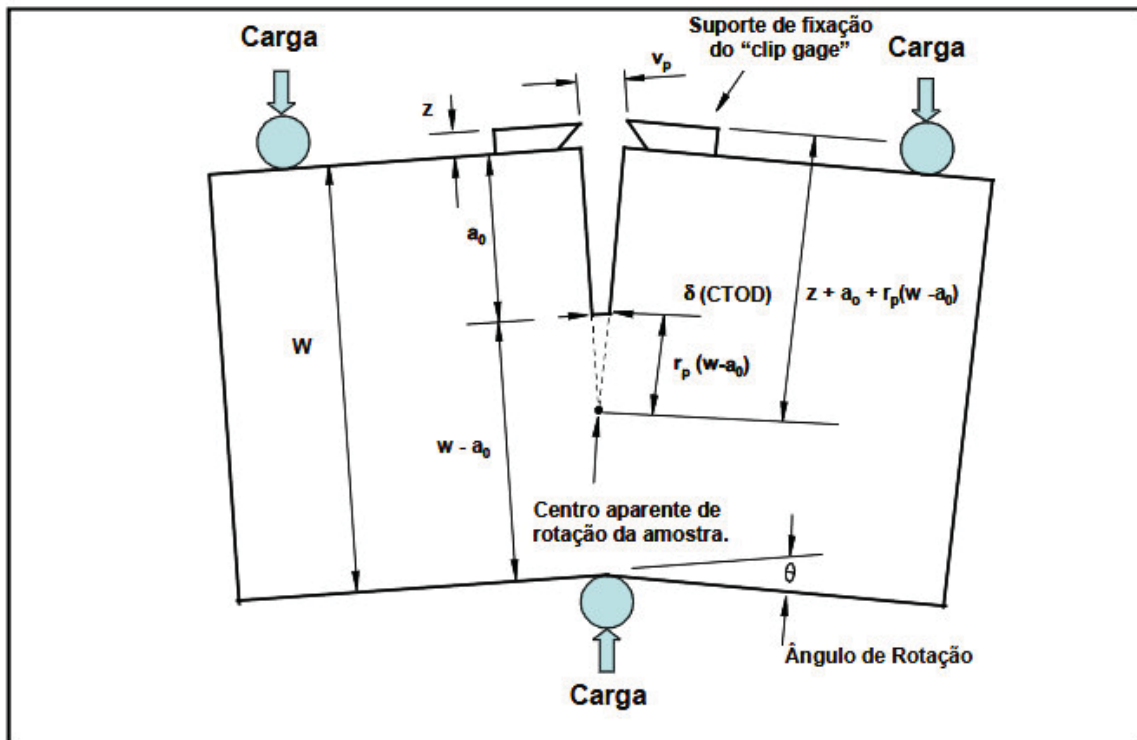


Figura 7 – Representação esquemática da abertura da trinca durante um ensaio de flexão em um corpo de prova do tipo SE(B). (GUIMARÃES, 2008, p.34).

Pela análise da Figura 7, pode-se verificar que o valor do CTOD (δ) poderia ser facilmente determinado por semelhança de triângulos e calculado, a partir do deslocamento de abertura da boca da trinca V_p , pela equação 2.2.

$$\frac{\delta}{V_p} = \frac{r_p \cdot (w - a_0)}{r_p \cdot (w - a_0) + a_0 + z} \quad (2.2)$$

Onde:

- δ - Deslocamento de abertura da ponta da trinca;
- r_p - Fator de rotação plástica;
- W - Largura do corpo de prova;
- a_0 - Comprimento da trinca;
- V_p - Deslocamento de abertura da boca da trinca;
- z - Distância do ponto de medição do extensômetro em relação à face do cdp.

A grande vantagem característica do método **CTOD** é a possibilidade da sua utilização tanto para o ensaio de materiais frágeis com alta resistência mecânica, onde predominam os conceitos da mecânica da fratura linear-elástica, quanto em materiais dúcteis onde as condições elasto-plásticas prevalecem.

Essas características permitem a utilização desse ensaio para a avaliação da tenacidade à fratura de materiais para tubulação – como o aço carbono, material muito dúctil, foco de estudo deste trabalho – impossível de ser avaliada através do ensaio **K_{IC}**, ou ainda, para materiais que apresentam propensão a crescimento instável da trinca com ocorrência de “pop in” que poderia invalidar os ensaios realizados para a obtenção do **J_{IC}**. Segundo Pinto (1999), essas propagações instáveis, sobre cuja interpretação do seu significado ainda não há um consenso, o que justifica a existência de diversos critérios de seleção do “pop-in”, com vistas ao comportamento à fratura. A definição do valor crítico da tenacidade com base nesse fenômeno pode, contudo, ocasionar resultados muito conservativos.

Um dos maiores problemas do ensaio **CTOD** é sem dúvida a dispersão dos resultados obtidos, especialmente no caso de juntas soldadas. Esse efeito é particularmente sensível às temperaturas de teste na zona de transição, onde os dois modos de fratura coexistem. Esta dispersão é atribuída à variação de estruturas metalúrgicas e da forma e distribuição das zonas frágeis na vizinhança da trinca bem como à variação dos próprios procedimentos de teste. Recomenda-se, por isso, que sejam obtidos pelo menos três resultados válidos para cada temperatura de ensaio e configuração do CP. Embora muito útil esse método é demorado e caro, o que justifica sua utilização de forma limitada. (PEREIRA, 1999)

2.5 Determinação do CTOD crítico

- **NORMA ASTM 1820-09 - Generalidades**

Segundo Guimarães (2008), a norma universal de tenacidade à fratura, ASTM E1820 – (Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness) foi criada com o objetivo de evitar desperdícios usuais na área de ensaios de Mecânica da Fratura, pelo fato de não se conhecer previamente o comportamento do material ensaiado.

Como exemplo, vejamos o caso do ensaio de um material do qual se espera um comportamento elástico linear. A norma a ser utilizada para esta situação seria a ASTM E399 . Seguidas as regulamentações impostas por esta norma, com a escolha, por exemplo, de um

corpo-de-prova tipo C(T), após a realização dos ensaios, hipoteticamente, poderiam ser obtidos resultados inválidos. Nesta situação haveria a necessidade de preparar novos corpos C(T) - de acordo com as normas E813 e E1152 e que são ligeiramente diferentes daqueles definidos pela ASTM E399, de forma a acomodar um posicionamento diferente dos clip-gages - para então obterem-se valores de J que nos permitiriam avaliar a tenacidade em regime elasto-plástico. Como pode ser visto, este antigo procedimento causava um desperdício de tempo, material e, portanto, aumentava-se o custo do processo. A filosofia da nova metodologia de ensaio da norma ASTM E1820 é a de adotar uma abordagem universal, considerando que todos os métodos anteriormente vigentes valiam-se essencialmente dos mesmos corpos-de-prova e de procedimentos similares, mas que o cálculo final da tenacidade à fratura era uma função tão somente do tipo de análise a qual os resultados dos testes estariam sujeitos. Isto quer dizer que, se utilizando a nova norma, um resultado de KIC poderia ser obtido para um comportamento essencialmente elástico linear do material ensaiado, da mesma forma que se os resultados dos ensaios demonstrassem um comportamento elasto-plástico, a tenacidade seria então calculada em termos da integral J ou de CTOD. Resumindo, a nova norma não adota qualquer técnica nova para medição da tenacidade à fratura, mas tão somente combina de forma eficiente as técnicas já existentes nas normas ASTM E399, E813, E1152 e E1290 [ASTM, 2006], esta última relacionada ao cômputo da tenacidade à fratura em termos do CTOD, anteriormente vigentes. (GUIMARÃES, 2008, p.26,27)

A norma ASTM E1820 apresenta os procedimentos e diretrizes para a determinação de tenacidade à fratura de materiais metálicos utilizando os seguintes parâmetros: K, J e CTOD (δ). A tenacidade pode ser medida no formato de curva-R ou como um valor de ponto. A tenacidade à fratura determinada de acordo com este teste método é para o modo de abertura (Modo I) de carregamento (Figura 8). Os corpos-de-prova recomendados são: flexão em três pontos [SE (B)], compacto [C(T)], e em forma de disco compacto, [DC(T)]. Todas as amostras devem possuir um entalhe com uma pré-trinca obtida pela aplicação de uma solicitação de fadiga no CP.

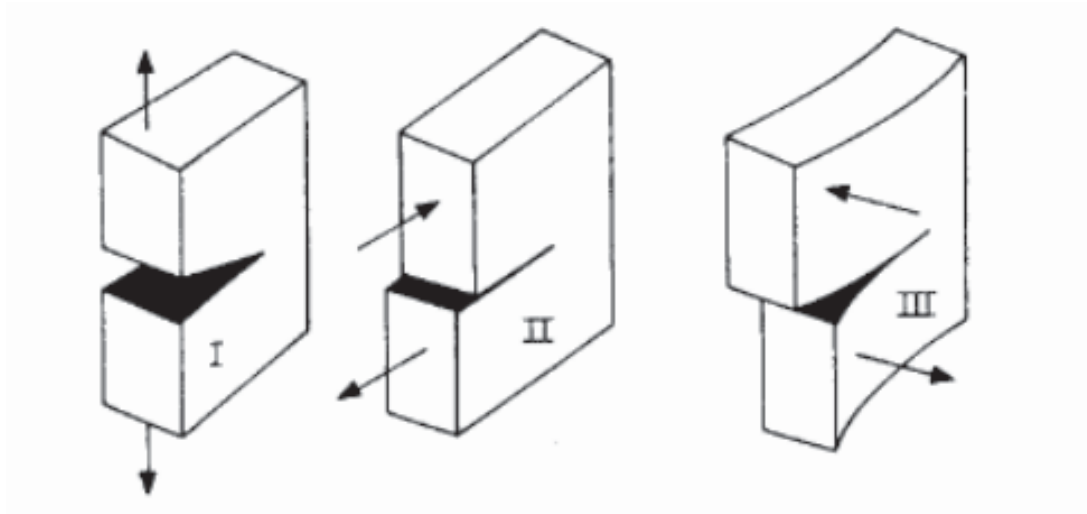


Figura 8 – Modos básicos de deslocamento da superfície da trinca para materiais isotrópicos. (BROEK, 1986)

Essa pré-trinca de fadiga sob carga cíclica se estende desde o entalhe usinado até uma extensão limite normalizada. Após aberta a pré-trinca de fadiga, inicia-se o teste CTOD crítico onde o CP é submetido a uma carga monotônica crescente, sendo as cargas e os respectivos deslocamentos registrados graficamente até o ponto onde ocorre fratura frágil (trinca instável) ou até o CP atingir uma condição de carga máxima. Quando este ponto é atingido satisfaz a um determinado critério de validade, ele é usado para a determinação da tenacidade à fratura em estado plano de deformação K_{IC} . Quando este critério de validade não é satisfeito, esse ponto é usado para a determinação da tenacidade à fratura CTOD, ou do valor crítico da integral J, dependendo da escolha da geometria do CP e os deslocamentos medidos. (PINTO, 1999, p.45)

- **Corpo-de-prova SE(B) – Flexão em três pontos.**

O corpo-de-prova padrão para o ensaio é do tipo “Single Edge Bend” - SE(B) ou “Flexão em três pontos” cujas dimensões e tolerâncias são especificadas conforme ASTM E1820 – Figura 9. A dimensão para entre os apoios “S” deve ser igual a quatro vezes a largura “W”.

O ensaio consiste em apoiar o CP em dois cutelos cilíndricos (roletes) com uma carga aplicada na seção média dos vãos, ponto médio da distância entre os centros dos roletes, sendo essa distância ($4W \pm 0,2W$).

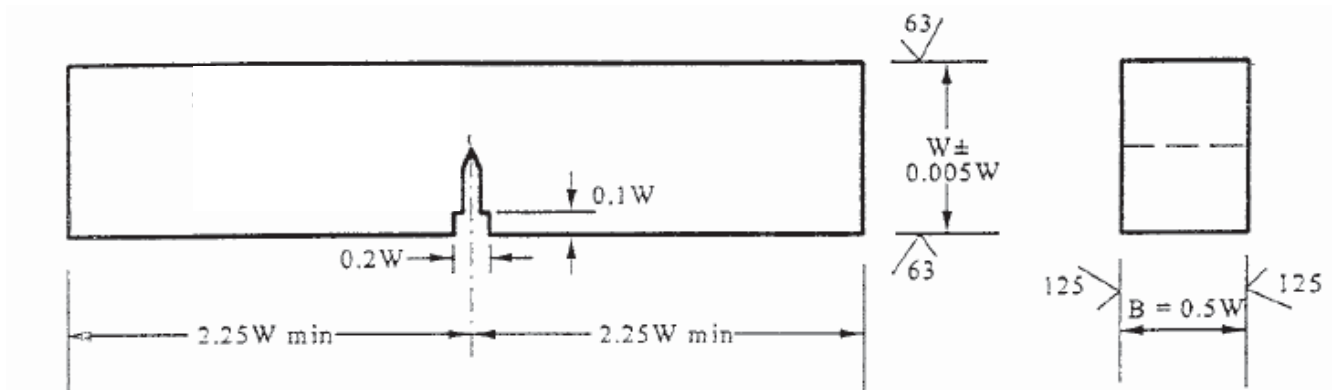


Figura 9 – Dimensões e tolerâncias proporcionais para o CP SE(B) - Flexão em três pontos (ASTM E1820, 2009, p.13).

O tamanho da trinca recomendado para a execução do ensaio deve estar na faixa de $0,45W \leq a_0 \leq 0,70 W$ e os carregamentos utilizados para a obtenção da pré-trinca não devem ser maiores que a carga $P(\max)$ calculada de acordo com a Equação 2.3 para corpos de prova do tipo SE(B), onde B é a espessura do corpo de prova, b_0 é o ligamento não trincado ($w-a_0$), σ_y é a média aritmética entre o limite de escoamento ($\sigma_{e0,2}$) e o limite de resistência à tração (σ_t), S a distância entre o dispositivo de aplicação da carga para o corpo de prova de flexão em três pontos e W a largura do corpo de prova. (GUIMARÃES, 2008, p.36).

$$P_{\max} = 0,5.(B.b_0^2.\sigma_y/S) \quad (2.3)$$

A Figura 10 representa um CP de flexão em três pontos, instrumentado com um transdutor “clip-gage” para medir os afastamentos dos lados do entalhe na face do CP, bem como o dispositivo para aplicação da carga, projetado com a finalidade de reduzir ao mínimo o atrito, pois permite um movimento de rotação e translação dos suportes cilíndricos.

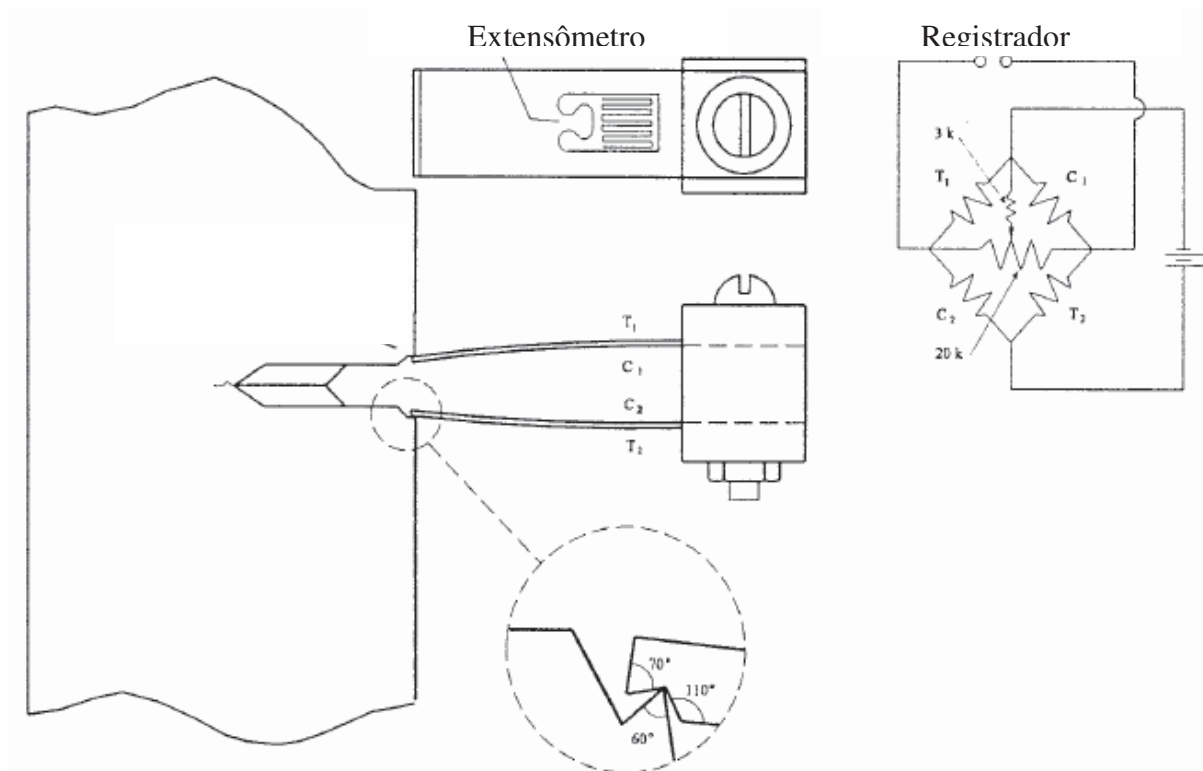


Figura 10 – Clip gage – Transdutor de deslocamento com extensômetros (ASTM E1820, 2009, p.5).

O registro da carga x deslocamento da abertura das faces do entalhe da trinca é plotado num gráfico, com as informações enviadas pelo transdutor de deslocamento. O ensaio é continuado até que o CP não possa sustentar qualquer acréscimo de carga aplicada – Figura 11. Uma não-linearidade inicial pode ocorrer nas curvas, uma vez que há uma certa dificuldade no início dessa análise. Isto pode ser minimizado se houver preliminarmente um pequeno carregamento, seguido de um descarregamento, com uma carga não superior a F_f .

