

GUSTAVO RUYS TOLEDO

**LEVANTAMENTO DE UMA CURVA SN PARA UMA JUNTA SOLDADA DE PLACA
PLANA**

DEVELOP A SN CURVE FOR A FLAT PLATE WELDED JOINT

Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Trabalho de Conclusão de Curso na Área de Concentração do *Estudo da Fadiga*, apresentando ao
curso de Graduação de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Rio de Janeiro, RJ

2015.2

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de algum jeito fizeram os dias do período de graduação inesquecíveis. A todos os professores que tive a oportunidade de conhecer e assistir a aula. Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica. Aos funcionários da PUC-Rio.

Um agradecimento especial para meus pais que sempre me apoiaram e me deram incentivo para realizar os meus sonhos e atingir meus objetivos.

Agradeço também ao Professor Jayme Tupiassú Pinho de Castro, meu orientador, pela atenção e disposição de esclarecer dúvidas e elucidar problemas. Ao Professor José Luiz de França Freire, pela ajuda e incentivo em melhorar minhas técnicas como Engenheiro.

Agradeço aqueles que me ajudaram a elaborar esse projeto final, Renato Bichara Vieira e Vitor Garcia, pela amizade e auxílio nos testes elaborados.

Agradeço aos meus amigos de faculdade que proporcionaram grandes momentos de descontração e sabedoria. Amigos que espero levar para o resto da vida.

Palavras Chave / Keywords

Fadiga, Solda, Curva SN, Classe Solda, Tensão Residual, Solda Chapa Plana, Fadiga Solda
Fatigue, Weld, SN Curve, Weld Class, Residual Stress, Weld Flat Plan, Fatigue Weld

Resumo

O trabalho presente tem por objetivo desenvolver uma curva para vida a fadiga de uma parte específica de estruturas em geral. A solda. A solda apresenta diversas variáveis que quando não são controladas e estudadas podem alterar a resistência de toda uma estrutura quando cargas são aplicadas. Originando uma falha prematura da estrutura. Concentrando o estudo deste trabalho em carregamentos cíclicos em estruturas soldadas, devemos considerar que uma análise estatística para determinar a carga de teste deve ser feita. Pois não estarão disponíveis muitas amostras, restringindo assim o número de observações de resultado. Com o auxílio de uma câmera infravermelha e pela Análise Termoelástica da Tensão, será observado a distribuição de tensão ao longo do corpo de prova. E mais interessante é ao redor da solda. Podendo fazer um levantamento de uma potencial tensão residual. O trabalho irá decorrer sobre a existência de desvios dentro de um processo de fabricação contínuo, ou seja, para um produto que sofreu o mesmo processo de fabricação de tantos outros, pode haver uma divergência na resposta a sobre tensões elásticas cíclicas.

Abstract

The purpose of this study is to develop a curve to the fatigue life of a specific portion of general structures. The weld).The weld has several variables that, if not controlled and studied, may change the resistance of loads applied to a whole structure, causing a premature failure of the structure. Focusing the study of this work in cyclic loading of welded structures, we must consider that a statistical analysis to determine the test load should be made, since there is not enough samples available, limiting the number of observations results. Making use of an infrared camera and the Thermoelastic Stress Analysis , we can observe the stress distribution along the specimen. Focusing around the welding spot, a potential residual tension can be examined. The study will take place on the existence of deviations within a continuous manufacturing process, where it can be found a divergence of cyclical elastic stresses for a product that has undergone the same manufacturing process.

Índice de Tabela

Tabela 1: Apresentação das diferentes formas de gerar tensão residual em processos de manufatura.	14
Tabela 2: Tabela de propriedades químicas do Aço ASTM A36 para chapas.	27
Tabela 3: Tabela de propriedades mecânicas do Aço ASTM A36 para chapas.	27
Tabela 4: Geometria do Corpo de Prova.....	28
Tabela 5: Projeto da junta soldada pela ASW D1.1, 2002.....	33
Tabela 6: Fator F quando todos os corpos de prova testados falham	40
Tabela 7: Fator F quando interrompe o teste quando o primeiro corpo de prova falha	40
Tabela 8: Valores para o fator k, usando diferentes métodos.	42
Tabela 9: Valores estimados para as cargas aplicadas nos corpos de prova.....	52
Tabela 10: Principais dados do equipamento utilizado para realizar os testes de fadiga.	54
Tabela 11: Dados para o ponto a ser calibrado	58
Tabela 12: Calibração da Câmera de Infravermelho para ASTM A-36	58
Tabela 13: Diferença da tensão aplicada de projeto e da tensão apresentada na região da solda.....	71
Tabela 14: Distribuição t de student.	83

Índice de Figuras

Figura 1: Representação do efeito de impacto de martelamento.	15
Figura 2: Processo de Soldagem MIG/MAG.....	17
Figura 3: Processo de Soldagem TIG	17
Figura 4: Processo de Soldagem Eletrodo Revestido	17
Figura 5: Processo de Soldagem Arco Submerso	18
Figura 6: Volume do metal de adição no estado líquido	19
Figura 7: Volume do metal de adição no estado sólido.....	19
Figura 8: Esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada	20
Figura 9: Representação esquemática da relação entre tensões residuais e variações do gradiente de temperatura durante a soldagem	21
Figura 10: Carregamento axial, transversal ao cordão de solda.	25
Figura 11: Fissura no centro do cordão de solda.	28
Figura 12: a) dimensões de uma junta soldada tipo V. b) Zona de fusão da solda para uma junta tipo V.....	31
Figura 13: Configuração de junta do tipo V simples, segundo a AWS D1.1 de 2002.	32
Figura 14: Projeto do Corpo de Prova	34
Figura 15: Corpo de prova após finalizar o processo de Solda.....	37
Figura 16: Curva SN para aço, tensão normal e aplicações padrão (IIW,2008).....	44
Figura 17: Tabela {3.2}-1 da IIW. Grupo de solda de chanfro em chapas carregadas transversalmente ao cordão de solda.....	46
Figura 18: Curva SN para solda da classe 80 pela.....	47
Figura 19: Curvas dos Limites Superior e da Média da tensão esperadas para o projeto.....	52

Figura 20: Esquema dos equipamentos usados para realizar os testes	55
Figura 21: Calibração da escala da câmera com o material ASTM A-36	57
Figura 22: Posicionamento da câmera para análise das distribuições de tensões no novo corpo de prova	59
Figura 23: Corpo de prova de seção não uniforme sofrendo carregamento cíclico do Grupo A	60
Figura 24: Detalhe da concentração de tensão no pé da solda.....	63
Figura 25: Evolução da trinca no corpo de prova quando aplicado um carregamento de 185 MPa a 20 Hz. A – Foto após 30 mil ciclos; B- Foto após 160mil ciclos; C- Foto após 210 mil ciclos.....	64
Figura 26: Propagação da trinca, instantes antes de romper o material.....	64
Figura 27: Ruptura Corpo de Prova Grupo A.....	65
Figura 28-Detalhe do crescimento da trinca. a) na parte superior do corpo de prova; b) na parte inferior do corpo de prova.....	65
Figura 29: Carga alternada de amplitude 208MPa, puramente trativa.	66
Figura 30: Corpo de Prova submetido ao Grupo C do projeto de teste.	67
Figura 31: Corpo de Prova após ruptura Grupo C	68
Figura 32: Detalhe da ruptura do corpo de prova do Grupo C. a) parte inferior b) parte superior	69
Figura 33: a) material desalinhado e sofrendo carga trativa; b) material já alinhado e com tensões residuais compressivas em cima e trativa embaixo.	71
Figura 34: Plotados a curva do projeto do teste (Média) , curva da classificação da solda (Limite Superior) e dos pontos obtidos pelos ensaios (GRUPO A, GRUPO B e GRUPO C).	73
Figura 35: Linha de tendência obtida a partir dos dados dos testes dos Grupos A e C.	75
Figura 36: Comparação entre a curva de Limite Superior, que descreve o comportamento de uma junta soldada de classe FAT=80 como a curva obtida pelos ensaios de um corpo de prova dos Grupos A e C.	76
Figura 37: As curvas de da classe FAT=80 e do corpo de prova em um intervalo de $6 \cdot 10^4$ até 10^7 .77	
Figura 38: Distribuição t de Student para 2, 5 e $+\infty$ graus de liberdade.....	82

Lista de Variáveis

A – Área transversal ao carregamento

C – Constante para curva SN padronizada por classe

E – Módulo de elasticidade

F – Fator dependente do número de testes.

ΔF – Gama de carregamento

K – Propriedade constante do material

N – Número de ciclos

N_d – Número de ciclos, que o componente pode ser utilizado em serviço.

N_T – A vida média em ciclos dos corpos de prova testados, ou a vida do primeiro corpo de prova a falhar, aos dois são aplicados.

R – Espaçamento da raiz da solda

S_{80} – Tensão para a classe de solda 80 para curva de falha por fadiga

S_{CP} – Tensão da curva para o corpo de prova obtida após análise dos testes de falha por fadiga

S_E – Tensão limite de escoamento

S_k – Tensão característica de falha por fadiga

S_{k_i} – Tensão característica do Limite Inferior de falha por fadiga

S_{k_S} – Tensão característica do Limite Superior de falha por fadiga

S_m – Tensão média de falha por fadiga

S_R – Tensão Limite de resistências

ΔT – Variação de Temperatura

T_0 – Temperatura inicial

T_1 – Espessura do metal base

c_p – Calor específico a pressão constante

k_i – Fator que correlaciona o valor mínimo da média e valor máximo da variância

n – Número de amostras

p – Probabilidade

s – fator de Desvio Padrão

t – Distribuição t de Student

t' – Tamanho Nariz da Solda

α – Probabilidade de Gauss

α' – Ângulo do Chanfro da solda

α_t – Coeficiente linear de expansão térmica

β – Probabilidade Bicaudal de Student

ϕ – Distribuição normal gaussiana

ρ – Densidade do material

$\Delta\sigma_1$ – Gama da tensão principal na direção 1.

$\Delta\sigma_2$ – Gama da tensão principal na direção 2.

ν – Número de Poisson

χ – Distribuição Chi-quadrado

Sumário

1. Introdução a Fadiga	11
1.1. Fadiga Juntas Soldadas	12
2. Tensões Residuais	13
2.1. Definição Tensão Residual.....	13
2.2. Tensão Residual na Indústria	13
2.2.1. Tensão Residual Processo de Soldagem.....	15
2.3. Tensão Residual Padrão de Juntas Soldadas.....	20
3. Projeto do corpo de prova.....	22
3.1. Introdução à Aço	22
3.2. Junções em estruturas metálicas.....	23
3.3. Projeto da Junta Soldada	24
3.4. Razão da Tensão Residual.....	24
3.5. Especificação da Solda.....	28
3.5.1. Defeitos Cordão de Solda	28
3.5.2. Processo de Soldagem.....	30
3.6. Dimensionamento da junta, pela ASW D1.1:	31
4. Fabricação do Corpo de Prova.....	35
4.1. Preparo Metalúrgico	35
4.2. Processo de Soldagem	36
5. Projeto de Fadiga de Juntas Soldadas	38

5.1. Revisão Bibliográfica IIW,2008	38
5.1.1. Carga de Teste.....	40
5.1.2. Classe da Solda.....	43
5.2. Determinação da Classe da Solda.....	45
6. Projeto das cargas aplicadas no Teste	47
7. Realização do teste.....	54
7.1. Análise Termoelástica da Tensão	55
7.2. Primeiro Teste	59
7.3. Redefinindo o Projeto do Corpo de Prova	61
8. Resultados.....	63
9. Análise dos Resultados	70
10. Conclusão	78
11. Bibliografia.....	80
APÊNDICE A.....	82
ANEXO A	85
ANEXO B	87

1. Introdução a Fadiga

Fadiga é a falha mecânica que resultada da propagação lenta e gradual de trincas que levam à ruptura e ao colapso súbito do componente. Ocasionada por exposição à ciclos repetidos de tensão ou deformação.

É um fenômeno complexo, de fundamento extremamente estatístico, dependente de diversos fatores como: carregamento, geometria, microestrutura do material, temperatura, meio, umidade, tensões residuais, acabamento superficial e defeitos gerados pelo processo de fabricação.

A falha por fadiga ocorre em tensões muito menores do que aquela necessária para romper o material devido a aplicação de uma carga estática, como o aplicado em ensaios de tração. O fenômeno de fadiga deve ser muito bem estudado durante o projeto de uma estrutura ou elemento de máquina, que sofrem tensões cíclicas. Pois representa em torno de 90% das falhas em metais [CALLISTER, 2003].

Durante o processo de carregamento, formam-se micro trincas que, inicialmente, não se desenvolvem ou viram macro trincas que se propagam até atingir a tenacidade do material, ocorrendo então a falha final.

Pois as ligas metálicas, assim como outros materiais que não são de interesse para esse estudo, têm memória de carregamento. Onde cada carregamento aplicado ao material causa naturalmente um dano na peça. E com isso, cada carregamento sobreposto ao anterior terá seu dano somando.

Mesmo que a peça permaneça um período sem receber esforços, quando o mesmo carregamento for aplicado novamente, terá seu dano somado aos danos provocados por carregamentos anteriores. Este é o conceito básico da regra de Palmgren Miner, ou regra de acúmulo linear dos danos, como pode ser visto na equação 1 [CASTRO, MEGGIOLARO, 2009].

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1$$

1

1.1. Fadiga Juntas Soldadas

A solda é um dos processos de fabricação que pode influenciar a iniciação e o crescimento de trincas, quando aplica-se cargas cíclicas. São muitas as interferências no material durante o processo de soldagem, como: geração de tensão residual, descontinuidades na microestrutura, imperfeições e irregularidades no cordão de solda que funcionam como concentradores de tensão. Na maioria causada por falhas de operação do soldador e devido às altas temperaturas que são atingidas no processo.

Os casos mais conhecidos de falha por fadiga em solda ocorrem no ponto onde existe o maior concentrador de tensão. Para as soldagens feitas por processos que possibilitam um alto grau de qualidade, ou seja, pouco ou nenhum defeito, a trinca de falha ocorre na margem ou pé (toe). E para as demais juntas temos uma incidência menor de trinca nessa região, ocorrendo com maior frequência nos pontos do defeito de soldagem.

2. Tensões Residuais

2.1. Definição Tensão Residual

A definição mais difundida para tensão residual é apresentada a seguir. Define-se como as tensões que permanecem em um material sem a existência de carregamentos externos ou gradientes de temperatura, são tensões elásticas e se superpõem às cargas de serviço [LU, 1996]. Elas são auto equilibrantes, ou seja, o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos é zero.

Podendo existir em um mesmo corpo tensões residuais trativas e compressivas. O que em alguns casos são provocados intencionalmente para maximizar a vida da peça em cargas cíclicas. Por exemplo, na existência de tensões residuais compressivas, em um corpo que sofre esforço trativo, irá enxergar a resultante da tensão residual mais a carga de esforço (tensão residual que neste caso é negativa por ser compressiva). O que será benéfico para a vida da peça. Já que estará trabalhando com uma carga menor do que as cargas empregadas à peça, devido a tensão compressiva superficial (ponto de início de trinca)[TOTTEN; HOWES, 2003].

A tensão residual é um tema muito abordado quando existe um potencial falha por fadiga. Em muitos casos a tensão residual é utilizada para minimizar a possibilidade de iniciação de trincas em carregamentos cíclicos. Em outros casos ela pode prejudicar e elevar as chances de falhas estruturais por fadiga.

2.2. Tensão Residual na Industria

Existem diferentes maneiras de se obter uma tensão residual em corpos metálicos. Elas têm origem em deformações elásticas não uniformes causadas mecanicamente, termicamente, durante alteração micro estrutural ou transformações de fase. Como é possível ver na Tabela 1 as diferentes formas de se gerar tensões residual em componentes metálicos.

Tabela 1: Apresentação das diferentes formas de gerar tensão residual em processos de manufatura.

Origem da Tensão Residual	Processo de Manufatura	Exemplos
Mecanicamente	Conformação Processos de Usinagem Processos de Fabricação	Laminação, Forjamento, Estampagem, Jateamento, Lixamento, Retífica, Torneamento, Fresamento, Furação, dentre outros.
Transformação de Fase e Alteração Micro estrutural	Tratamento Térmico Deposição Superficial Tratamento Termoquímico	Têmpera, Revenimento, Normalização, Nitrelação Cementação, Galvanização, Metalização Eletrodeposição
Termicamente	Processos de Usinagem Processos de Soldagem Tratamento Térmico Processo de Fundição Tratamento Termoquímico	Aquecimento causado pela usinagem, Têmpera, Revenimento, Normalização, Resfriamento não controlado dentro do molde de fundição.

Um simples atingimento de marreta em um corpo pode gerar tensões residuais compressivas Figura 1, devido ao deslocamento elástico da superfície do corpo. O que irá minimizar o dano na peça para um carregamento cíclico trativo. Levando em consideração que a tensão residual se sobrepõe a carga aplicada ao corpo.

A tensão residual também aparece por variação térmica, que são consequências de um aquecimento ou resfriamento não homogêneo do material, gerando contração e/ou dilatação do material, e que normalmente são gerados por um alto gradiente de temperatura.

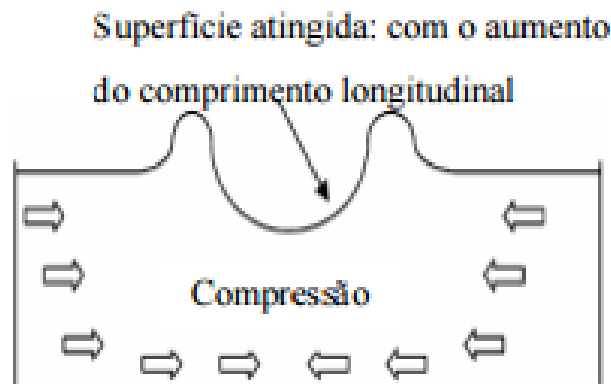


Figura 1: Representação do efeito de impacto de martelamento. [FERNANDES, 2003]

2.2.1. Tensão Residual Processo de Soldagem

O exemplo mais conhecido em processos de fabricação, que pode gerar uma tensão residual originada termicamente, é o processo de soldagem por arco elétrico. Onde uma corrente flui entre a peça até um terminal que representa o polo (positivo ou negativo, dependendo do arranjo de montagem dos cabos de conexão). Gerando uma alta fonte de calor.

Isso ocorre porque a peça está aterrada ligada a um cabo, conhecido como terra que tem o polo contrário ao da tocha¹. A ligação de um dos polos é feita através do cabo terra, com o grampo fixado à peça a soldar, e o conector da outra extremidade, fixado ao conector da fonte de solda.

Os processos de soldagem, mais difundidos na indústria, são o Eletrodo Revestido, MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*), TIG(*Tungsten Inert Gas*) e Arco Submerso.

- **Eletrodo Revestido:** “Quando as gotas de metal fundido são transferidas através do arco para a poça de fusão, são protegidas da atmosfera pelos gases produzidos durante a

¹ Peça da máquina de solda onde é fixado o consumível que abrirá o arco elétrico no contato com a peça já aterrada.

decomposição do revestimento. A escória líquida flutua em direção à superfície da poça de fusão, onde protege o metal de solda da atmosfera durante a solidificação”[FORTES, 2005].

