

1007
621
C871a
TES/4Em

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS VEICULARES SOLDADAS
SUBMETIDAS À CARREGAMENTOS CÍCLICOS - CRITÉRIOS DE
INSPEÇÃO E ACEITABILIDADE.**

Dissertação Apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por
ADMILSON VIEIRA DA COSTA
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

DIRBI/UFU



1000186964

Orientadora : Profa. Dra. Sonia Aparecida Goulart de Oliveira

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Sonia Aparecida Goulart de Oliveira	(UFU)
Prof. Dr. Américo Scotti	(UFU)
Prof. Dr. Samuel Irati Novaes Gomes	(EESC - USP)

UBERLÂNDIA, MARÇO DE 1998

A meus pais, José Vieira e Helenita

A meu filho Rafael

A meus irmãos, Adeilson e Admarço

A minha cunhada Lucimar e meus sobrinhos Marco Aurélio e Leonardo

AGRADECIMENTOS

À profesora e orientadora Sonia Goulart, pela orientação, confiança e empenho para a realização do trabalho.

Ao professor Américo Scotti, pela oportunidade dada e incentivo para a realização do mestrado.

Ao professor Valtair Ferraresi, pelo apoio, amizade e colaboração.

Aos professores do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Aos colegas e professores que direta ou indiretamente me incentivaram a ingressar no curso de mestrado, em especial ao amigo Idalberto pelo apoio inicial e companheirismo durante a minha vida acadêmica.

Aos colegas e alunos do curso de pós-graduação pelo incentivo, cooperação e principalmente pela amizade.

Aos funcionários da oficina do departamento de Engenharia Mecânica, especialmente ao funcionário Valdico e o estagiário Cléber pela amizade e colaboração.

Ao aluno Daniel que sempre se dispôs a me ajudar na realização do trabalho.

A todos os meus amigos e familiares que sempre me incentivaram e me ajudaram durante este período.

À coordenação do curso de pós-graduação desta universidade.

Ao apoio do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, pelo suporte infraestrutural e financeiro, em particular aos laboratórios LAPROSOLDA e de COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS.

Ao suporte financeiro da CAPES, pela concessão da bolsa, e a FAPEMIG pelo suporte financeiro para a execução do trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foi feito um estudo sobre a influência de defeitos de penetração incompleta da junta, mordedura e reforço excessivo, na resistência à fadiga de juntas soldadas, típicas de alterações veiculares. Com este estudo objetiva-se mostrar que critérios de inspeção e aceitação de soldas realizadas em estruturas veiculares devem ser padronizados. O procedimento experimental baseou-se na geração dos defeitos, a vários níveis, em chapas de teste, espessura de 9,5 mm, soldadas de topo. Corpos de prova foram retirados destas chapas de testes e uma carga cíclica foi aplicada perpendicularmente ao cordão de solda. Estes corpos de prova foram ensaiados à fadiga até a fratura, em ciclos de tensões com reverso completo. Os resultados mostraram que defeitos de penetração incompleta em torno de 1 mm provocaram uma redução na resistência à fadiga da junta soldada de aproximadamente 36%. Para defeitos de mordedura em torno de 1,6 mm, esta redução foi de aproximadamente 10%. Defeitos de reforço excessivo não se mostraram tão prejudiciais, exceto quando associado a outros tipos de defeitos, tais como, sobreposição do cordão e/ou defeitos de falta de fusão. Os resultados obtidos mostram que existe um tamanho crítico para cada tipo de defeito, de forma que um critério de aceitabilidade pode ser experimentalmente estabelecido.

ABSTRACT

In this work it has been was performed a study on the influence of welding defects such as incomplete joint penetration, undercut and excessive reinforcement, on the fatigue resistance of welded joints typical in vehicular alterations. With this study it is aimed to show that acceptance and welds inspection criteria performed in vehicular structures must be standardized. The experimental procedure has been based in the generation of such defects, in several levels, in butt welded test plates 9,5 mm thick. Samples were taken from these test plate and cyclic loading was applied perpendicular to the weld bead. Those samples were tested under fatigue up to fracture, in a complete reverse stress cycle. The results show that incomplete joint penetration defects of about 1 mm cause a reduction of approximately 36% in the fatigue endurance of the welded joint. For the undercut defects up to 1,6 mm, the reduction was approximately 10%. Defects of excessive reinforcement were not so harmful, except when associated with other kinds of defects such as overlap or lack of fusion. The results show that there is a critical size in such a way that an acceptance criterion could be experimentally established.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	xi
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	xiii

Capítulo	Página
1.0 - INTRODUÇÃO.....	01
1.1 - Objetivos e Metodologia do Trabalho.....	03
1.2 - Apresentação da Dissertação.....	04
2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 - Introdução.....	05
2.2 - Processos de Soldagem.....	06
2.2.1 - Eletrodo Revestido.....	06
2.2.2 - Processo MIG-MAG.....	07
2.3 - Defeitos de Soldagem.....	08
2.3.1 - Penetração Incompleta da Junta.....	09
2.3.2 - Mordedura.....	11
2.3.3 - Reforço Excessivo (Convexidade).....	13
2.3.4 - Efeito da Proteção do Arco de Soldagem.na Geometria do Cordão....	15
2.4 - Fadiga.....	16
2.4.1 - Mecanismos de Falha por Fadiga.....	18
2.4.2 - Regimes de Fadiga.....	21
2.4.3 - Teorias de falhas por Fadiga.....	21
2.4.4 - Ensaios de Fadiga.....	24
2.5 - Falha por Fadiga em Estruturas Soldadas.....	24
2.6 - Fatores que Influenciam na Resistência à Fadiga de Juntas Soldadas.....	26
2.6.1 - Concentração de Tensão em Função de Defeitos de Soldagem.....	28

2.6.2 - Influência de Mudanças Microestruturais, Acabamento e Corrosão ..	29
2.7 - Ciclo de Tensões em Fadiga.....	30
2.8 - Tensões Residuais de Soldagem em uma Junta de Topo.....	32
2.9 - Normas e Padrões de Soldagem.....	34
2.9.1 - Código da ANSI/AWS - D1.1-96.....	35
2.9.2 - Norma da ANSI/AWS D8.8-89 (SAE HS J1196).....	38
2.9.3 - Doc. IIS/IIW-778-83.....	39
3.0 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	41
3.1 - Introdução.....	41
3.2 - Equipamentos.....	41
3.2.1 - Sistema de Soldagem.....	41
3.2.2 - Equipamento para Ensaio de Fadiga.....	43
3.3 - Metodologia.....	45
3.4 - Materiais e Dimensões.....	46
3.4.1 - Chapas de Teste.....	46
3.4.2 - Consumíveis de Soldagem.....	46
3.5 - Procedimento para Obtenção do Defeito de Penetração Incompleta da Junta.....	47
3.6 - Procedimento para obtenção do defeito de Mordedura.....	49
3.7 - Procedimento para Obtenção do Defeito de Reforço Excessivo.....	51
3.8 - Corpo de Prova.....	52
3.9 - Execução dos Testes de Fadiga.....	54
3.10 - Medição dos Defeitos.....	54
3.10.1 - Sistema Digital de Imagem.....	55
3.10.2 - Equipamentos de Medição Dimensional.....	55
4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1 - Introdução.....	57
4.2 - Defeito de Penetração Incompleta da Junta.....	58
4.3 - Defeito Mordedura.....	65

2.6.2 - Influência de Mudanças Microestruturais, Acabamento e Corrosão ..	29
2.7 - Ciclo de Tensões em Fadiga.....	30
2.8 - Tensões Residuais de Soldagem em uma Junta de Topo.....	32
2.9 - Normas e Padrões de Soldagem.....	34
2.9.1 - Código da ANSI/AWS - D1.1-96.....	35
2.9.2 - Norma da ANSI/AWS D8.8-89 (SAE HS J1196).....	38
2.9.3 - Doc. IIS/IIW-778-83.....	39
 3.0 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	 41
3.1 - Introdução.....	41
3.2 - Equipamentos.....	41
3.2.1 - Sistema de Soldagem.....	41
3.2.2 - Equipamento para Ensaio de Fadiga.....	43
3.3 - Metodologia.....	45
3.4 - Materiais e Dimensões.....	46
3.4.1 - Chapas de Teste.....	46
3.4.2 - Consumíveis de Soldagem.....	46
3.5 - Procedimento para Obtenção do Defeito de Penetração Incompleta da Junta.....	47
3.6 - Procedimento para obtenção do defeito de Mordedura.....	49
3.7 - Procedimento para Obtenção do Defeito de Reforço Excessivo.....	51
3.8 - Corpo de Prova.....	52
3.9 - Execução dos Testes de Fadiga.....	54
3.10 - Medição dos Defeitos.....	54
3.10.1 - Sistema Digital de Imagem.....	55
3.10.2 - Equipamentos de Medição Dimensional.....	55
 4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 57
4.1 - Introdução.....	57
4.2 - Defeito de Penetração Incompleta da Junta.....	58
4.3 - Defeito Mordedura.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 - Defeito de penetração incompleta da junta.....	09
2.2 - Defeito de mordedura.....	11
2.3 - Reforço excessivo do cordão de solda.....	14
2.4 - Formatos típicos de cordões de soldas.....	16
2.5 - Modelo de propagação de trincas apresentado por Dieter(1976) e Suresh (1991).....	20
2.6 - Curva S-N para o aço AISI 4130, com carregamento axial e reverso completo, Norton (1996).....	23
2.7 - Curvas S-N estimadas. a) material com patamar de vida infinita (metais ferrosos e titânio); b) materiais sem patamar de vida infinita (alumínio, etc.), Norton (1996).....	24
2.8 - Corpo de prova com uma trinca central e submetido à tensões axiais.....	29
2.9 - Ciclos de tensões.....	31
2.10 - Distribuição de tensões ao longo dos eixos do cordão de solda.....	33
2.11 - Exemplos de perfis soldados de topo. a) Chapa retangular solicitada axialmente; b) Perfil "I" com solicitação de flexão. AWS (1996).....	36
2.12 - Curvas de faixas de tensões de projeto para categorias de A até F de estruturas secundárias(não tubulares), AWS (1996).....	37
3.1 - Sistema universal de testes de materiais MTS 810.....	44
3.2 - Projeto da junta utilizada para simulação do defeito de penetração incompleta da junta.....	47
3.3 - Projeto da junta utilizado na simulação do defeito de mordedura.....	50
3.4 - Simulação do defeito de mordedura.....	50
3.5 - Projeto da junta utilizado para simulação de reforço excessivo.....	51
3.6 - Corpo de prova para ensaio de fadiga.....	53
3.7 - Chapa de teste.....	53