Segundo Guimarães (2009), existem dois parâmetros de tenacidade à fratura que caracterizam a resistência do material ao surgimento e crescimento posterior de uma trinca em uma determinada temperatura. Os parâmetros normalizados que representam a somatória de uma componente plástica e outra elástica do deslocamento são:

δ_c - Determina o início da propagação instável da trinca quando não há ocorrência de propagação estável, antes da máxima carga ou antes do primeiro “pop in”. Definido quando a propagação da trinca é menor que 0,2 mm;

δ_u - Determina o início da propagação instável da trinca quando há ocorrência de propagação estável, antes da máxima carga ou antes do primeiro “pop in”. Definido quando a propagação da trinca é maior que 0,2 mm;

O parâmetro de tenacidade à fratura (δc , ou δu) a ser selecionado vai depender, então, do comportamento do material, que apresentará, em função das suas características um determinado tipo de curva carga-deslocamento. A Figura 11 apresenta os quatro tipos de curvas típicas obtidas pelo ensaio **CTOD** e os pontos P_c ou P_u utilizados para a obtenção do δc e δu , respectivamente.

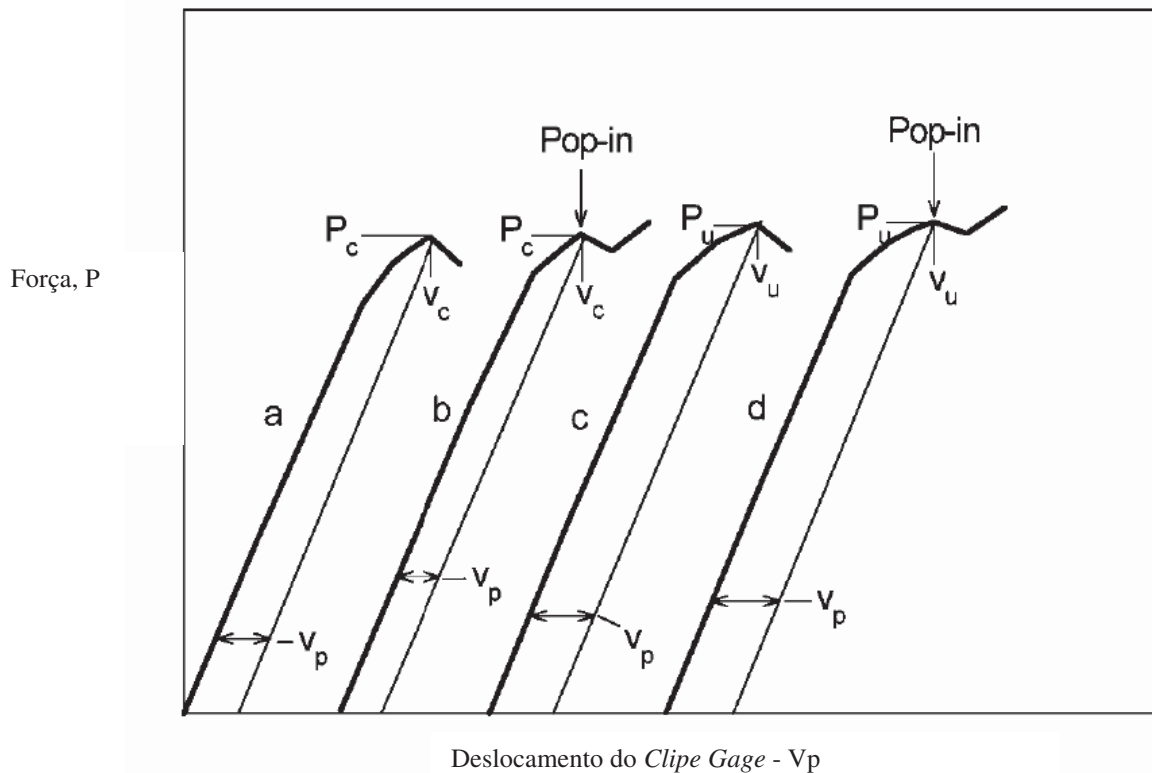


Figura 11 - Curvas características obtidas no ensaio CTOD, mostrando a definição dos pontos (P_c, V_c), (P_u, V_u), (ASTM E1820, 2009, p.24).

O valor da medida V_p de abertura da boca da trinca que será utilizado no cálculo do CTOD é obtido através da construção de uma reta paralela à parte inicial da curva carga-deslocamento, passando por um dos pontos P_c , ou P_u , dependendo do comportamento do material ensaiado. Uma vez definido um dos pares (P_c, V_c) (P_u, V_u) o valor do CTOD é calculado através das Equações 2.4 a 2.8 relacionadas na Tabela 1.

Um dos cuidados que se deve ter durante a análise de dados para a realização do ensaio CTOD, está associado com a ocorrência do “pop-in”. A ASTM E1820 estabelece um critério que define quando uma instabilidade na curva carga x deslocamento deve ser ou não

considerada como “pop-in”. A definição de um critério para a consideração do “pop-in” é bastante importante, uma vez que uma pequena instabilidade na curva, talvez associada até mesmo à sensibilidade do registrador gráfico da máquina de ensaio, pode gerar dúvidas durante a análise dos dados, colocando em risco a interpretação dos resultados. (GUIMARÃES, 2008).

Tabela 1 – Equações utilizadas para o cálculo do CTOD utilizando-se corpos de prova do tipo SE(B). (GUIMARÃES, 2008, p.38).

$\delta = \frac{1}{m\sigma_y} \left\{ \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \left[\frac{\eta A_p}{B(w-a_0) \left(1 + \frac{\alpha+z}{(0,8a_0+0,2w)} \right)} \right] \right\}$		(2.4)
$K = \frac{Y \cdot P}{B \cdot W^{\frac{3}{2}}}$		(2.5)
SE(B)	$Y = \frac{6(a_0/W)^{1/2} \{1,99 - (a_0/W)(1-a_0/W) \cdot [2,15-3,93a_0/W + 2,7 (a_0/W)^2]\}}{(1+2a_0/W)(1-a_0/W)^{3/2}}$	(2.6)
(S = 4W)	$m = A_0 - A_1 * \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_t} \right) + A_2 * \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_t} \right)^2 - A_3 * \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_t} \right)^3$ Onde $A_0 = 3,18 - 0,22 * (a_0/w)$ $A_1 = 4,32 - 2,23 * (a_0/w)$ $A_2 = 4,44 - 2,29 * (a_0/w)$ $A_3 = 2,05 - 1,06 * (a_0/w)$	(2.7)
	$\eta = 3,785 - 3,101(a_0/w) + 2,018(a_0/W)^2$	(2.8)

onde:

P - Carga correspondente a Pc ou Pu definidas pela a Figura 11;

K - Fator de intensificação de tensão;

ν - Coeficiente de Poisson;

σ_y - Limite de escoamento na temperatura de interesse;

E - Módulo de Young;

W - Largura do corpo de prova;

a_0 - Comprimento da trinca;

B - Espessura do corpo de prova;

V_p - Medida de abertura da boca da trinca correspondendo ao valor de V_c ou V_m

A_p - Área sobre a curva de carga versus deslocamento da boca da trinca correspondentes aos valores de V_c ou V_u (veja figura 11)

m - Parâmetro de restrição plástica em função de a/w e do coeficiente de encruamento do material

η - Função de a/w

z - Distância do ponto de medição do extensômetro em relação à face do corpo de prova;

α - Fator de rotação plástica: α = 0 para cdp do tipo SE(B);

Outra forma de calcular o CTOD crítico é fornecido pela norma BS7448, apresentado pela equação 2.9:

$$\delta = \left[\frac{F.S}{B.W^{1.5}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \cdot \frac{(1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{res} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot (W - a_0) \cdot V_p}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_0 + z} \quad (2.9)$$

Onde:

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^{0,5} \cdot [1,99 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \cdot (2,15 - 3,93 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right) + 2,7 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^2)]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a_0}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{1,5}} \quad (2.10)$$

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 Seleção do metal base e soldagem

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram simuladas as condições de fabricação de tubulações industriais para a área petroquímica. Como o objetivo principal é avaliar se a zona fundida (solda circunferencial de ligação entre tubos) possui as mesmas propriedades de tenacidade do metal base, procurou-se seguir fielmente todas as etapas utilizadas durante a soldagem de tubos para o transporte de hidrocarbonetos.

A soldagem do tubo foi realizada seguindo os requisitos da EPS AFB/TAT/035 (anexo 1) da utilizando como processo de soldagem TIG (GTAW) no primeiro passe da solda (raiz) e processo semi-automático de arame tubular (FCAW) nos passes subsequentes (enchimento e acabamento). Alguns dos parâmetros relativos à soldagem estão registrados na tabela 2. A soldagem foi feita na posição 6G – conforme QW 461.4 do ASME Sec. IX (Figura 12). O objetivo da soldagem do tubo nessa posição, é dificultar o trabalho do soldador, simulando uma possível dificuldade de soldagem em campo.

TABELA 2 – Dados registrados, relativos à soldagem do tubo

PASSE Nº	CAMADA Nº	CONSUMÍVEL CLASSIF.	Ø (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (mm/min.)	OSCILAÇÃO (mm)	TEMP. (°C)	HEAT INPUT (J/mm)	VAZÃO DE GÁS (l/min)
1	1	ER70S-3	3,2	10	106	77,50	4	54	820,65	12
2	2	ER70S-3	3,2	11	145	133,30	4	125	717,93	12
3	3	E81T8Ni2J	2	21	262	182,50	5	130	1808,9	12
4	3	E81T8Ni2J	2	22	268	137,33	5	148	2576	13
5	4	E81T8Ni2J	2	19	225	146,23	5	148	1754,1	13
6	4	E81T8Ni2J	2	20	208	131,20	5	150	1902,4	13
7	4	E81T8Ni2J	2	20	202	166,80	5	152	1453,2	13
8	5	E81T8Ni2J	2	21	213	183,00	4	150	1466,6	13
9	5	E81T8Ni2J	2	21	217	192,40	4	152	1421,1	13
10	5	E81T8Ni2J	2	22	223	201,70	5	147	1459,4	13

Como o aço carbono é utilizado em aproximadamente 90% das tubulações de uma refinaria de petróleo (Telles, 1932) ele foi o metal base escolhido para esse estudo. A especificação do metal base está citada abaixo:

API 5L Gr. X70 – Ø 8” (Ø_{ext} = 219,1 mm) – Sch. 100 – Esp. = 15,1 mm

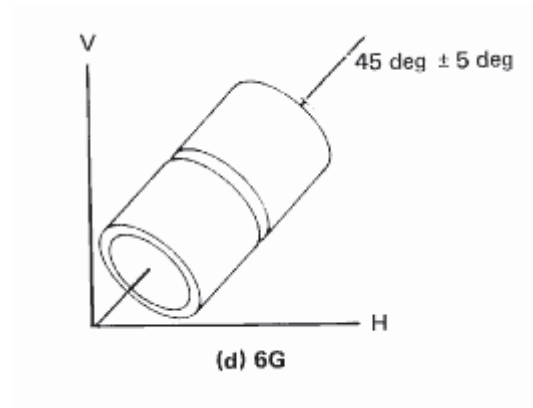


Figura 12 – Representação da posição de soldagem “6G” – (ASME Sec. IX, 2010, p.153).

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentadas as características químicas e mecânicas do tubo utilizado, conforme Norma API 5L.

TABELA 3 – Requisitos químicos para tubos (API 5L – PSL1, p.8)

Grau e Classe	Teor máximo de Carbono	Teor máximo de manganês	Teor de Fósforo		Teor máximo de Enxofre	Teor máximo de Titânio
			Mínimo	Máximo		
SEM COSTURA						
A25, Cl I	0,21	0,6		0,030	0,030	
A25, Cl II	0,21	0,6	0,045	0,080	0,030	
A	0,22	0,9		0,030	0,030	
B	0,28	1,2		0,030	0,030	0,04
X42	0,28	1,3		0,030	0,030	0,04
X46, X52, X56	0,28	1,4		0,030	0,030	0,04
X60	0,28	1,4		0,030	0,030	0,04
X65, X70	0,28	1,4		0,030	0,030	0,06
COM COSTURA						
A25, Cl I	0,21	0,60		0,030	0,030	
A25, Cl II	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030	
A	0,22	0,90		0,030	0,030	
B	0,26	1,20		0,030	0,030	0,04
X42	0,26	1,30		0,030	0,030	0,04
X46, X52, X56	0,26	1,40		0,030	0,030	0,04
X60	0,26	1,40		0,030	0,030	0,04
X65	0,26	1,45		0,030	0,030	0,06
X70	0,26	1,65		0,03	0,030	0,06

TABELA 4 – Requisitos mecânicos para tubos (API 5L – PSL1, p.9)

Grau	Lim. Escoamento Mínimo		Limite resist. Tração Mínimo	
	psi	Mpa	psi	Mpa
A25	25000	172	45000	310
A25	30000	207	48000	331
B	35000	241	60000	414
X42	42000	290	60000	414
X46	46000	317	63000	434
X52	52000	359	66000	455
X56	56000	386	71000	490
X60	60000	414	75000	517
X65	65000	448	77000	531
X70	70000	483	82000	565

As Figuras 13, 14 e 15 ilustram a soldagem do tubo de teste.

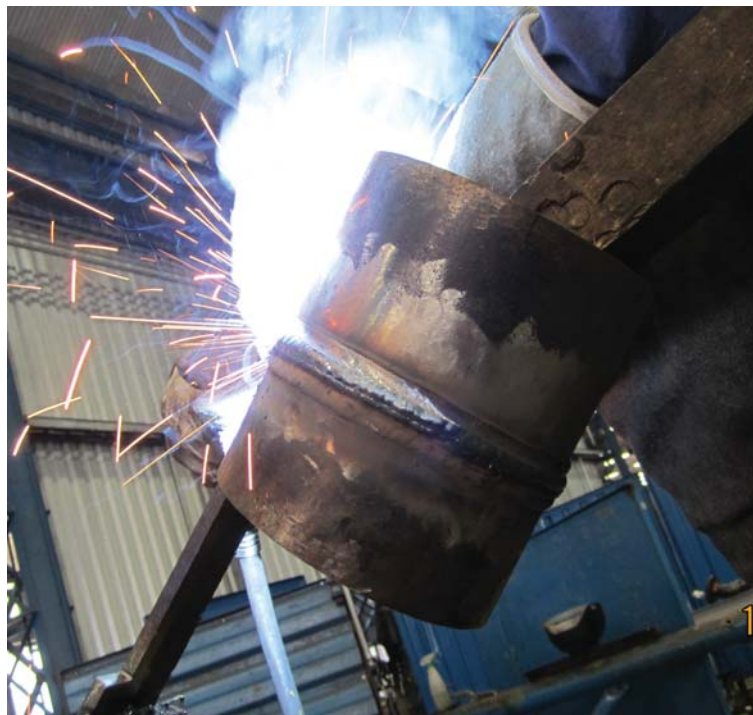


Figura 13 – Ilustração da soldagem do tubo de teste



Figura 14 – Ilustração da soldagem do tubo de teste



Figura 15 – Ilustração da soldagem do tubo de teste

O desenho TG-001, representado pela Figura 16, mostra o esquema de montagem e soldagem de juntas de topo (solda em chanfro) para a fabricação de tubulações industriais de processo.

3.2 Preparação dos CP's

Após a conclusão da soldagem do tubo de teste, os CP's para a realização do ensaio de Flexão por três pontos foram preparados. O desenho TG-002 representado pela Figura 17, mostra a orientação da retirada dos CP's para o ensaio de flexão por três pontos e suas respectivas dimensões. A Figura 18 apresenta a localização de retirada dos CP's - SE(B) e para o ensaio de tração.

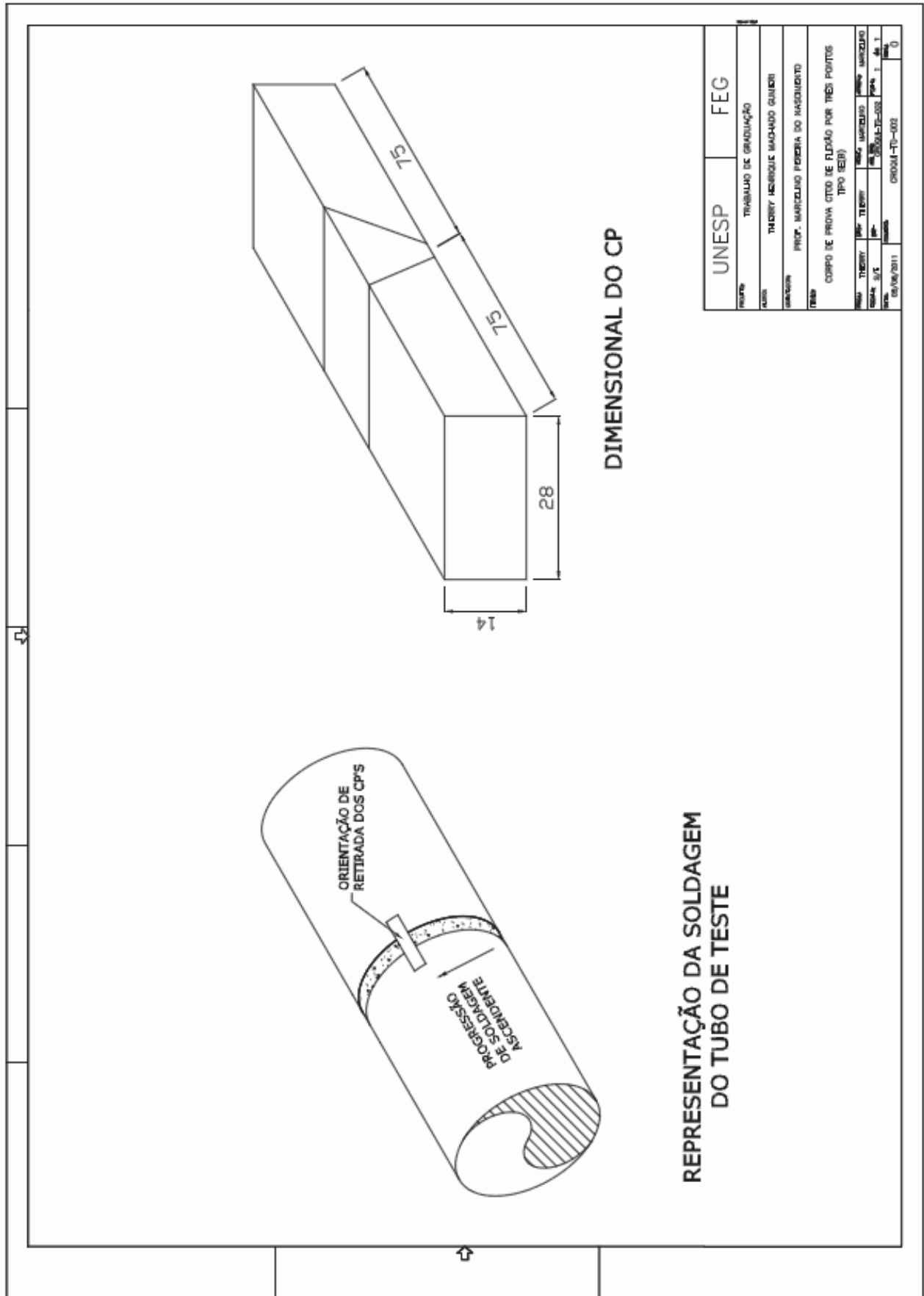


Figura 17 – Representação de retirada e dimensional dos CP's de Flexão por três pontos – SE(B).