- **MIG/MAG:** O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo [FORTES, 2005].
- **TIG:** É um processo que utiliza um eletrodo sólido de tungstênio não consumível, utilizado apenas para abrir o arco elétrico. O metal de enchimento é adicionado no limite da poça de fusão, onde consegue fundir-se à material base. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte [ESAB, 2014].
- **Arco submerso:** “A ponta do arame de soldagem, o arco elétrico e a peça de trabalho são cobertos por uma camada de um material mineral granulado conhecido por fluxo para soldagem por arco submerso. Não há arco visível nem faíscas, respingos ou fumos” [FORTES, 2004].

Esse trabalho não tem a pretensão de apresentar as diferentes aplicações de cada processo de soldagem. O importante é ter a ciência de que todos os processos acima são caracterizados como Solda por Arco Elétrico, e que geram tensões residuais térmicas.

Para conhecimento geral vale observar as figuras abaixo Figura 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5 e perceber que os processos se diferem entre si. Tendo dentro da Engenharia de Solda uma aplicação específica de cada processo.

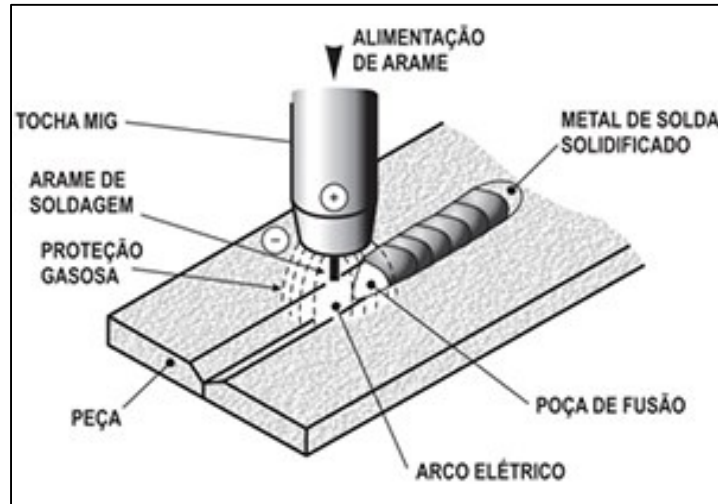


Figura 2: Processo de Soldagem MIG/MAG Fonte: ESAB

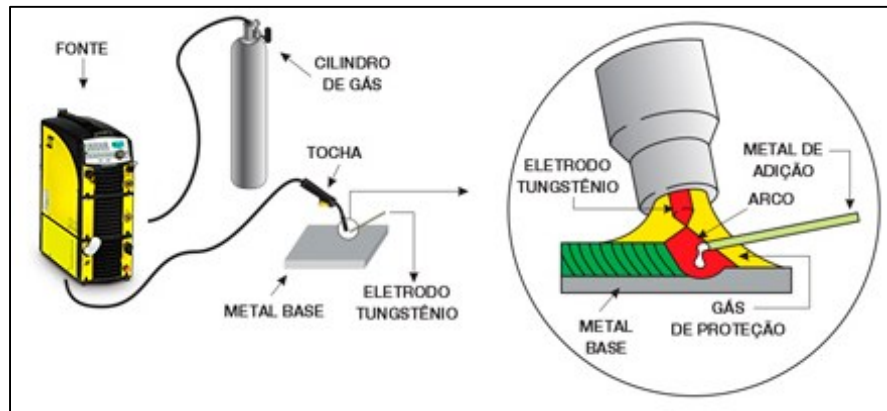


Figura 3: Processo de Soldagem TIG Fonte: ESAB

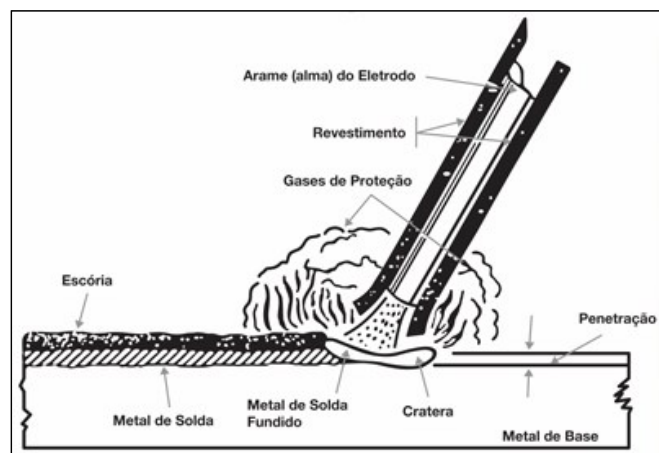


Figura 4: Processo de Soldagem Eletrodo Revestido Fonte: ESAB

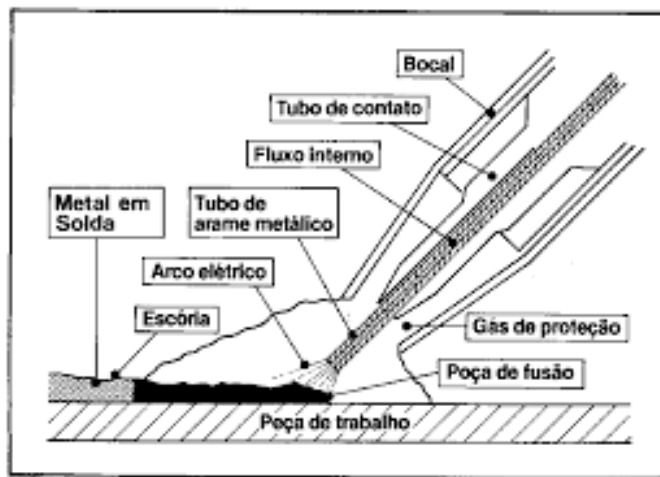


Figura 5: Processo de Soldagem Arco Submerso Fonte: ESAB

As tensões residuais térmicas, importante no estudo de fadiga de juntas soldadas, não seguem uma distribuição uniforme e padronizada. É difícil determinar a curva da tensão residual, pois elas são tridimensionais **Error! Reference source not found.**, e variam para cada interferência que o corpo sofreu. O que torna complexo o estudo e estimativa de tensões residuais.

Como já de conhecimento geral, ao aquecer um material metálico temos a expansão volumétrica deste corpo. E é exatamente o que acontece quando o metal de adição é aquecido na poça de fusão e funde com o material base.

Porém a porção de metal adicionado não pode ser considerado grande o suficiente para afetar toda a peça que está sendo soldada. E assim o material que foi adicionado tende a contrair ao solidificar-se pelo resfriamento.

A pequena porção de material, comparado ao material base, não consegue assumir o volume esperado. Acabando por gerar tensões residuais na área afetada pela solda (ZTA – Zona Termicamente Afetada).

O ponto em comum que é possível chegar, dentre a complexidade da tensão residual geradas em juntas soldadas, é que devido ao resfriamento da solda em ambiente não controlado (temperatura

ambiente), geram tensões residuais que no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material [MODENESI, 2008].

Contudo, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver. Pode se dizer, portanto, que tensões residuais térmicas são aquelas resultantes de deformações plásticas não uniformes causadas por variações térmicas desiguais ao longo do material [AGGEN et al, 1998].

No instante em que é depositado, o metal de adição está aquecido e no estado líquido, ocupando o volume mostrado na Figura 6. Na temperatura ambiente, essa mesma quantidade de metal solidificado ocupa somente o volume mostrado na Figura 7 [NERIS, 2012].

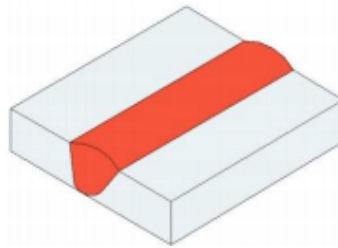


Figura 6: Volume do metal de adição no estado líquido

Fonte: <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT11.pdf>

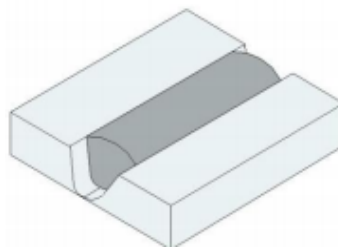


Figura 7: Volume do metal de adição no estado sólido.

Fonte: <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT11.pdf>

2.3. Tensão Residual Padrão de Juntas Soldadas

Um padrão típico de tensões residuais longitudinais macroscópicas encontrado em chapas finas soldadas está apresentado na Figura 8. Tem-se o valor máximo de tensão trativa no cordão de solda e ocorre uma redução deste valor na medida em que se afasta do cordão até que a tensão se torne compressiva, para manter o equilíbrio dos carregamentos internos, considerando-se que as tensões são constantes ao longo da espessura [COFIÑO, 2010].

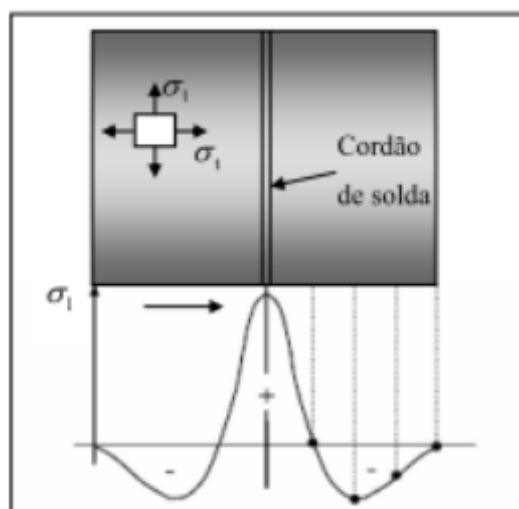


Figura 8: Esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada [PUC-RIO, 2010]

Um esquema que foi estudado por [MODENESI, 2008] resultou em uma análise (Figura 9) mais detalhada da variação da temperatura durante o processo de soldagem influenciando a tensão residual na região termicamente afetada pela solda². Área esta que normalmente é caracterizada por receber influencias do gradiente de temperatura gerado pela soldagem.

² ZTA – depende diretamente dos parâmetros utilizados na soldagem. Alta potência e alta velocidade reduz o gradiente térmico, afetando termicamente uma área menor [FORTES; ARAUJO, 2005].

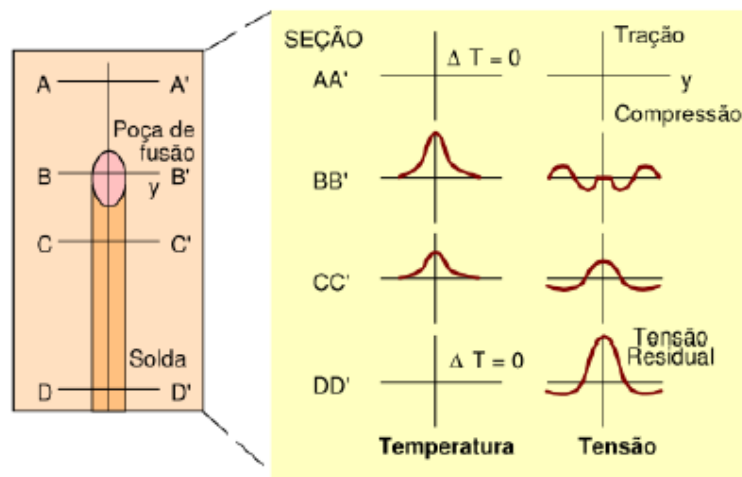


Figura 9: Representação esquemática da relação entre tensões residuais e variações do gradiente de temperatura durante a soldagem [MODENESI, 2008].

Observa-se que cada seção apresenta uma variação de temperatura para uma tensão residual característica. Na seção A-A' aparece a metal base puro, sem a presença do metal de adição, por isso um gradiente de temperatura zero e isenta de tensão residual. Na seção B-B' é o ponto de maior concentração de calor, o ponto onde a poça de fusão está atuando (ponto de abertura do arco elétrico, fonte de calor) e por estar líquida a tensão ainda é zero, porém no processo de solidificação inicia uma tensão compressiva ao redor da região de fusão, pois o material de adição é impedido de se expandir pelas regiões mais frias e tensões de tração nas áreas mais afastadas. Na seção C-C' ainda está se solidificando e produzindo tensões compressivas, e no centro do cordão de solda já inicial uma tensão residual trativa. A seção D-D' é considerada totalmente solidificada e geram tensões residuais, que podem chegar próximo ao limite de escoamento do material base [MODENESI, 2008].

Nesse trabalho não será discutido os diferentes métodos para cálculo de tensões residuais geradas por gradiente de temperatura. Os modelos que serão usados para dimensionar juntas soldadas, já interpretam as tensões residuais, e estão subentendidas sobre sua existência. Pois são modelos empíricos e não apenas teóricos.

3. Projeto do corpo de prova

Este trabalho foi elaborado em parceria com uma empresa do ramo industrial. A qual forneceu o material, mão de obra e espaço para a realização da fabricação dos corpos de prova.

O material base fornecido, foi um Aço com finalidade de utilização estrutural, onde no decorrer do capítulo será abordado suas especificações.

3.1. Introdução à Aço

O Aço Carbono vem sendo utilizado como matriz industrial a bastante tempo. Possui inúmeras vantagens de utilização em projetos estruturais e de elementos de máquinas. Como por exemplo apresentar uma boa tenacidade, aliada de boa soldabilidade, ter um comportamento uniforme para carregamento de tração e compressão e possuir uma tensão ao escoamento considerável, para os carregamentos usuais.

Atualmente no mercado o que encontramos disponível para compra são os Aços Ligados que mantém as características de composição do Aço Carbono, mas apresentam uma gama de variações de combinação entre os elementos que os formam.

Por vezes e quando desejado, introduz-se novas características mecânicas e químicas, possibilitando a criação de diferentes tipos de ligas metálicas, a partir da estrutura do Aço Carbono. Ligas essas que já são conhecidas e testadas por diferentes institutos a um longo período.

Os Aços são caracterizados por apresentarem uma boa tenacidade, o que para os Engenheiros Estruturais se torna como um casamento perfeito entre carregamento e resistência à fratura. Principalmente para equipamentos que qualquer possibilidade de falha causaria um desastre, como pontes, prédios, motores, carros, elementos de máquinas, etc.

Aço é uma liga de Ferro que contém entre 0,008% a 2,11%. Podendo ou não conter adição de outros elementos que podem ser dosados de acordo com a finalidade a que se destina um tipo de aço. Os elementos químicos Cobalto, Cromo, Enxofre, Fósforo, Níquel, Manganês, Molibdênio, Vanádio, Tungstênio e Silício são os mais usados na preparação de aços ligados [CHIAVERINI, 2002].

Onde o Carbono é o elemento mais importante depois da matriz Ferro. Pois ele se aloca nos interstícios criados pela condição da microestrutura, a qual depende dos parâmetros utilizados para o resfriamento, porcentagem de carbono na matriz e temperatura de mistura dos elementos. Por ter um raio atômico que equivale metade do Ferro, o Carbono se posiciona facilmente nos espaços vazios criados pela estrutura geométrica da rede cristalina. O que aumenta a rigidez, mas sem perder a tenacidade necessária para trabalhos que necessitam de uma margem de deformação plástica para danificar sem fraturar a peça.

3.2. Junções em estruturas metálicas

Porém na maior parte de sua aplicação não é possível fabricar a peça ou um equipamento completo sem uniões entre suas partes. Um grande impecílio é o transporte e o custo de fabricação de peças inteiras sem juntas entre suas partes. Com isso surgiram processos distintos para a junção de peças metálicas.

As mais difundidas no mercado são juntas soldadas, fixadas por parafusos, por pinos, juntas articuladas. Dependendo das restrições e custo que existe em cada projeto.

Uma das juntas que apresenta maiores discussões, em reação ao seu projeto, é a junta feita por meio de soldagem. Por fundir um material ao outro em altas temperaturas, afeta uma área do material base e gera tensões residuais devido ao resfriamento do material de adição. E pode provocar defeitos internos, ao material de adição, durante o processo de soldagem. O que pode interferir na vida da peça quando esta sofre carregamentos, principalmente cíclicos.

3.3. Projeto da Junta Soldada

Esse assunto é aparentemente muito discutido em trabalhos e estudos, na área de juntas soldadas. Pois apresenta uma grande importância quanto aos resultados obtidos com os testes a serem efetuados. Principalmente quando trata de teste voltado para falha por Fadiga.

Um dos principais pontos que não se encontra com facilidade nas literaturas disponíveis, é a influência da tensão residual no projeto do corpo de prova. Ou seja, qual é a dimensão ideal para o corpo de prova quando objetiva-se atingir uma tensão residual similar a uma peça de dimensões reais.

Por exemplo, imaginemos que deseja-se estudar o comportamento de uma junta longitudinal soldada de um casco de um vaso de pressão. Como já sabemos, a tensão residual varia ao longo do material, e não pode-se considerar uniforme sua distribuição ao longo de todo o cordão de solda, pois ocorrem alívio de tensão ao aproximar-se das bordas do cordão [CASAVOLA; MASELLIS; PAPPALETTERE, 2010].

Qual deverá ser a dimensão do corpo de prova utilizado para o estudo da fadiga na região da solda deste componente, visando simular a tensão residual existente no componente real? Não existe um acordo definido que direcione para um tamanho padrão. E esse ponto será o início do projeto de corpo de prova.

3.4. Razão da Tensão Residual

Após discutir e pesquisar bastante, junto aos professores. Não foi possível chegar a uma única conclusão sobre o tamanho ideal para um corpo de prova. Mas foi preciso definir algumas hipóteses para que atingisse pelo menos um caminho para trabalhar. Hipóteses assumidas:

- 1) Temos que a espessura da chapa a ser soldada influencia diretamente no comprimento ideal do cordão de solda a ser projetado;

- 2) Considerar a Tensão Residual tridimensional ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$);
- 3) Considerar que a Tensão Residual paralela ao cordão de solda sofra descontinuidade quando: $L < 15 t$.

Ou seja, para uma chapa de 4 milímetros de espessura teremos um comprimento mínimo do cordão de solda de 45 milímetros.

Definido que o comprimento na seção da solda deverá ser em função da espessura da chapa a ser utilizada. Utilizando um fator de tensão residual igual a 15 estimasse simular a tensão residual de uma solda em um componente estrutural que sofre carregamento cíclico de tração-zero transversal ao cordão de solda, vide Figura 10.



Figura 10: Carregamento axial, transversal ao cordão de solda.

Na indústria em geral são utilizados diversos tipos de ligas metálicas para atender a necessidade de cada projeto, variáveis como resistência aos carregamentos sofridos pela peça, ambiente em que está exposto e custo, são os pontos chave para determinar qual será o melhor material a ser utilizado em uma peça.

Os aços ligados de baixo teor de carbono são em geral os mais utilizados para projetos estruturais. O fator alta tenacidade, baixo custo, facilidade de compra e boa soldabilidade, proporcionam a esses aços o uso em diversos projetos.