3.8 - Medidores de defeitos geométricos.....	56
4.1 - Curvas S-N para soldas sem defeito e soldas contendo defeitos de penetração incompleta da junta.....	61
4.2 - Juntas soldadas com defeito de penetração incompleta da junta.....	63
4.3 - Curvas S-N para soldas contendo defeitos de mordedura.....	66
4.4 - Seções da junta soldada com defeito de mordedura.....	67
4.5 - Curvas S-N para o defeito de reforço excessivo.....	71
4.6 - Formato dos cordões de solda para o defeito de reforço excessivo.....	72
4.7 - Corpo de prova de nível 2 fraturado na região da solda.....	73
4.8 - Curvas S-N de soldas com e sem reforço excessivo do cordão de solda.....	75
4.9 - Gráfico de tamanho de defeito x vida (tensão \cong 240-250 MPa).....	77
4.10 - Gráfico de tamanho do defeito x vida - (tensão \cong 200-220 MPa).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 - Requisitos de qualidade para defeitos geométricos (Doc. IIS/IIW-778-83).....	40
3.1 - Dados técnicos da fonte.....	42
3.2 - Níveis de defeitos.....	45
3.3 - Propriedades mecânicas do metal de base.....	46
3.4 - Especificação dos consumíveis de soldagem.....	47
3.5 - Resistência a tração de juntas com defeito de penetração incompleta da junta.....	48
3.6 - Parâmetros de soldagem para simulação de defeito de penetração incompleta da junta.....	49
3.7 - Parâmetros de soldagem utilizados na simulação do defeito de mordedura....	50
3.8 - Parâmetros de soldagem - simulação de defeito de reforço excessivo.....	52
4.1 - Resultados de testes de fadiga de juntas soldadas com defeito de penetração incompleta da junta.....	59
4.2 - Coeficientes de regressão das curvas S-N para defeitos de penetração incompleta.....	62
4.3 - Redução da resistência à fadiga para juntas soldadas com presença de defeito de penetração incompleta da junta.....	63
4.4 - Resultados de testes de fadiga de juntas soldadas com defeito de mordedura.....	65
4.5 - Coeficientes de regressão das curvas S-N para defeitos de mordedura	68
4.6 - Redução da resistência à fadiga para juntas soldadas com presença de defeito de mordedura.....	69
4.7 - Resultados de testes de fadiga de juntas soldadas com defeito de reforço excessivo.....	70

4.8 - Energia de soldagem utilizada na simulação do defeito de reforço excessivo.....	74
4.9- Coeficientes de regressão das curvas S-N para defeitos de reforço excessivo.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

K_c	Limite de tenacidade do material
ε	Deformação
N	Vida em ciclos
S_f	Resistência à fadiga para vida finita
S_e	Resistência à fadiga para vida infinita
K_t	Fator de concentração de tensão
K_l	Fator de intensificação de tensão
W	Largura
R_t	Razão de tensão
A	Razão de amplitude
S_{ut}	Resistência a tração
σ_{\min}	Tensão mínima
σ_{\max}	Tensão máxima;
σ_a	Amplitude de tensão
σ_m	Tensão média
σ_r	Faixa de tensões
σ_y	Tensões residuais transversais na direção Y
σ_x	Tensões residuais transversais na direção X
PIJ	Penetração incompleta da junta
Mord	Mordedura
Ref	Reforço

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A soldagem é hoje um dos processos de fabricação mais importantes e populares para a união de materiais metálicos. A garantia de sua qualidade requer, no entanto, em determinadas aplicações, avaliação e qualificação da junta soldada (AWS, 1988 e AWS, 1990). A inspeção e aceitabilidade de determinada solda deve atender a critérios preestabelecidos, tais como em normas específicas (AWS 1980 e AWS 1989). Nos países desenvolvidos, onde a qualidade do produto é fator determinante da sua aceitabilidade no mercado, o desenvolvimento de normas de inspeção e aprovação do produto torna-se uma necessidade indispensável.

O uso do processo de soldagem por empresas que executam manutenções e alterações veiculares é uma prática muito comum atualmente. Porém a garantia da qualidade destas soldagens torna-se uma questão a ser discutida e avaliada cuidadosamente. Devido a não existência de normas técnicas brasileiras específicas para a qualificação de soldagem em alterações veiculares, a inspeção da qualidade das soldas realizadas nestas aplicações torna-se arbitrária. A situação se complica por não existirem informações ao alcance de todos sobre a distribuição de esforços atuantes na estrutura, sob condições de serviço rodoviário. Um exemplo comum deste tipo de situação, se caracteriza quando se faz um alongamento ou encurtamento de chassis de caminhões, onde, normalmente, é utilizada a soldagem como um dos meios de ligação deste tipo de estrutura.

A qualidade em juntas soldadas é um aspecto importante e significativo. O estabelecimento e a aplicação de um padrão de aceitabilidade adequado com a

finalidade de aprovar ou reprovar determinada solda, pode contribuir significativamente para a economia e segurança de estruturas soldadas.

A elaboração de normas específicas que contemplam diferentes tipos e níveis de solicitação já é uma realidade para outros tipos de aplicações soldadas. Um exemplo é relatado por Feder (1996), em um trabalho que discute um sistema de níveis de qualidade para soldas aplicadas em equipamentos de mineração a céu aberto. Entretanto, para atender necessidades específicas impostas pelo mercado, normalmente, o que se faz é editar e/ou adequar normas existentes. Estas necessidades levam, quase que obrigatoriamente, ao estabelecimento de novos padrões de qualidade, ligados à critérios de inspeção, níveis de defeitos, característica da junta soldada e tipo de solicitação imposta na estrutura soldada. Níveis de defeitos aceitáveis e não aceitáveis variam de uma norma ou código para outro. Por isso, é importante estudar os efeitos destes níveis de defeitos sobre a integridade de juntas soldadas e, quando possível, reestabelecer critérios para situações específicas não cobertas pelas normas existentes.

Aplicar normas existentes para inspeção veicular seria um exemplo típico da situação acima mencionada. Isto é, para os esforços típicos deste tipo de estrutura, qual critério de rejeição deve ser utilizado? Critérios rígidos implicam em aumento de custos e critérios complacentes aumentam o risco relativo à segurança.

Analisando todos os aspectos da forma como o produto, neste caso a soldagem, é colocado no mercado, é que se percebe o quanto ainda há por fazer. Mas dentre todos estes aspectos, o mais importante é a necessidade da conscientização de que estas normas e/ou procedimentos, se possíveis qualificados, devem ser utilizados em serviços e produtos de maior responsabilidade, afim de atender aos requisitos de qualidade e segurança necessários. Atualmente, muitas empresas que executam soldagens veiculares ainda não possuem em mãos normas e/ou procedimentos de inspeção, adequados e específicos para execução deste tipo de serviço. Isto também é observado nos órgãos oficiais responsáveis pela aprovação e liberação final do produto. Falta ainda uma maior conscientização quanto a necessidade de

treinamento mais qualificado da mão de obra diretamente envolvida, sejam estes soldadores ou inspetores.

Desta forma, no presente trabalho foi realizado um estudo sobre a influência de três tipos de defeitos de soldagem, de natureza geométrica, sobre a resistência à fadiga de juntas soldadas típicas de alterações veiculares. Objetivava-se a obtenção de dados técnicos para o estabelecimento de uma metodologia de inspeção destas juntas soldadas.

1.1 - Objetivos e Metodologia do Trabalho

O objetivo principal deste trabalho é estudar a influência que defeitos de soldagem, de natureza geométrica, tais como, mordedura, penetração incompleta da junta e presença de reforço excessivo do cordão de solda, causam na resistência a fadiga de uma junta de topo, correntemente utilizada nos processos de adaptação veicular. Com os resultados deste estudo pretende-se propor uma metodologia que estabeleça requisitos e critérios de aceitabilidade a serem adotados em soldagens de alterações veiculares, durante as inspeções de liberação. Um outro objetivo deste trabalho é o de gerar dados que futuramente venham a servir como subsídios técnicos para o esboço de uma norma brasileira que estabeleça critérios mínimos de qualidade a serem empregados em soldagens de alterações veiculares.

Para satisfazer os objetivos do trabalho, várias etapas foram implementadas. Na primeira etapa, foram gerados em chapas de teste os defeitos de soldagem em três níveis diferentes, além da obtenção de uma chapa de teste com um nível que não apresentasse defeito. Para a obtenção destes defeitos de soldagem foram selecionadas condições de soldagem próprias para sua geração, ou seja, uma combinação de parâmetros de soldagem com um projeto de junta favorável à obtenção dos defeitos. Após a realização das soldagens e obtenção dos defeitos, passou-se à etapa de preparação dos corpos de prova, conforme norma específica. Na última etapa do trabalho foram executados os testes de fadiga nos corpos de prova, em dois níveis de tensões diferentes, conforme um

procedimento de teste específico. Espera-se que com os resultados a serem obtidos possa-se verificar a criticidade de cada tipo de defeito.

1.2 - Apresentação da Dissertação

A redação dessa dissertação foi feita de forma a apresentar todas as etapas realizadas neste trabalho. A seguir está descrito, de forma resumida, as abordagens apresentadas em cada capítulo da dissertação.

Primeiro é mostrada a motivação para a realização deste trabalho, em seguida são listados os objetivos e metodologia empregada para a sua realização. A etapa seguinte mostra a fundamentação teórica do trabalho, onde são abordados os estudos realizados por outros pesquisadores, processos de soldagem e defeitos associados a estes processos, comportamento dos defeitos de soldagem sob carregamento cíclico, teoria de fadiga, processo de fadiga em juntas soldadas e normas que definem limites de aceitação destes defeitos. Após esta etapa, são descritos os procedimentos experimentais utilizados, tanto para a geração dos defeitos nos vários níveis definidos como para a realização dos ensaios de fadiga, a metodologia utilizada para a confecção destes defeitos, os equipamentos utilizados e os métodos de medição dos defeitos. Posteriormente, são mostrados os resultados e a discussão. As conclusões, propostas para trabalhos futuros e referências bibliográficas estão apresentadas na fase final da dissertação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Introdução

A fadiga é ainda a maior causa das falhas em serviço das estruturas (Maddox, 1995). A presença de uma solda em uma estrutura carregada ciclicamente pode reduzir drasticamente sua resistência à fadiga. As tensões de projeto dessas estruturas estão, geralmente, limitadas pela resistência à fadiga dos detalhes soldados.

O tipo de carregamento cíclico e a intensidade das tensões atuantes, ou seja a faixa de tensões operantes, são de fundamental importância em estruturas soldadas. Para a garantia da qualidade de uma junta soldada, uma avaliação criteriosa da junta soldada e do tipo de carregamento deve ser feito.

Fatores diversos podem ser responsáveis diretos ou indiretos pela ocorrência da fadiga na junta soldada, dentre estes a presença de defeitos de natureza geométrica. Estes são, geralmente, resultantes da execução de soldagens sem a utilização de procedimentos adequados. Em um procedimento de soldagem são estabelecidos o conjunto de variáveis e as condições necessárias para a execução de uma solda, de acordo com a exigência de projeto (FBTS, 1991). Um outro fator determinante na geração de defeitos de soldagem é a falta de treinamento e qualificação do soldador. O soldador deve ter a capacidade de interpretar um procedimento de soldagem e executá-lo conforme estabelecido.

A falha por fadiga poderá também ser influenciada pela presença de tensões residuais geradas durante a soldagem. Wright (1987) salienta que as tensões residuais são quase impossíveis de se evitar, pois elas são geradas pela contração sofrida pelo material durante o resfriamento do metal fundido. Uma das inúmeras formas de minimizar este efeito é utilizar a técnica de martelamento, a qual introduz na junta soldada tensões residuais compressivas, que neutralizam as tensões

residuais de tração que são nocivas. Lawrence & Munse (1973), observaram que as tensões residuais compressivas na raiz da solda, nas proximidades de um defeito de penetração incompleta da junta, reduz o valor efetivo da faixa de intensidade de tensões que agem na solda, produzindo menores taxas de crescimento de trincas.