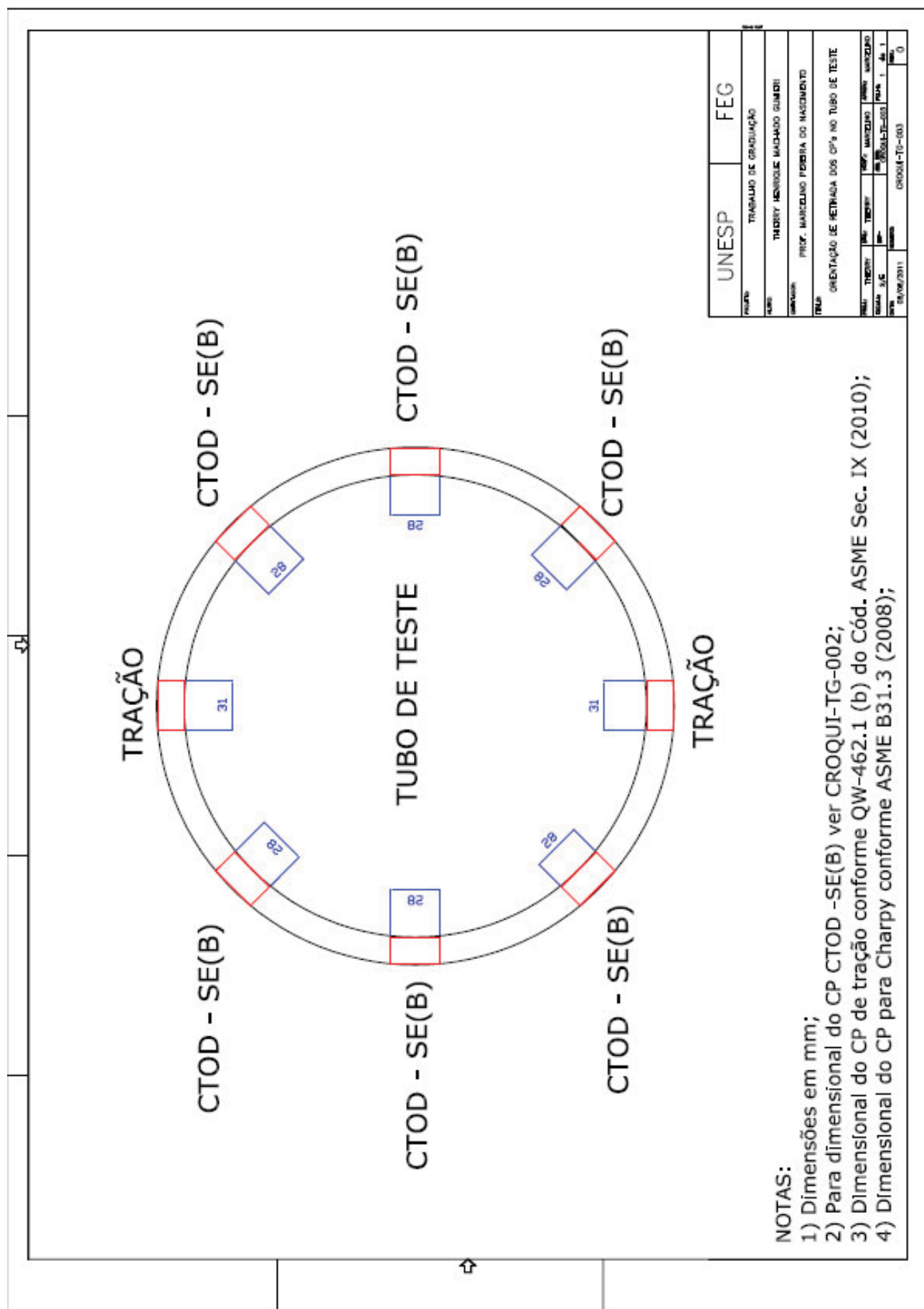


Figura 18 – Orientação de retirada dos CP's.

No total foram retirados os seguintes CP's a partir do tubo de teste:

- 2 CP's para ensaio de tração (seção reduzida na solda)
- 6 CP's para ensaio de flexão por três pontos (Entalhe e pré-trinca na solda)
- 6 CP's para ensaio de flexão por três pontos (Entalhe e pré-trinca no metal base)

Os CP's de tração foram retirados com o objetivo de analisar a resistência à tração do metal de solda e compará-la aos valores tabelados pela API 5L para o metal base. Como referência para a realização deste ensaio foi utilizado a norma ASME Sec. IX. As Figuras 19 (a)(b) apresentam o esquema de retirada e preparação dos CP's para o ensaio de tração.

Os CP's retirados são representados na Figura 20.

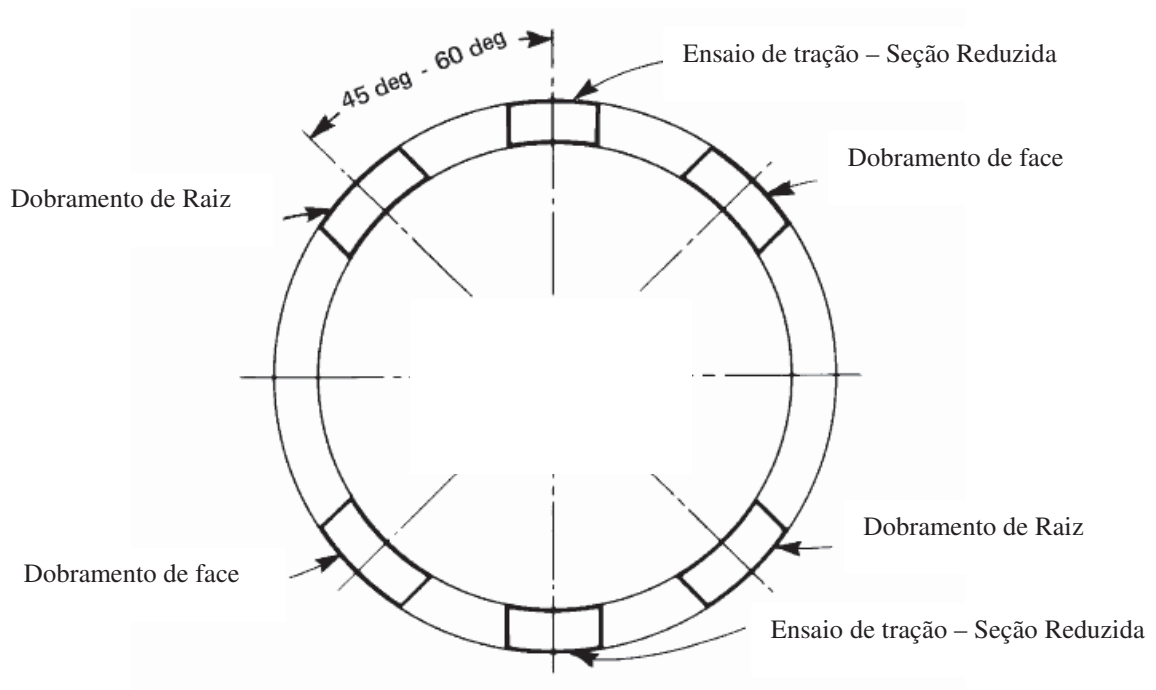


Figura 19 (a) – Orientação de retirada dos CP's de tração (ASME Sec. IX, 2010, p.179).

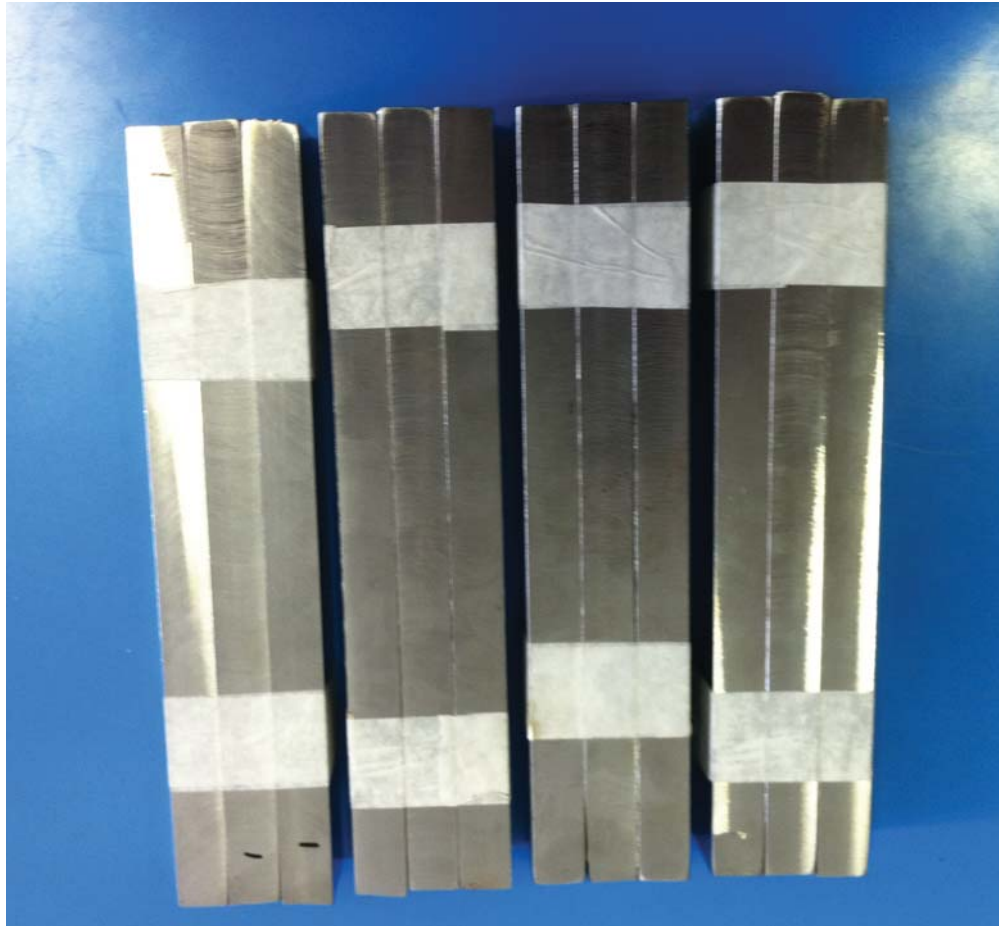


Figura 21 – Corpos de prova SE (B) antes do ataque químico (vista da espessura)

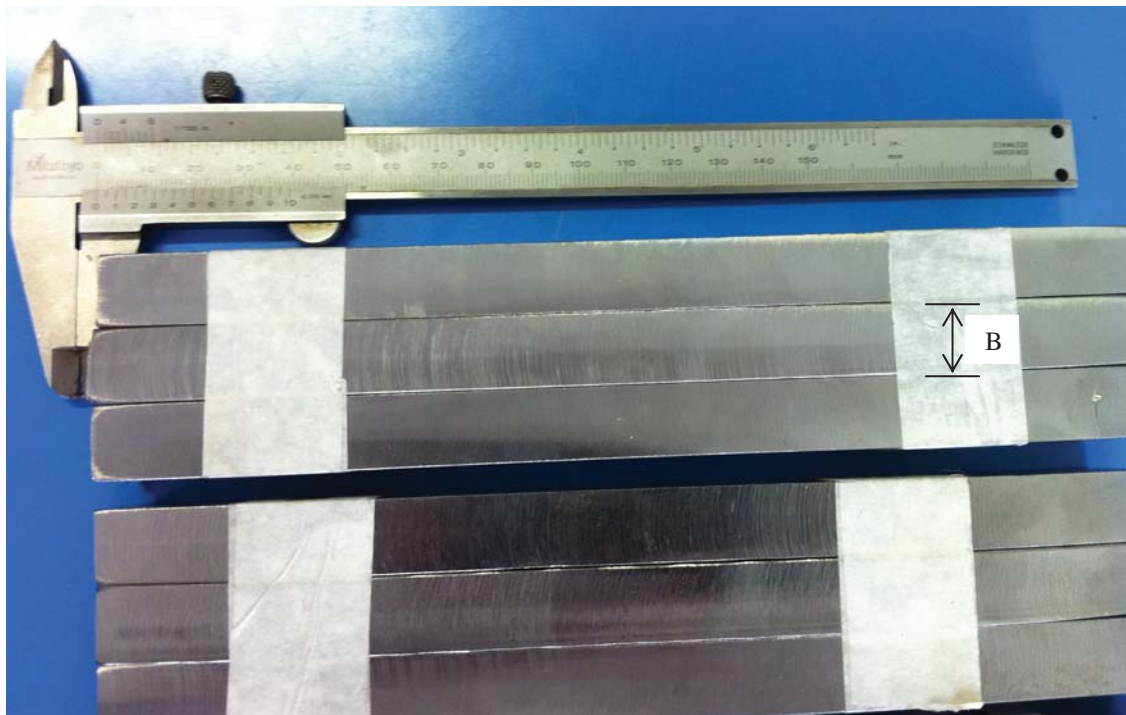


Figura 22 – Corpos de prova SE (B) antes do ataque químico (B=14mm)

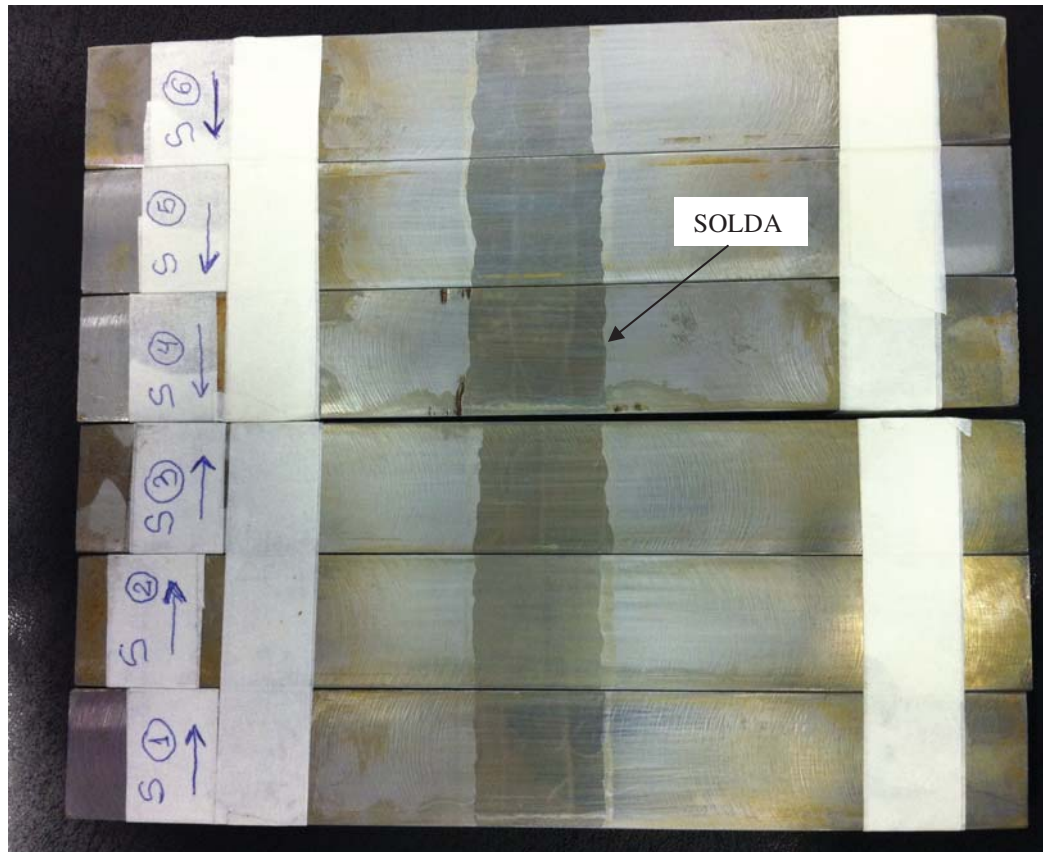


Figura 23 – Corpos de prova SE (B) (solda) após o ataque químico. (Vista das faces)