Nesse projeto será utilizado o aço de baixo teor de carbono de uso estrutural. São aços que não apresentam as mesmas características mecânicas e metalúrgicas apresentadas pelos aços especiais, pois em seus processos de fabricação não são controlados o tamanho de grão austenítico, os níveis de gases dissolvidos, o grau de pureza, etc. As faixas de composições químicas dos aços comerciais são apenas orientadas pela norma NBR 6006 ou pelas normas internacionais tipo SAE, AISI, ou DIN, portanto, não há garantias de que os teores dos elementos químicos principais ou residuais estejam estritamente dentro dos limites especificados por estas normas. Além disto, nos aços comerciais, não são garantidas as faixas de temperabilidade conforme as normas NBR ou SAE. No Brasil, a norma ainda segue algumas diretrizes da ASTM, “American Standards of testing and materials”, sendo que alguns fabricantes apresentam produtos com especificações ASTM.

O aço ASTM A-36, vai ser utilizado no trabalho em questão. É um aço de grande uso em estruturas metálicas, peças mecânicas, chapas, tubulação, entre outras inúmeras utilidades. A Tabela 2 apresenta as faixas de cada elemento químico, e propriedades mecânicas que devem ser encontradas no A-36. Diferentes normas apresentam faixas bem próximas para cada elemento. A variação na fabricação do Aço é reconhecida como aceitável, devida a fabricação dos Aços sofrerem interferências diversas.

O material fornecido para a fabricação do corpo de prova foi uma chapa de $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura, aproximadamente 6 milímetros, da **USINIMINAS**. Cujo certificado está no ANEXO B. Respeitando o fator de tensão residual mínimo, a largura terá 150 milímetros. Comprimento de 200 mm (duzentos milímetros). Como é possível ver na Figura 14 e Tabela 4.

Tabela 2: Tabela de propriedades químicas do Aço ASTM A36 para chapas. Fonte: <http://www.matweb.com>

ELEMENTO QUÍMICO	ASTM A36 (CHAPA) MatWeb
Carbono, C	0.25 – 0.29%
Cobre, Cu	0.20%
Ferro, Fe	98%
Manganes, Mn	1,03%
Fósforo, P	0.040%
Silício, Si	0.28%
Enxofre, S	0.050%

Tabela 3: Tabela de propriedades mecânicas do Aço ASTM A36 para chapas. Fonte: <http://www.matweb.com>

PROPRIEDADES MECÂNICAS	ASTM A36 (CHAPA) MatWeb
S_E (MPa)	250
S_F (MPa)	400-550
E (GPa)	200
ν	0.26
Alongamento após ruptura (l₀ = 200mm)	20 %
Alongamento após ruptura (l₀ = 50mm)	23%

Tabela 4: Geometria do Corpo de Prova

Grandeza	Dimensão
Espessura	6 mm
Largura	150 mm
Comprimento	200 mm

3.5. Especificação da Solda

O objetivo do projeto é garantir que a solda no corpo de prova esteja livre de defeitos de solda, dos mais diferentes tipos de defeitos que são normalmente encontrados em juntas soldadas.

3.5.1. Defeitos Cordão de Solda

Trincas de solidificação, ocasionado pela escolha errada do material de adição que pode aumentar a faixa de temperatura de solidificação, deverão ser evitadas. A fissuração a quente também é fortemente influenciada pela direção de solidificação dos grãos na solda, veja a Figura 11. Quando grãos de lados opostos crescem juntos numa forma colunar, impurezas e constituintes de baixo ponto de fusão podem ser empurrados na frente de solidificação para formar uma linha fraca no centro da solda.



Figura 11: Fissura no centro do cordão de solda.

Fonte: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM315/IT%202015/Defeitos%20em%20soldagem.pdf>.

Trincas induzidas por hidrogênio, o hidrogênio pode ser introduzido na poça de fusão através da umidade da peça ou dos hidrogênios contidos no fluxo, nas superfícies do metal de adição ou metal

base. Conforme ocorre o resfriamento da solda a formação de austenita dificulta a difusão posterior do hidrogênio, que se difundiu do cordão de solda para as regiões adjacentes da zona termicamente afetada.

Porosidade, existem três maneiras que ocorre o defeito por porosidades. Primeiro, resultado de reações químicas na poça de fusão. Segundo, pela expulsão de gases à medida que a solda solidifica. Terceiro, pode ocorrer aprisionamento de gases na base da poça de fusão na soldagem com gás de proteção.

Inclusões, ocorre quando alguma partícula é aprisionada dentro material de adição. Por vezes originadas de impurezas no fluxo utilizado para proteger a poça de fusão. Ocorre normalmente entre passes subsequentes ou entre o metal de solda e o chanfro do metal base. A causa mais comum é por limpeza inadequada da solda entre um passe e outro, resquícios de escória³.

Defeitos de cratera, uma solda feita com baixa técnica em soldagem, pode gerar espaços durante o processo de soldagem. A poça fundida solidifica com um vazio que é denominado cratera.

Falta de fusão, podem ter diversas causas aplicadas a este defeito. Pode ser um parâmetro da máquina de solda mal ajustado, velocidade de solda inadequada, má preparo da junta a ser soldada, um chanfro mal projetado.

E por isso é necessário ter um conhecimento de projeto de juntas soldadas para reproduzir um corpo de prova que apresente uma boa qualidade, evitando defeitos comuns em processos de soldagem.

³ Material sólido resultante da solda. Fica sobre o material de adição após a solidificação, necessitando uma boa técnica de remoção, utilizando escova para limpar a área que receberá o novo passe de solda.

3.5.2. Processo de Soldagem

Dentre os diversos parâmetros que influenciam a qualidade da solda está o tipo de solda que é feita e quem está executando-a. Para a fabricação do corpo de prova foi exigido que o soldador tivesse um alto grau de qualificação. Apenas soldadores formados pelo curso do SENAI, referência de curso em processos fabris, poderiam efetuar o processo de escolha de parâmetros na máquina e solda da peça.

Para garantir uma boa fusão do metal de adição ao metal base foi determinado que para fazer a raiz da solda e seu reforço o soldador utiliza-se o processo TIG (dois primeiros passes). O que permite que o soldador tenha uma precisão maior no desenvolvimento do cordão de solda, e não precisa de mata junta para depositar o material de adição e fundi-lo ao metal base.

E para acelerar o processo de fabricação os demais passes de enchimento foram feitos com o processo de eletrodo revestido (SMAW). Dois passes de enchimento e mais dois passes de acabamento.

Mantendo o objetivo de produzir uma solda de boa qualidade, o projeto deste corpo de prova exigiu um ensaio não destrutivo, utilizado em larga escala na indústria, por ser fácil e rápido. O teste é conhecido como Líquido Penetrante (LP). Que utiliza dois compostos químicos que ao reagirem indicam se existe alguma descontinuidade de solda superficial.

Aplica-se o líquido penetrante, de cor avermelhada, na superfície da solda e espera-se em torno de 15 minutos ou mais até que o líquido penetre nas possíveis imperfeições superficiais da solda. Este método está baseado no fenômeno da capilaridade, que é o poder de penetração de um líquido em áreas extremamente pequenas devido a sua baixa tensão superficial. O tempo de espera é de extrema importância para obtenção da sensibilidade desejada com o teste de LP.

Após aguardar os 15 minutos, retira-se o excesso do líquido que restou na superfície da solda e da área afetada pela solda. E em seguida aplica-se um revelador, da cor branca, em cima da solda, o

que irá reagir com o líquido revelador que tenha permanecido no interior das imperfeições e irá revelar o comprimento e posição de eventuais defeitos na solda.

3.6. Dimensionamento da junta, pela ASW D1.1:

Outro ponto que é importante ter muita atenção durante o projeto de juntas soldadas é o preparo da junta antes de iniciar a solda. Dependendo do ângulo do chanfro, perfil geométrico e acabamento da junta, é possível induzir alguns defeitos durante a soldagem, como falta de fusão, inclusões, porosidade e defeito de cratera.

Os principais pontos que devem ser definidos com cautela são o tipo da geometria da junta (tipo V, duploV, tipo J, tipo U e inúmeras possibilidades), o chanfro (ângulo de abertura para penetração do material de adição), abertura da Raiz (espaçamento entre as peças que se deseja soldar), existência ou não de nariz (área não angular da solda, localizada na raiz do cordão). Principalmente para garantir uma fusão satisfatória entre os materiais, como podem ser vistos nas Figura 12.a) e Figura 12.b).

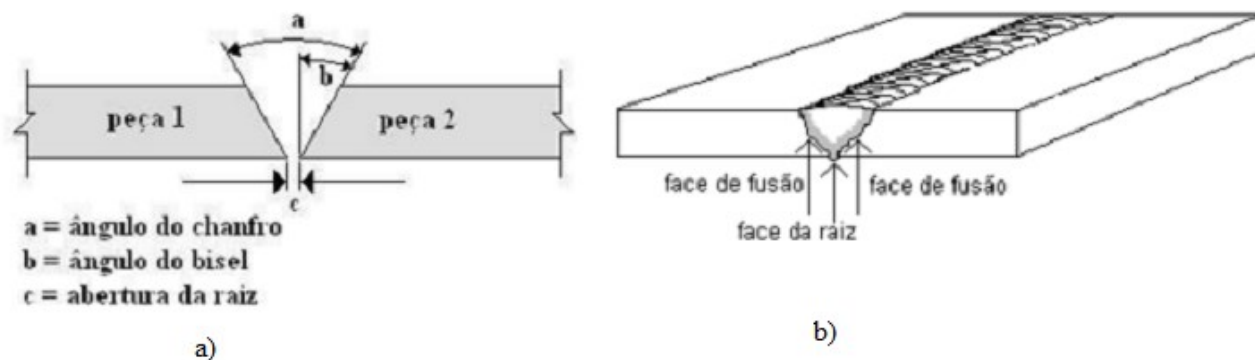


Figura 12: a) dimensões de uma junta soldada tipo V. b) Zona de fusão da solda para uma junta tipo V.

A norma de projeto de solda AWS D1.1 nos permite dimensionar o tipo de junta que deve ser fabricada. Tratando-se da união de duas placas por uma junta de topo (Figura 10), optou-se por uma solda de filete do tipo V simples. Por ter sua configuração geométrica linear, facilita a execução do trabalho de usinagem da junta. Reproduzindo uma quantidade grande de peças com uma boa

repetibilidade. E essa configuração permite uma penetração total do material de adição ao longo da solda.

Sabendo que o processo de solda a ser utilizado será o GTAW, que em inglês significa Gas Tungsten Arc Welding. Ou como é mais conhecido TIG, e que será utilizado para fazer a raiz e reforço, os dois primeiros passes de solda.

O enchimento e acabamento da solda, os três passes finais, serão realizados pelo processo chamado de SMAW, que em inglês significa Shielded Metal Arc Welding. Ou como é mais conhecido Eletrodo Revestido.

Utilizando a seção 2 (“Design of Welded Connections”) da norma ASW D1.1 como referência, determinou-se que o projeto deve seguir a configuração da junta B-U2, como pode ser visto na Figura 13. E suas características estão apresentadas na como é possível ver na Figura 14.

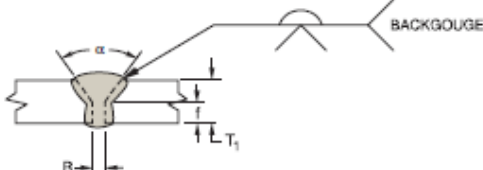
Single-V-groove weld (2) Butt joint (B)									
									
Welding Process	Joint Designation	Base Metal Thickness (U = unlimited)		Groove Preparation		Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW	Notes	
		T ₁	T ₂	Root Opening Root Face Groove Angle	Tolerances As Detailed (see 2.12.1) As Fit-Up (see 3.3.4)				
SMAW	B-U2	U	—	R = 0 to 3 f = 0 to 3 α = 60°	+2, -0 +2, -0 +10°, -0°	+2, -3 Not limited +10°, -5°	All	—	1, 3, 9
GMAW FCAW	B-U2-GF	U	—	R = 0 to 3 f = 0 to 3 α = 60°	+2, -0 +2, -0 +10°, -0°	+2, -3 Not limited +10°, -5°	All	Not required	3, 9
SAW	B-L2c-S	Over 12 to 25	—	R = 0 f = 6 min α = 60°	R = ±0 f = +6, -0 α = +10°, -0°	+2, -0 Not limited +10°, -5°	F	—	3, 9
		Over 25 to 38	—	R = 0 f = 10 min α = 60°					
		Over 38 to 50	—	R = 0 f = 12 min α = 60°					

Figura 13: Configuração de junta do tipo V simples, segundo a AWS D1.1 de 2002.

A partir da escolha do tipo de junta determinou-se a característica geométrica da junta. Como mostra a Tabela 5.

Tabela 5: Projeto da junta soldada pela ASW D1.1, 2002.

Parâmetros	Valores de Projeto
Processo de Solda	GTAW e SMAW
Classificação da Junta	B-U2
T_1	6,35 mm
R	$3_0^{+1.6}mm$
t'	$1,35_0^{+1.6}mm$
α'	$60_0^{+10^\circ}$

A área efetiva considerada para efeitos de cálculo dos esforços sofridos pela peça independe da direção da carga. Será o produto da garganta efetiva pelo comprimento da solda, para qualquer direção de carregamento aplicada. Onde a garganta efetiva deve ser a distância mais curta entre a raiz e o topo da solda, ou simplificando, será a altura da raiz até o topo da solda [ASW, 2002].

A junta não sofrerá nenhum trabalho de alívio de tensão residual, devido ao objetivo deste trabalho de fazer o levantamento da curva SN de uma junta soldada, e simular uma estrutura metálica que sofre carregamento cíclico.

Não haverá nenhuma forma de rebaixo⁴ de solda, muito menos adoçamento⁵ da mesma. Pois este trabalho de final de curso está interessado em avaliar o comportamento de peças que existem em larga escala na indústria. Onde existem profissionais qualificados para efetuarem o preparo da junta, soldagem e inspeção, resultando em processos de união de peças estruturais confiáveis. Mas não

⁴ Rebaixo, é a retirada de material até não existir mais diferenciação entre os passes de solda

⁵ Adoçamento, é a retirada do material de adição até facear a solda com o material base. Ou quando a solda é efetuada em ângulo, fazer com que a solda tenda a um raio pré determinado, evitando concentrações de tensão no pé da solda.

existe uma exigência de acabamento superficial nas juntas soldadas, pois o projeto de fadiga não exigiu esse tipo de preparo, ou o custo de produção para adoçamento e/ou rebaixo ficariam muito caros, inviabilizando a fabricação. O projeto que será enviado para a fabricação segue o desenho da Figura 14.

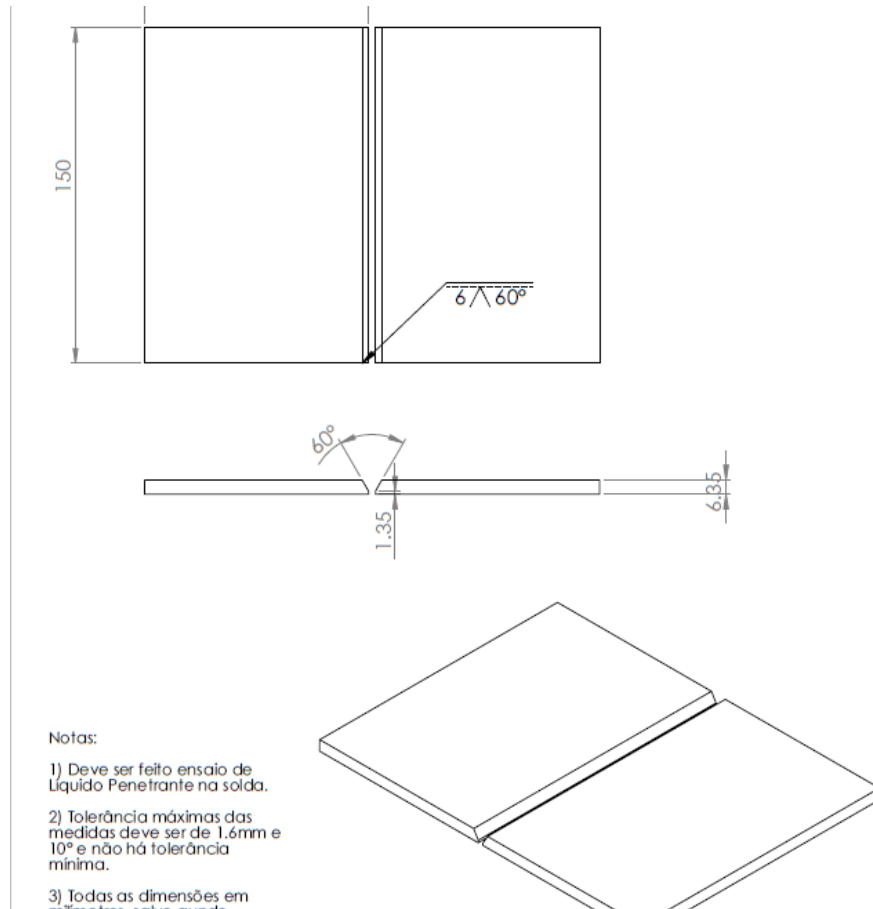


Figura 14: Projeto do Corpo de Prova

4. Fabricação do Corpo de Prova

A fabricação do corpo de prova foi realizada dentro de uma fábrica de equipamentos criogênicos. Onde a produção é voltada para vasos de pressão de estocagem e de processo, que são projetados para trabalhar em baixas temperaturas. Além de estruturas metálicas para suportação de equipamento rotativos, tubulações onde operam gases e líquidos pouco viscosos, mas em altas pressões com linhas de regeneração e equipamentos de separação de gases criogênicos. Considerados conjuntos de grande porte. Podendo atingir 500 toneladas um único equipamento de componentes de separação de gás criogênico.

Sabendo da importância de cada junta soldada para a fabricação desses equipamentos, esta fábrica separa uma parte do seu investimento, e destina-o para treinamento de soldadores. Pois assim é possível garantir a qualidade de suas soldas, através de certificados e laudos que garantem a formação de bons soldadores. No ANEXO A é possível encontrar o certificado do soldador que fabricou os corpos de prova.

4.1. Preparo Metalúrgico

O material utilizado como base para o corpo de prova foi uma chapa de Aço Carbono ASTM A-36 de $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura, 2440 milímetros de comprimento e 12000 milímetros de largura, fornecido pela **USIMINAS**, empresa reconhecida no mercado nacional. E que emite um certificado de cada lote de chapas, aferindo as propriedades mecânicas do material. Certificado este que está também no ANEXO B.

Para a retirada dos corpos de prova que deverão ainda ser soldados da chapa de $\frac{1}{4}$ ”, utilizou-se uma mesa de corte CNC com três eixos. Que utiliza um software CAD/CAM, onde consegue transformar o desenho de uma peça em rotinas de movimentos de trabalho da mesa de corte. Este software utilizado é conhecido como LANTEK, este programa, específico para corte de chapas, é um dos

mais utilizados na indústria metalúrgica em mesas de corte, para diferentes processos, como por exemplo: oxicorte, plasma, laser, jato d'água, puncionadeira, guilhotina.