2.2 - Processos de Soldagem

A soldagem é uma operação que visa a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades químicas e físicas (Quites e Dutra, 1979). Uma série muito grande de aplicações, desde construções de veículos espaciais, plataformas submarinas, estruturas metálicas em geral, etc., até aplicações em componentes eletrônicos, utiliza-se dos processos de soldagem. Vários são os processos de soldagem existentes e aplicáveis, e cada um destes processos de soldagem deve preencher características, tais como: gerar uma quantidade de energia capaz de unir os materiais, similares ou não; remover as contaminações das superfícies a serem unidas; evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem e propiciar o controle da metalurgia de soldagem, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas (Wainer et. al., 1992).

Porém, neste trabalho, visando o estudo de estruturas veiculares, a ênfase é dada para os processos de soldagem a arco, tais como eletrodo revestido, MIG-MAG e arco submerso, e seus respectivos defeitos.

2.2.1 - Eletrodo Revestido

O processo de soldagem com eletrodo revestido é um processo no qual a fusão dos metais é produzida pelo calor gerado no arco elétrico que é mantido entre a extremidade do eletrodo e a superfície do metal de base da junta que está sendo soldada (AWS, 1991).

Este processo é ainda um dos processos de soldagem mais utilizados, principalmente na fabricação e manutenção. Sua grande aplicabilidade deve-se às

vantagens tais como, grande versatilidade no projeto da junta, posição de soldagem, baixo custo, dispensando o auxílio de gás ou de fluxo granular para proteção do arco e podendo ser usado em áreas de acesso limitado. Porém, este processo apresenta algumas desvantagens, tais como a necessidade de mão de obra habilidosa e baixa produtividade. É o processo de soldagem mais dependente do soldador.

Descontinuidades, tais como, porosidades, inclusões de escória, fusão incompleta, mordeduras e trincas são algumas vezes encontradas em soldas feitas por este processo, se requisitos como treinamento do soldador e utilização de procedimentos de soldagens apropriados, não forem aplicados.

2.2.2 - Processo MIG-MAG

Segundo a AWS (1987), o processo de soldagem MIG-MAG é um processo de soldagem a arco no qual o eletrodo de metal é alimentado continuamente até a poça de solda. A proteção do arco é feita por meio de um gás suprido externamente. Esta proteção gasosa tem a função de proteger a poça de fusão contra o meio ambiente e ser o meio ionizante. Este processo pode ser classificado de acordo como as características do arco elétrico e do modo de transferência do material durante a soldagem (Okumura & Taniguchi, 1982). Para materiais de fácil oxidação, o gás deve ser inerte quimicamente, o que caracteriza o processo MIG (Metal Inerte Gas) e ativo para os aços, o que caracteriza o processo MAG (Metal Active Gas). O processo MIG-MAG é um processo que pode ser semi-automático ou totalmente automatizado e resulta em soldas de alta qualidade. Este processo utiliza um eletrodo de pequeno diâmetro e comprimento, alimentado continuamente e com alta densidade de corrente, proporcionando alta taxa de consumo. Diferentes combinações de gases, parâmetros de soldagem e características da fonte, proporcionam a obtenção de soldas com características bem distintas, normalmente ligadas ao tipo de transferência metálica. Transferência metálica por curto circuito, spray e pulsado são as mais usuais deste tipo de processo. O processo MIG-MAG pode ser aplicado em praticamente todos os metais (aços comum ao carbono, aços

baixa liga, cobre, titânio e suas ligas), requerendo pouca limpeza do cordão após soldado. Apresenta também algumas desvantagens, dentre as quais a necessidade da tocha estar muito próxima da junta (entre 10 e 20 mm), para garantir uma proteção apropriada. Isto poderá dificultar o acesso da tocha em algumas aplicações. O arco deve estar sempre protegido contra correntes de ar, que dispersa o gás de proteção.

Algumas das descontinuidades mais comuns que podem ocorrer no processo MIG/MAG são mordeduras, porosidades, fusão incompleta, penetração incompleta da junta, excessiva fusão lateral e trincas no metal de solda. Geralmente estas descontinuidades são o resultado da seleção inadequada dos parâmetros de soldagens, projeto e posicionamento impróprio da junta e principalmente da escolha incorreta do gás de proteção (AWS 1987).

2.3 - Defeitos de Soldagem

Nas soldagens estruturais, uma grande variedade de descontinuidades podem aparecer no cordão de solda e podem estar associados à vários causas ligadas à condições, tais como o projeto da junta soldada, processo de soldagem utilizado, procedimentos de soldagem e comportamento metalúrgico dos materiais soldados. As descontinuidades podem aparecer no metal de solda, na zona afetada pelo calor (ZAC) ou nos metais de base.

Segundo a AWS (1987), o tipo e formato da descontinuidade poderão influenciar na tensão externa aplicada em uma estrutura soldada, amplificando-a ou concentrando-a. O efeito menos prejudicial é a amplificação da tensão. As tensões são amplificadas quando as descontinuidades se apresentam no formato tridimensional, não criando quase problemas de entalhe, e esta amplificação de tensões deve-se à redução da área transversal provocada por estas descontinuidades. Porém, quando as descontinuidades se apresentam de forma planar, tais como trincas, delaminações, fusão incompleta e penetração incompleta da junta, estas criam sérios problemas de efeitos de entalhe, nos quais as tensões se concentram. Tensões de tração perpendiculares ao entalhe e tensões de

cisalhamento paralelas a estes, estão, normalmente, concentradas nas proximidades do defeito.

Este trabalho está restrito ao estudo da influência que alguns tipos de defeitos geométricos, tais como penetração incompleta da junta, mordeduras e reforço excessivo podem causar na resistência de uma junta soldada, sob carregamento cíclico. Portanto, esta revisão se concentrará nestes tipos de defeitos. No entanto, vários outros tipos de defeitos geométricos e metalúrgicos podem aparecer no cordão de solda.

2.3.1 - Penetração Incompleta da Junta

Segundo Meyers (1995), o defeito de penetração incompleta da junta é definido na norma ANSI/AWS A3.0 (1984), como sendo uma condição na raiz da junta na qual o metal de solda não estendeu-se completamente através da espessura da junta. Um desenho esquemático deste tipo de defeito é mostrado na Figura 2.1. Normalmente a penetração incompleta da junta é causada pela entrada insuficiente de calor (energia de soldagem) necessário para fundir a seção transversal da junta. Este calor ou energia de soldagem, por sua vez, é função dos parâmetros de soldagem, tais como corrente, tensão de soldagem e velocidade de soldagem. Meyers (1995), cita em seu trabalho que a velocidade de soldagem é um parâmetro importante na penetração da junta.

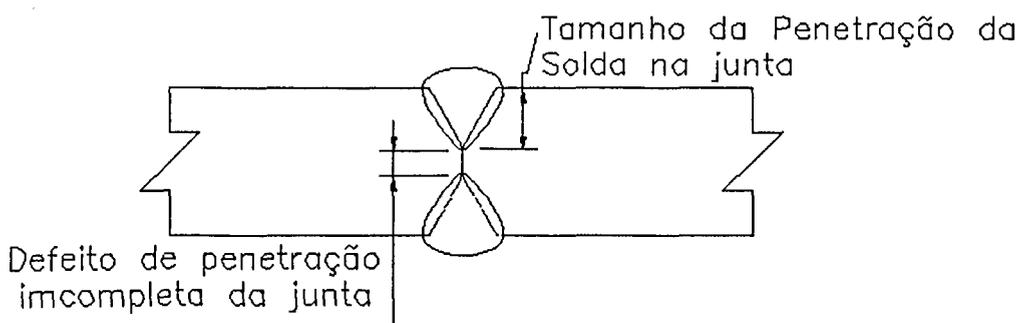


Fig. 2.1 - Penetração incompleta da junta

A velocidade de soldagem controla o nível de energia térmica transferida para a peça. O calor transferido para a peça é máximo quando a velocidade de soldagem é tal que o arco elétrico deixa de incidir diretamente sobre a poça de solda e passa a incidir imediatamente sobre o material de base, proporcionando que uma quantidade máxima de calor seja transferida para o material de base, pois a poça de solda deixa de agir como uma barreira térmica entre o arco e o material de base. Geralmente, isto ocorre em velocidades de soldagem intermediárias.

A Equação 2.1 mostra como parâmetros de soldagem, tais como corrente (I em Ampères), tensão (E em Volts) e velocidade de soldagem (S em mm/s) influem diretamente sobre a entrada de calor (HI em J/mm) na peça. Verifica-se que o aumento da tensão ou corrente provoca um aumento da energia de soldagem e um aumento da velocidade de soldagem provoca uma redução da energia de soldagem.

$$HI = (141.7E.I)/S \quad (2.1)$$

Scotti (1991) relata em seu trabalho que, na investigação da penetração em chanfro estreito pelo do processo MIG/MAG, a falta de fusão no fundo do chanfro é, na maioria das vezes, causada pela elevada posição da fonte de calor, pelo aperto das paredes laterais e pela existência de uma espessa poça fundida logo abaixo do arco, causada por uma velocidade de soldagem relativamente baixa. Em velocidades de soldagem elevadas uma maior eficiência de fundição é proporcionada, devido à maior parte do calor disponível ser consumido na formação da poça fundida e uma pequena proporção usada no aumento da temperatura do metal de base vizinho.

O defeito de penetração incompleta da junta leva à concentração de tensão local e pode ser oriundo de outras causas, além da já citada insuficiência de energia, tais como: preparação imprópria da junta, isto é, o projeto da junta não permite acesso suficiente do arco ao fundo do chanfro, ou o volume do nariz do chanfro é grande demais para ser fundido; da utilização de técnica de soldagem imprópria, como por exemplo o posicionamento inadequado do eletrodo com relação à superfície da peça. Um outro fator, talvez um dos mais relevantes na penetração de uma junta soldada, é o tipo de proteção gasosa ou revestimento; dependendo do

tipo de proteção utilizada, pode-se ter um potencial de ionização maior ou menor, o que conseqüentemente influirá na energia de soldagem transferida para a peça.

2.3.2 - Mordedura

Segundo Meyers (1995), o defeito de mordedura é definido na ANSI/AWS A3.0 (1984) como um entalhe fundido dentro do metal de base, adjacente ao pé da solda ou raiz da solda, não preenchido pelo metal de solda.

Geralmente, a presença de mordeduras está associada à técnicas de soldagens impróprias e correntes de soldagens excessivas. Devido a sua localização estar na junção da solda com o material de base, no pé ou raiz da solda, cria-se nesta interface um sério entalhe concentrador de tensões. Um desenho esquemático deste tipo de defeito é mostrado na Figura 2.2.

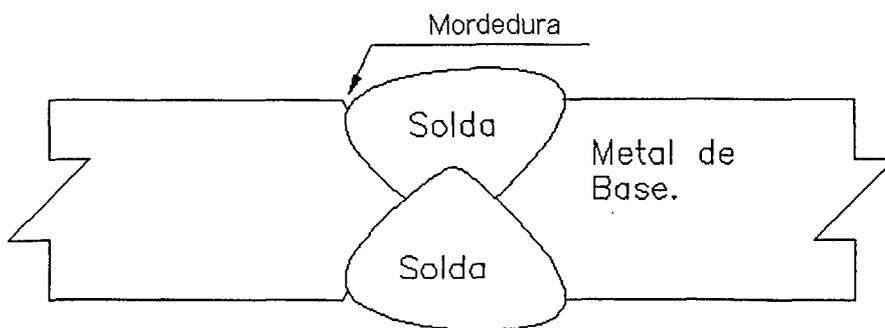


Fig. 2.2 - Defeito de Mordedura

Scotti (1991), relata que a forma e o comportamento da poça de solda, em soldagem a arco, é influenciada pela tensão superficial que geralmente determina as características geométricas do cordão de solda. Afirma também que este defeito, que margeia a zona fundida, pode ser intermitente ou contínuo ao longo do cordão de solda.