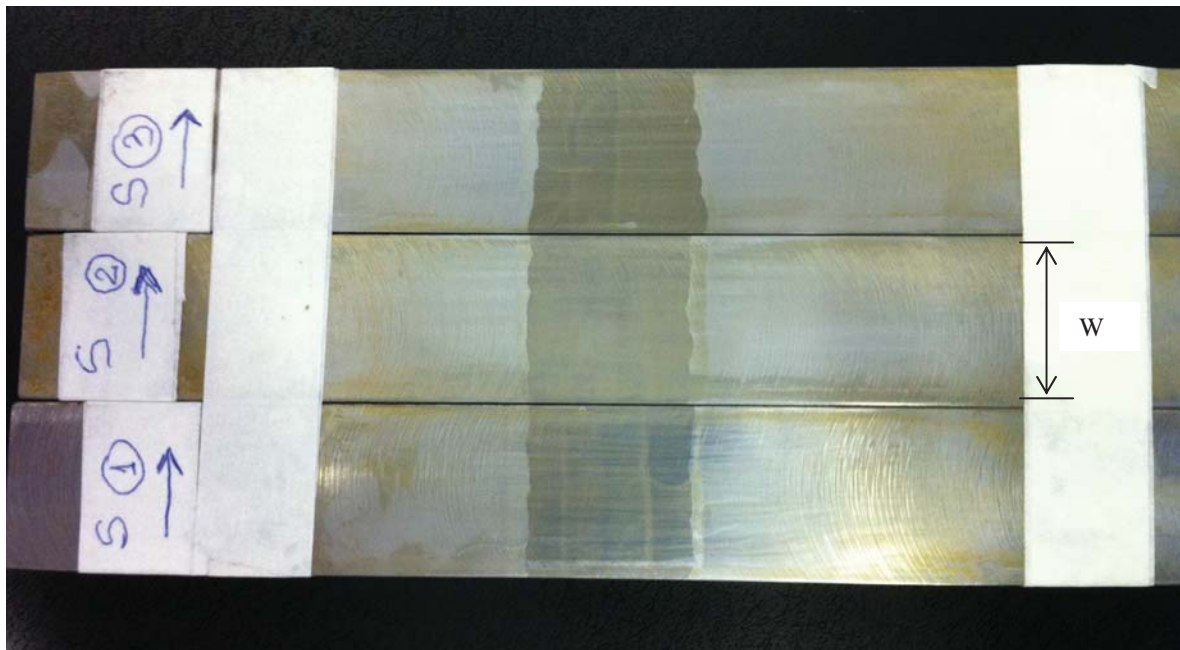


Figura 24 – Corpos de prova SE (B) (solda) após o ataque químico. ($W = 28 \text{ mm}$)

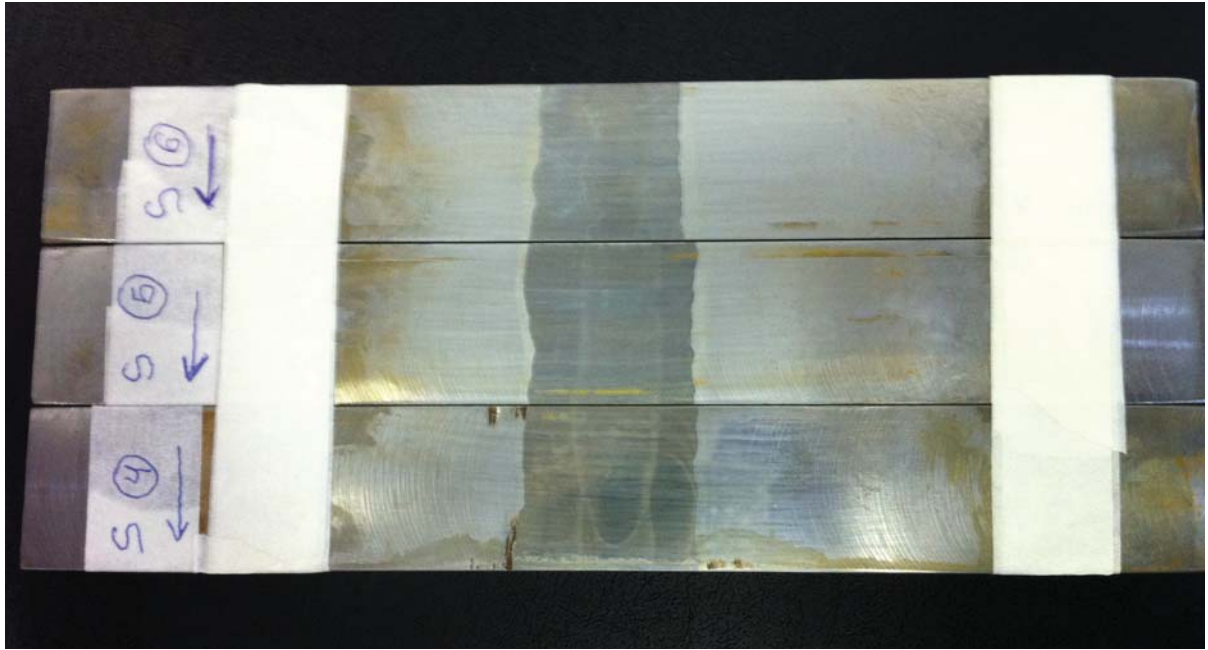


Figura 25 – Corpos de prova SE (B) (solda) após o ataque químico.

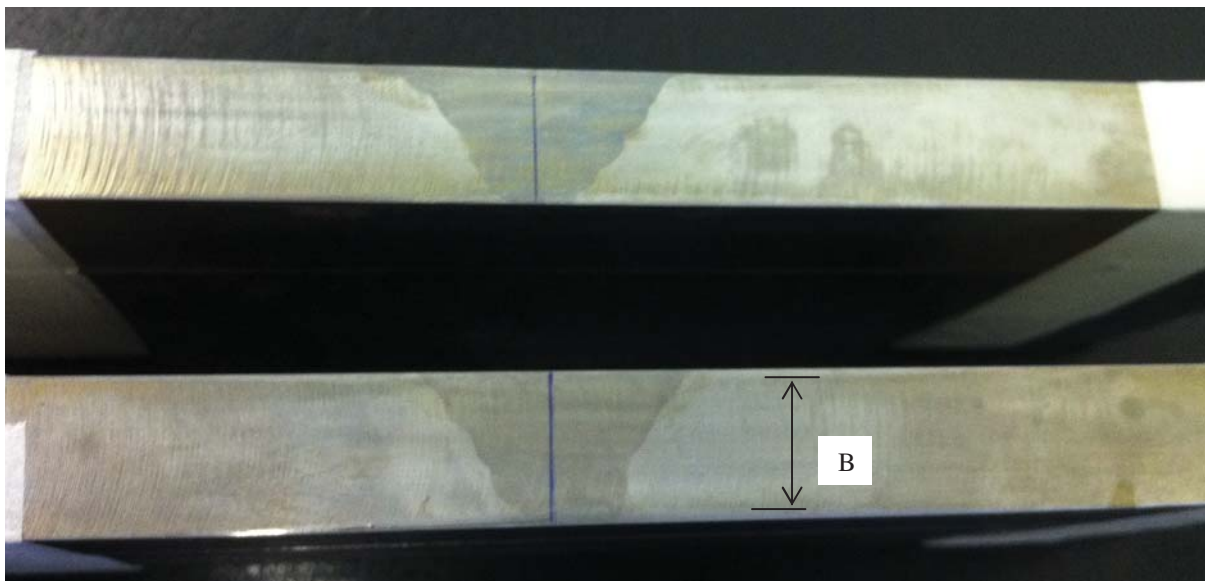


Figura 26 – Corpos de prova SE (B) (solda) após o ataque químico – Seção transversal (B = 14 mm)

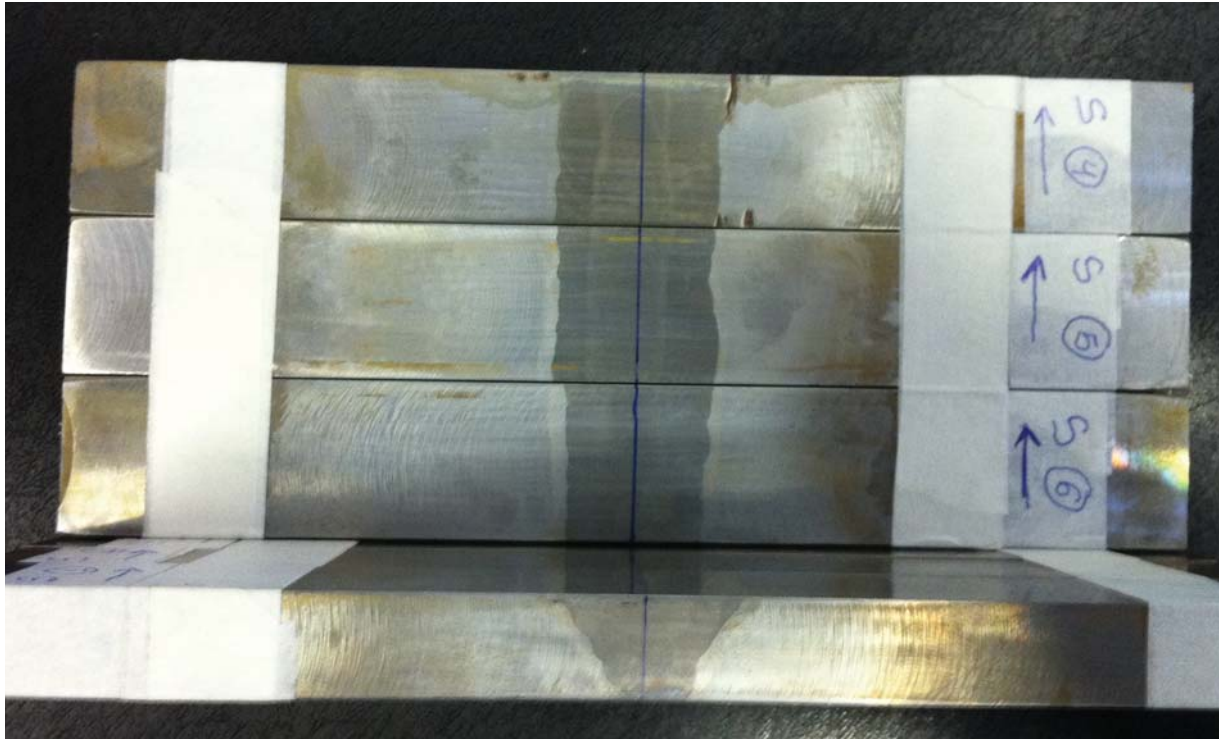


Figura 27 – Corpos de prova SE (B) (solda) após o ataque químico – Seção transversal + Vista superior

3.3 Execução dos entalhes e pré-trincas de fadiga

Após a identificação das regiões a serem entalhadas, foram calculados os dados referentes à execução da pré-trinca por fadiga. A dimensão da trinca recomendada para a execução do ensaio deve estar na faixa $0,45W \leq a_0 \leq 0,55 W$.

Sabendo que $W = 28 \text{ mm}$, tem-se que:

$$12,6 \leq a_0 \leq 15,4 \text{ (mm)}$$

Para o cálculo do carregamento máximo admissível, foi utilizada a Equação 2.3.

$$P_{\max} = 0,5 \cdot (B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_y / S) \quad (2.3)$$

$$P_{\max} = 0,5 \cdot \frac{0,014 \cdot 0,014^2 \cdot \frac{(483 + 565) \cdot 10^6}{2}}{0,112} = \mathbf{6419 \text{ N}}$$

Conforme Garcia, et al. (1999) a identificação do plano e da direção da fratura é feita em relação à geometria do produto. Essa identificação deve ser feita através de duas letras: a primeira representa a direção normal ao plano da trinca, e a segunda, a direção esperada de propagação da trinca, já que a tenacidade à fratura de um material depende da orientação e da propagação da trinca em relação à anisotropia do material, que é função do trabalho mecânico sofrido pelo material e da direção de crescimento do grão. A norma ASTM E399 apresenta o padrão para identificação do plano da trinca para peças cilíndricas, conforme Figura 28.

Para este trabalho, será utilizado o entalhe no plano **L-C** (tanto para os CP's entalhados na solda quanto para os CP's entalhados no metal base), pois iremos avaliar a propagação da trinca no sentido longitudinal à solda, simulando um defeito que poderia causar um possível rompimento total da tubulação.

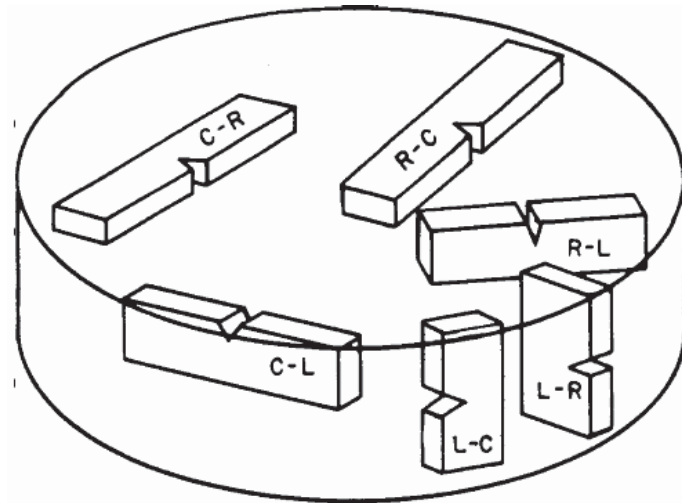


Figura 28 – Identificação do plano da trinca (ASTM E399, 2009, p.3)

As Figuras 29 e 30 seguir mostram as imagens dos corpos de prova já entalhados:



Figura 29 – Corpos de prova SE (B) (solda) após realização do entalhe – Vista superior

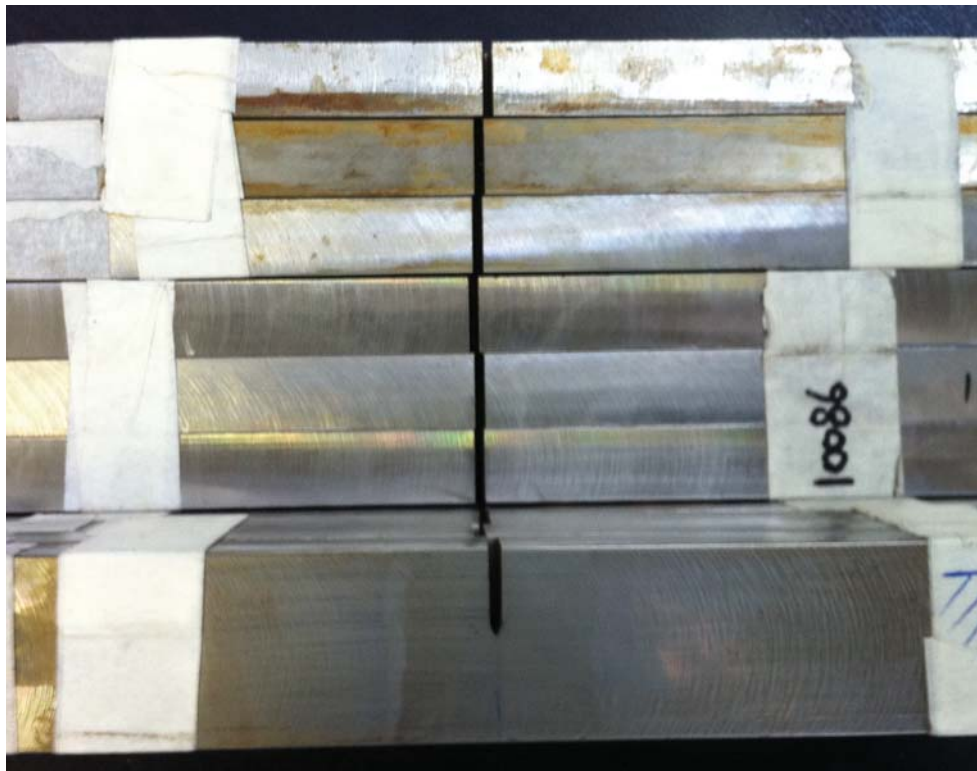


Figura 30 – Corpos de prova SE (B) (solda) após realização do entalhe – Vista superior + Seção transversal

Após os entalhes terem sido realizados por eletro-erosão, os CP's foram submetidos ao carregamento de fadiga para a indução da pré-trinca, conforme apresentado nas figuras 31 e 32.



Figura 31 – Corpo de prova SE (B) (Metal base) após realização da pré-trinca

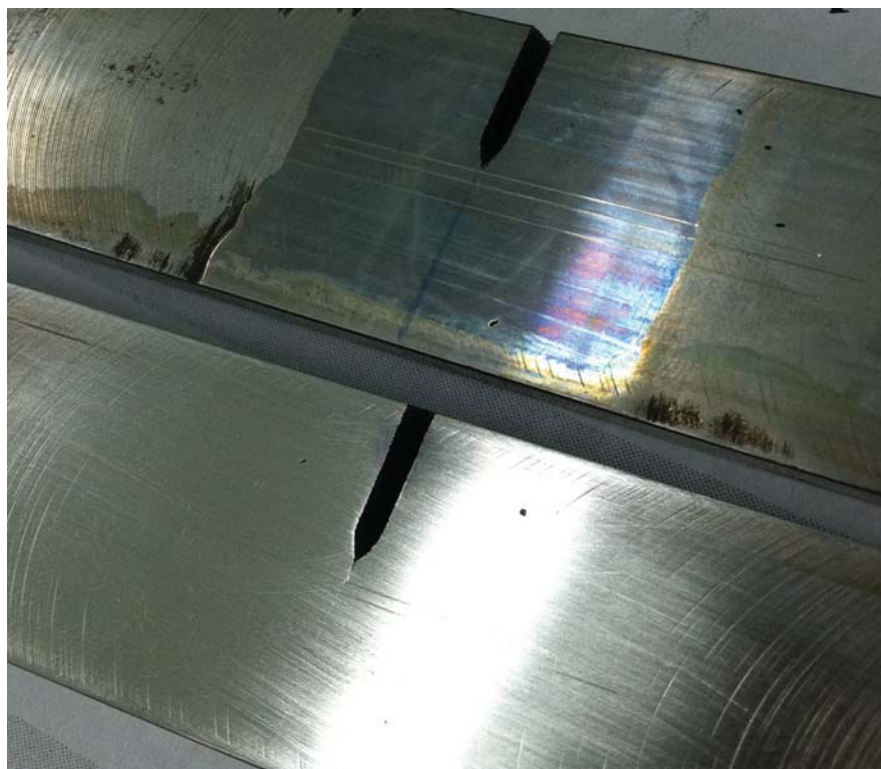


Figura 32 – Corpos de prova SE (B) (Solda) após realização da pré-trinca

3.4 Ensaio de CTOD

Após a preparação das peças, confecção dos entalhes e pré-trincas de fadiga, iniciou-se a realização dos ensaios **CTOD**. O dimensional final do CP está representado na Figura 33, que apresenta também os pontos de aplicação da carga para o ensaio.