O equipamento fornecido pela fábrica para efetuar o corte da peça foi uma máquina de corte da Hyperterm modelo HT-4000 de 1998, com corte a plasma. Está continua sendo boa para os padrões atuais de máquinas de corte, e ainda atende sem problemas as demandas da fábrica inteira.

Vale lembrar que apesar ser necessário um operador para a máquina, ela pode configurar os parâmetros antes e durante o corte da peça, necessitando apenas que o desenho seja imputado no programa LANTEK e este fará a rotina de movimentação da tocha, para o corte preciso.

Este equipamento não possuía a ferramenta necessária para cortes angulados, e não foi possível fazer o ângulo de chanfro projetado na mesa de corte. O que precisou, pegar as peças já cortadas e esmerilhar manualmente com disco de desbaste até atingir os 30° de bixel exigidos no projeto.

4.2. Processo de Soldagem

Após o preparo metalúrgico de 18 peças, foram levadas de duas em duas para a bancada, onde o soldador ajustou-as, seguindo o espaçamento de raiz conforme projeto. E com a orientação de um técnico de solda preparou a máquina de processo TIG para efetuar os primeiros passes.

Utilizando uma vareta de Aço Carbono ER70S3 configurou os parâmetros da máquina para uma corrente de 160A com vazão de 9.5L/m de Argônio, como gás inerte. Após finalizar o segundo passe com a TIG, o soldador preparou a máquina para soldar com Eletrodo. Utilizando o Eletrodo Revestido E7016 de 3,25 milímetros, configurou os parâmetros da máquina para 120A. Ambos os consumíveis são da marca ESAB.

Após soldar todas as peças, o próprio soldador junto a um técnico de qualidade fizeram o ensaio de líquido penetrante. O que não resultou em nenhuma falha grave. E não foi preciso reparar nenhuma das soldas realizadas.

Para finalizar foi feita apenas um leve visual na solda, para eliminar possíveis respingos de solda, pontos de grande concentrador de tensão em peças metálicas.

O resultado final foi considerado satisfatório e todos os corpos de prova poderão ser usados nesse trabalho. Apesar de terem um desalinhamento angular, provocado pela solidificação do cordão e da sucessão de passe sobre passe, não será um impeditivo nos resultados esperados.

Na Figura 15 é possível ver o resultado da fabricação do corpo de prova que será utilizado como estudo deste trabalho. Pode-se observar que ele possui pontos de oxidação na região do cordão de solda devido a exposição ao ambiente úmido e sem proteção contra oxidação. O que não influenciará os resultados obtidos no teste, pois os mesmos ainda serão lixados e pintados de preto para aumentar sua emissividade ver na seção 6 mais detalhado.



Figura 15: Corpo de prova após finalizar o processo de Solda

5. Projeto de Fadiga de Juntas Soldadas

Projetos de estruturas, peças, elementos de máquinas que sofrem carregamentos cíclicos precisam ser encaminhados para a análise de falha por Fadiga.

Como já foi visto no primeiro capítulo deste trabalho, a fadiga é o estudo mais importante a ser feito em análise de tensões, quando existem forças que atuam ciclicamente, o que pode resultar na ruptura do material após um número suficiente de ciclos do carregamento.

Todo o processo de projeto de junta soldada foi orientado pela [IIW,2008], e por isso vale fazer uma revisão bibliográfica da mesma, IIW Doc. XIII-1539-96 / XV-845-9.

5.1. Revisão Bibliográfica IIW,2008

A norma de fadiga de solda [IIW,2008] diz que um experimento de análise de fadiga deve ter pelo menos uma das três razões abaixo, para ser elaborado:

- I. Estudo de um novo projeto ou conhecimento insuficiente sobre o comportamento da fadiga de um corpo de prova;
- II. Verificar um componente ou estrutura, para uma probabilidade de não ruptura específica, sob um histórico de carregamento especial.
- III. Otimização do projeto e/ou fabricação com relação ao peso, segurança e economia depois do projeto inicial. Por exemplo, as dimensões projetadas podem ser justificadas com base nos dados de resistência a fadiga mais elevados, obtidos com o teste, do que aqueles apresentados na norma.

Para basear a motivação do teste elaborado durante este trabalho é possível enquadrá-lo na razão apresentada no item III. Já que não é conhecido o projeto e dimensões do corpo de prova que foi

utilizado nos testes da IIW. Logo os dados para projeto a fadiga do corpo que estamos utilizando se tornam imprecisos.

Porém existem diferentes formas de conduzir um teste novo, por exemplo:

- **Todos falham:** todos os corpos de prova, de uma mesma amostra, devem falhar.
- **Primeiro a falhar:** o teste é interrompido quando o primeiro corpo de prova da amostra falhar.
- **‘p’ falham:** o teste deve ser interrompido quando ‘p’ corpos de prova de ‘n’ amostras falharem.

Quando o número de testes for inferior a dez ($n < 10$), ou se optar por proceder o teste para “Todos falham”, ou “‘p’ falham”, os desvios padrões devem ser estimados seguindo os seguintes critérios:

- Para simples geometrias e ruptura à fadiga entre 10^4 e 10^5 ciclos – $s=0.178$
- Para geometrias complexas e resistência à fadiga maior que 10^6 ciclos – $s=0.25$
- Para testes que ultrapassam a resistência à fadiga de 10^7 ciclos – $s=\text{não estimado}$.

Para um critério de aceitação do teste durante a avaliação da fadiga com base em testes de serviço pela (IIW, 2008), é necessário que a vida à fadiga, seja menor do que a mínima probabilidade de vida estimada no início do teste. Como podemos ver na equação 2

$$N_d < \frac{N_T}{F} \quad 2$$

Onde o fator F atribui-se aos 95% de probabilidade de limite de confiança da distribuição t bicaudal de 75% da média.

Quando os testes de fadiga são direcionados para todos os corpos de prova falharem, a Tabela 6 deve orientar a estimativa do fator F. Se o teste é encaminhado para interromper quando o primeiro corpo de prova falhar, os valores do fator F serão estimados pela Tabela 7.

Tabela 6: Fator F quando todos os corpos de prova testados falham (IIW, 2008)

s \ n	2	4	6	8	10
0.178	3.93	2.64	2.45	2.36	2.30
0.200	4.97	2.97	2.73	2.55	2.52
0.250	6.86	3.90	3.52	3.23	3.18

Tabela 7: Fator F quando interrompe o teste quando o primeiro corpo de prova falha (IIW, 2008)

s \ n	2	4	6	8	10
0.178	2.72	2.07	1.83	1.69	1.55
0.200	3.08	2.26	1.98	1.80	1.64
0.250	4.07	2.77	2.34	2.09	1.85

5.1.1. Carga de Teste

Para o projeto de um teste de fadiga, uma margem de segurança é utilizada, a qual é aplicada ao valor médio da tensão. Onde os valores para a tensão utilizada para o projeto, é conhecido como valores característico.

A princípio este fator é considerado para uma probabilidade de 95% calculada a partir da média da tensão com base o limite de confiança bicaudal de 75%.

$$S_k = S_m - k_i \cdot \text{DesvioPadrao}$$

3

E a partir da equação 3 é possível relacionar a tensão característica com a tensão média, por uma variação do desvio padrão junto ao fator k_i . Este que relaciona o intervalo de confiança do valor mínimo da média com o do valor máximo da variância.

Que por sua vez é passível de duas interpretações, quanto ao seu cálculo. Deve-se valiar o método para cálculo do fator k_i de acordo com o método utilizado para obter a distribuição da probabilidade da média e da variância.

Quando a probabilidade da média é calculada pela distribuição t de Student (Student law, ver APÊNDICE A) e a probabilidade da variância calculada pela distribuição do chi-quadrado, a equação para cálculo de k_i é dada pela equação 4.

Se a variância é fixa, conhecida de outros testes ou valores padrões, é possível considerar k_i pela equação 5.

Na Tabela 8 estão apresentados alguns valores para o fator k_i para os diferentes métodos, de acordo com as distribuições da média e da variância.

$$k_1 = \frac{t(p, n-1)}{\sqrt{n}} + \phi_\alpha^{-1} \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{\frac{1+\beta}{2}, n-1}^2}} \quad 4$$

$$k_2 = \frac{t(p, n-1)}{\sqrt{n}} + \phi_\alpha^{-1} \quad 5$$

Onde temos uma probabilidade bicaudal na distribuição de estudante de $p = \beta = 75\%$, ou unicaudal de $p = (1 + \beta)/2 = 87.5\%$ para $n-1$ graus de liberdade. E a inversa da função de distribuição normal Gaussiana (ϕ) para uma probabilidade de exceder de $\alpha = 95\%$.

Tabela 8: Valores para o fator k , usando diferentes métodos.

n	t	χ^2	k_1	k_2
2	2.51	28	11.61	3.41
3	1.61	0.27	5.41	2.57
4	1.44	0.29	4.15	2.36
5	1.36	1.21	3.6	2.25
10	1.24	4.47	2.73	2.04
15	1.22	8.21	2.46	1.96
20	1.20	12.17	2.32	1.91

Considerando que todos os corpos de provas que serão testados irão falhar, o procedimento é estimar a média de $\log N_T$ da curva SN e associar ao desvio padrão.

Utilizando a equação 2, podemos chegar na equação 6 apenas colocando-a na escala log.

$$\log N_T - \log F > \log N_d \quad 6$$

Onde a curva SN é descrita pela equação 7, e conhecendo a equação 3 pode-se deduzir uma equação que relacione o fator k_i com o fator F , e que podem ser calculados dependendo apenas da quantidade de testes realizados (n) quando assumido um valor padrão do Desvio Padrao para esses resultados. Observe a equação 9.

$$S^m N = C \quad 7$$

Relacionando equação 7 com equação 3, temos:

$$\log N_T - \log N_d = k_i \cdot \text{DesvioPadrao} \quad 8$$

Logo:

$$\log F = k_i \cdot \text{DesvioPadrao} \quad 9$$

5.1.2. Classe da Solda

As classificações dos detalhes estruturais e das juntas soldadas são baseadas na gama das tensões nominais. Na maioria dos casos os detalhes estruturais são avaliados com base na tensão de maior amplitude na seção considerada mais crítica para falha por fadiga.

As curvas de fadiga para juntas soldadas são elaboradas a partir de experimentos investigativos, além disso também consideram efeitos como:

- Pontos de concentração de tensão devido ao detalhe em questão
- Tensão localizada de concentração devido a geometria da solda
- Imperfeições da solda, normais para fabricações padrões
- Direção do carregamento
- Tensão residual, na ordem do limite de escoamento do material
- Condições metalúrgicas
- Processo de solda (penetração total, salvo indicações ao contrário)
- Inspeção de solda (Testes não destrutivos, NDT)
- Tratamento de solda

Vale ressaltar que as curvas de fadiga de juntas soldadas não são dependentes da resistência a tração do material que está sendo considerado.

A classificação da solda é determinada pela tensão aplicada, em MPa, quando esta falha a 2 milhões de ciclos. Dado este que está presente na curva SN. Esse valor da classe de fadiga é chamado de FAT.

Ou seja, se existe uma junta soldada de classe 100 sabemos que a constante da curva SN, para uma inclinação $m=3.0$, é considerada $C=2.00 \times 10^{12}$. Como pode ser visto a seguir.

$$\Delta S^m N = C$$

$$m = 3.0; N = 2 \times 10^6; \Delta S = 100 \text{ MPa}$$

$$C = 100^3 \times 2 \times 10^6 = 2.00 \times 10^{12}$$

A inclinação da curva de tensão de fadiga SN (Figura 16), com base na tensão normal, é $m=3.0$, salvo quando indicado contrário. A amplitude conhecida para vida infinita corresponde a $N=10^7$ ciclos.

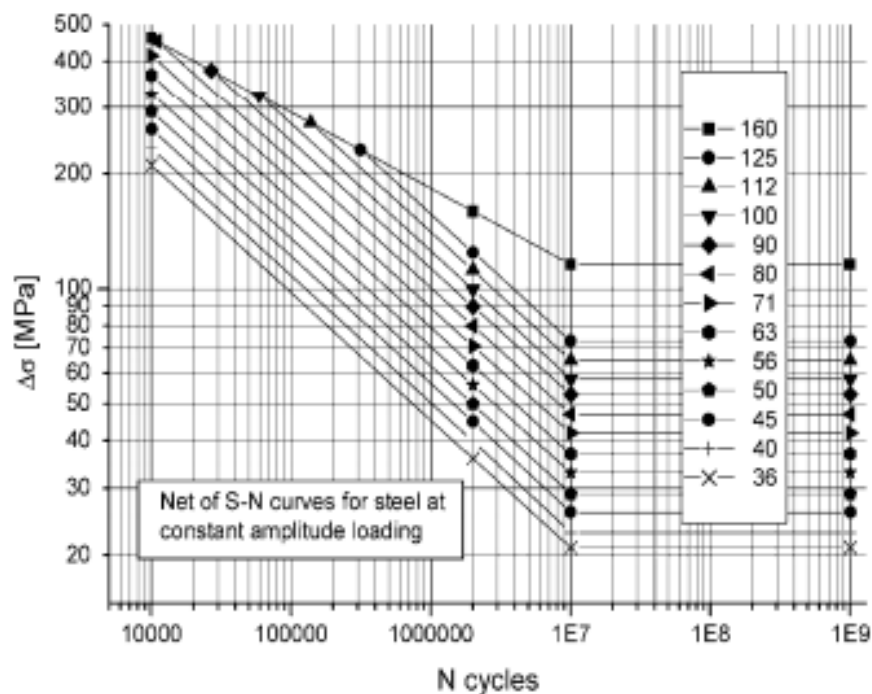


Figura 16: Curva SN para aço, tensão normal e aplicações padrão (IIW,2008)

As descrições dos detalhes estruturais incluem apenas informações sobre o comprimento, formato e qualidade da solda. Os dados referem-se a normas de qualidade assim como normas de procedimento de soldagem.

Todas as soldas devem ter totalmente fundidas e ter penetração total.

As curvas SN para detalhes de solda são elaboradas para específicos modos de falha, geralmente a trinca cresce do pé da solda até o material base, da raiz da solda através da garganta da solda, ou da superfície da solda através da solda até atingir o material base.

5.2. Determinação da Classe da Solda

Tendo o conhecimento adquirido com a [IIW,2008] sobre a formação das classes de juntas soldadas, é possível determinar a classe de solda, dos corpos de prova a serem utilizados, para o projeto dos testes e comparação posterior.

Sabendo que não foram feitos num tratamento de alívio de tensões, a solda não foi rebaixada ou adoçada, foi exigido NTD em todos os corpos de prova, a junta projetada é do tipo V e presença de desalinhamento angular.

Primeiro é preciso encontrar o grupo dentro da tabela {3.2}-1 da [IIW,2008]. O grupo não é algo difícil de determinar. Dentre os nove grupos apresentados, o que representa o ensaio que será feito é o número 200, que descreve um detalhe estrutural de junta soldada entre duas chapas chanfradas carregadas transversalmente ao cordão de solda (Figura 17).




No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT AL	Requirements and Remarks
200	Butt welds, transverse loaded				
211		Transverse loaded butt weld (X-groove or V-groove) ground flush to plate, 100% NDT	112	45	All welds ground flush to surface, grinding parallel to direction of stress. Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed. Plate edges ground flush in direction of stress. Welded from both sides. Misalignment < 5% of plate thickness. Proved free from significant defects by appropriate NDT
212		Transverse butt weld made in shop in flat position, NDT weld reinforcement < 0.1 · thickness	90	36	Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed. Plate edges ground flush in direction of stress. Welded from both sides. Misalignment < 5% of plate thickness.
213		Transverse butt weld not satisfying conditions of 212, NDT Al.: Butt weld with toe angle $\leq 50^\circ$ Butt welds with toe angle $> 50^\circ$	80	32 25	Weld run-on and run-off pieces to be used and subsequently removed. Plate edges ground flush in direction of stress. Welded from both sides. Misalignment < 10% of plate thickness.

Figura 17: Tabela {3.2}-1 da IIW. Grupo de solda de chanfro em chapas carregadas transversalmente ao cordão de solda.[IIW,2008].

A solda número 211 já está desconsiderada por se tratar de uma junta com solda zerada (não existe ressalto de solda) e sabemos que o trabalho em questão visa avaliar juntas não rebaixadas. Sobrou a 212 e 213.

A número 212 descreve uma junta soldada em área protegida, em posição plana, que tenha passado por NDT, o reforço da solda seja menor do que 10% da espessura e que apresente um desalinhamento menor do que 5% da espessura da chapa. Não podemos utilizar a classe desse tipo de junta, pois o reforço de solda e o desalinhamento não corresponde ao exigido por essa especificação.

Então recorreremos a número 213, que descreve uma junta soldada que não satisfaça as condições da 212, mas tenha passado por NDT e contenha um desalinhamento menor que 10% da espessura. O que podemos considerar satisfatório ao relacionar com a peça que será utilizada nos testes.

Para aço a classe (FAT) desenvolvida para o 213 é a 80, que apresenta uma curva característica conforme a Figura 18.

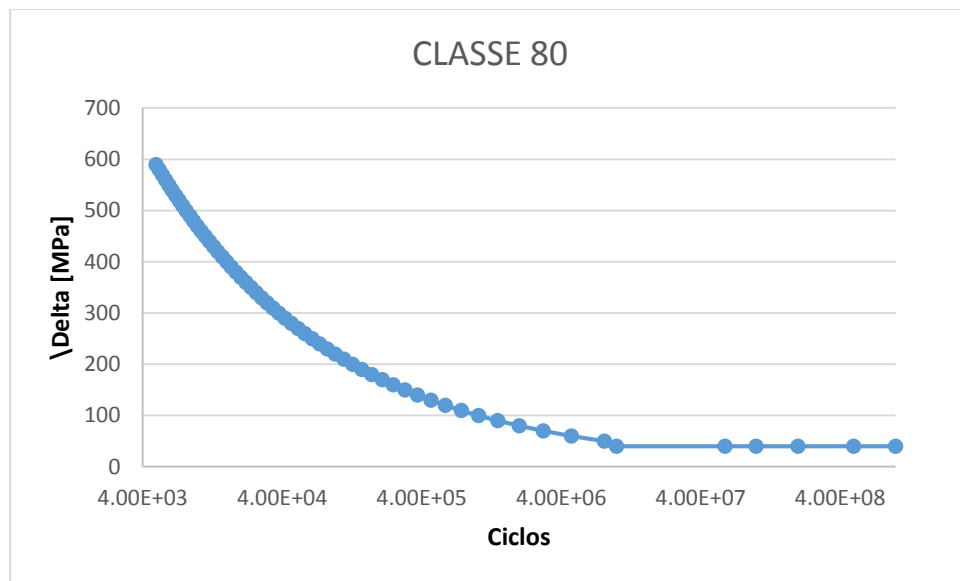


Figura 18: Curva SN para solda da classe 80 pela [IIW, 2008]

6. Projeto das cargas aplicadas no Teste

A partir do conhecimento sobre juntas soldadas apresentado neste trabalho, podemos projetar o teste em questão. Conhecendo a classificação da solda que será utilizada para modelar o comportamento da peça a ser estudada, podemos definir as cargas aplicadas durante o teste. Porém sabe-se que para elaborar o teste de uma junta soldada deve-se levar em consideração o desvio padrão e o fator k_i , como mostrado na seção 0.