Bradstreet (1968), citado por Scotti (1991), afirma que, sob a maioria das condições de soldagem, o metal fundido sob o arco é forçado a mover-se na direção do fundo da poça, provocando o aparecimento de uma superfície sólida goivada sob o

arco. Como o metal de solda se solidifica muito rapidamente, esta reentrância não é preenchida completamente e o defeito de mordedura é criado no pé do cordão. No entanto, existe metal suficiente para preencher toda a área fundida. A solidificação inicia-se no contorno do metal fundido antes deste ter se expandido para dentro da reentrância. Propriedades físicas e metalúrgicas da superfície goivada (fluidez e molhabilidade, por exemplo) são fatores importantes que afetam a formação do defeito. Acredita que a mordedura esteja relacionada principalmente ao molhamento, isto é, a molhabilidade pode ser influenciada pela formação de óxido no metal líquido ou na parede de solidificação da região goivada, e que a tensão da superfície óxida é apreciavelmente menor que os valores para os metais correspondentes. Assim, a presença de um filme óxido na poça fundida deve melhorar a molhabilidade. Um filme óxido no metal sólido (paredes), por outro lado, deve diminuir a molhabilidade.

Outros dois fatores têm sido considerados como responsáveis pelo movimento da poça fundida e pelo aparecimento da superfície goivada. Primeiro a diferença de temperatura entre a parte da frente e a de trás da poça, alterando a tensão superficial de forma a induzir o metal fundido a fluir para a parte traseira da poça. A outra razão para o aparecimento da superfície goivada é a pressão do arco. A pressão do arco é considerada pelos autores como sendo o principal fator responsável pelo movimento da poça metálica (Scotti 1991).

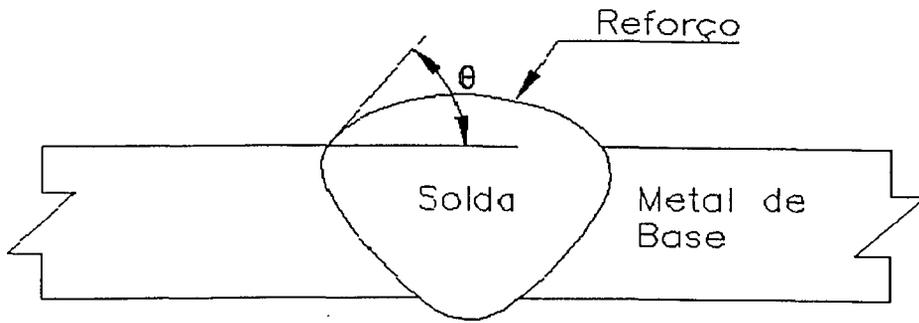
Com relação à influência dos parâmetros de soldagem no aparecimento de mordedura, Ohara et al. (1986), verificaram utilizando o arco submerso que, embora a mordedura ocorra quando a velocidade de soldagem é aumentada acima de um certo limite crítico, este limite é também influenciado por outras variáveis de soldagem. Eles mostraram o efeito da corrente e tensão de soldagem sobre a ocorrência de mordedura. O efeito da corrente de soldagem pode ser visto entre dois níveis de tensão. Quando a tensão de soldagem está abaixo de 30 V, um aumento contínuo da corrente de soldagem implica em um aumento da velocidade crítica de soldagem e conseqüente redução da ocorrência de mordedura. Ao contrário, aumentando-se a corrente de soldagem acima de 800 A em nível de tensão acima de 33 V, a velocidade de soldagem crítica diminui drasticamente aumentando-se assim a

incidência de defeito. Para uma mesma corrente, quanto maior a tensão tanto maior é a variação de mordedura.

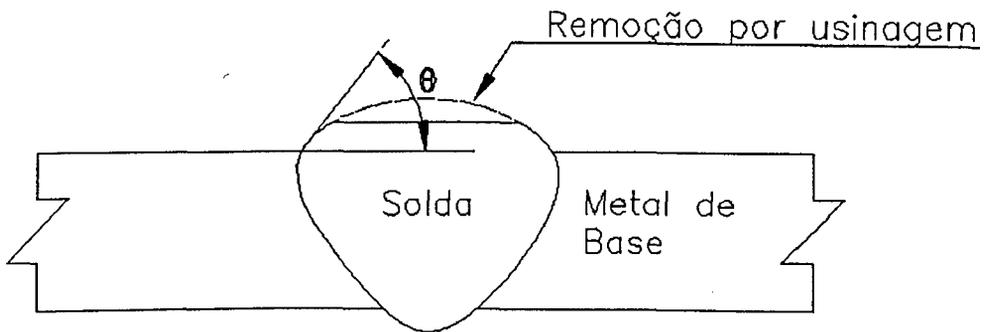
2.3.3 - Reforço Excessivo (Convexidade)

Reforço excessivo ou convexidade é definido como a distância máxima entre o topo do cordão de solda até o pé da solda (Meyers, 1995). O reforço por si só, dentro de limites de aceitabilidade estabelecidos por normas, não representa um defeito. Porém quando se apresenta de forma excessiva, ou seja, com um ângulo de contato (θ) grande, provoca uma elevada variação de seção, passando a agir como um concentrador de tensões e, conseqüentemente, como um redutor da resistência à fadiga do membro estrutural. Tensões nesta área podem, então, exceder à resistência ao escoamento do material e levá-lo até à fratura em certas aplicações (ex.: carregamento cíclico). A Figura 2.3 mostra o ângulo de contato do reforço da solda e o metal de base. A Figura 2.3a mostra que quanto maior for este ângulo mais brusca será a variação da seção. As Figuras 2.3b e 2.3c mostram duas formas de remoção do reforço do cordão de solda, caracterizando um procedimento incorreto desta remoção e o procedimento correto, respectivamente.

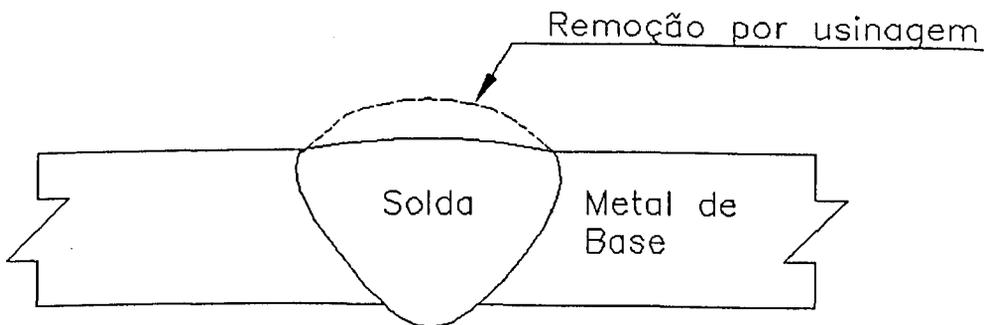
Uma forma de avaliar o reforço do cordão de solda é observar qual é o limite crítico do reforço da solda. Reforço da solda, ou convexidade, pode ser medido usando vários níveis ou padrões, normalmente o ponto mais alto do reforço da solda é usado como um critério para a determinação da aceitabilidade do mesmo. Segundo Meyers (1995), este tipo de medição torna-se sem sentido quando considerando a concentração de tensão no pé da solda. Isto é, seria mais significativo medir o ângulo que é feito entre uma linha reta tangente ao pé do cordão com a superfície do material de base, conforme mostrado na Figura 2.3a. Quanto menor for este ângulo menor é o efeito do cordão como concentrador de tensão. A altura do reforço (convexidade) é mais comumente medida, pois, uma medição exata do ângulo é mais difícil de se fazer. Este tipo de defeito pode ser observado tanto na face quanto na raiz da solda. Os efeitos são os mesmos, seja na face ou na raiz.



a) - Figura mostrando a solda com reforço excessivo



b) Tratamento impróprio do reforço



c) - Figura mostrando tratamento adequado para o reforço

Fig. 2.3 - Reforço excessivo do cordão de solda.

2.3.4 - O Efeito da Proteção do Arco de Soldagem na Geometria do Cordão

Segundo Lyttle & Stapon (1990), a proteção de um arco de soldagem tem um efeito significativo sobre a performance global do sistema de soldagem. Sua função primária é proteger o metal fundido da oxidação, desde o destacamento da gota na ponta do eletrodo até a sua deposição no metal de base. A proteção gasosa proporciona estabilidade do arco e uma transferência uniforme em conjunção com vários outros parâmetros. O tipo de proteção gasosa utilizada afeta as propriedades da solda e determina seu formato e padrão de penetração. Estas propriedades são o resultado das interações dos elementos presentes no gás de proteção e no arame eletrodo. Através do controle eficiente da transferência destes elementos pode-se obter propriedades satisfatórias e evitar descontinuidades indesejadas.

Lyttle & Stapon (1990) destacam ainda a influência de algumas propriedades inerentes dos gases de proteção. A abertura do arco, bem como a sua estabilidade, são grandemente influenciadas pelos potenciais de ionização dos componentes dos gases usados nos processos de soldagem. Uma abertura fácil e uma boa estabilidade podem resultar em uma alta qualidade dos depósitos de solda e redução de custos com limpeza devido à menor taxa de respingos. Uma outra característica importante dos gases de proteção é a sua condutividade térmica, pois quanto maior for a condutividade térmica de um gás maior será a transferência de calor para a peça, influenciando dessa forma no formato e perfil de penetração da solda. Um aumento na transferência de calor para peça promove um aumento na penetração da junta e fluidez da poça de solda.

O formato do cordão de solda é grandemente influenciado pelo tipo de gás de proteção utilizado. A Figura 2.4 mostra alguns formatos característicos de cordões de solda para vários tipos de gases e misturas.

Existem muitos exemplos da influência dos gases de proteção sob a qualidade de soldas utilizadas correntemente na indústria. Lyttle & Stapon (1990), dá um exemplo de um grande fabricante de chassis, cruzetas e componentes estruturais da indústria de automóveis e de caminhões leves, que fez uma análise sobre as operações de soldagem utilizadas no seu processo produtivo.