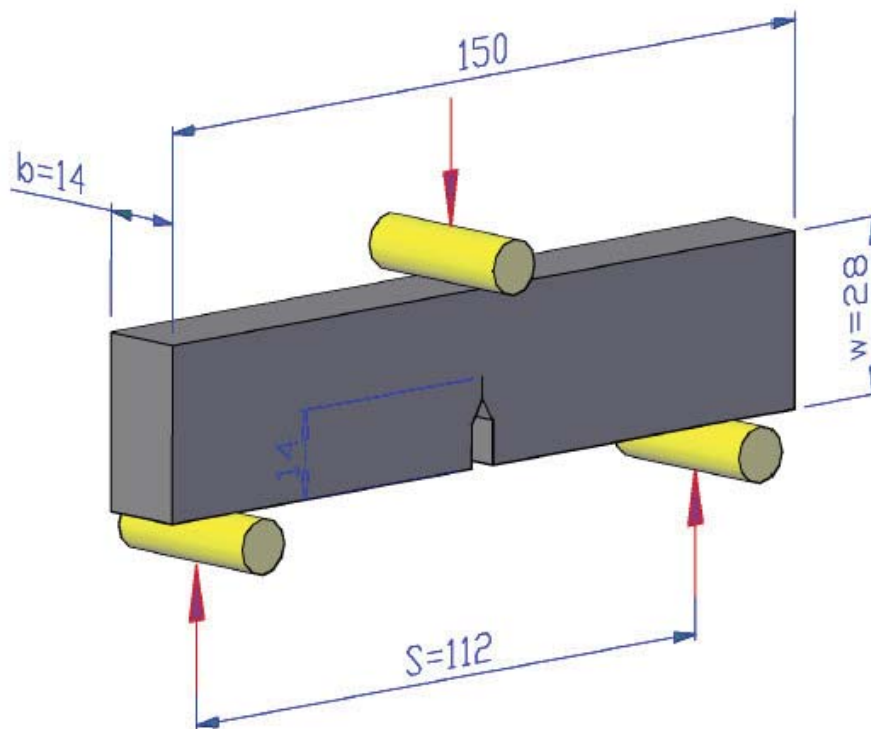


Figura 33 – Corpos de prova SE (B) – Dimensões padrões finais para o ensaio.

Todos os CP's foram ensaiados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Departamento de Materiais e Tecnologia. As Figuras 34 a 37 ilustram o início da execução dos ensaios, assim como os equipamentos utilizados. A seguir são fornecidos alguns dados preliminares do ensaio. Informações sobre o equipamento utilizado para a realização do ensaio, podem ser encontradas no catálogo do fabricante (www.instron.com.br), apresentado no anexo B.

- Temperatura das peças: $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Velocidade de avanço do dispositivo de dobramento: $V = 5\text{ mm/min}$.



Figura 34 – Representação do dispositivo para ensaio **CTOD**.

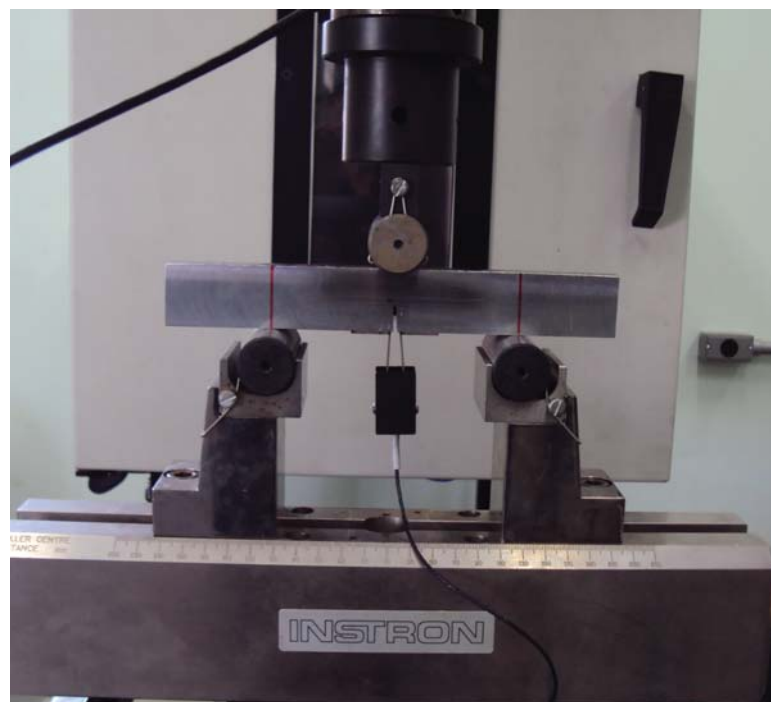


Figura 35 – Corpo de prova montado no dispositivo de flexão

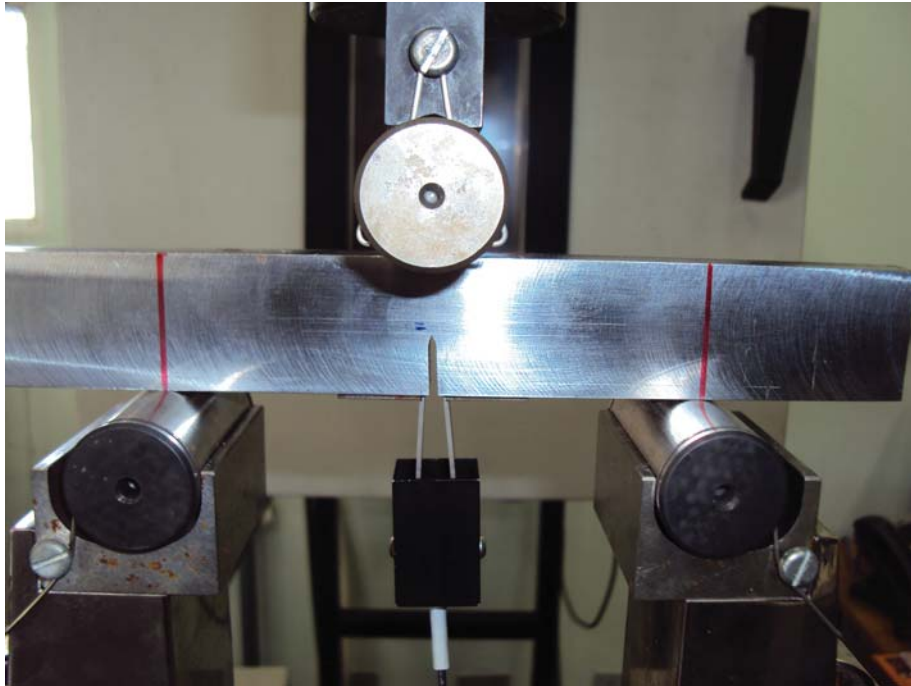


Figura 36 – Corpo de prova pronto para o início dos ensaios.

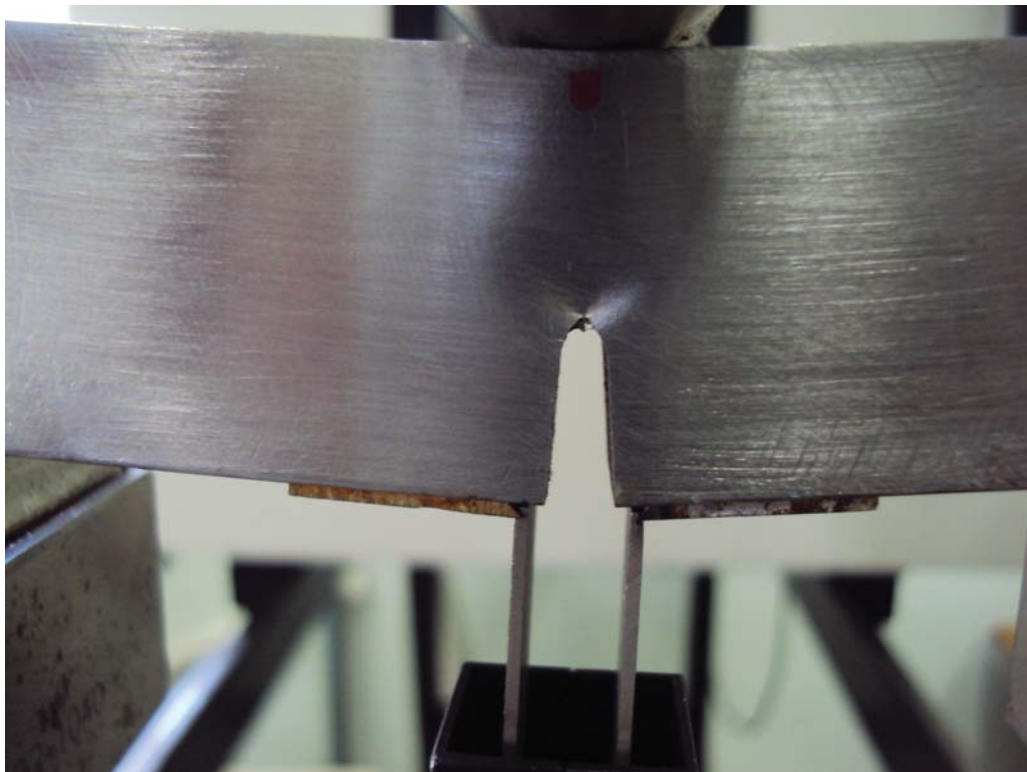


Figura 37 – Início do processo de flexão e propagação da trinca.

4. RESULTADOS

Foram ensaiados dois corpos de prova por tração e seis corpos-de-prova de Flexão por três pontos, sendo três com entalhe e pré-trinca na solda e três com entalhe e pré-trinca no metal de base. Os resultados são apresentados nas Figuras 38 a 49 e Tabelas 5 a 8.

4.1 Ensaio de tração

A Figura 38 apresenta o corpo de prova de tração com seção reduzida após rompimento.



Figura 38 – Corpos de prova de tração.

Tabela 5 –Resultado do ensaio de tração.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	DIMENSÕES (mm)	SEÇÃO (mm ²)	CARGA (kgf)	LIMITE RESISTÊNCIA (MPa)	LOCAL DE RUPTURA
T1	14,0 x 19,0	266,0	17325,0	638,29	METAL BASE
T2	14,0 x 19,2	268,8	16985,0	619,24	METAL BASE

4.2 Ensaio de Flexão em três pontos

Os corpos de prova SE(B) foram identificados da seguinte forma:

CP1, CP2, CP3 – ENTALHE NO METAL BASE

CP4, CP5, CP6 – ENTALHE NA SOLDA

O ensaio foi realizado até o rompimento total dos corpos de prova. Os CP's rompidos estão ilustrados nas figuras 39 a 42.



Figura 39 – Corpos de prova CP1, CP2, CP3 (respectivamente) com entalhe no metal base, após rompimento. As setas indicam as diferentes regiões do corpo-de-prova



Figura 40 – Corpos de prova CP4, CP5, CP6 (respectivamente) com entalhe na solda, após rompimento

A Figura 41 apresenta a comparação entre os CP's rompidos com entalhe no metal base e na solda, respectivamente.



Figura 41 – Comparação entre os corpos de prova

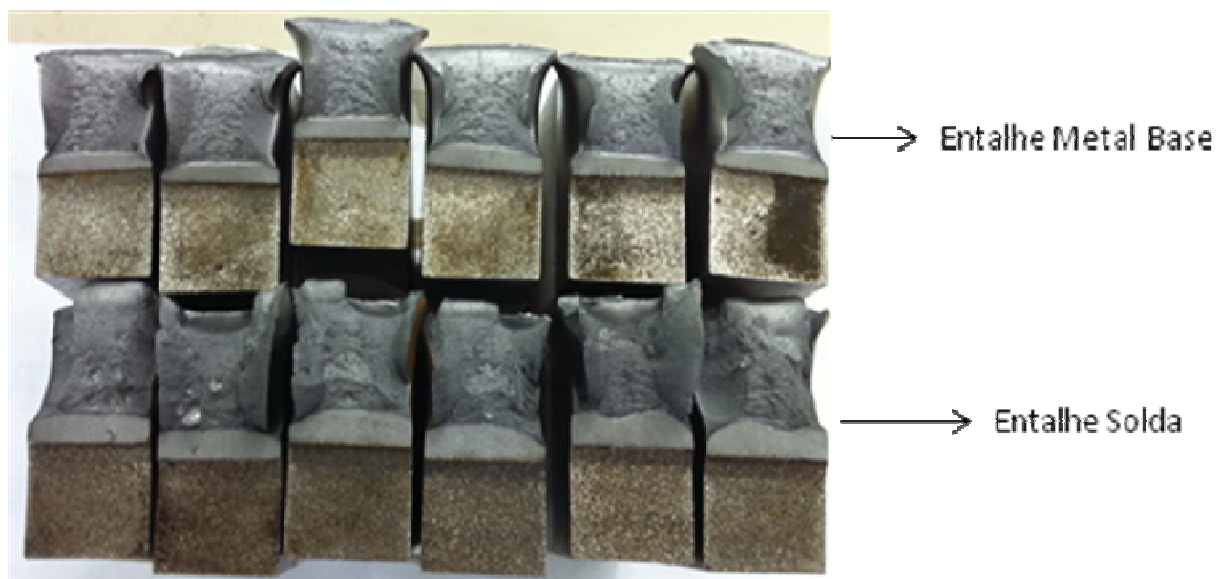


Figura 42 – Comparação entre os corpos de prova

Durante a flexão dos corpos-de-prova, foram coletados os valores referentes às cargas aplicadas aos CP's bem como os respectivos deslocamentos dos roletes. Esses dados foram plotados na forma de gráficos.

Para o cálculo dos valores de CTOD crítico para o metal base e para a solda para posterior comparação, utilizaremos a Equação 2.9.

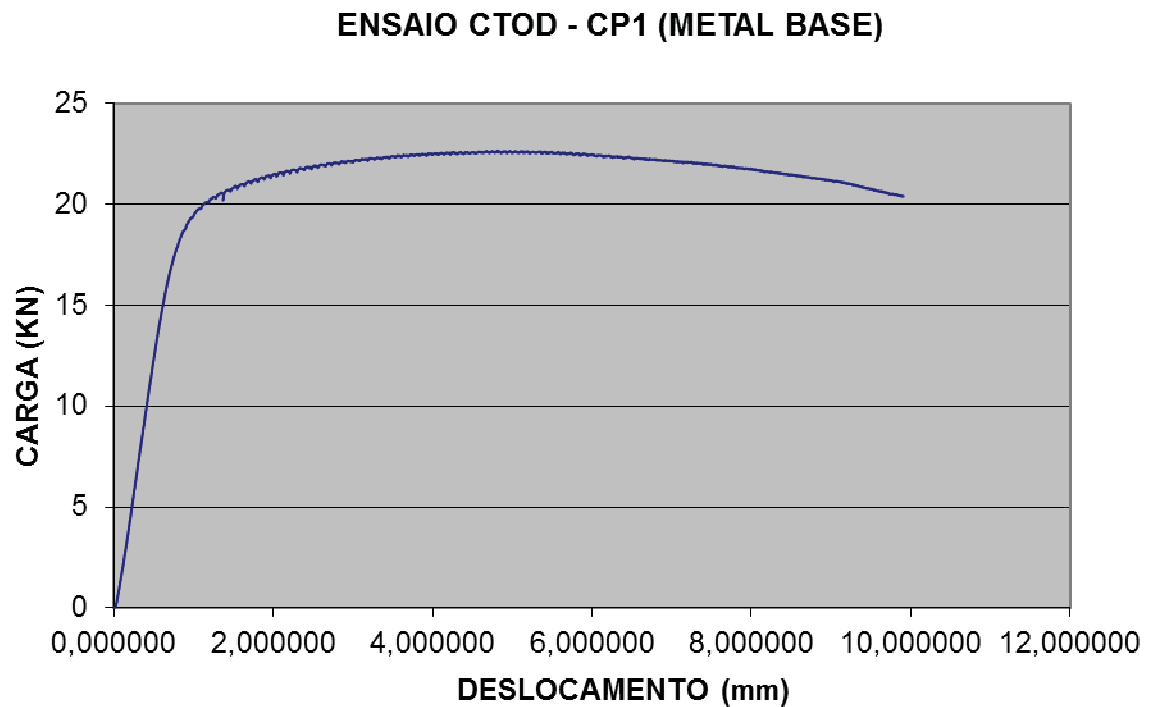


Figura 43 (a) – Registro carga x deslocamento para o CP 1 com entalhe no metal base

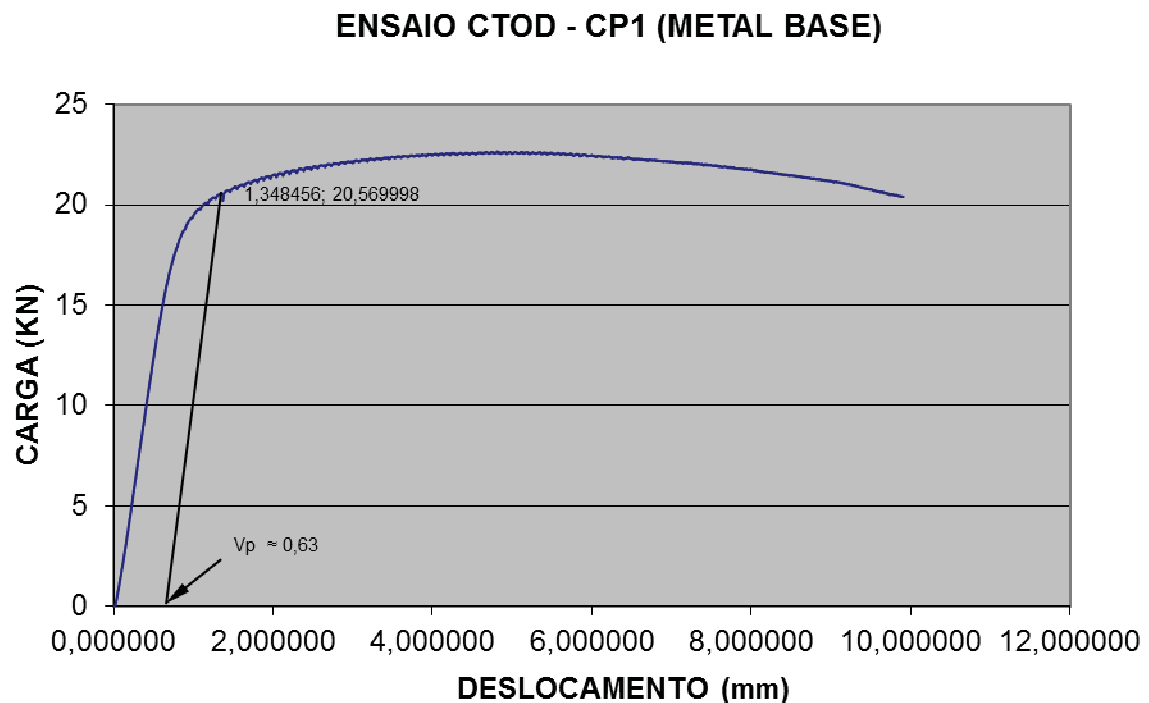


Figura 43 (b)– Registro carga x deslocamento para os CP1 - Identificação do ponto de Pop-In e valor de V_p .