Ao todo foram fabricados 9 corpos de prova, seguindo o mesmo modelo de fabricação, material base, processo de soldagem e de preparo. Serão divididos em três grupos, com três amostras. Cada grupo terá uma carga média aplicada e a partir dos resultados será avaliado o desvio nos resultados de vida a fadiga e traçar uma curva SN para essa classificação de solda.

Serão chamados de grupo A, grupo B e grupo C.

- Grupo A: serão carregados com cargas baixas.
- Grupo B: serão carregados com cargas médias.
- Grupo C: serão carregados com cargas altas.

Sendo que as cargas serão projetadas para não atingir o limite de escoamento do material, evitando deformações plásticas, que podem influenciar negativamente a propagação de trincas. Para realizar as definições de carregamento de cada grupo será considerado:

- A variância dos carregamentos será fixa, conhecida de outros testes ou valores padrões
- Todos os corpos de prova serão testados para falharem.
- Considerar geometria simples e ruptura à fadiga entre 10^4 e 10^5 ciclos.
- Número de corpos de prova a serem testados em cada grupo $n=3$.

Logo podemos retirar das tabelas Tabela 6, Tabela 8 os valores para os fatores F e k_i , respectivamente.

Considerando o número de corpos de prova testados igual a $n=3$, e para o cálculo do k_i usando a equação 5, pela Tabela 8 temos que $k=k_2=2.57$.

Pelas hipóteses assumidas podemos considerar que o fator de desvio padrão dos resultados será de $s=0.178$.

E pela Tabela 6, utilizando os mesmos dados para a estimativa do fator k_i , foi preciso interpolar os dados para atingir um fator F para $n=3$.

$$\frac{4-3}{4-2} = \frac{2.64-n}{2.64-3.93}$$

$$F(n=3) = 3.285$$

As cargas de projeto que serão consideradas nesse trabalho seguem as considerações estatísticas de segurança observada na (IIW,2008) que admite uma tensão característica, a partir de uma tensão média.

Onde a tensão média é a carga aplicada nos testes para uma margem de confiança seguindo as curvas de distribuição.

Sabendo que o nível de confiança para as tensões médias considerados para os dados obtidos nos testes, seguidos pela IIW,2008, seguem as curvas de distribuição t. É indicado fazer uma previa comparação com o cálculo para a distribuição t de Student considerando um intervalo de confiança de 25% bilateral/bicaudal, ou seja um nível de confiança de 75%.

Interpolando os dados da tabela presente no APÊNCIDE A, teremos um valor para a distribuição t , quando o grau de liberdade é (n-1)=2:

$$t = 1.886 - \left[\frac{80 - 75}{80 - 70} \cdot (1.886 - 1.386) \right] = 1.636$$

Pelo comando TINV do EXCEL foi encontrado um valor próximo ao da tabela:

$$t = 1.604$$

Onde por definição a distribuição t de Student é apresentada na equação 10.

$$t = \sqrt{n} \frac{|S_k - S_m|}{Desvio\ Padrao} \quad 10$$

Assim podemos determinar um intervalo em torno do valor característico, sendo a média. Ou seja, determinando que o valor característico seja o maior valor no limite aceitável pelas distribuições apresentadas.

$$S_k = S_m \pm \frac{t}{\sqrt{n}} \text{DesvioPadrao} \quad 11$$

$$\text{DesvioPadrao} = S_m * s \quad 12$$

$$S_m = \frac{S_{k_x}}{1 \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}} \quad 13$$

Pois sabemos que o número de observações $n=3$, $t=1.636$ e $s=0.178$, temos que o valor médio estatístico das tensões deve ser:

$$S_m = \frac{S_{k_x}}{\left(1 \pm 1.636 * \frac{0.178}{\sqrt{3}}\right)}$$

$$S_m = \frac{S_{k_i}}{1 - 0.17} = \frac{S_{k_s}}{1 + 0.17}$$

Ou seja, a partir do limite superior ou do limite inferior (S_{k_s} e S_{k_i} , respectivamente) pode-se encontrar o valor médio da distribuição t de Student.

Utilizando a mesma teoria apresentada a cima na equação 3, apresentada na revisão bibliográfica da norma [IIW,2008] em que os testes serão apoiados. E considerando que o valor da variância é fixo. Caímos na equação 5 que possui uma relação entre a distribuição t de Student e a distribuição normal Gaussiana (onde $\alpha = 95\%$), pode-se dizer que:

$$k_2 = \frac{t(p, n-1)}{\sqrt{n}} + \phi_\alpha^{-1}$$

$$S_m = \frac{S_{k_x}}{1 \pm k_2 \cdot s}$$

$$S_m = \frac{S_{k_i}}{1 - 0.46} = \frac{S_{k_s}}{1 + 0.46}$$

Para verificação vide a norma [IIW,2008] deve-se avaliar se valor do fator de segurança F , na base \log , está na mesma ordem do fator $k_i.s$:

$$\log F \cong k_i.s$$

$$\log(3.285) = 0.52 \cong 0.5$$

$$k_2.s = 0.46 \cong 0.5$$

Então a relação para média está válida e pode ser usada.

Percebe-se que os limites Superior e Inferior considerados pela norma IIW,2008 são quase três vezes maior do que os determinado pela distribuição t de Student.

Para o teste dos corpos de prova será considerado o limite superior como a curva SN descrita pela classe de solda escolhida (FAT=80), e as cargas de teste determinadas a partir da tensão média. Pois assim podemos considerar aceitável que para a carga de projeto tenha uma vida a fadiga superior da que foi projetada, baseado no desvio padrão associado a essas cargas.

Foi plotado os gráficos dos Limites Superior e Média das tensões esperadas de projeto. Assumindo que a curva do Limite Superior segue a equação da curva SN para uma classe FAT =80, equação 14. Como pode ser visto na Figura 19.

$$S_{80}^3 N = 1.024 \cdot 10^{12}$$

14

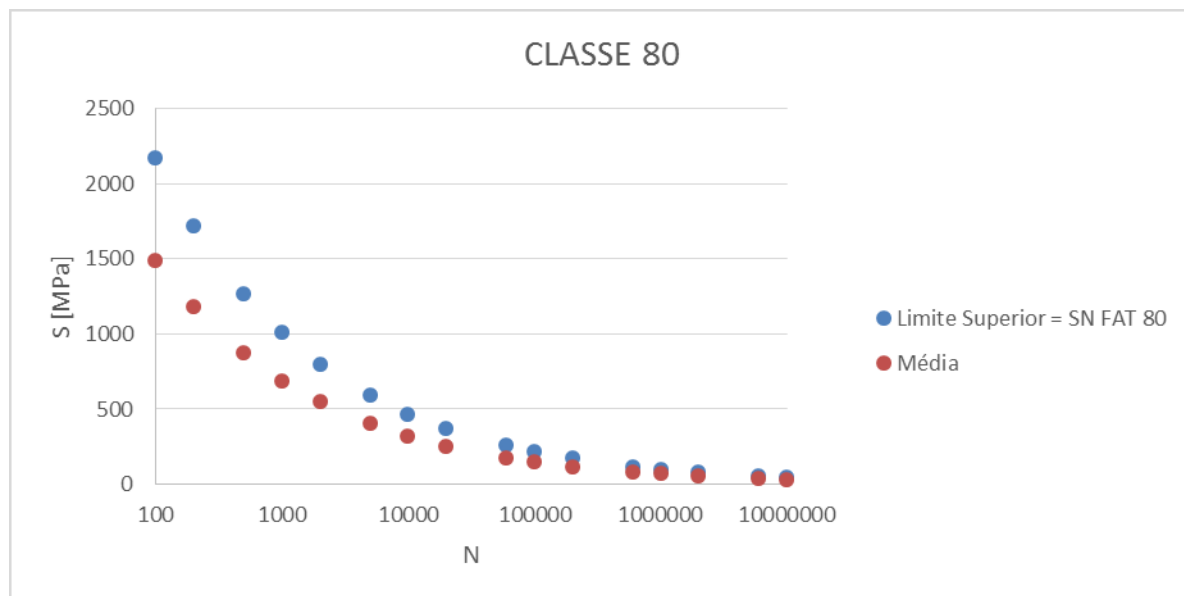


Figura 19: Curvas dos Limites Superior e da Média da tensão esperadas para o projeto.

E então estima-se as cargas de teste para três regiões diferentes de tensão, seguindo a curva Média de tensão calculada seguindo a IIW,2008. Ver a Tabela 9

Tabela 9: Valores estimados para as cargas aplicadas nos corpos de prova

GRUPO	CARGA DE TESTE, ΔS [MPa]	ESTIMATIVA MÁXIMA DE VIDA - LIMITE SUPERIOR [CICLOS]
A	185	$1.71 \cdot 10^5$
B	208	$1.20 \cdot 10^5$
C	230	$8.7 \cdot 10^4$

As cargas aplicadas durante o teste devem ter seus ciclos regulados para trabalharem em uma frequência abaixo de 25 Hz. Pois o equipamento utilizado para fazer o levantamento da distribuição de tensão no corpo de prova só consegue trabalhar na faixa de 0 a 25 Hz.

Quando houver sinais de ressonância da máquina servo hidráulica, deve-se variar a frequência sem que o equipamento de medição das distribuições de tensão não consiga efetuar a leitura.

7. Realização do teste

Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do INSTITUTO TECNOLÓGICO DA PUC-RIO – ITUC.

A máquina cedida pelo laboratório é uma das mais requisitadas no mercado de ensaios mecânicos de cargas cíclicas, Tabela 10.

Tabela 10: Principais dados do equipamento utilizado para realizar os testes de fadiga.

DADOS DOS EQUIPAMENTO UTILIZADOS PARA ENSAIO DE FADIGA	
Servo Hidraulica	Instron 8854 capacidade de 500[kN]
Célula de Carga	Instron 500 [kN]
Controlador	Fasttrack 8800
Câmera	Modelo FLIRA655SC

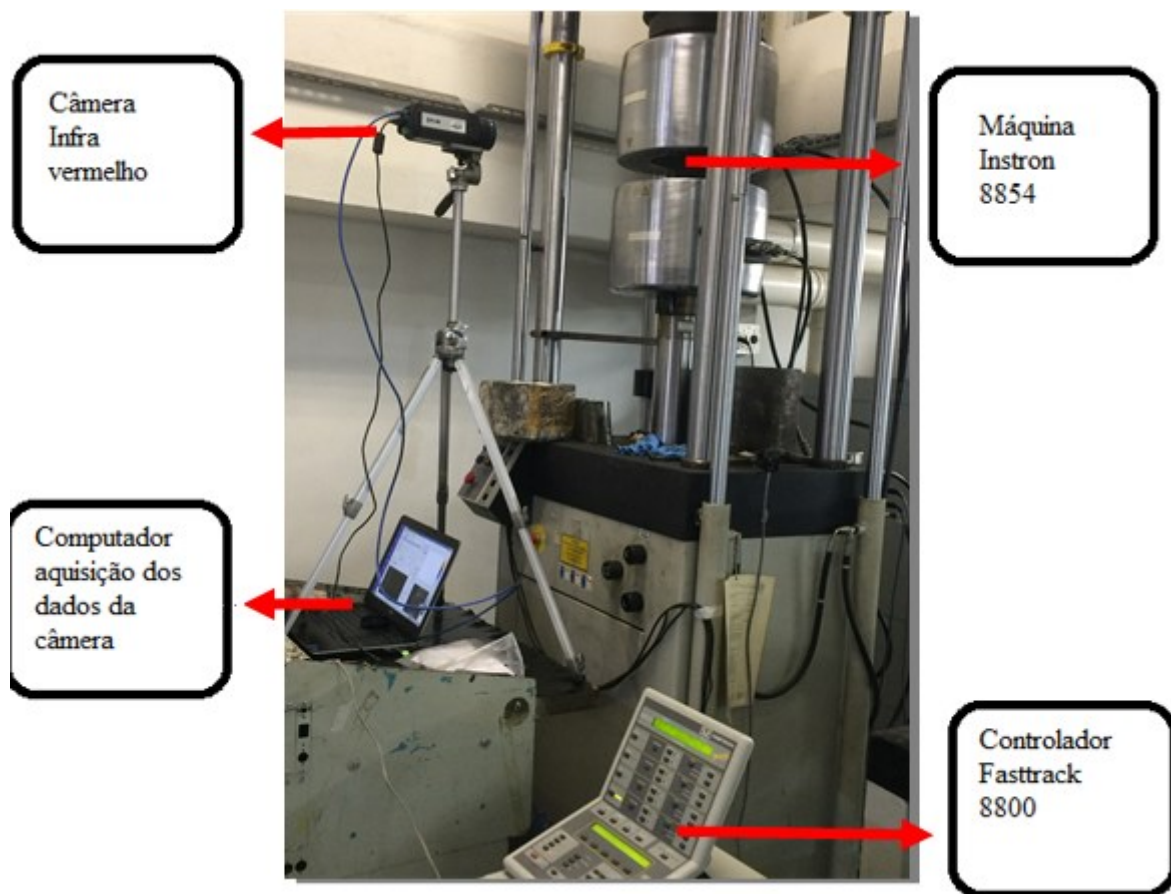


Figura 20: Esquema dos equipamentos usados para realizar os testes

Os testes foram feitos em conjunto do Laboratório de Fotomecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. “Este Laboratório está equipado para a análise experimental de tensões utilizando técnicas de fotoelasticidade tridimensional, bidimensional e por reflexão, método de shadow Moiré, correlação digital de imagens (DIC) e técnicas de medição por extensômetros de resistência elétrica.”[LABORATORIO FOTOMECANICA,PUC-RIO]

7.1. Análise Termoelástica da Tensão

Seguindo o princípio do efeito termoelástico, que descreve a variação da temperatura induzida pela aplicação de uma tensão, para deformações elásticas em condições adiabáticas. Esse efeito é conhecido desde a metade do século XIX, quando Weber relatou o efeito termoelástico pela

primeira vez em 1830 e Lord Kelvin publicou sobre a teoria em 1853 [THOMSON, 1853]. Para carregamentos planos e condições adiabáticas é válida a equação 15.

$$\Delta T = -K(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2) \quad 15$$

Onde $K = \alpha_t / \rho c_p$

Esse estudo conhecido como Análise Termoelástica da Tensão ou em inglês ‘Thermoelastic Stress Analysis (TSA ou Thermoelasticity)’, é relativamente novo, devido ao alto custo dos equipamentos envolvidos na medição, e por depender de novas tecnologias que vem aparecendo ao longo dos últimos anos.

Com o auxílio de uma câmera de Infravermelho Microvolumétrica, e que consegue detectar uma variação de temperatura na ordem de 0.001°C . Para conseguir detectar pequenas resoluções, a superfície do corpo é coberta com uma fina camada de tinta preta fosca, tendendo a aumentar a sua emissividade, de modo a comportar-se como um corpo negro [DULIEU-BARTON, 1999].

Mas antes de iniciar o teste é preciso fazer a calibração. Onde foi aplicada uma carga trativa em [kN] em apenas uma direção em um corpo de prova de geometria uniforme, conhecida. E pela equação 16 calcula-se a tensão $\Delta\sigma_1$ já que $\Delta\sigma_2$ é igual a zero, para a carga cíclica puramente trativa que foi aplicada.

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\Delta F}{A} \quad 16$$

Para fazer a calibração da câmera com o material ASTM A-36, foi registrada a seguinte escala, ver Figura 21.

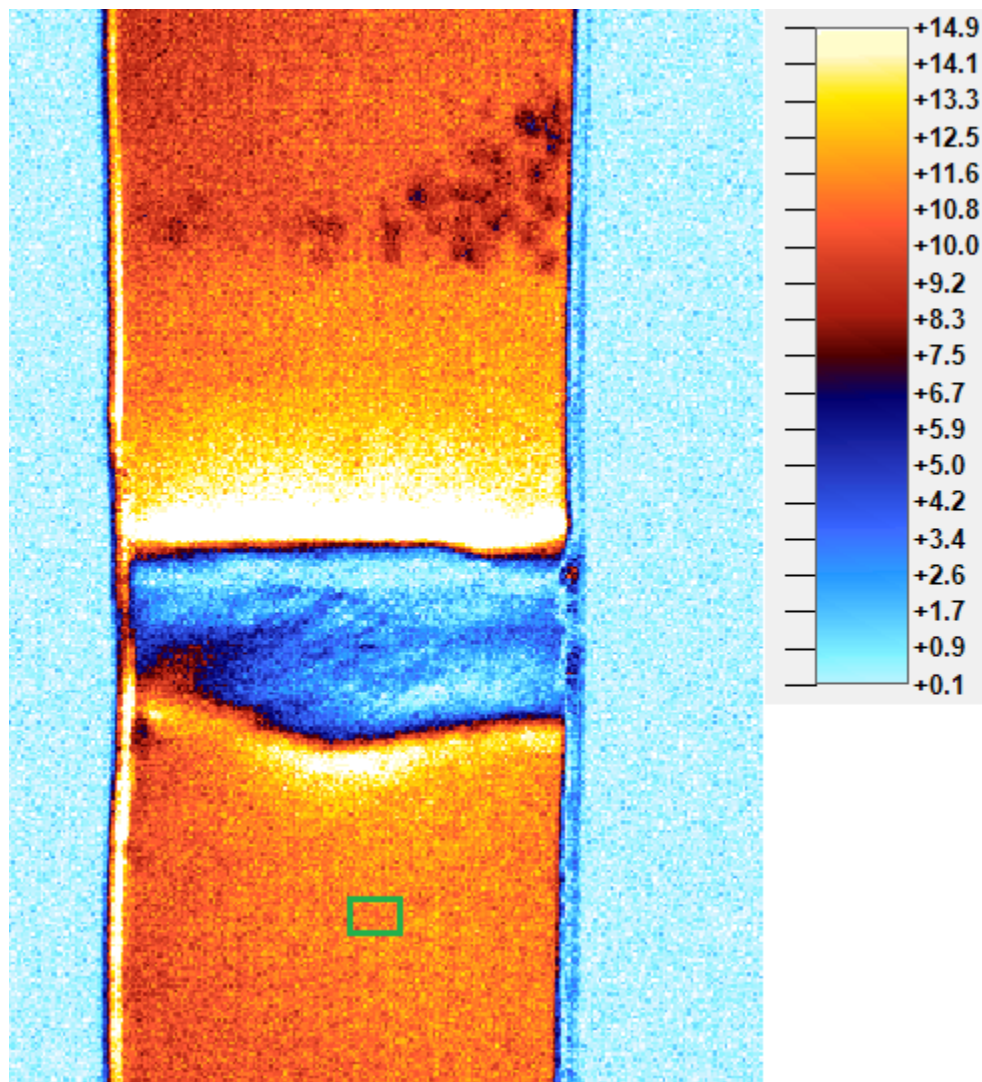


Figura 21: Calibração da escala da câmera com o material ASTM A-36

A área em verde da Figura 21 foi terminada para ser o ponto de interação do programa que coleta os dados da câmera. E neste mesmo ponto foi possível obter os seguintes resultados da Tabela 11. Sabendo que a largura média do corpo de calibração é 34 milímetros.