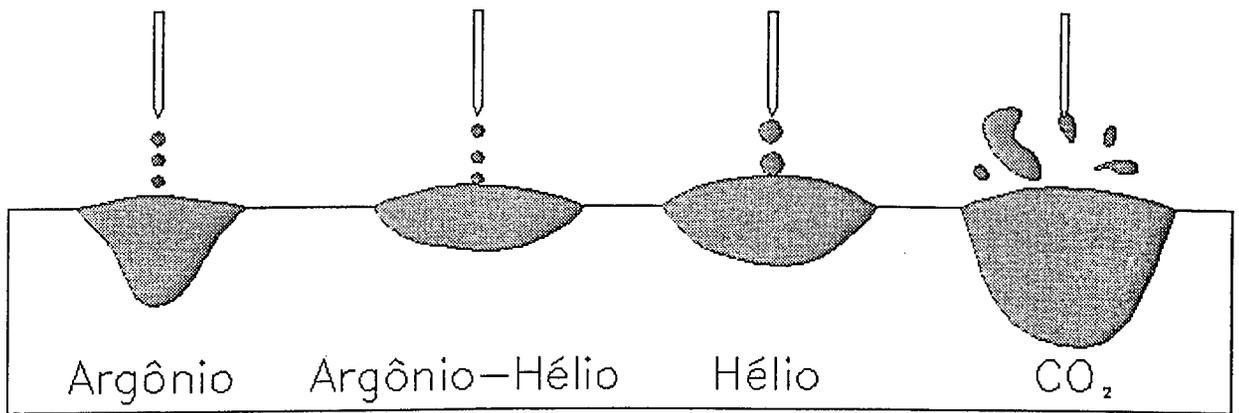


Fig. 2.4 - Formato típicos de cordões de soldas

Este fabricante utilizava 100% CO₂ como gás de proteção em suas operações de soldagens. Este tipo de proteção gasosa, há muito tempo utilizada, atendia o mercado até então, porém provocava altos níveis de respingos e de escória, proporcionando um formato pobre do cordão de solda. O fabricante resolveu, então, rever todas as operações de soldagens em busca de uma melhoria de qualidade e produtividade do seu processo produtivo. A qualidade destas soldas necessitavam, no entanto, serem melhoradas, pois não estavam mais atendendo os padrões de qualidade exigidos pelos seus clientes, face à competitividade que eles enfrentavam com fabricantes estrangeiros.

Com o objetivo de melhorar o seu processo produtivo, mantendo um nível similar de produtividade e diminuindo o nível de respingos, foram feitas investigações com gases à base de argônio, com transferência spray. Estas investigações mostraram que a melhor mistura era uma mistura de 15% de argônio-CO₂, para uma variedade de aplicações.

2.4 - Fadiga

Segundo Norton (1996), o fenômeno de falha por fadiga já vem sendo estudado por mais de um século. Relata que as primeiras investigações no que era chamado de falha por fadiga foram feitas por August Wohler, um engenheiro alemão, na década de 60 do século passado. Em suas descobertas, publicadas em

1870, identificou-se que o número de ciclos na qual a tensão variava, era o responsável pela ocorrência da falha por fadiga. A partir daí, determinou-se um limite de resistência para aços, isto é, um nível de tensão que um componente mecânico fabricado a partir do aço pudesse suportar por milhões de ciclos, em um regime de tensões completamente reversas, sem fraturar. Segundo Suresh (1991), o trabalho de August Wohler levou à caracterização do comportamento de fadiga em termos de amplitude de tensão x Vida (curvas S-N) e ao conceito de limite de resistência à fadiga. Salienta ainda que a falha por fadiga em um componente mecânico pode decorrer de várias causas diferentes, onde defeitos podem nuclear em um lugar inicialmente não danificado e propagar de uma forma estável até a falha catastrófica ocorrer. A progressão desta falha poderá ocorrer segundo causas como: mudanças subestruturais e microestruturais, criação de trincas microscópicas, crescimento e coalescência de falhas microscópicas, macrotrincas e instabilidade estrutural. Afirma também que as condições para a nucleação de microdefeitos e a taxa de crescimento da trinca são fortemente influenciados por uma larga faixa de fatores mecânicos, microestruturais e do meio ambiente a que está exposto o componente mecânico.

Shigley (1989), também afirma que as falhas por fadiga iniciam-se a partir de uma pequena trinca. A trinca inicial pode ser tão pequena que não pode ser identificada a olho nu, sendo também muito difícil sua detecção por outros meios de inspeção, tais como magnaflux ou raio X. A trinca, geralmente, desenvolve-se em um ponto de descontinuidade do material, que poderá ser uma variação abrupta na seção transversal, como um rasgo de chaveta ou um furo. Trincas poderão iniciar também em pontos tais como marcas de inspeção ou estampagem, trincas internas e irregularidades causadas por usinagem. Geralmente, estes pontos de nucleação de trincas estão localizados em regiões de concentração de tensões gerados pelos processos de fabricação. No caso da soldagem, estes pontos de concentração de tensões constituem-se em defeitos de soldagem oriundos do processo.

Com a presença de algum destes fatores citados acima, a trinca poderá nuclear e progredir. Com a progressão da trinca a área tensionada diminui em tamanho, as tensões aumentam em magnitude até que, finalmente, a área

remanescente falha subitamente. A falha por fadiga é caracterizada por duas regiões distintas, sendo uma destas regiões devido ao desenvolvimento progressivo da trinca, enquanto a outra região é devido à falha súbita. A zona de fratura súbita é muito similar em aparência com a fratura de um material frágil, como por exemplo, um ferro fundido fraturado por ensaio de tração.

As falhas por fadiga constituem um significativo custo para a economia, podendo também envolver riscos para vidas humanas (Suresh, 1991).

2.4.1 - Mecanismos de Falha por Fadiga

As falhas por fadiga sempre iniciam-se a partir de uma trinca, que pode estar presente no material desde a sua fabricação ou ter sido desenvolvida em função de um carregamento cíclico em torno de pontos de concentração de tensões, presentes no material. Todos os membros estruturais contém descontinuidades variando desde tamanhos microscópicos menor do que 0,25 mm até tamanhos macroscópicos. As descontinuidades microscópicas presentes no material são, geralmente, o conjunto de partículas e inclusões comuns em materiais de engenharia, descontinuidades estas introduzidas durante o processo de fabricação do material. As descontinuidades macroscópicas são, oriundas dos processos envolvidos na fabricação do componente (Norton 1996).

A falha por fadiga em um material metálico dúctil é caracterizada por três estágios distintos:

Estágio I - Iniciação da Trinca

Segundo Norton (1996), este estágio ocorre quando um material dúctil é submetido a um determinado ciclo de tensões, que oscila em torno de um concentrador de tensões, que pode ser uma descontinuidade microscópica ou macroscópica. Neste ponto ocorre um escoamento localizado, mesmo que as tensões nominais aplicadas sejam menores que a resistência ao escoamento do material. Isto ocorre devido à concentração de tensões provocada pelo defeito. Este

escoamento localizado causa distorção e cria bandas de escorregamento (regiões de intensa deformação devido ao movimento cisalhante) ao longo dos contornos dos cristais do material. Estas bandas de escorregamento coalescem formando trincas microscópicas. Este mecanismo também pode ser ativado, mesmo na ausência de concentradores de tensões em locais onde a resistência do material é excedida localmente. Vazios preexistentes ou inclusões servem como concentradores de tensões para iniciar a trinca. Materiais menos dúcteis não tem a capacidade de escoar como os materiais dúcteis e tendem a desenvolver a trinca mais rapidamente.

Estágio II - Propagação da Trinca

Após o término do primeiro estágio, uma microtrinca está iniciada, tornando operantes os mecanismos de mecânica da fratura. Inicia-se, então, o segundo estágio, no qual ocorre a propagação da trinca.

Um modelo de propagação da trinca, em um regime de carregamento completamente reverso, é mostrado por Dieter (1976) e Suresh (1991). Este modelo mostra como a trinca se desenvolve neste estágio. Dieter (1976) descreve este estágio como sendo o estágio no qual a trinca se propaga por um processo plástico que torna a ponta da trinca rombuda, tal como ilustrado na Figura 2.5. No início do carregamento cíclico a ponta da trinca é aguda (Figura 2.5a), a medida que o esforço de tração é aplicado, o pequeno entalhe duplo na ponta da trinca concentra o deslizamento ao longo dos planos que fazem 45° com o plano da trinca (Figura 2.5b). À proporção que a trinca se alarga para sua extensão máxima (Figura 2.5c), ela caminha ainda mais por cisalhamento plástico, ao mesmo tempo que sua ponta se torna rombuda. Quando a carga muda para compressão as direções de deslizamento na extremidade são invertidas (Figura 2.5d), as faces da trinca são compactadas e a nova superfície da trinca, criada na tração, é forçada para o plano da trinca (Figura 2.5e) onde é parcialmente dobrada por flambagem, formando uma ponta de trinca novamente aguda. Desta forma a trinca está pronta para avançar e se tornar rombuda no próximo ciclo de tensões.

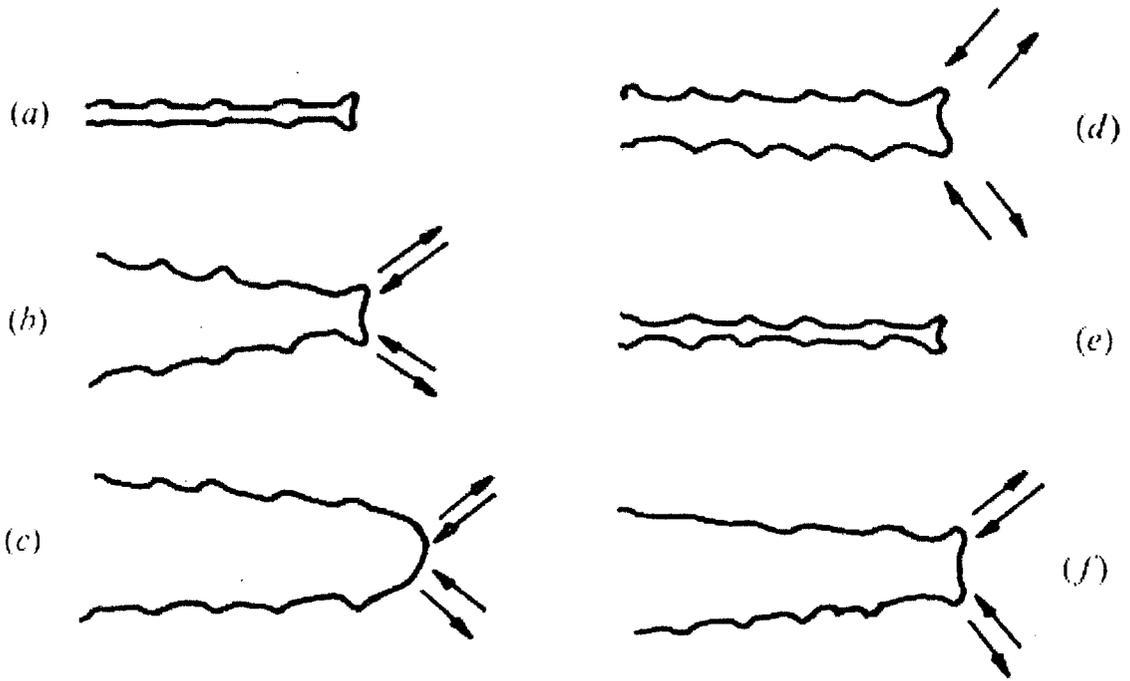


Figura 2.5 -Modêlo de propagação de trincas apresentado por Dieter(1976) e Suresh (1991)

A trinca cresce ao longo de planos normais de tração máxima. É por esta razão que a falha por fadiga é atribuída às tensões de tração, embora as tensões cisalhantes iniciem o processo em materiais dúcteis. Tensões cíclicas que são compressivas não causam o crescimento da trinca quando tendem a fechar a trinca, Norton (1996).