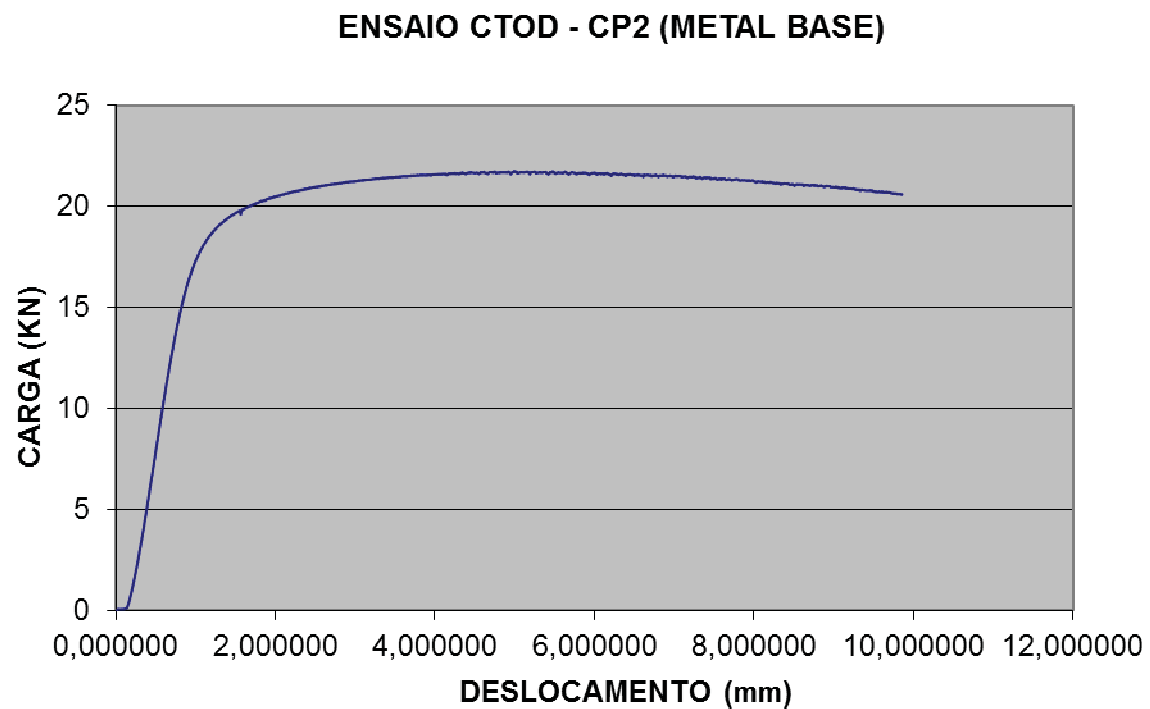


Figura 44 (a) – Registro carga x deslocamento para o CP 2 com entalhe no metal base

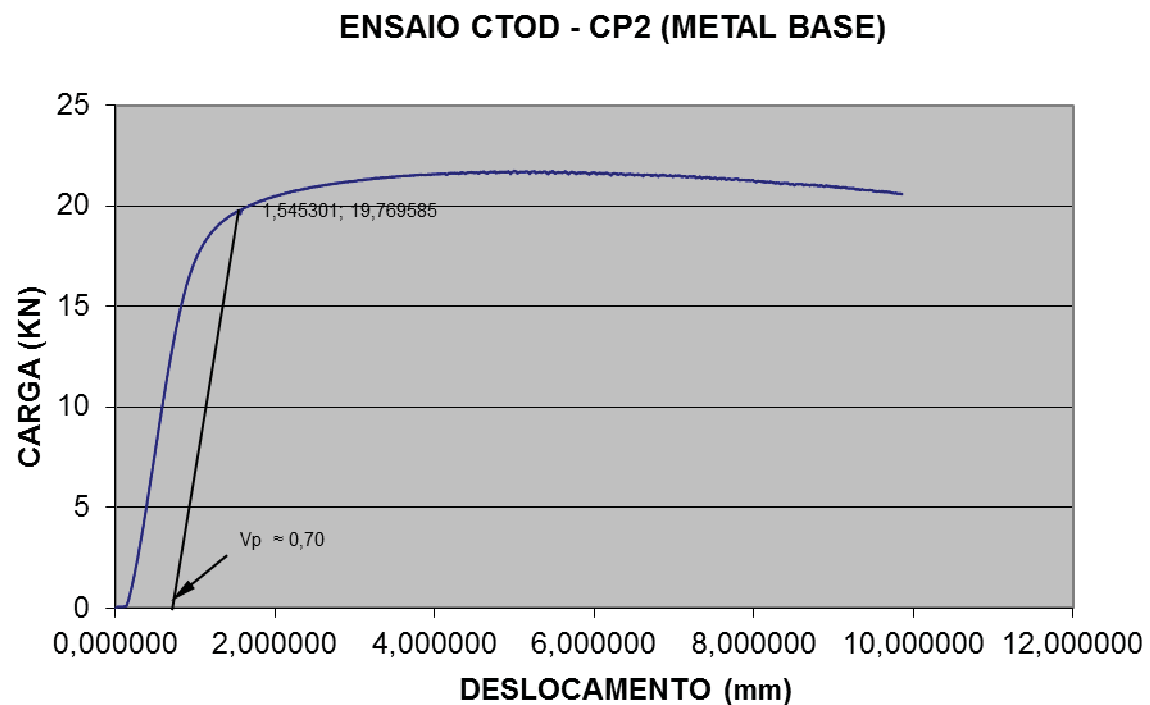


Figura 44 (b)– Registro carga x deslocamento para os CP2 - Identificação do ponto de Pop-In e valor de V_p .

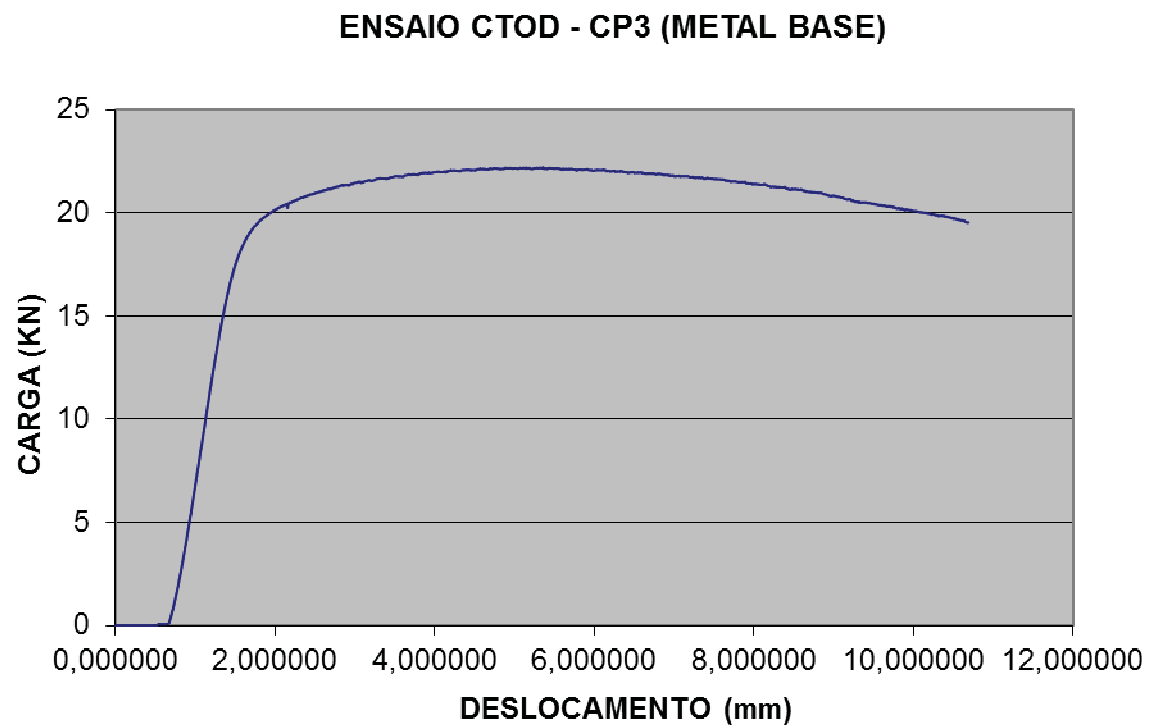


Figura 45 (a) – Registro carga x deslocamento para o CP 3 com entalhe no metal base

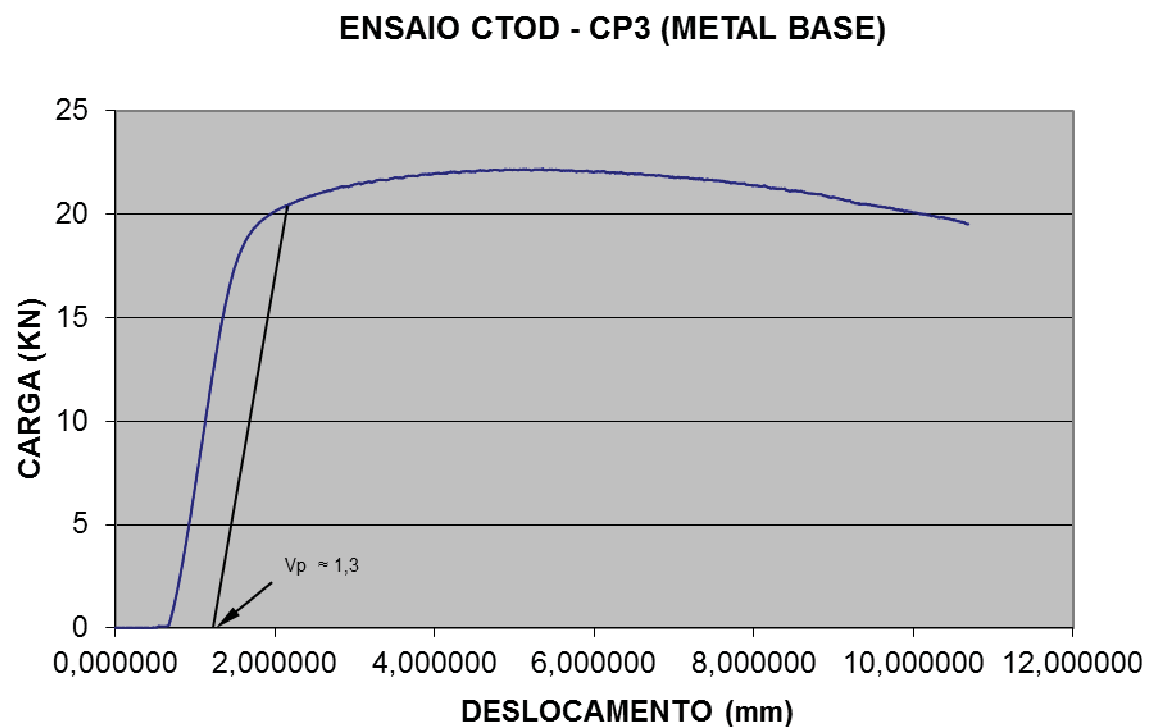


Figura 45 (b)– Registro carga x deslocamento para os CP3 - Identificação do ponto de Pop-In e valor de V_p .

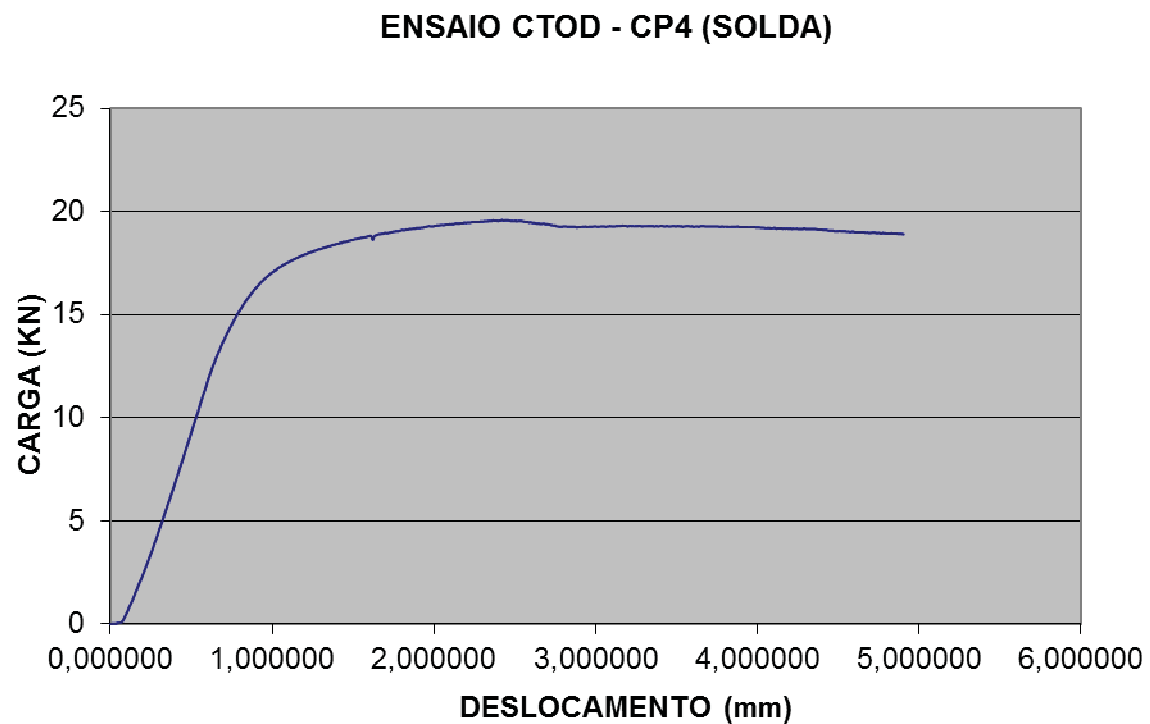


Figura 46 (a) – Registro carga x deslocamento para o CP 4 com entalhe na solda.

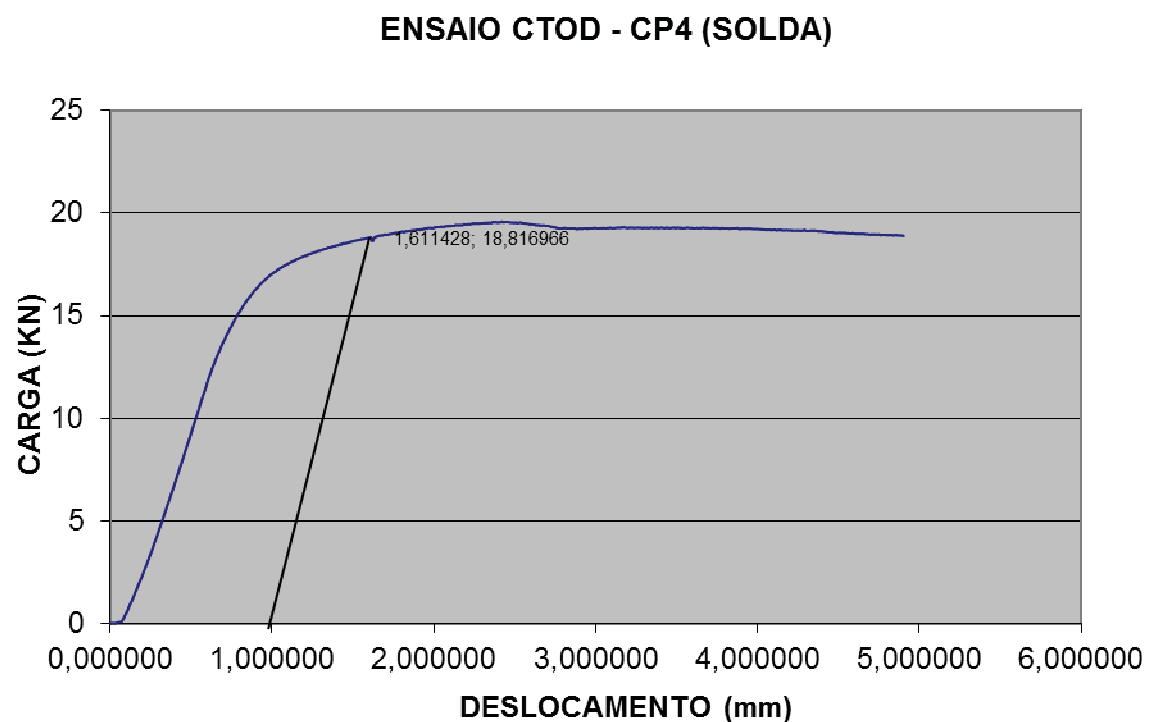


Figura 46 (b)– Registro carga x deslocamento para os CP4 - Identificação do ponto de Pop-In e valor de V_p .