Tabela 11: Dados para o ponto a ser calibrado

ESCALA DA CAMERA NO CORPO DE CALIBRAÇÃO		
MAX	13.407	CAM unit
MIN	8.758	CAM unit
MED	11.30984	CAM unit

E a calibração pode ser feita pela equação 17.

$$Calibração = \frac{\Delta\sigma_1}{MediaEscala}$$

17

Tabela 12: Calibração da Câmera de Infravermelho para ASTM A-36

CALIBRAÇÃO ASTM A-36		
Força	43.1	kN
Área	215.9	mm ²
Tensão Calculada	199.6	MPa
Calibração	17.65	MPa/CAM

Os testes foram realizados na máquina servo hidráulica da marca Instron Modelo 8854, com célula de carga da própria máquina e de mesma capacidade, igual a 500kN. Um controlador fasttrack 8800 para comandar a posição do pistão servo hidráulico.

7.2. Primeiro Teste

Antes de iniciar o primeiro teste encontrou-se o primeiro problema, a garra da máquina só consegue pegar um corpo de prova cuja a largura fosse menor ou igual a 100 milímetros, sendo os corpos de prova fabricados possuem 150 milímetros de largura.

Com a intenção de não interferir nas tensões residuais geradas pelas contrações do cordão de solda, optou-se por não cortar o corpo de prova na região soldada. Ajustando apenas as áreas onde a garra da Instron iria precisar pegar. O que vai gerar um K_t na região de início da variação da área transversal, vamos aqui chamar de abas.



Figura 22: Posicionamento da câmera para análise das distribuições de tensões no novo corpo de prova

Trabalhando com a carga mais baixa do que a menor carga de projeto, Grupo A (185MPa de amplitude), obteve-se uma distribuição de carga planejada que já não era mais linear, agora existe além da tensão principal $\Delta\sigma_1$ uma outra componente de tensão principal também vai aparecer $\Delta\sigma_2$.

Que está presente devido à restrição das abas se deformarem. Por não estar sofrendo quase carregamento nenhum, as abas não sobre deformação e com isso restringe a área central do corpo de se deformar na direção da carga. Ver Figura 23.

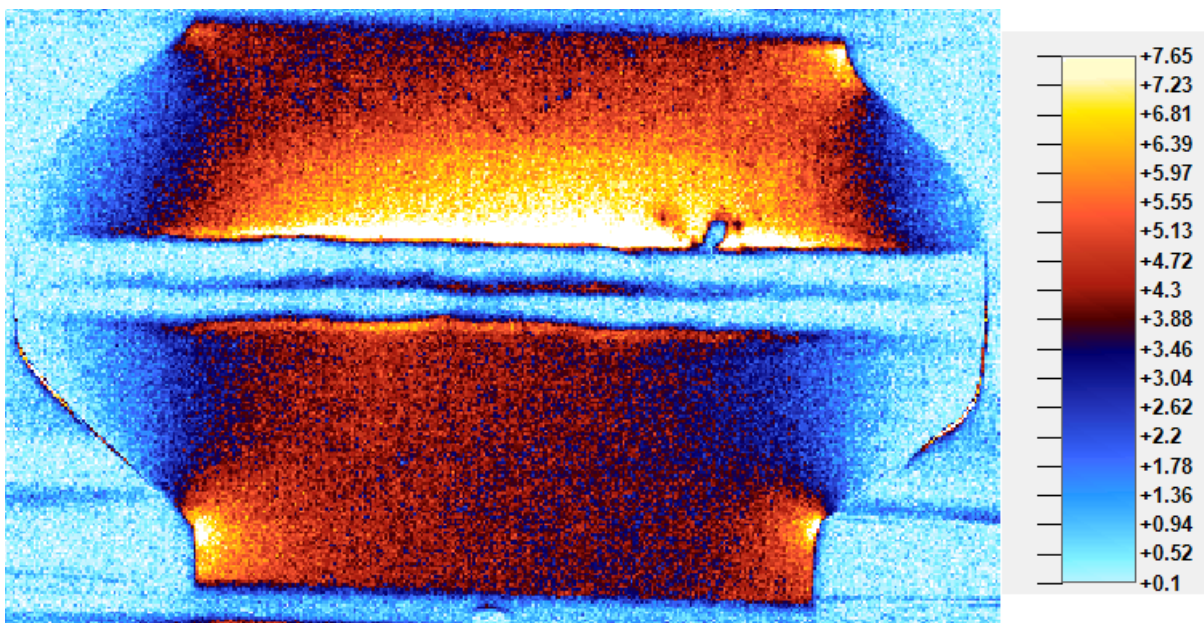


Figura 23: Corpo de prova de seção não uniforme sofrendo carregamento cíclico do Grupo A

Observando a Figura 23, pode-se notar que o maior sinal de temperatura está indicado na região superior da solda, o que não significa que a trinca deva se iniciar neste ponto. Tensão aproximada na região da solda é de $17.65 \times 7.65 = 135 \text{ MPa}$. Sendo que a carga aplicada foi de 78 kN. O que na região próxima ao K_t geraria uma tensão de $78 \text{ kN} / 600 \text{ mm} = 130 \text{ MPa}$.

Após 250 mil ciclos foi possível ver o início de uma trinca na região do K_t . Embora o sinal de temperatura na região do K_t seja menor que no pé da solda, tivemos a trinca iniciando neste ponto. Devido a presença do $\Delta\sigma_2$ na região da solda, causada pela existência de uma restrição de deslocamento das duas "abas", a variação de temperatura (proporcional a soma das tensões principais $\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2$) é maior na solda. No entanto, a tensão principal máxima trativa ($\Delta\sigma_1$) provavelmente ocorreu na região do K_t , onde a trinca efetivamente nasceu.

A partir do resultado anterior já sabemos que a configuração geométrica apresentada não trará grandes ajudas ao estudo da fadiga na junta soldada.

7.3. Redefinindo o Projeto do Corpo de Prova

O segundo passo é produzir um corpo de prova a partir do já fabricado com uma área transversal uniforme, mas para isso será preciso retirar parte do cordão de solda, o que pode acarretar em uma variação da tensão residual. Porém na seção 3.4 deste trabalho, foi determinado que a uma razão de 15 vezes a espessura seria suficiente para manter uma tensão residual considerável.

Sabendo que a garra da máquina tem uma largura de 105 milímetros, projetou-se o novo corpo de prova para uma largura de 100 milímetros, para evitar interferências no acoplamento. Mantendo assim uma razão de 16, ou seja, maior do que o exigido pelo projeto.

Como os novos corpos de prova já usinados foi possível elaborar os testes desejados para cada grupo (A, B e C).

Para cada teste que foi realizado, foi preciso informar os limites mínimos e máximos da carga aplicadas. Lembrando que as cargas serão apenas trativas. Então determinou-se um valor mínimo próximo ao zero (valor positivo) e outro valor para a carga máxima, em que está é o valor da carga mínima mais a carga de teste estipulada pela Tabela 9.

As cargas são colocadas em força (kN) e não em tensão (MPa), então foi realizado a medição da largura cada corpo de prova antes de determinar as cargas de teste. Pois considerou-se que cada amostra tinha uma variação de largura oque influencia diretamente na tensão aplicada ao material (onde a área é largura vezes espessura), assim conseguimos atingir as regiões das tensões médias projetadas para o teste, pela equação 18.

$$Cargas\ de\ Teste_i = \frac{Tensão\ de\ Projeto}{Largura_i \times Espessura} [kN] \quad 18$$

E para obter uma boa medição das distribuições de tensão pela câmera infravermelho, foi determinado que a frequência aplicada nos carregamentos atingisse um limite máximo de 20Hz.

E todos os corpos que foram posicionados de forma a ficarem com a face do acabamento da solda voltada para a lente da câmera. Pois estimasse que a iniciação a trinca seja no pé do último passe de solda, pois foi o último aporte térmico que definiu a maior tensão residual do material.

8. Resultados

Com base nas alterações que foram feitas no projeto do corpo de prova foram desenvolvidos os testes de apenas um corpo de prova para cada grupo. Pois os problemas com o equipamento e o com projeto do corpo de prova inviabilizaram a elaboração de todos os nove testes, durante o período que o laboratório estava disponível.

Grupo A:

Com a carga de projeto de 185 MPa de amplitude, puramente trativa, com uma frequência de 20Hz. Obtivemos uma propagação de trinca bem no ponto do pé da solda e a falha total do corpo com 220 mil ciclos, após aproximadamente 3 horas.

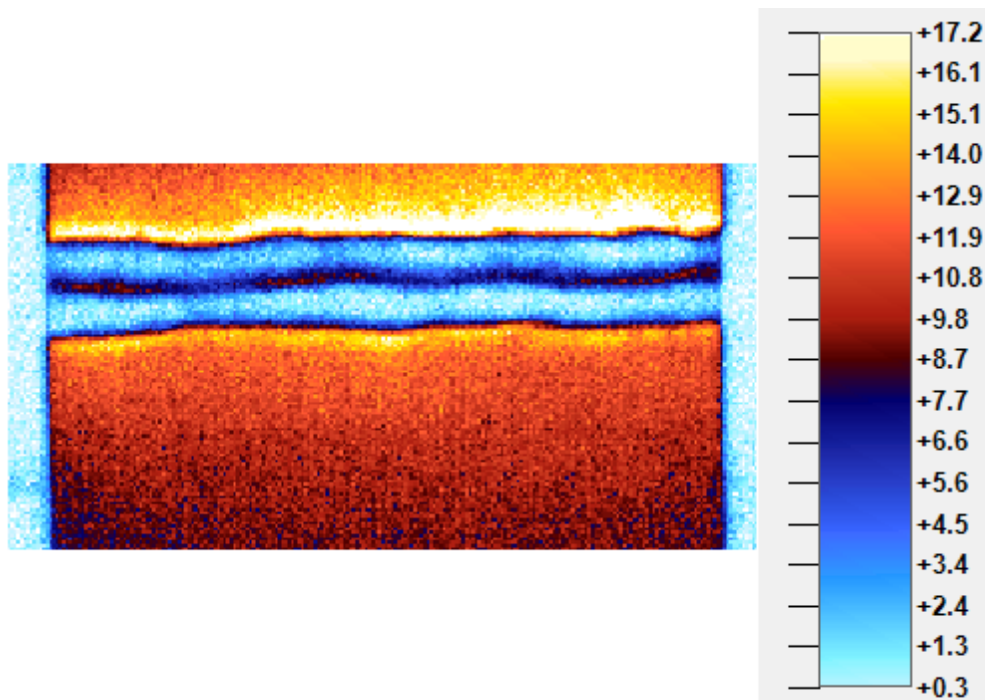


Figura 24: Detalhe da concentração de tensão no pé da solda.

Como podemos ver na Figura 24 a região de maior concentração de tensão está exatamente no pé da solda. Podemos avaliar que a máxima tensão que o corpo está sofrendo é:

$$17.65 * 17.2 = 303.6 \text{ [MPa]}$$

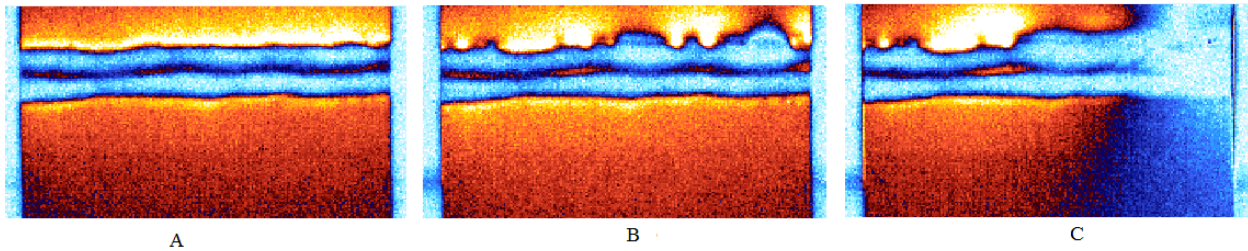


Figura 25: Evolução da trinca no corpo de prova quando aplicado um carregamento de 185 MPa a 20 Hz. A – Foto após 30 mil ciclos; B- Foto após 160mil ciclos; C- Foto após 210 mil ciclos.

A Figura 25 mostra a evolução da trinca no corpo de prova, percebe-se que a trinca se inicia no passe superior da solda. E que existem dois pontos principais de início da trinca, ou seja, existem duas trincas principais que se propagam ao longo do corpo de prova. Na Figura 25 c) é possível ver na região em azul que a trinca já atravessou todo o material e estar se propagando para a esquerda.

O que é possível ver na Figura 26, a trinca se propagando momentos antes da ruptura do material.

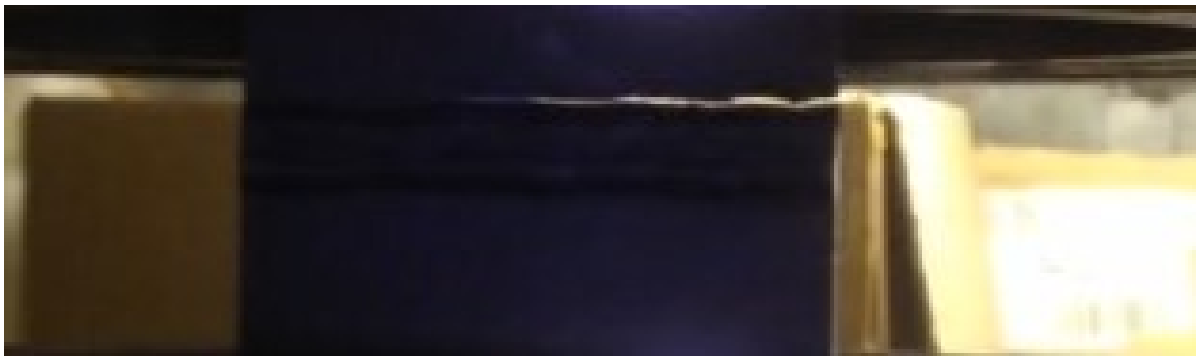


Figura 26: Propagação da trinca, instantes antes de romper o material.

Após a ruptura total, Figura 27 é possível ver que a trinca se desenvolveu ao longo do pé da solda. E como já era esperado foi do lado do último passe de solda.



Figura 27: Ruptura Corpo de Prova Grupo A



a)



b)

Figura 28-Detalhe do crescimento da trinca. a) na parte superior do corpo de prova; b) na parte inferior do corpo de prova.

A Figura 28 apresenta uma foto da região de propagação da trinca e que permite analisar que a trinca iniciou pela Figura 28 a) da região de baixo da foto até o meio da peça. E depois rompeu.

Grupo B:

Para o grupo B foi aplicada a carga de 208MPa de amplitude, puramente trativa, e uma frequência de 20Hz. Após realizarem um total de 284mil ciclos não foram indicadas nenhum início de trinca. Pela Figura 29 estimava-se que a trica tivesse início da região superior da solda. No pé da solda superior.

Foi feito um teste não destrutivo de LP para verificar se havia alguma iniciação de trinca microscópica, mas nada foi indicado no teste.

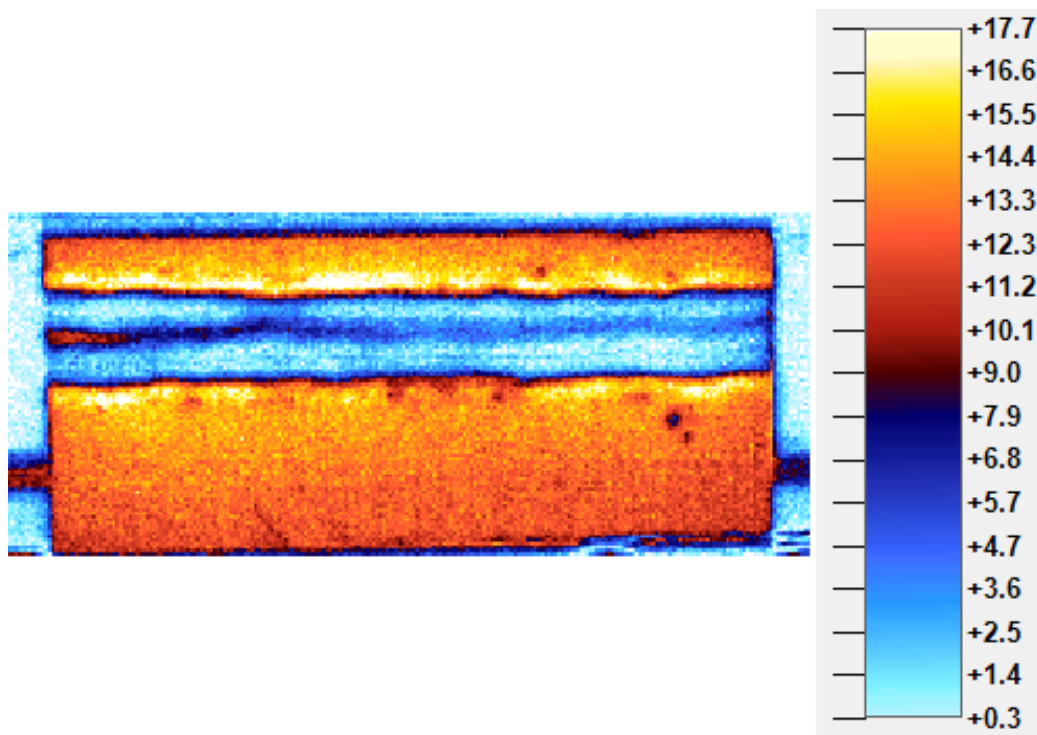


Figura 29: Carga alternada de amplitude 208MPa, puramente trativa.

Como podemos ver na Figura 29, a região de maior concentração de tensão está exatamente no pé da solda superior. Podemos avaliar que a máxima tensão que o corpo está sofrendo é:

$$17.65 * 17.7 = 312.4 \text{ [MPa]}$$

Grupo C:

Para este grupo o corpo de prova foi carregado com uma carga alternada de amplitude de 230 MPa e uma frequência igual aos dois testes realizados anteriores, 20 Hz. Observando a Figura 30, percebe-se que o ponto de concentração de maior tensão é na região da solda inferior. Exatamente onde a trinca se iniciou e propagou até o colapso da peça, após 82.3 mil ciclos.