Estágio III - Fratura

A ruptura final estática ocorre quando a trinca atinge um tamanho crítico, tal que a seção transversal resistente não pode mais suportar a carga que está sendo aplicada. Isto é, em um determinado ponto, o tamanho da trinca torna-se grande, o suficiente, fazendo com que o fator de intensificação de tensão K na ponta da trinca se iguale ao limite de tenacidade do material (K_c) e a falha súbita ocorre instantaneamente no próximo ciclo de tração, Norton (1996).

2.4.2 - Regimes de Fadiga

O regime de fadiga para um determinado material é baseado no número de ciclos de tensões ou deformações que o material pode suportar em trabalho, Norton (1996). Dependendo do número de ciclos suportados, a fadiga pode ser classificada em fadiga de baixo ciclo ou fadiga de alto ciclo. A transição dos regimes de fadiga, isto é, de fadiga de baixo ciclo para fadiga de alto ciclo e deste para o regime de vida infinita, não são ainda claramente definidos. Alguns autores definem que esta transição do regime de fadiga de baixo ciclo para o regime de fadiga de alto ciclo ocorre em torno de 10^3 ciclos.

A outra região de transição, isto é, a região onde o material passa de vida finita para vida infinita, não ocorre para a maioria dos materiais, mas é comum a todos os materiais ferrosos. Segundo Shigley (1989) esta região situa-se em algum lugar entre 10^6 e 10^7 ciclos para os aços, ou seja, a resistência à fadiga é usualmente constante além de 2 milhões de ciclos.

2.4.3 - Teorias de Falhas por Fadiga

A natureza da falha por fadiga, pode ser explicada utilizando-se duas abordagens diferentes, que são : Teoria tensão-vida (S-N) e Teoria deformação-vida (ϵ -N).

Por causa da iniciação da trinca envolver escoamento, a abordagem baseada em tensões não pode modelar adequadamente este estágio do processo. A abordagem deformação-vida (ϵ -N) é, então, mais freqüentemente utilizada para explicar o estágio de iniciação da trinca. É utilizada em problemas de vida finita, isto é em situações de fadiga de baixo ciclo, onde as tensões cíclicas são bastante altas, o suficiente para causar o escoamento local na região de falha. As condições para ocorrência de fadiga de baixo ciclo são freqüentemente criadas quando as tensões repetidas são de origem térmica. Uma vez que as tensões térmicas devem-se à expansão térmica do material, verifica-se facilmente que a fadiga resulta de deformação cíclica em vez de tensão cíclica (Dieter 1976).

A teoria tensão-vida é uma das mais velhas abordagens e uma das mais utilizadas para aplicações de fadiga de alto ciclo. Esta abordagem é um modelo baseado em tensões, o qual procura determinar a resistência à fadiga e/ou um limite de tolerância para um material, de modo que as tensões cíclicas possam permanecer abaixo deste nível e evitar falhas para um determinado número de ciclos (Norton 1996). Este modelo baseia-se numa relação entre a vida tolerada por um determinado material com as tensões que estão sendo aplicadas.

O limite de resistência à fadiga de um material pode ser determinado, submetendo corpos de prova a um carregamento cíclico uniaxial em vários níveis de tensões diferentes até a ocorrência de falha por fadiga. Plotando-se os resultados de tais testes para diferentes níveis de tensão, obtém-se as curvas tensão-vida, também chamadas curvas S-N ou curvas de Wohler. Este diagrama, normalmente, é plotado em uma escala logarítmica, e a curva obtida pode ser aproximada por uma reta. A ordenada do diagrama S-N é chamada de resistência à fadiga para vida finita, S_f . No caso de metais ferrosos e suas ligas, o gráfico torna-se horizontal após o material ter sido tensionado por um determinado número de ciclos. Abaixo deste ponto a falha por fadiga não ocorrerá, independente do número de ciclos. A resistência correspondente a este valor é chamada de limite de resistência à fadiga para vida infinita, S_e . A região a partir do ponto onde o gráfico corta o eixo das ordenadas para uma vida de 10^3 ciclos, corresponde à região de fadiga de alto ciclo. Quaisquer componentes mecânicos que sejam submetidos a uma tensão de trabalho entre o limite de resistência à tração e o limite de resistência à fadiga, sob condições de carregamento cíclico, poderão falhar por fadiga, pois estarão dentro da zona de vida finita. Com estas curvas, pode-se, então, caracterizar os regimes de fadiga para determinado material e calcular a vida que um determinado componente mecânico poderá suportar em trabalho.

Na inexistência de tais curvas para um determinado material e aplicação, as mesmas podem ser estimadas, com base na relação entre o limite de resistência à tração e limite de resistência à fadiga em corpos de prova padronizados. As resistências à fadiga obtidas desde corpos de prova ensaiados à fadiga ou obtidos através de estimativas baseadas em testes estáticos, devem ser corrigidos devido

às diferenças físicas existentes entre amostras de testes e componentes que estão sendo projetados. Fatores de correção tais como acabamento, tipo de carregamento, temperatura, concentração de tensão e outros devem ser levados em conta. A partir destes fatores de correção e do limite de resistência à tração do material, S_{ut} , pode-se estimar o limite de resistência à fadiga do material. A resistência do material em 10^3 ciclos é chamada de S_m . Segundo Norton (1996), dados de testes indicam que estimativas de S_m para as seguintes condições de testes são aceitáveis.

$$\text{Teste executado em flexão rotativa :} \quad S_m = 0,9 S_{ut} \quad (2.2)$$

$$\text{Teste executado com carregamento axial :} \quad S_m = 0,75 S_{ut} \quad (2.3)$$

A partir de dados, tais como, S_m , S_e ou S_f , pode-se escrever a equação da reta que representa o comportamento da resistência à fadiga de determinado material como:

$$\log S_f = \log a + b \log N \quad (2.4)$$

onde S_f é a resistência à fadiga para um dado numero de ciclos, a e b são constantes definidas pelas condições de contorno.

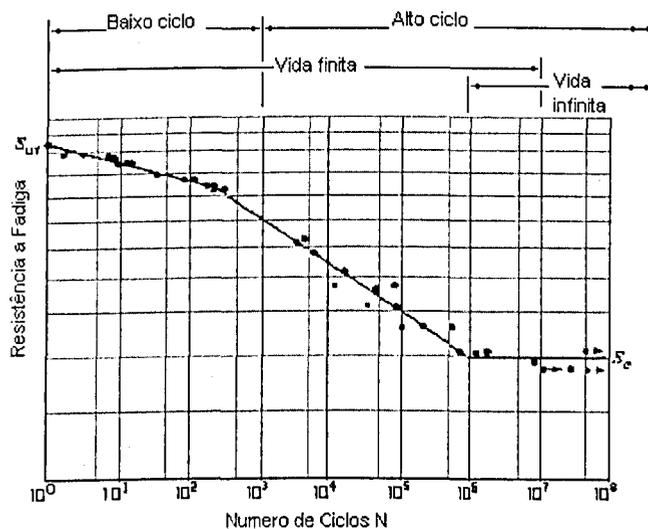


Fig. 2.6 - Curva S-N para o aço AISI 4130, com carregamento axial e reverso completo, Norton (1996).

A Figura 2.6 mostra uma curva característica para aços, obtida de forma experimental para um aço AISI 4130, com carregamento axial com reverso completo, mostrando os intervalos de transição de fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo bem como o limite de resistência à fadiga. A Figura 2.7 mostra duas curvas S-N estimadas a partir de S_f , S_e e S_f para dois materiais diferentes.

2.4.4 - Ensaio de Fadiga

Segundo Norton (1996), atualmente existem várias técnicas de testes diferentes para o propósito de levantar o comportamento dos materiais quanto às variações de tensões e deformações com o tempo. Estas variações determinam o comportamento de fadiga dos materiais testados. Dentre estes testes, destacam-se o teste de flexão rotativa, testes de fadiga axial, testes de fadiga torsional e teste de flexão em viga engastada. O teste mais popular é o teste de flexão rotativa. É também a técnica de teste que mais gerou dados/informações sobre a resistência à fadiga dos materiais. Com menores quantidades de dados estão os testes de fadiga com carregamento axial, seguidos de testes de fadiga com carregamentos torsionais.

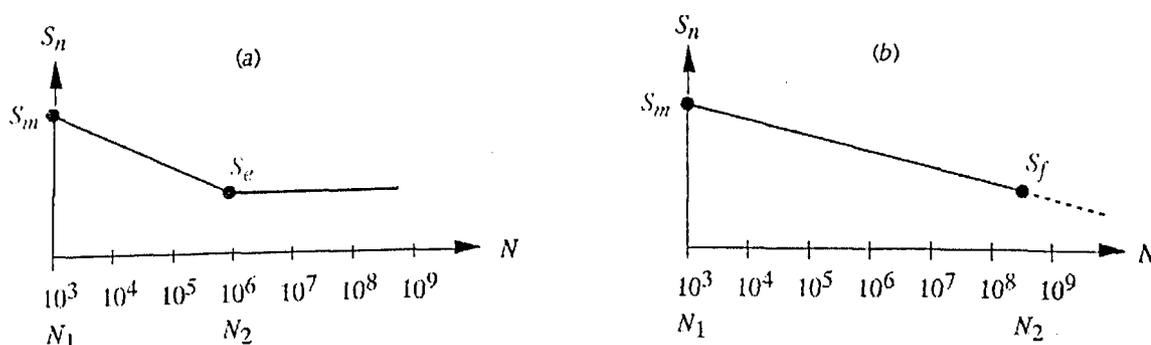


Fig. 2.7 - Curvas S-N estimadas. a) material com patamar de vida infinita (metais ferrosos e titânio); b) materiais sem patamar de vida infinita (alumínio, etc.) Norton (1996).

Ensaio de fadiga com carregamento axial é uma das formas de levantar o diagrama S-N para um determinado material. Este tipo de ensaio é executado utilizando-se um equipamento de teste servo-hidráulico, o qual permite a programação do tipo de carregamento desejado, incluindo um carregamento com reverso completo. A diferença principal para o teste de flexão rotativa é que no teste com carregamento axial e reverso completo, a seção transversal do corpo de prova é uniformemente tensionada em tração e compressão, proporcionando uma maior distribuição de tensões. Os resultados obtidos, a partir de tais ensaios, podem ser utilizados como um guia para a seleção de materiais metálicos a serem utilizados em serviços sob condições de tensões axiais repetidas (Norton, 1996).

2.5 - Falha por Fadiga em Estruturas Soldadas

O comportamento da resistência dos metais sob carregamento cíclico é um importante aspecto que deve ser avaliado em estruturas, principalmente as que possuem juntas soldadas. Falhas por fadiga em juntas soldadas, ocorrem quando os mecanismos de falha tornam-se operantes.

Segundo Okumura & Taniguchi (1982), o estudo da resistência à fadiga das juntas soldadas é bem mais complexo do que o do material de base, devido ao maior número de fatores que influenciam no processo de fadiga em uniões soldadas. Afirma também que, no caso de juntas soldadas, a resistência à fadiga depende grandemente do tipo, da geometria e da própria qualidade da solda, enquanto que o limite de fadiga do metal de base guarda uma correspondência com a resistência estática do material. Essa diferença é comprovada face à grande dispersão observada nos resultados de ensaios de fadiga efetuados em juntas soldadas. De acordo com a AWS (1987), a performance de fadiga de um determinado componente é mais dependente do estado de tensões localizado do que da resistência estática do metal de base ou do metal de solda. Afirma também que dois fatores primários que influenciam na resistência à fadiga de um componente soldado são a faixa de tensões aplicada e os detalhes de projeto do componente. Lewis (1996) confirma que características do material, isto é, sua

resistência à tração e seu limite de escoamento não apresentam um efeito significativo sobre a performance de tais juntas. Maddox (1985) declara que as resistências à fadiga de juntas soldadas são independentes da resistência à tração do material.