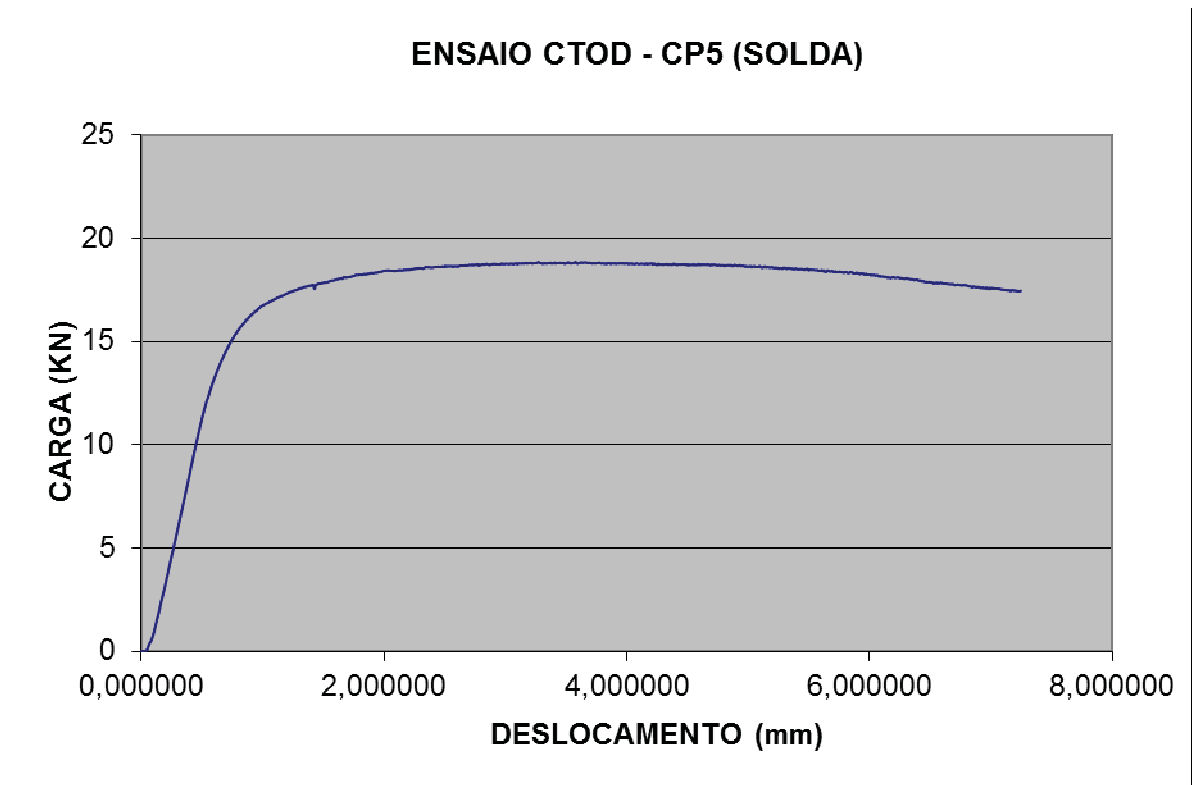


Figura 47 (a) – Registro carga x deslocamento para o CP 5 com entalhe na solda.

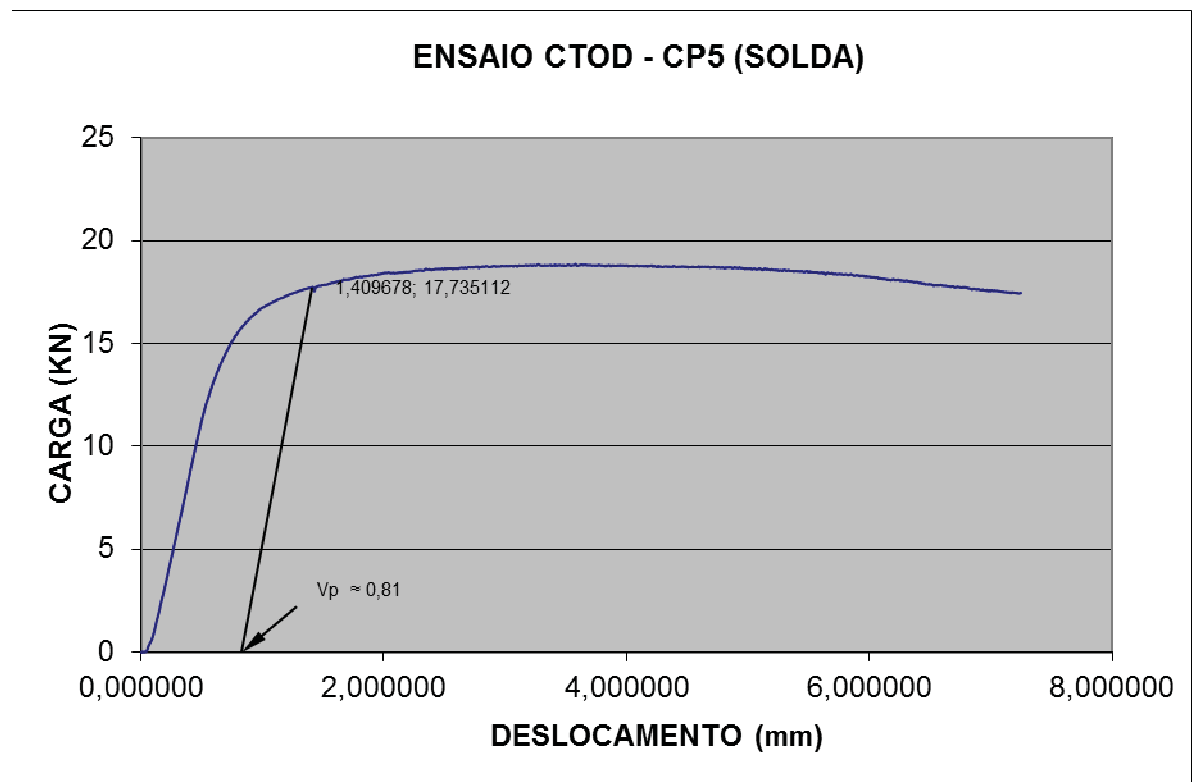


Figura 47 (b)– Registro carga x deslocamento para os CP5 - Identificação do ponto de Pop-In e valor de V_p .

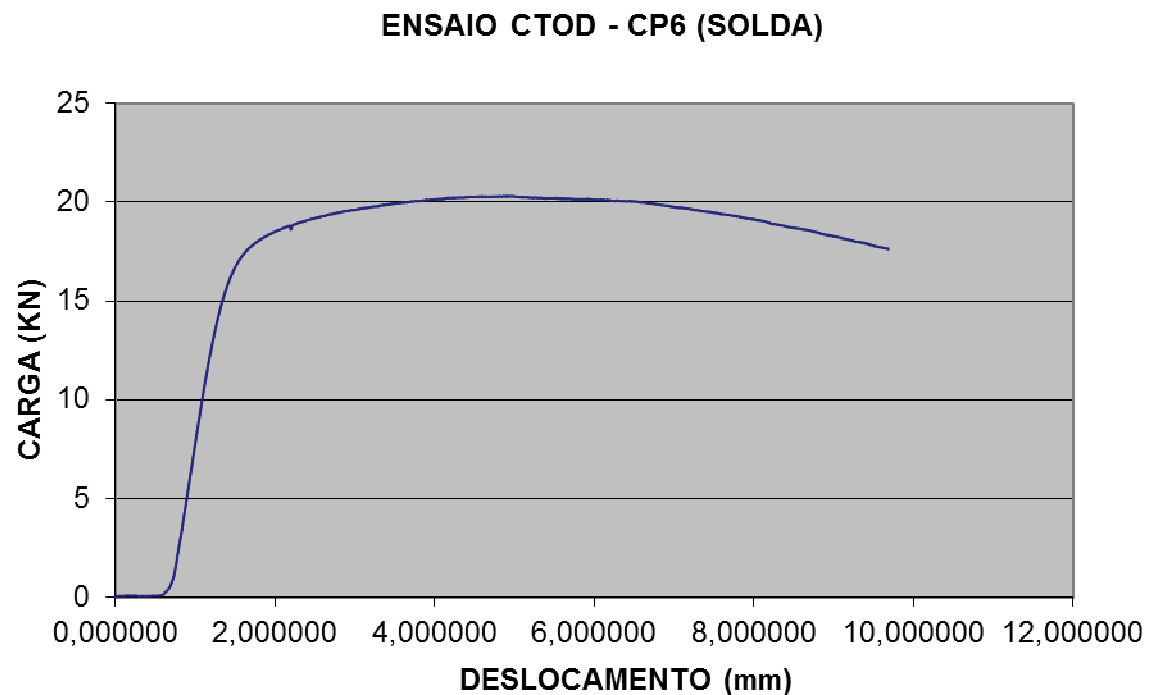


Figura 48 (a) – Registro carga x deslocamento para o CP 6 com entalhe na solda.

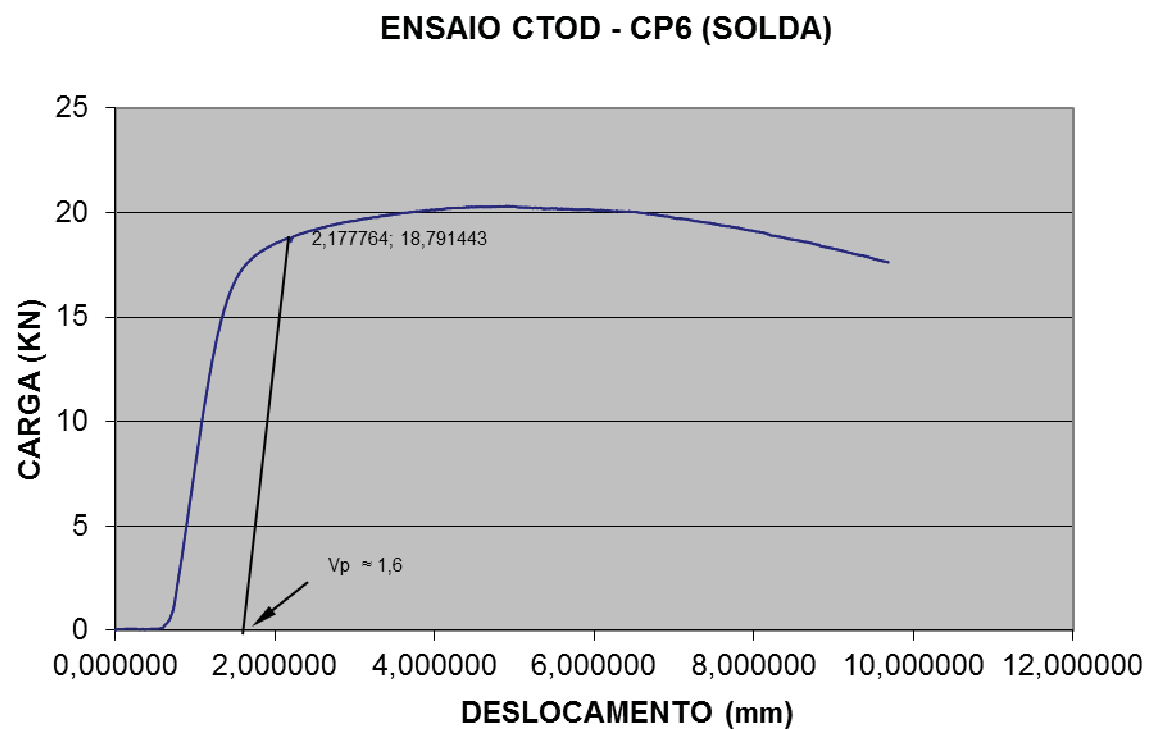


Figura 48 (b)– Registro carga x deslocamento para os CP6 - Identificação do ponto de Pop-In e valor de V_p .

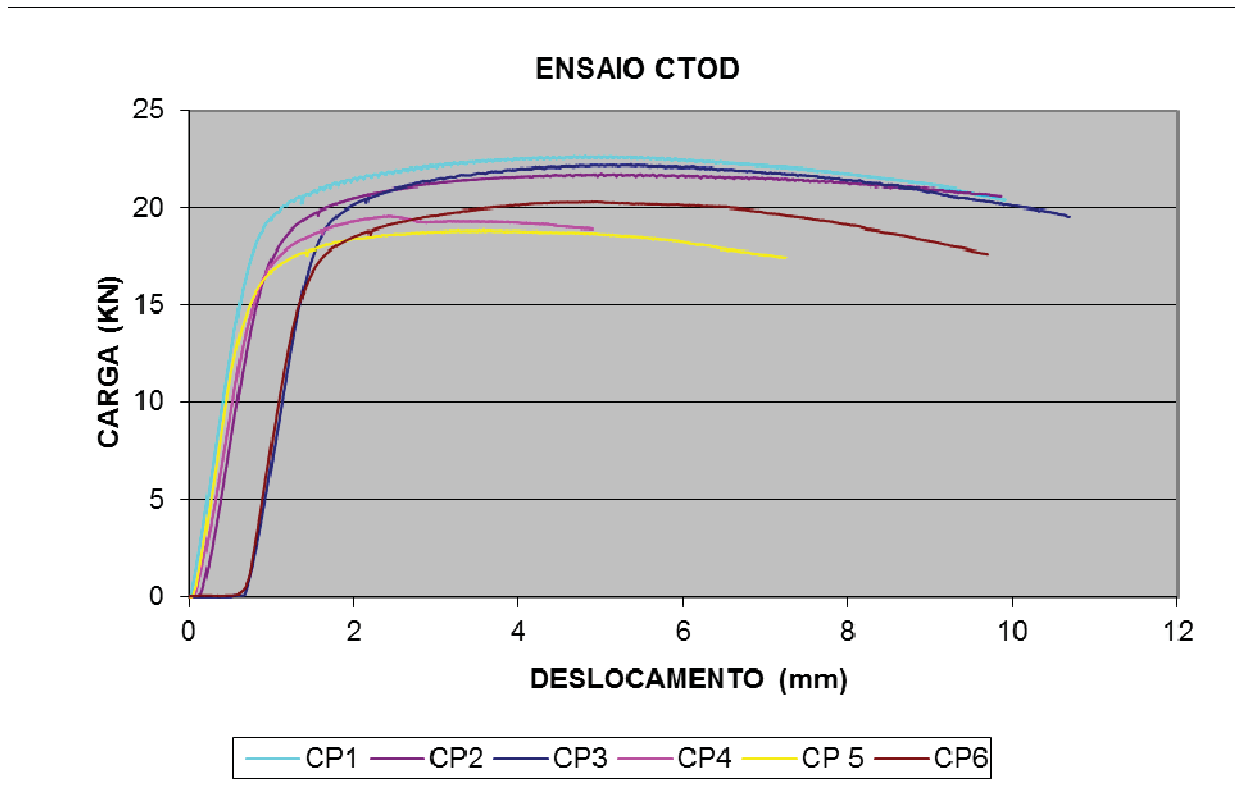


Figura 49 – Registro carga x deslocamento para todos os CPs - Comparativo

A Tabela 6 apresenta os valores “fixos” para todos os CP’s, por serem função da geometria, ou característica do próprio aço carbono, são constantes para todos os CP’s.

Tabela 6 – Dados “fixos” para o cálculo do CTOD

Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,29$
Limite de escoamento [Mpa]	$\sigma_{re} = 483$
Módulo de Elasticidade [Mpa]	$E = 207000$
Largura do corpo de prova [mm]	$W = 28$
Comprimento da trinca [mm]	$a_0 = 14$
Espessura do corpo de prova [mm]	$B = 14$
Distâ. entre roletes [mm]	$S = 112$
Fator geom. Adimensional	$a_0/w = 0,5$
Função fator geom. adimensional	$f(a_0/W) = 2,6625$
Fator rotacional plástico	$r_p = 0,4$
Espessura “knife edge”	$z = 1,6$

Para o cálculo do CTOD crítico foi utilizada a Equação 2.9. Os resultados para todos os corpos de prova, estão apresentados nas tabelas 7 e 8:

Tabela 7 –Cálculo do CTOD para os CP1 / CP2 / CP3.

CÁLCULOS - CP 1 (METAL BASE)	
Parcela plástica do deslocamento	$V_p = 0,63$
Carga de Ensaio [N]	$F_u = 20569,998$
Parâmetro CTOD (Comp. Elástica)	$\delta_1 = 0,040055$
Parâmetro CTOD (Comp. Plástica)	$\delta_2 = 0,180000$
Parâmetro CTOD	$\delta = 0,220055$

CÁLCULOS - CP 2 (METAL BASE)	
Parcela plástica do deslocamento	$V_p = 0,7$
Carga de Ensaio [N]	$F_u = 19769,585$
Parâmetro CTOD (Comp. Elástica)	$\delta_1 = 0,036998$
Parâmetro CTOD (Comp. Plástica)	$\delta_2 = 0,200000$
Parâmetro CTOD	$\delta = 0,236998$

CÁLCULOS - CP 3(METAL BASE)	
Parcela plástica do deslocamento	$V_p = 1,3$
Carga de Ensaio [N]	$F_u = 20405,906$
Parâmetro CTOD (Comp. Elástica)	$\delta_1 = 0,039418$
Parâmetro CTOD (Comp. Plástica)	$\delta_2 = 0,371429$
Parâmetro CTOD	$\delta = 0,410847$

Tabela 8 –Cálculo do CTOD para os CP4 / CP5 / CP6.