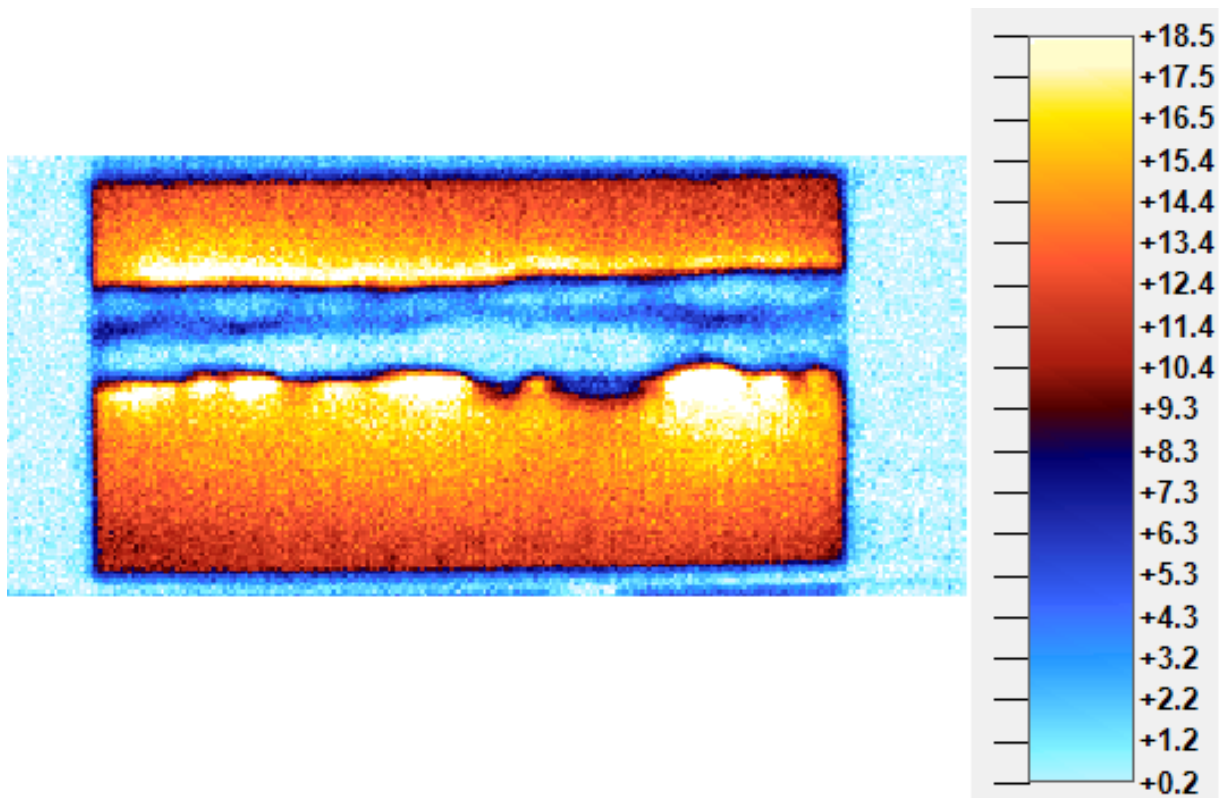


Figura 30: Corpo de Prova submetido ao Grupo C do projeto de teste.

Como podemos ver na Figura 30, a região de maior concentração de tensão está exatamente no pé da solda inferior. Podemos avaliar que a máxima tensão que o corpo está sofrendo é:

$$17.65 * 18.5 = 326.5 \text{ [MPa]}$$

A Figura 31 foi colocada exatamente na posição como foi observada pela câmera infravermelho. O que nos permite verificar que não foi só um acaso a trinca do teste do Grupo A ter iniciado e propagado ao longo do pé do último passe de solda. Pois nesse teste ocorre o mesmo fenômeno.



Figura 31: Corpo de Prova após ruptura Grupo C

A Figura 32 apresenta uma foto da região de propagação da trinca e que permite analisar que a trinca iniciou, pela Figura 28 b) da região de baixo da foto até 1/3 da peça e depois rompeu. A trinca neste caso não se propagou até o meio da peça, como ocorreu no Grupo A. Pois a carga aplicada neste teste foi maior, e como a carga aplicada durante o teste são sempre as mesmas, independente se a área transversal ao carregamento varia, ao propagar a trinca temos uma perda de resistência, pois área diminui e a tensão sofrida pela peça aumenta provocando o seu rompimento.



a)



b)

Figura 32: Detalhe da ruptura do corpo de prova do Grupo C. a) parte inferior b) parte superior

9. Análise dos Resultados

O primeiro ponto que pode ser discutido na análise dos resultados, é o motivo de ter aparecido tensões bem maiores na região da solda do que aquelas que foram aplicadas pela servo hidráulica.

Como já foi discutido na seção dois do trabalho, as tensões residuais presentes no material variam ao longo do cordão de solda e da ZTA. Essas tensões são deixadas pelo resfriamento do cordão de solda que é restringido pela chapa que possui um volume maior, de contrair pelo processo inverso da expansão volumétrica.

Outro fator que pode contribuir para um aumento de tensão residual no material é o desalinhamento, ou empenamento do material quando a solda tende a resfriar, conhecida também como tensão de membrana, presente em peças calandradas para fabricação de Vasos de Pressão.

Mesmo que este desalinhamento tenha sido controlado durante o processo de soldagem, não é possível garantir que todas as peças não tenham uma deformação considerada. E quando colocado na garra da máquina o corpo de prova tende a ficar ereto e com isso a peça é realinhada. Porém, esse fato provoca uma tensão devido ao deslocamento do material para alinhar a peça, deixando uma tensão residual trativa de um lado e compressiva do outro, como pode ser visto na Figura 33 b).

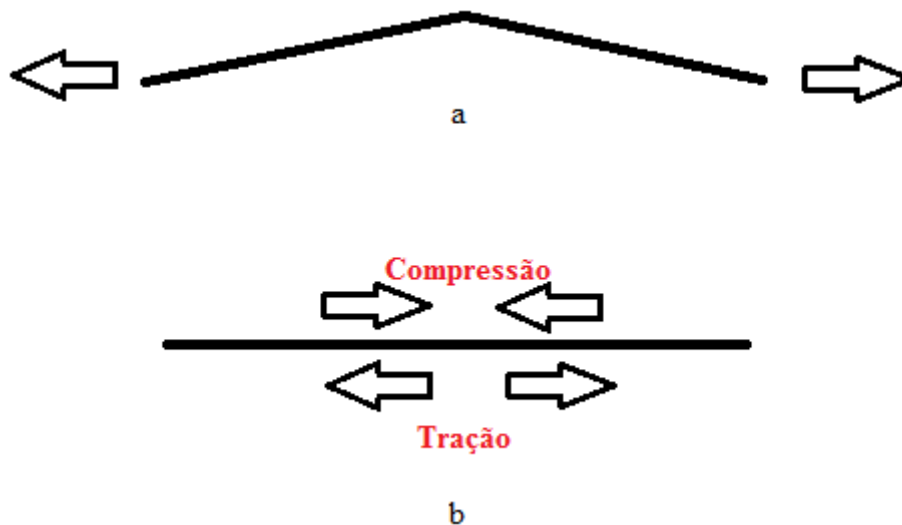


Figura 33: a) material desalinhado e sofrendo carga trativa; b) material já alinhado e com tensões residuais compressivas em cima e trativa embaixo.

Se analisar cada um dos três testes realizados no novo corpo de prova, e comparar os resultados da Tabela 13, podemos avaliar que a tensão residual total na região de solda é por volta de 106 MPa. Abaixo do limite de escoamento do material que é de 250 MPa.

Tabela 13: Diferença da tensão aplicada de projeto e da tensão apresentada na região da solda.

GRUPO	TENSÃO PROJETO [MPa]	TENSÃO MAX REGIÃO SOLDA [MPa]	DIFERENÇA [MPa]
A	185	303.6	105
B	208	312.4	118
C	230	326.5	96
MÉDIA DA DIFERENÇA			106.5

Vamos agora analisar os resultados com o objetivo de descrever uma curva SN para o novo corpo de prova.

Apesar de não ter conseguido realizar os três testes para cada grupo, como o teste foi projetado, já é possível verificar o comportamento da vida a fadiga das juntas soldadas. E todos os dados obtidos com os testes serão avaliados.

O primeiro corpo de prova que foi testado, peça de área não linear, produziu um resultado insatisfatório para a análise de fadiga em junta soldada. Porém podemos perceber que quando a solda possui uma restrição de deslocamento (as duas ‘abas’ restringiram o deslocamento do cordão de solda no sentido da carga aplicada), ocorre uma resistência a propagação de uma trinca.

Não que exista uma força compressiva impedindo o aparecimento e amortecimento de crescimento. Mas existe uma resistência ao deslocamento no sentido da tensão trativa, o que provoca uma deformação menor em toda esta área. Como consequência a trinca pode não chegar a nascer na região da solda, principalmente se existe um K_t em algum ponto do corpo que concentre tensão, provocando assim a propagação da trinca até a ruptura do material.

Os resultados obtidos com os corpos de prova usinados para uma razão da tensão residual igual 16, foram considerados satisfatórios. Ao analisar os dados obtidos com as curvas de limite de fadiga da Figura 19, plotou-se o gráfico da Figura 34.

Lembrando que as curvas da média e do limite superior foram elaboradas para um número de ensaios por grupo igual a $n=3$, porém não foi possível seguir o projeto, e os resultados que serão analisados estão voltados para apenas $n=1$ observação por Grupo.

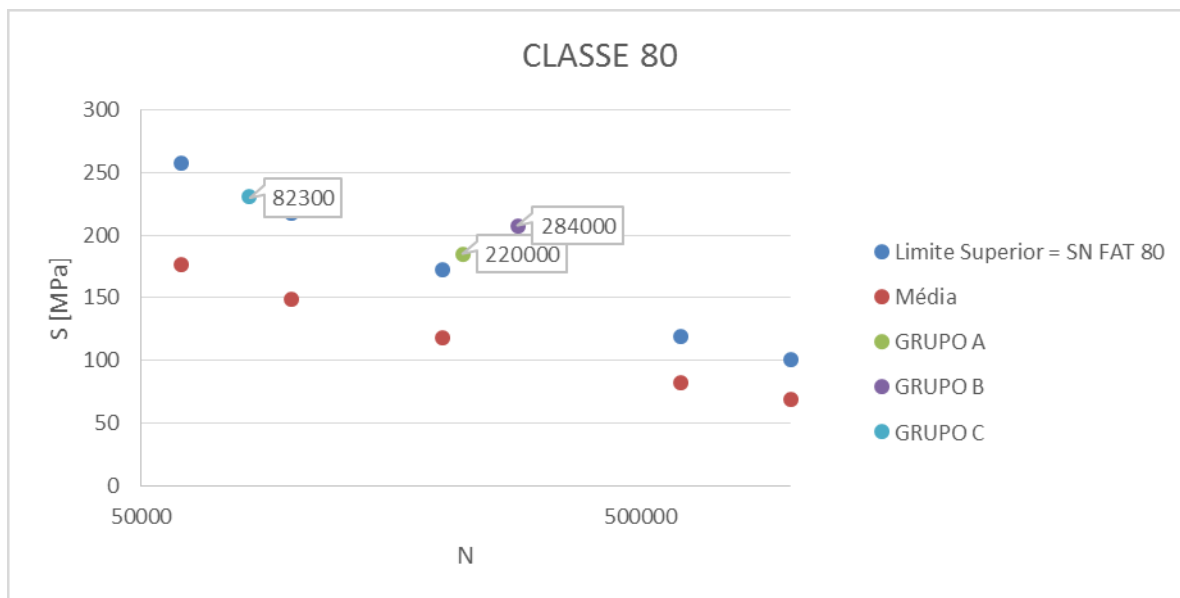


Figura 34: Plotados a curva do projeto do teste (Média), curva da classificação da solda (Limite Superior) e dos pontos obtidos pelos ensaios (GRUPO A, GRUPO B e GRUPO C).

Nota-se que nesta Figura 34 os ensaios que foram realizados até o fim, ou seja, foram aplicada as cargas de projeto e só interrompeu-se o ensaio após a ruptura do material, tiveram resultados dentro do desvio padrão estatístico determinados para ensaios realizados com $n=3$ observações. O que é um ponto positivo pois só foi realizado $n=1$ ensaio para cada grupo.

E os resultados esperados para o desvio padrão estatístico nesses casos é de haver um espalhamento maior, devido à baixa amostra de medições.

O resultado obtido com o ensaio para o Grupo B não pode ser avaliado ao lado dos outros dois Grupos, pois este não teve o teste concluído. Interrompendo o ensaio para avaliar se existia uma iniciação de trinca após 284mil ciclos, sendo que pelo projeto estimava-se romper o material com aproximadamente 120mil ciclos, ou seja, o teste foi interrompido após o limite superior de ciclos passar de 134% do esperado.

A conclusão que pode-se chegar é que a classe da solda projetada para este corpo de prova não poderia ser a mesma que para os demais, apesar de todos eles terem seguido rigorosamente o mesmo processo de fabricação e usinagem.

Para uma amostragem um pouco maior este ponto se torna algo aceitável, por tratarmos de muitas interferências que podem ocorrer durante o processo de fabricação, que aparentemente não provocam nenhuma variação, mas podem ter influências grandes na vida a fadiga.

Avaliando rapidamente os valores obtidos para um projeto de junta solda de classe FAT=112. Teríamos em uma curva média e de limite superior, estimando uma vida de N=284mil ciclos, pontos iguais a 215 MPa e 147 MPa respectivamente. Ou seja, o limite superior estaria bem próximo dos 230MPa aplicados no ensaio do Grupo B.

Então vamos trabalhar com os pontos dos Grupos A e C, já que esses ficaram dentro dos limites estipulados e os testes foram elaborados até a ruptura do material. Usando como referência a curva do Limite Superior, que descreve o comportamento da junta soldada classificada pelo projeto.

$$S_{80} = \sqrt[1/3]{\frac{1.024 \cdot 10^{12}}{N}} \quad 19$$

Plotando os dados obtidos com os testes do Grupo A e C ao lado da curva SN para a classe FAT=80, Figura 35, percebemos que temos uma inclinação para a curva do corpo de prova bem parecida com apresentada pela IIW para SN de junta soldada classe 80.

E utilizando a linha de tendência de uma curva de potência, podemos descrever o comportamento dos corpos de prova, utilizando apenas os dois pontos obtidos com os testes dos Grupos A e C.

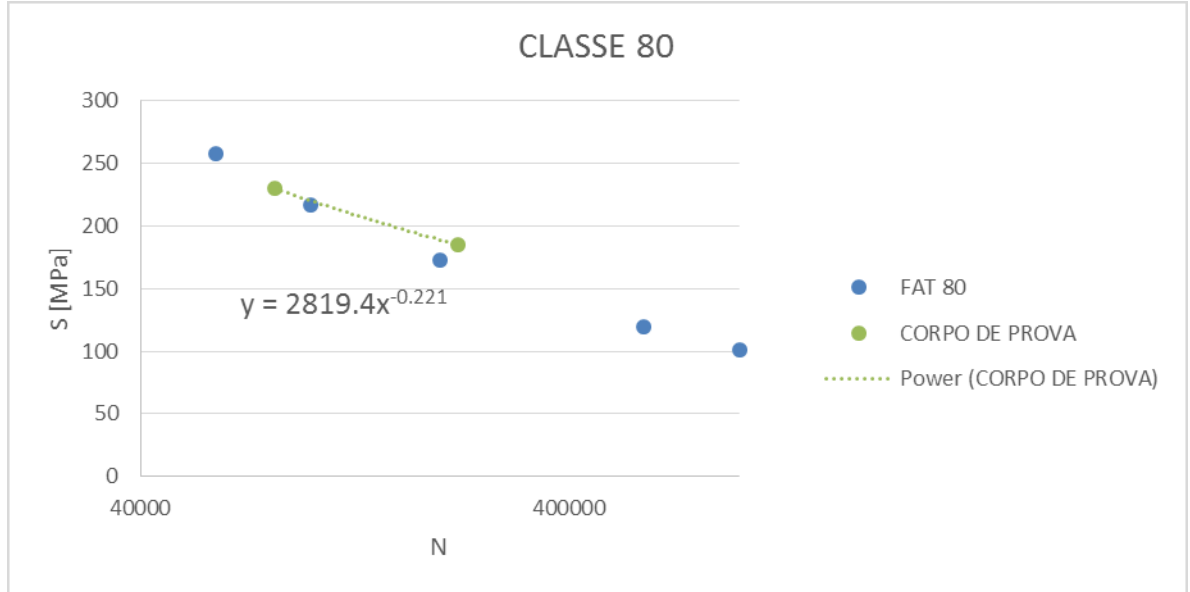


Figura 35: Linha de tendência obtida a partir dos dados dos testes dos Grupos A e C.

Reescrevendo a linha de tendência chegamos a equação 20

$$S_{CP} = 2819,4N^{-0.221} \quad 20$$

Ou seja,

$$S_{CP}^{4.5} N = 4,09 \cdot 10^{15} \quad 21$$

E ao comparar a equação 21 com a equação 1419 percebemos que estão falando de curvas muito próximas . A partir de $N > 10^4$ existe um afastamento pequeno entre elas, e para os parâmetros estatístico utilizados, pode-se dizer que se trata da mesma curva. Basta olhar a Figura 36, e perceber que as curvas duas estão quase no mesmo ponto quando $N > 1 \times 10^4$.

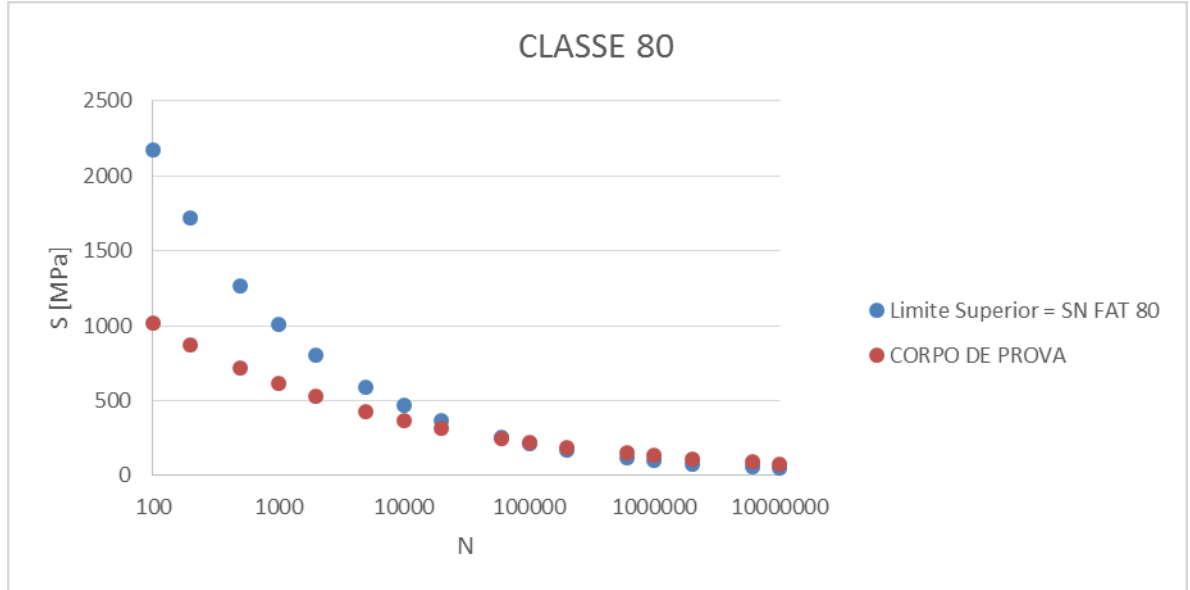


Figura 36: Comparação entre a curva de Limite Superior, que descreve o comportamento de uma junta soldada de classe FAT=80 como a curva obtida pelos ensaios de um corpo de prova dos Grupos A e C.