O crescimento da trinca não ocorre quando o balanço líquido de tensões em sua extremidade é compressivo. A trinca pode iniciar devido às altas tensões residuais de tração, originárias do processo de soldagem, que serão aliviadas com a formação da trinca. Dessa forma, se as tensões aplicadas são compressivas, não haverá progressão da trinca até um comprimento crítico.

O projeto de estruturas soldadas, sujeitas a carregamentos cíclicos, deve seguir uma norma padrão, que seja aplicável à situação. As alterações em uma determinada estrutura, devem-se basear nos detalhes de projeto, principalmente quando nestas alterações forem introduzidas juntas soldadas, o que torna a região mais susceptível à ocorrência de uma falha por fadiga.

Dependendo da natureza e orientação do carregamento imposto na junta soldada, a trinca por fadiga poderá iniciar em alguns locais. Mas o local mais provável é o pé da solda, pois ele representa uma região de severa concentração de tensão, particularmente devido à variação abrupta da seção nesta região. Uma outra razão é a presença, nos aços, de defeitos agudos na forma de intrusões não metálicas que, geralmente, se localizam nesta região. Trincas por fadiga iniciam-se rapidamente desde tais defeitos, tornando praticamente desprezível a parte da vida gasta na iniciação da trinca, o que contrasta com o comportamento de fadiga de materiais planos (Maddox 1995). Atwa (1992) cita em seu trabalho que a vida gasta na iniciação e na propagação da trinca por fadiga de soldas de topo são reduzidas devido à defeitos de falta de penetração em torno de 5 a 10%.

2.6 - Fatores que Influenciam na Resistência à Fadiga de Juntas Soldadas

Uma estrutura soldada está, normalmente, sujeita à presença de defeitos de soldagem, sejam estes macroscópicos ou microscópicos. Exemplos de descontinuidades macroscópicas são os defeitos de soldagem de natureza

geométrica, tais como reforço excessivo, mordeduras e penetração incompleta da junta. Quaisquer defeitos, desta natureza, presentes em um componente mecânico e submetidos a um carregamento cíclico podem alterar a distribuição de tensões na região do defeito e na sua vizinhança, tanto que as equações elementares de tensão não mais descrevem o estado de tensões no componente. Tais descontinuidades são chamadas de concentradores de tensão, e as regiões onde elas ocorrem são chamadas de áreas de concentração de tensão (Shigley, 1988).

Segundo Rading (1993) descontinuidades microscópicas, ou seja, microimperfeições arredondadas, tais como porosidades, inclusões de escória, etc. que se colocam no caminho da propagação de uma trinca por fadiga (mas excluindo as microtrincas de solda) provocam a perda da agudeza da extremidade da trinca, conseqüentemente, reduz a intensificação das tensões, resultando em menores taxas de crescimento da trinca.

Xiliun (1989) relata que, nos elementos soldados, as trincas por fadiga usualmente iniciam ao longo do pé da solda e, então, propagam-se para dentro da zona afetada pelo calor (ZAC). Relata também que a vida suportada pelo material até a ocorrência da falha por fadiga, particularmente a vida gasta na iniciação da trinca por fadiga dos elementos soldados, é governada por fatores tais como concentração de tensão induzida pela presença do reforço da solda, defeitos de soldagem, tensões residuais, pela variação da microestrutura e alteração das propriedades mecânicas do metal no pé da solda.

Neste item está descrito, de forma resumida, como estes fatores influenciam na resistência à fadiga das juntas soldadas. Fatores, tais como, defeitos de soldagem, tensões residuais, mudanças microestruturais, acabamento superficial e corrosão serão abordados. Estes fatores podem provocar na região soldada, mais especificamente no pé da solda, concentrações de tensões tão elevadas que podem exceder a resistência ao escoamento do material.

2.6.1 - Concentração de Tensão em Função de Defeitos de Soldagem

O fator de concentração de tensão K_t é usado para relacionar as tensões máximas atuantes em uma descontinuidade às tensões nominais. O subscrito "t", significa que o fator de concentração de tensão depende somente da geometria da peça. Este fator é definido pela Equação 2.5.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad (2.5)$$

A análise das formas geométricas para determinar os fatores de concentração de tensão, em defeitos de juntas soldadas é um problema difícil de se resolver, face às diferentes geometrias apresentadas por cada tipo de defeito. No entanto, alguns estudos sobre este assunto já foram feitos por alguns pesquisadores. Gosch & Petershagen (1996) idealizaram uma geometria aproximada do defeito de mordedura, em uma junta soldada de topo, e identificaram todos os parâmetros geométricos que poderiam influenciar no cálculo do fator de concentração de tensão para o mesmo. Com a realização dos cálculos, eles chegaram a conclusão de que os parâmetros geométricos que influenciam no fator de concentração de tensão são: a profundidade da mordedura, o raio da raiz da mordedura e altura do reforço do cordão de solda. A partir daí, formularam equações para a obtenção de K_t , em função destes três parâmetros geométricos.

A determinação do fator de intensificação de tensão (K_I) nos corpos de prova com penetração incompleta da junta, submetidos à esforços axiais, pode ser estimado pela Equação 2.6 (Suresh 1991), já que este tipo de defeito é similar a uma trinca como mostrada na Figura 2.8.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Esta equação estima o fator de intensificação de tensões para uma trinca central de comprimento de comprimento $2a$ em uma placa de largura W , a qual é submetida a uma tensão de tração (σ) aplicada na extremidade da peça, conforme mostrado pela Figura 2.8.

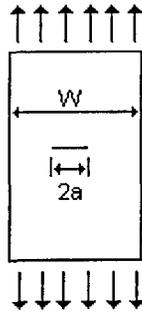


Fig. 2.8 - Corpo de prova com uma trinca central e submetido à tensões axiais

2.6.2 - Influência de Mudanças Microestruturais, Acabamento e Corrosão.

Segundo Easterling (1983), os processos de soldagem consistem na união de duas ou mais partes metálicas através da utilização de energia térmica. Estas partes metálicas são aquecidas até o seu ponto de fusão e então resfriadas rapidamente, sob condições de restrições impostas pela geometria da junta. O material adjacente à zona de soldagem é, então, exposto a um severo ciclo térmico e à transformações metalúrgicas complexas, alterando a microestrutura e as propriedades mecânicas iniciais do material de base. Esta região do metal, ou zona, que sofreram estas alterações é normalmente designada de zona afetada pelo calor (ZAC). A ZAC pode ser dividida em várias sub-zonas, dependendo do material que está sendo soldado. Cada sub-zona apresenta uma microestrutura diferente e, conseqüentemente, propriedades mecânicas diferentes. A região de ligação da zona fundida com a zona afetada pelo calor apresenta uma microestrutura grosseira onde a trinca por fadiga pode desenvolver-se com mais facilidade.

O acabamento superficial do componente mecânico soldado é um outro fator significativo para a resistência à fadiga. Uma junta soldada onde não é promovido um acabamento superficial adequado, como por exemplo, a remoção do reforço do cordão de solda e possíveis mordeduras que se localizam no pé do cordão, terão sua resistência à fadiga diminuída em função destes defeitos. Segundo Norton (1996), quanto pior for o acabamento superficial, maiores serão as imperfeições

superficiais que atuam como concentradores de tensão. Um acabamento rugoso pode além de introduzir concentrações de tensões, alterar as propriedades físicas das camadas superficiais do material, diminuindo, dessa forma, a resistência à fadiga do material. Em virtude disso, há a necessidade, no cálculo da resistência à fadiga de uma união soldada, levar em conta o tipo de acabamento da mesma. Materiais de resistência mais elevada são mais sensíveis à concentrações de tensões introduzidas por irregularidades superficiais.

Norton (1996), salienta que a corrosão é um outro fator que pode acelerar o crescimento da trinca, porque a frequência de ciclagem das tensões passa a ter um efeito significativo. Frequências menores permitem o meio agir por mais tempo na extremidade da trinca tensionada enquanto ela é mantida aberta em função das tensões de tração e isto aumenta substancialmente a taxa de crescimento das trincas por ciclo.

2.7 - Ciclo de Tensões em Fadiga

Segundo Okumura & Taniguchi (1982), O ciclo de tensões presentes em um determinado componente são geralmente caracterizados pelos níveis de tensões máximas e mínimas atuantes. Muitas aplicações práticas de engenharia e ensaios de fadiga específicos em materiais de engenharia, podem envolver diferentes ciclos de tensões. A partir da magnitude destas tensões e da razão entre a tensão mínima e tensão máxima é possível, através de formulações, calcular a resistência à fadiga permissível para um determinado material. A determinação prática da tensão máxima, que ocorre em um carregamento repetido, não é tão simples, pois, regra geral, o modo de variação de solicitações repetidas em uma estrutura é bastante aleatório. Muitas vezes as tensões flutuam sem passar através do zero. No entanto, a determinação do limite de fadiga de um determinado material, ou de um junta soldada, é estimado, solicitando-se corpos de prova a carregamentos cíclicos padronizados. A Figura 2.9 ilustra os ciclos de tensões que podem ocorrer. Os componentes de tensão que caracterizam estes ciclos e que devem ser considerados na avaliação das tensões flutuantes são:

$\sigma_{\text{mín.}}$ = Tensão mínima; $\sigma_{\text{max.}}$ = Tensão máxima; σ_a = Amplitude de tensão

σ_m = Tensão média; σ_r = Faixa de tensões

Estas componentes de tensões podem ser relacionadas pela seguintes expressões:

$$\sigma_m = \left(\frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} \right) \quad (2.7)$$

$$\sigma_a = \left(\frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min.}}}{2} \right) \quad (2.8)$$

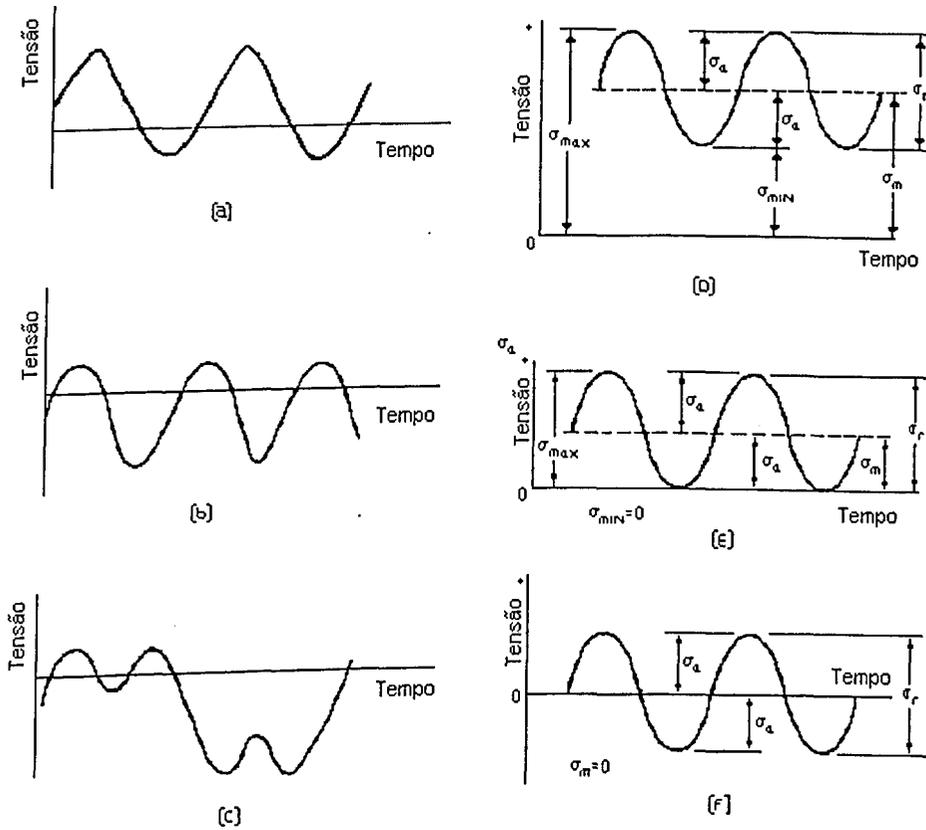


Fig. 2.9 - Ciclos de tensões

Segundo Shigley (1989), apesar de algumas das componentes de tensão terem sido definidas usando-se uma relação tensão/tempo de forma senoidal, o formato exato da curva parece não ser de significância relevante.