CÁLCULOS - CP 4 (SOLDA)	
Parcela plástica do deslocamento	$V_p = 0,98$
Carga de Ensaio [N]	$F_u = 18816,966$
Parâmetro CTOD (Comp. Elástica)	$\delta_1 = 0,033519$
Parâmetro CTOD (Comp. Plástica)	$\delta_2 = 0,280000$
Parâmetro CTOD	$\delta = 0,313519$

CÁLCULOS - CP 5 (SOLDA)	
Parcela plástica do deslocamento	$V_p = 0,81$
Carga de Ensaio [N]	$F_u = 17735,112$
Parâmetro CTOD (Comp. Elástica)	$\delta_1 = 0,029775$
Parâmetro CTOD (Comp. Plástica)	$\delta_2 = 0,231429$
Parâmetro CTOD	$\delta = 0,261204$

CÁLCULOS - CP 6 (SOLDA)	
Parcela plástica do deslocamento	$V_p = 1,6$
Carga de Ensaio [N]	$F_u = 18791,443$
Parâmetro CTOD (Comp. Elástica)	$\delta_1 = 0,033428$
Parâmetro CTOD (Comp. Plástica)	$\delta_2 = 0,457143$
Parâmetro CTOD	$\delta = 0,490571$

METAL BASE: $\delta_{\text{MÉDIO}} = 0,289300$

SOLDA: $\delta_{\text{MÉDIO}} = 0,355098$

5. CONCLUSÕES

Por se tratar de uma forma de ligação entre componentes de uma tubulação, era de se esperar que as propriedades de tenacidade, assim como o limite de resistência à tração da solda fossem próximos aos valores requeridos para o metal base, pois estarão sujeitas às mesmas condições de temperatura e pressão da tubulação.

Através dos resultados do ensaio de tração, conclui-se que a solda possui limite de resistência maior que o especificado para o metal base, tanto que os CP's romperam no próprio metal base, com uma carga superior ao mínimo especificado para o API 5L X70.

Quanto aos resultados de CTOD, pode-se verificar que para ambos os casos (solda e metal base) os valores ficam entre $0,2 \leq \delta \leq 0,49$ e a média em torno de 0,3. Não há grande variação entre os valores para o metal base e a solda.

Esses resultados obtidos (tração e CTOD) revelam que a utilização de um procedimento de soldagem qualificado para a realização de soldas garante propriedades mecânicas muito próximas às do metal base, o que em termos de projeto é ótimo, pois podemos garantir que a solda terá as mesmas características do metal base especificado para a montagem da tubulação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E1820: “Standard Test Method for Measurement of Fracture” – ASTM International, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E399: “Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials” – ASTM International, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME Sec. IX: “Welding and Brazing Qualifications” – ASME, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME B31.3: “Process Piping” – ASME, 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API 5L: “Specification for Line Pipe” – API, 2004.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION, BSI: BS7448: “Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials” – BSI, 1997.

BRACARENSE, A.Q.; Processo de Soldagem TIG (GTAW), Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Apostila, 2000.

BROEK, D.; Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th Edition, Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

FORTES, C.; Mecânica da Fratura, ESAB – Soldagem e Corte, Apostila, 2003.
www.esab.com.br

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A.; Ensaios dos materiais, LTC Editora, 1999.

GRAÇA, M.L.A.; Micromecanismos de iniciação da fratura em amostras entalhadas, UNESP, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Tese (Doutorado), 2002.

GUIMARÃES, V.A.; Ensaios de tenacidade à fratura, UNESP, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Apostila, 2008.

INSTRON BRASIL. Catálogo virtual. Disponível em: <<http://www.instron.com.br>>. Acesso em 18/12/2011.

JOAQUIM, R.; Processo de Soldagem por arame tubular, INFOSOLDA, Apostila, 2002.
www.infosolda.com.br

PEREIRA, C.P.M.; Comportamento à fratura da zona afetada pelo calor de juntas soldadas de aços microligados utilizados em baixas temperaturas. UNESP, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Tese (Livre-Docência), 1999.

STROHAECKER, T.R.; Mecânica da Fratura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Apostila.

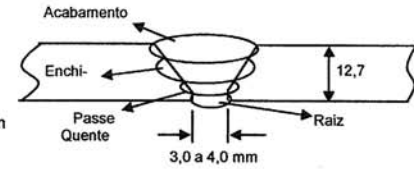
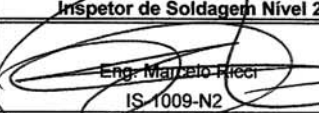
TELLES, P.C.S.; Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem, LTC Editora, 1932.

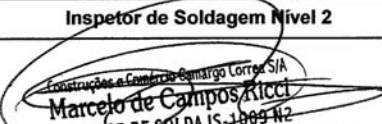
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

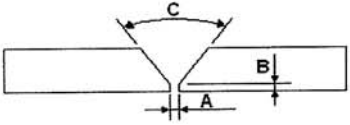
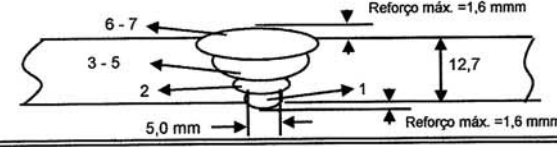
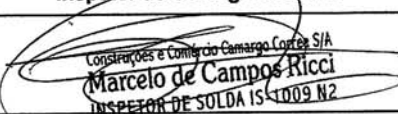
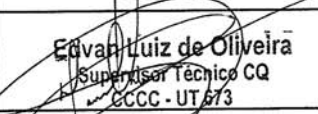
ANDERSON, T.L.; Fracture mechanics fundamentals and applications, 2nd Edition Ed. CRC Press Whashington, 1994.

DOWLING, N.E.; Mechanical behavior of materials – Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue, 2nd Edition, Prentice Hall, 1998.

ANEXO A – Especificação de procedimento de Soldagem

		ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM		EPS: AFB/EPS/TAT/035 Revisão: 0 Data: 25/7/2011		 ANGLO FERROUS BRAZIL		
CLIENTE Anglo Ferrous Brazil CONTRATO 069/08 PROCESSO TIG + ARAME TUBULAR NORMA DE REFERÊNCIA API 1104				EMPREENDIMENTO: Mineroduto Minas - Rio TIPO: Manual / Semi-automático BASEADO NA RQPS: AFB-RQPS-TAT-035				
DETALHE DA JUNTA :				SEQUÊNCIA DE PASSES				
Abertura da Raiz: 3,0 a 4,0 mm Face da Raiz: 1,0 mm Ângulo do Chanfro: 60 a 70 Espessura do Metal de Base: 12,7 mm				Número de Passes: 05 Tipo de Chanfro: Topo em V Desalinamento Máximo: 1,6 mm 				
METAL DE BASE				PRÉ/PÓS AQUECIMENTO				
Especificação: API 5L X70 Grupo: C (σ _e = 70.000 psi) Espessura: 12,7 mm Diâmetro 26"				Temperatura Pré/Pos Aquecimento N/A Temperatura Interpasses: 250°C (máximo) Temperatura Pós Aquecimento: N/A Tratamento Térmico: N/A				
POSIÇÃO / PROGRESSÃO DE SOLDAGEM				FAIXAS DE QUALIFICAÇÃO				
Posição: Fixa vertical Progressão Raiz: Descendente Demais passes: Descendente Tempo Máximo entre 1º e 2º Passes (minutos) 30 minutos Tempo Máximo entre 2º e Demais Passes (em horas) ver observação b)				Materiais 70.000 psi (tensão de Escoamento) Posição: Todas Espessura: 4,8 à 19,1 mm Diâmetro: Todos				
GÁS DE PURGA				GÁS DE PROTEÇÃO				
Tipo: N/A Composição: N/A Vazão: N/A				Tipo: Argônio (TIG) Composição: 100% Ar (TIG) Vazão: 12 à 15 l/min (TIG)				
METAIS DE ADIÇÃO								
Passe	Processo	Ø (mm)	Classific. AWS	Especificação SFA	Grupo	Marca Comercial	Fluxo	Fabricante
1 e 2	TIG	3,18	ER70S-3	5.18	5	ER70S-3	N/A	Gerdau
Demais	AT	2,0	E81T-8-Ni2J	SFA 5.29	8	Fabshield	N/A	Hobart
CARACTERÍSTICA ELÉTRICAS								
Passe	Processo	Ø (mm)	Tipo de Corrente	Polaridade	Tensão	Corrente	Veloc. Soldagem	Aporte Térmico (J/cm)
1 e 2	TIG	3,18	CC	Direta	9 - 14 V	99-164 A	7-13 cm/min	N/A
Demais	AT	2,0	CC	Direta	19 - 22V	115-286 A	17-27 cm/min	N/A
TÉCNICA DE SOLDAGEM								
Passe	Deposição	Eletrodo Simp/Mult.	Método de Limpeza				Método de Goivagem	
1 / 2	Oscilante	Simples	Metal Brilhante				N/A	
Demais	Retilíneo	Simples	Escovamento / Esmerilhamento				N/A	
SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM								
Raiz: Dois soldadores defasados a 90º um do outro				Demais Passes: Dois soldadores com início na geratriz superior				
TÉCNICA DE ACOPLAMENTO								
Interno: Não aplicável				Externo: Não retirar a acopeladora antes da conclusão de 50% do passe de raiz.				
OBSERVAÇÕES								
a) No caso de umidade ou temperatura abaixo de 10°C, pré-aquecer na faixa de 50°C a 60°C b) Juntas soldadas que não puderem ser terminadas na mesma jornada de trabalho, devem ter pelo menos 70% da espessura do Metal-Base preenchidas. O restante da soldagem pode ser terminado em até 72 horas aplicando-se um pré-aquecimento de 100°C. c) A marca comercial do consumível é uma variável essencial. O consumível utilizado na soldagem deve ser da mesma marca comercial desta EPS. d) Número de passes e diâmetro do consumível não são uma variáveis essenciais, podendo ser modificado conforme a necessidade. e) Conforme Consulta Técnica CT-CCC-AFB-1-10-0060								
Inspetor de Soldagem Nível 2			Coordenador de CQ			Cliente		
 Eng. Marcelo Ricci IS-1009-N2			 Edvan Luiz de Oliveira Supervisor Técnico CQ R-CCC-UT 673					

	REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM		RQPS: AFB-RQPS-TAT-035								
			Rev.: 0								
			Folha.: 01/02								
		Data: 25/7/2011									
PROCESSO DE SOLDAGEM : TIG / Arame Tubular			TIPO : Manual / Semi-automática		Norma: API 1104 Ed. 1999						
Posição da Soldagem: Fixa inclinada à 20° da horizontal			Tipo de Chanfro: Em "V"								
Metais de Base		Especificação	Grau	Espessura	Diâmetro						
API 5L X70		API 5L	X70	12,7 mm	24"						
Consumível	Passe	Classe	Especificação AWS	Fabricante / Origem	Marca Comercial						
TIG	1 e 2	ER 70S-3	A 5.18	Gerdau	ER 70S-3						
Arame Tubular	Demais	E-81T-8-Ni2J	A 5.29	Hobart	Fabshield X80						
Temp. Pré-Aquecimento (Min): N/A			Temp. Entre Passes (Max.): ≤ 250°C								
Método de Aquecimento:			Método de Controle: termômetro infravermelho ou lápis térmico								
TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM											
Temperatura de Patamar		Tempo de Tratamento		Taxa de Aquecimento							
N/A		N/A		N/A							
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS											
Método	Executante	Número do Relatório		Data	Laudo						
Gamagrafia	Labmat Oceania	001		21/6/2011	Aprovado						
ENSAIOS MECÂNICOS											
Tipo	Quantidade CP	Executante	Número do Relatório	Data	Laudo						
Tração	4	Lab Metal	8185/11	25/7/2011	Aprovado						
Dobramento	8	Lab Metal	8185/11	25/7/2011	Aprovado						
Impacto "Charpy"	12	Lab Metal	8185/11	25/7/2011	Aprovado						
Fratura	4	Lab Metal	8185/11	25/7/2011	Aprovado						
Dureza	2	Lab Metal	8185/11	25/7/2011	Aprovado						
Macrografia	2	Lab Metal	8185/11	25/7/2011	Aprovado						
CERTIFICADOS DIVERSOS											
Descrição	Identificação	Número	Descrição	Identificação	Número						
Calibre de solda	CS 011		Vareta TIG	ER 70S-3	41047682						
Paquímetro	PQ 038		Arame Fabshield	E81T8-Ni2J	P00499						
Trena 5 m	TM 020										
Alicate Amperímetro	AV 073										
FAIXA DE QUALIFICAÇÃO											
Processo	Consumíveis			Metais de Base				Tipo de Juntas e Posições			
	Nº. F ou Grupo	Nº A	Depósito Máx. (mm)	Grupo	Diã. Chanfro	Diã. Filete	Esp. Tubo	Esp. Filete	Tipo de juntas	Posições Chanfro	Posições Filete
GTAW	4	-	-	C	24"	-	12,7 mm	-	Topo	Vertical	-
FCAW	8	-	-		V						
OBSERVAÇÕES :											
Inspetor de Soldagem Nível 2				Coordenador de CQ				Cliente			
 Marcelo de Campos Ricci Inspetor de Soldagem Nível 2				 Edvan Luiz de Oliveira Supervisor Técnico CQ CCCC - UF 673							

	REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM				RQPS: AFB-RQPS-TAT-035		 ANGLO FERROUS BRAZIL
					Rev.: 0		
					Folha: 2/2		
					Data: 25/07/2011		
Acompanhamento de Soldagem							
Passe N°	1	2	3 - 5	6 - 7			
Descrição	Raiz	Reforço	Enchimento	Acabamento			
Lado	D/E	D/E	D/E	D/E			
Processo	TIG	TIG	Arame Tubular	Arame Tubular			
Tipo do Processo	Manual	Manual	Semi-Aut.	Semi-Aut.			
Progressão	Ascendente	Ascendente	Descendente	Descendente			
Especificação do Consumível	A 5.18	A 5.18	A 5.29	A 5.29			
Classe Consumível	ER 70S-3	ER 70S-3	E-81T-8-Ni2J	E-81T-8-Ni2J			
Diâmetro (mm)	3,18	3,18	2,0	2,0			
Fabricante	Gerdau	Gerdau	Hobart	Hobart			
Marca Comercial	ER 70S-3	ER 70S-3	Fabshield X80	Fabshield X80			
Identificação da Corrida	41047682	41047682	S228825T	S228825T			
Tipo de Corrente	CC	CC	CC	CC			
Polaridade	-	-	-	-			
Corrente	99 - 114	120 - 164	120 - 273	210 - 279			
Tensão	9 - 14	9 - 13	19 - 22	18 - 21			
Velocidade de Trabalho (cm/min)	7	13	17 - 27	20 - 22			
Velocidade do Arame (cm/min)	N/A	N/A	90 - 95	100			
Oscilação Largura (mm)	6	6	4 - 8	3 - 5			
Gás de Proteção	Argônio	Argônio	N/A	N/A			
Vazão do Gás (l/min)	13 - 14	13 - 14	N/A	N/A			
Espessura Depósito (mm)	3	2	8	2			
Diâmetro do Bocal	8 mm	8 mm	N/A	N/A			
Energia Sold. (kJ/Cm)	N/A	N/A	N/A	N/A			
Cobre junta:	N/A		Material do Cobre Junta:		N/A		
Gás de Purga:	N/A		Tempo entre Passes:		1 hora		
Vazão:	N/A	Manter até o	passe		2° e Demais passes:		
Acoplamento:	Interno		Externo		Limpeza do Bisel:		
Tipo de Acoplamento:	Cachorro				Limpeza da Raiz: Escovamento		
Retirados após Completados:	1° passe				Limpeza entre Passes: Esmerilhamento e Escovamento		
Soldadores / Operadores:			Lado	Passe	Equipamento		
Fábio Vieira de Aquino			E	1 - 2	Big Blue		
Claudionor Gomes da Conceição			D	1 - 2	Big Blue		
Raimundo Dias de Souza			E	Demais	Big Blue		
Franklin W. A. Souza			D	Demais	Big Blue		
Detalhe do Chanfro			Sequência dos Passes				
							
Dimensões A 5 B 1 C 70							
1) Certificamos que o descrito neste registro está correto, e que todos os corpos de prova foram preparados, soldados e testados de acordo com os requisitos da norma API 1104 Ed. 1999 e Especificação Técnica B118.03-1140-S-C-004. 2) Ensaio de Impacto "Charpy" realizado conforme Consulta Técnica AFB/CT/030							
Inspetor de Soldagem Nível 2			Coordenador de CQ			Cliente	
 Marcelo de Campos Ricci Inspetor de Solda IS-1009 N2			 Edvan Luiz de Oliveira Supervisor Técnico CQ ECCC - UT 673				

ANEXO B – CATÁLOGO DO FABRICANTE DO EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO CTOD (INSTRON 8801 – FATIGUE TESTING SYSTEMS)

Disponível em www.instron.com.br

Specifications

Model Number	8801-A1/ A2 Standard Height	8801-A3/ A4 Extra Height
LOAD CAPACITY		
A1/ A3 Option	±50 kN (±11 Kip)	±50 kN (±11 Kip)
A2/ A4 Option	±100 kN (±22 Kip)	±100 kN (±22 Kip)
Total Actuator Stroke	±75 mm (±3 in)	±75 mm (±3 in)
(B) Loadcell Height	97 mm (3.8 in)	97 mm (3.8 in)
(C) Actuator Fully Retracted	63 mm (2.5 in)	63 mm (2.5 in)
(D) Maximum Daylight	1100 mm (43.3 in)	1480 mm (58.3 in)
(E) Column Spacing	562 mm (22.1 in)	562 mm (22.1 in)
(F) Column Diameter	70 mm (2.8 in)	70 mm (2.8 in)
(G) Table Height	890 mm (35 in)	890 mm (35 in)
(H) Feet height	85 mm (3.35 in)	60 mm (2.4 in)
(I) Overall Width	920 mm (36.2 in)	920 mm (36.2 in)
(J) Overall Depth	546 mm (21.5 in)	546 mm (21.5 in)
(K) Overall Height (Maximum)	2423 mm (95.4 in)	2778 mm (109.4 in)
Weight	600 kg (1320 lb)	625 kg (1375 lb)