Sabendo que o limite de escoamento do ASTM A36 é 250MPa, temos a indicação que essa tensão não deve ser atingida durante a operação deste material. Ao calcular a vida a fadiga pela IIW para classe 80 de uma amplitude na ordem do limite de escoamento do material temos:

$$N = \frac{S_E^3}{1,024 \cdot 10^{12}} = 6,55 \cdot 10^4 \text{ Ciclos}$$

Logo, as curvas da Figura 36 podem ser desconsideradas para $N < 6 \cdot 10^4$. E então teremos as curvas do Limite Superior e de teste bem próximas, podemos dizer que são relativamente as mesmas, ver na Figura 37.

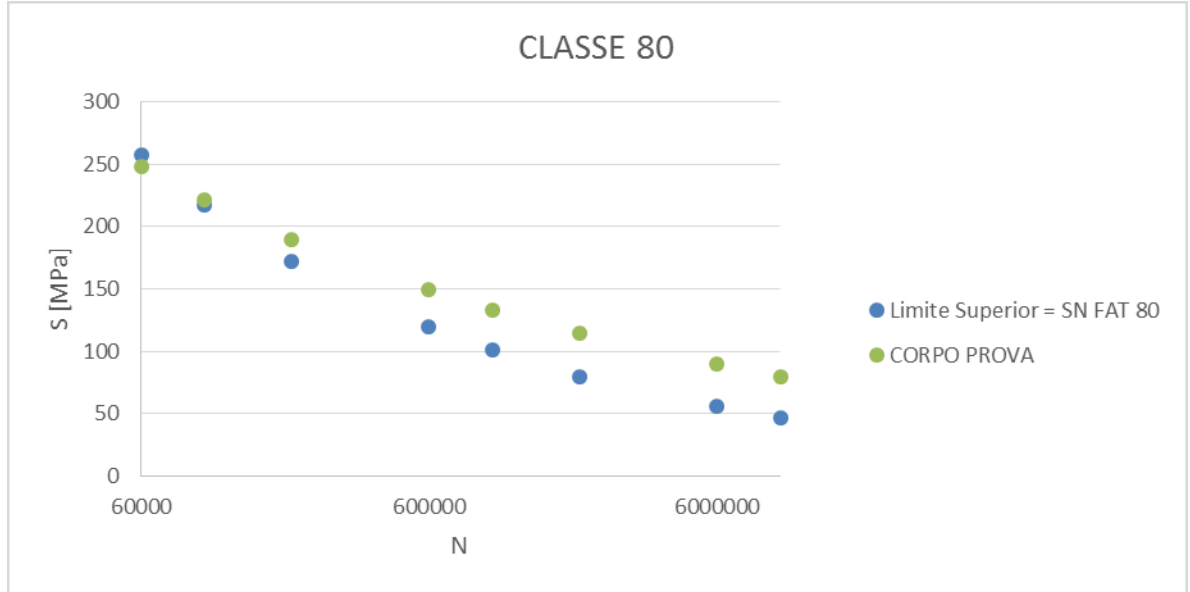


Figura 37: As curvas de da classe FAT=80 e do corpo de prova em um intervalo de 6.10^4 até 10^7 .

Na Figura 37 está apresentada as duas curvas, em um intervalo de 6.10^4 até 10^7 , intervalos esses de interesse para o cálculo da vida a fadiga da junta soldada do material A-36. Já que antes desse intervalo atinge tensões não recomendadas de trabalho e depois atinge o regime de vida infinita.

10. Conclusão

O objetivo do trabalho de graduação apresentado era desenvolver um estudo do comportamento estrutural de uma junta soldada em placa plana e fazer o levantamento de uma curva de comportamento da vida do material em relação a gama de tensão cíclica nele aplicado.

Com base na análise estatística desenvolvida pela distribuição t de Student é possível determinar um valor da média do carregamento para um limite de confiança de 75% bicaudal/bilateral, que atingisse um valor quase 3 vezes menor do que o apresentado pela IIW,2008.

Pois o modelo de análise estatística presente na IIW,2008 faz um estudo mais detalhado sobre a influência dos parâmetros média e variância utilizando diferentes métodos de distribuição.

O modelo IIW,2008 apresenta um fator k_i (equação 4 e 5) calculando a distribuição da média pela teoria de Student, a variância pela teoria do Chi-quadrado e uma probabilidade de 5% para a distribuição Gaussiana.

Partindo do valor médio foi determinado um limite superior a cima do valor da média, como o valor máximo esperado para o número de ciclos após a ruptura dos corpos de prova testados. Sendo essa curva a própria SN da classe projetada para a junta utilizada nos ensaios.

Seria aceitável considerado aceitável pelo projeto que os corpos falhassem em um intervalo entre as duas curvas (média e limite superior). Porém não foi possível realizar todos os testes até a conclusão deste trabalho, mas 2/3 dos resultados se mostraram bem-comportados quanto ao esperado pelo projeto.

O outro 1/3 que fugiu do que se esperava, foi considerado como aceitável. Pois se todos os nove testes tivessem concluídos este ponto não iria afetar a curva de tendência que seria traçada para a vida a fadiga da junta testada.

Então este ponto foi retirado da curva e assim foi possível encontrar uma curva descrita por uma equação potencial que se aproxima da curva de vida a fadiga da classe FAT=80, descrita na IIW,2008.

Tendo em vista que ainda temos corpos de prova já usinados que poderiam ser ensaiados para coletar mais resultados e podendo até melhor a curva apresentada na Figura 37.

11. Bibliografia

1. Aggen G., Akstens Frank W., Allen C. Michael, Avery H.S., Babu P., Bayer Alna M., Bello Felix, Bhat Shrikan P., “American Society for Metals International”, ASM Handbook: Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. USA: ASM International. 1998.
2. Callister Jr.W., “Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução”.Ed. LTC, 2003.
3. Castro J.T.P, Meggiolaro M.A., “Fadiga: Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural Sob Cargas Reais de Serviço, Volume I e II”, ,2009.
4. Chiaverini V., “Aços e Ferros Fundidos ”, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, p. 22, 2002.
5. Cofíño R.C., ”Análise das Tensões Residuais em um Junta Soldada em Condição Overmatch”, FEI, 2010.
6. Dulieu-Barton J.M. “Introduction to Thermoelastic Stress Analysis”, Strain, Vol. 35, Issue 2, p. 35-39, 1999.
7. Fortes C., Araujo W.,”Apostila de Metalurgia da Soldagem”, ESAB BR, 2005.
8. Fortes C., Araujo W., ”Apostila de Soldagem Arco Submerso”, ESAB BR, 2004.
9. Fortes C., Vaz C.T, “Apostila de Soldagem MIG/MAG”, ESAB BR,2005.
10. Fortes C., Vaz C.T, “Apostila de Soldagem Eletrodo Revestido”, ESAB BR,2005.
11. Gurney T.R.,”Fatigue of Welded Structures”, Cambridge University Press, 1979
12. Halliday, David. “Fundamentos da Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica.”, Ed. LTC. vol. 2, 2012
13. Hobbacher A., “Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components”, Ed. IIW,2008.
14. Lu J. and Society for Experimental Mechanics (U.S.), “Handbook of Measurement of Residual Stresses”, Ed. Fairmont Press ,1996.
15. Marques P.V, Modenesi P.J, Bracarense A.Q, “ Soldagem Fundamentos e Tecnologias”, Ed. UFMG ,2005.
16. Thomson W., “On the Dynamical Theory of Heat”, Trans. R. Soc (Edin), Vol. 20, p. 161-283, 1853.

17. Vieira R.B., Kurunthottikal S.P., Gonzáles G.L.G., Freire J.L.F., Yang B., Rowlands R.E, “Determination of a U-notch Aluminum Plate Stress Concentration Factor by Thermoelasticity”, 13^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 2015.

APÊNDICE A

Distribuição t de Student

É uma distribuição aproximada a distribuição normal. Porém na prática é utilizado a distribuição normal para amostras grandes e a quando temos poucas amostras para analisar os resultados utilizamos a distribuição t de Student. Amostras pequenas, de maneira geral, são aquelas que possuem um número menor do que 30 observações.

Em relação a curva característica da distribuição normal, pode-se dizer a curva da distribuição t é um pouco mais achatada e isso nos indica que não temos uma liberdade tão grande com os nossos dados. Por apresentar desvios padrões maiores do que a gaussiana, provada por pequenos números de observações.

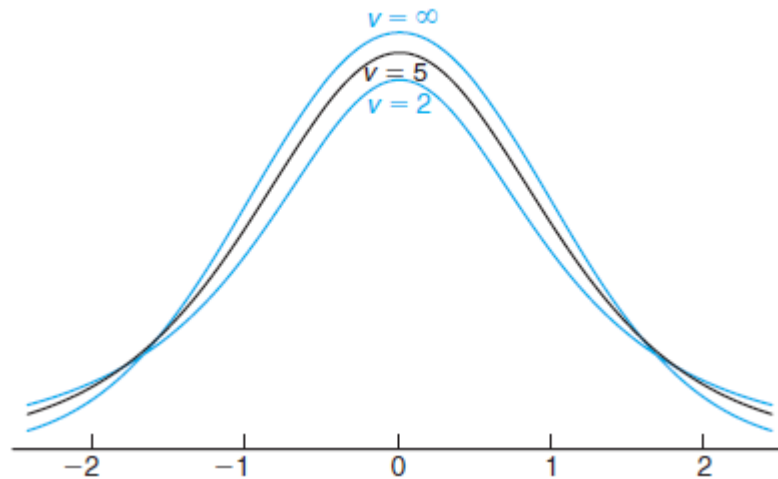


Figura 38: Distribuição t de Student para 2, 5 e ∞ graus de liberdade

Sua distribuição está determinada pelo grau de liberdade de suas amostras, que é o número de observações (n) menos 1 (n-1). Os valores de sua distribuição já estão padronizadas e são tabeladas. Onde para encontrar o valor da distribuição na Tabela 14 é preciso olhar para o grau de liberdade e para o Nível de Confiança da sua amostra (1- Intervalo de Confiança), ou seja a probabilidade de ocorrer o fenômeno. E determinar se o evento é Unicaudal ou Bicaudal.

Tabela 14: Distribuição t de student. Fonte: Wikipedia.com

Unicaudal	75%	80%	85%	90%	95%	97,5%	99%	99,5%	99,75%	99,9%	99,95%
Bicaudal	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99,5%	99,8%	99,9%
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792

23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,767
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,690
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,659
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646

ANEXO A

Registro de Qualificação de Soldador no Processo GTAW

Registro de Qualificação de Soldador (Welding Performance Qualification) ASME IX		No. da Qualificação (Qualification No.) S195-P001			
		Data Qualificação (Date) : 08/09/2009			
Empresa (Company) : [REDACTED] Nome (Name) : [REDACTED] No. da EPS (Identification of WPS) : 1P1 T 591 T Tipo de Junta (Joint Type) : Chanfro		Sinete (Stamp) : S-195 Processo de Soldagem (Welding Process) : GTAW Técnica (Type) : Manual			
Variáveis Essenciais (Essential Variables)(QW-350)	Valores (Values)	Faixa Qualificada (Range Qualified)			
Mata-Junta (Backing) :	Não	Com/Sem Mata-Junta			
M. Base (Base Metal) Tipo : Listado	P/S-No. (MB1) : 1	P-No 1-11, 34, 41-47			
Especificação (Specification) : SA-106	P/S-No. (MB2) : 1	+ Não List. c/ Comp. Quím. similar			
Chapa (Plate) : N/A Tubo (Pipe) : Sim	Diâm. (mm) : 60,3	Min. : 25,4	Max. : Ilimitado		
Especificação do Consumível (Filler Metal Specification) :	5,9				
F-Number :	6	C/M. Junta: 6	S/M. Junta: 6		
Mat. de Adição (Addition of Filler Metal) (GTAW, PAW) :	Sim	c/Adição de Arame			
Tipo Arame Consumível (Filler Metal Type) (GTAW, PAW) :	Arame Sólido	Arame Sólido			
Consumível Insert (Consumable Insert) (GTAW, PAW) :	Não	s/Inserts			
Espessura Metal Depositado (Weld Deposit Thickness (mm) :	5,54	Max. 11,08			
Posição de Soldagem (Welding Position) :	6G	Ch./Tubo > 610mm	Tubo < 610mm Filete		
		Todas	Todas Todas		
Progressão (Progression) :	Ascendente	Ascendente			
Gás de Purga (Backing Gas) (GTAW, PAW ou GMAW) :	Não	Com ou Sem Gás de Purga			
Tipo de Transferência (Transfer Mode) (GMAW) :	N/A	N/A			
Tipo de Corrente/Polaridade (Current Type/Polarity) (GTAW) :	CC-	CC-			
Variáveis Essenciais (Essential Variables)(QW-360)	Valores (Values)	Faixa Qualificada (Range Qualified)			
Controle Visual (Direct/Remote Visual Control) :	N/A	N/A			
Controle Automático de Volt. (Autom. Volt. Control)(GTAW) :	N/A	N/A			
Seguidor Automático de Junta (Automatic Joint Tracking) :	N/A	N/A			
Posição de Soldagem (Welding Position) :	N/A	N/A			
Consumível Insert (Consumable Insert) :	N/A	N/A			
Mata-Junta (Backing) :	N/A	N/A			
Passe por Lado da Junta ((Single or Multiple Passes per Side) :	N/A	N/A			
Ensaios (Test)					
Ensaio de Dobramento (Guided Bend Test)					
No. do C.P.	Tipo (Type)	Resultado (Result)	No. do C.P.	Tipo (Type)	Resultado (Result)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
No. do Relatório (Laboratory Test Number) : N/A					
Ensaio Visual (Visual Examination)		Resultado (Result) : N/A		No. Relatório (Lab. Test No.) : N/A	
Ensaio Radiográfico (Radiographic Test)					
No. do Filme	Result. (Result)	Observação (Note)	No. do Filme	Result. (Result)	Observação (Note)
01- A	APROVADO	N/A	N/A	N/A	N/A
02- B	APROVADO	N/A	N/A	N/A	N/A
No. do Relatório (Laboratory Test Number) : WM-093/09					
Ensaio de Fratura/Macrográfico (Fracture Test / Macro Test)					
Desc. da Fratura (Fracture Test) : N/A					
Comp. dos Defeitos (Length of Defects)(mm) : N/A % : N/A No. Relatório (Lab. Test No.) : N/A					
Descrição Macrografia (Macro Test Description) : N/A					
Pernas do Filete (Fillet Leg Size) (mm) : N/A x N/A Concavidade/Convexidade (Concavity/Convexity) (mm) : N/A					
Observações :					
Certificamos que os dados constantes neste documento são corretos e que os corpos de prova foram preparados, soldados e testados de acordo com os requerimentos da Norma ASME Seção IX					
Elaborado por (Prepared by) :			Aprovado por (Approved by) :		
[REDACTED]			URJ		

Registro de Qualificação de Soldador no Processo SMAW.

Registro de Qualificação de Soldador (Welding Performance Qualification) ASME IX				No. da Qualificação (Qualification No.) S195-P002	
				Data Qualificação (Date) : 21/03/2013	
Empresa (Company) : [Redacted]				Sinete (Stamp) : S-195	
Nome (Name) : [Redacted]				Processo de Soldagem (Welding Process) : SMAW	
No. da EPS (Identification of WPS) : 1P1 E 539 E				Técnica (Type) : Manual	
Tipo de Junta (Joint Type) : Chanfro					
Variáveis Essenciais (Essential Variables)(QW-350)		Valores (Values)		Faixa Qualificada (Range Qualified)	
Mata-Junta (Backing) :		Sim		Com/Mata-Junta	
M. Base (Base Metal) Tipo : Listado		P/S-No. (MB1) : 1		P-No 1-15F, 34, 41-49	
Especificação (Specification) : SA-285		P/S-No. (MB2) : 1			
Chapa (Plate) : Sim		Tubo (Pipe) : N/A		Diâm. (mm) : N/A	
Especificação do Consumível (Filler Metal Specification) :		5.1		Min.: 73,02	
F-Number :		4		Max.: Ilimitado	
Mat. de Adição (Addition of Filler Metal) (GTAW, PAW) :		N/A		N/A	
Tipo Arame Consumível (Filler Metal Type) (GTAW, PAW) :		N/A		N/A	
Consumível Insert (Consumable Insert) (GTAW, PAW) :		N/A		N/A	
Espessura Metal Depositado (Weld Deposit Thickness (mm) :		16		Max. Ilimitado	
Posição de Soldagem (Welding Position) :		2G, 3G e 4G		Ch./Tubo>610mm	
				Tubo<610mm	
				Filete	
				Todas	
				P.H(D>73mm)	
				Todas	
Progressão (Progression) :		Ascendente		Ascendente	
Gás de Purga (Backing Gas) (GTAW, PAW ou GMAW) :		N/A		N/A	
Tipo de Transferência (Transfer Mode) (GMAW) :		N/A		N/A	
Tipo de Corrente/Polaridade (Current Type/Polarity) (GTAW) :		N/A		N/A	
Variáveis Essenciais (Essential Variables)(QW-360)		Valores (Values)		Faixa Qualificada (Range Qualified)	
Controle Visual (Direct/Remote Visual Control) :		N/A		N/A	
Controle Automático de Volt. (Autom. Volt. Control)(GTAW) :		N/A		N/A	
Seguidor Automático de Junta (Automatic Joint Tracking) :		N/A		N/A	
Posição de Soldagem (Welding Position) :		N/A		N/A	
Consumível Insert (Consumable Insert) :		N/A		N/A	
Mata-Junta (Backing) :		N/A		N/A	
Passe por Lado da Junta ((Single or Multiple Passes per Side) :		N/A		N/A	
Ensaios (Test)					
Ensaio de Dobramento (Guided Bend Test)					
No. do C.P.	Tipo (Type)	Resultado (Result)	No. do C.P.	Tipo (Type)	Resultado (Result)
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
No. do Relatório (Laboratory Test Number) : N/A					
Ensaio Visual(Visual Examination)		Resultado(Result) : N/A		No. Relatório (Lab. Test No.) : N/A	
Ensaio Radiográfico (Radiographic Test)					
No. do Filme	Result. (Result)	Observação (Note)	No. do Filme	Result. (Result)	Observação (Note)
L-2G	APROVADO	N/A	L-4G	APROVADO	N/A
L-3G	APROVADO	N/A	N/A	N/A	N/A
No. do Relatório (Laboratory Test Number) : WM-038/13					
Ensaio de Fratura/Macrogáfico (Fracture Test / Macro Test)					
Desc. da Fratura (Fracture Test) : N/A					
Comp. dos Defeitos (Length of Defects)(mm) : N/A					
Descrição Macrografia (Macro Test Description) : N/A					
Pernas do Filete (Fillet Leg Size) (mm) : N/A					
Observações :					
Certificamos que os dados constantes neste documento são corretos e que os corpos de prova foram preparados, soldados e testados de acordo com os requerimentos da Norma ASME Seção IX					
Elaborado por (Prepared by) :			Aprovado por (Approved by) :		
[Redacted]			UQE		