Além disso, as relações de tensões, mostradas abaixo, podem ser usadas para apresentação dos dados de fadiga.

$$R_t = \frac{\sigma_{max.}}{\sigma_{min.}} \quad (2.9)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.10)$$

Onde R_t é chamado de razão de tensão e A é a razão de amplitude.

2.8 - Tensões Residuais de Soldagem em uma Junta de Topo

A soldagem é um processo de fabricação que naturalmente induz tensões residuais durante a fabricação de estruturas, e estas tensões serão mais ou menos críticas dependendo da presença ou não de restrições nas partes a serem soldadas. Tensões residuais em juntas soldadas são causadas pela contração do material de solda e deformação plástica produzida no metal de base próxima à solda durante a soldagem (Masubachi, 1996). Em virtude disto, as tensões residuais podem ser classificadas em: a) tensões residuais de soldagem produzidas em soldagens de membros não restringidos e b) tensões residuais de reação causadas por restrição externa. Em função do carregamento imposto na estrutura soldada, estas tensões poderão ser prejudiciais e em alguns casos benéficas para a resistência à fadiga, dependendo de seu sentido (tração ou compressão) e de sua direção.

De acordo com a AWS (1987), em uma soldagem de topo, a distribuição típica de ambas as tensões residuais transversais e longitudinais em um passe simples de solda podem ser representadas, conforme mostrado na Figura 2.10. As tensões principais são aquelas paralelas à direção de soldagem, designadas por σ_x , e aquelas transversais à solda, designadas por σ_y , como mostrado na Figura 2.10a.

A distribuição das tensões residuais longitudinais, σ_x , é mostrada na Figura 2.10b. Elevadas tensões residuais de tração são geradas nesta direção, em uma região próxima à solda. Elas decrescem rapidamente até zero por uma distância várias vezes a largura do metal de solda. Mais adiante as tensões residuais são compressivas em natureza. A distribuição de tensões é caracterizada por duas variáveis: a máxima tensão residual na região da solda, σ_m , e a largura da zona de tração das tensões residuais, b . Nas soldas feitas em aços de baixo carbono, a tensão residual máxima, σ_m , é usualmente tão alta quanto a resistência ao escoamento do metal de solda.

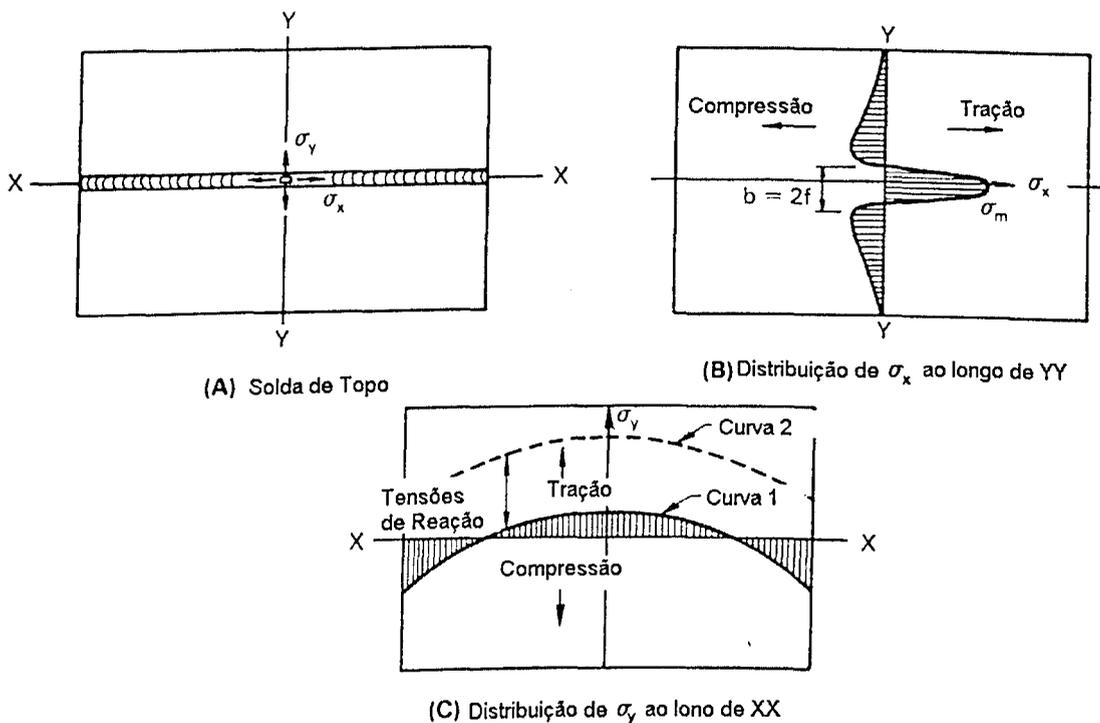


Fig. 2.10 - Distribuição de tensões ao longo dos eixos do cordão de solda.

A presença ou não de uma restrição determinará a magnitude das tensões residuais transversais σ_y , ao longo do comprimento da solda. As curvas 1 e 2 mostradas na Figura 2.10c mostram a distribuição de tensões em um membro não restringido e em um membro restringido, respectivamente. Verifica-se que a magnitude das tensões residuais é aumentada na soldagem de membros

restringidos. Este aumento deve-se à soma de tensões de reação às tensões residuais de soldagem.

2.9 - Normas e Padrões de Soldagem

Defeitos aceitáveis e não aceitáveis variam de uma norma (código) para outra. Por isso, é importante estudar os efeitos destes defeitos sobre a integridade de juntas soldadas, e quando possível estabelecer um critério para situações não cobertas por estas normas, como por exemplo em uma determinada aplicação específica.

Muitas normas de qualidade em soldagem são, geralmente, editadas e/ou revisadas com a finalidade de atender necessidades específicas impostas pelo mercado. Estas necessidades levam, quase que obrigatoriamente, ao estabelecimento de novos padrões de qualidade, ligados à critérios de inspeção, níveis de defeitos, característica da junta soldada e tipo de carregamento, se estático ou de natureza cíclica. Um exemplo deste tipo de aplicação é relatado por Feder (1996) em um trabalho que discute um sistema de níveis de qualidade para soldas, aplicado em equipamentos de mineração a céu aberto. Este trabalho discute a elaboração de um esboço de norma, criado por uma associação de indústrias alemãs, que decidiram transformar a norma existente em uma norma DIN, segundo as regras determinadas pelo mercado comum europeu.

Segundo Feder (1996), o esboço desta norma, a DIN 22261, baseou-se numa coletânea de várias normas anteriores, editadas por autoridades de mineração. No caso desta norma, as tensões permissíveis de fadiga oriundas de recomendações do IIW foram vinculadas a um sistema de níveis de qualidade de soldas, baseado em diferentes tipos de defeitos aceitáveis e pela prescrição da quantidade de ensaios não destrutivos, normalmente utilizados neste tipo de avaliação. Uma outra norma, a DIN 8565 - Parte 3, também citada por Feder (1996), tem a mesma finalidade, porém esta norma não quantifica valores para as irregularidade (descontinuidades) de soldagens, descrevendo somente impressões

visuais da qualidade da solda. Na prática, estes tipos de avaliações são insuficientes, pois levam à uma grande margem de incertezas.

Foi proposto um sistema de avaliação, composto por 5 níveis de qualidade, designado desde 0 (zero), o nível mais elevado, para soldas de topo com penetração total e com superfície usinada, sem reforço, até 4 o nível mais baixo. O nível 2 é considerado como qualidade padrão. Os vários níveis de aceitabilidade introduzidos nesta norma tiveram como finalidade, estabelecer uma banda de aceitabilidade em função do grau de solicitação a que está sendo submetido determinada parte da estrutura, visto que estruturas de grande porte possuem uniões soldadas com graus de solicitação estática e cíclica de magnitudes diferentes. O objetivo era, então, permitir a aprovação de soldas que se enquadrassem em um níveis de qualidade menos severos, sem a necessidade de executar reparos na união soldada, os quais poderiam piorar a performance de fadiga da união soldada. Estes cinco níveis de qualidade foram vinculados à cinco níveis de tensões de fadiga permissíveis para cada detalhe estrutural. Observa-se então que este sistema de qualidade relacionou o tamanho do defeito com os níveis de tensões impostas nas estruturas soldadas.

Abaixo estão apresentadas as recomendações estabelecidas por algumas normas, com relação à aceitabilidade de defeitos em estruturas soldadas de topo, submetidas à carregamento cíclico.

2.9.1 - Código da ANSI/AWS - D1.1-96

Este código contém requisitos para a fabricação de estruturas soldadas. Em sua seção referente à inspeção estabelece critérios para qualificação e responsabilidade dos inspetores, critérios de aceitabilidade para produção de soldas e procedimentos padrões para a execução de inspeção visual e realização de ensaios não destrutivos.

A aplicação deste código não é recomendada para as seguintes condições:

- Aços com uma resistência ao escoamento maior do que 690 MPa .
- Aços com espessura menor do que 3.2 mm (1/8 in.).

- Vasos de pressão ou tubulação de pressão.
- Metais de base a não ser aços carbono e aços de baixa liga.

A parte C deste código (Requisitos específicos para conexões não tubulares carregadas ciclicamente) aplica-se somente à membros não tubulares e conexões sujeitas a cargas cíclicas de frequência e magnitude suficientes para iniciar trincas e propagá-las até a falha por fadiga. Este faz uma classificação de categorias de tensões em função do tipo de perfil soldado e tipo de carregamento. Faixas de tensões permissíveis (fadiga) para estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos são mostradas, em função do tipo de ligação soldada e das condições aplicáveis de vida cíclica. Foram extraídos, destes código, dois exemplos de ligações soldadas que são classificadas em uma mesma categoria de tensão, "B". A Figura 2.11(a) mostra uma junta soldada de topo com carregamento de tração-compressão, e a Figura 2.11(b) mostra um perfil soldado submetido à esforço de flexão.

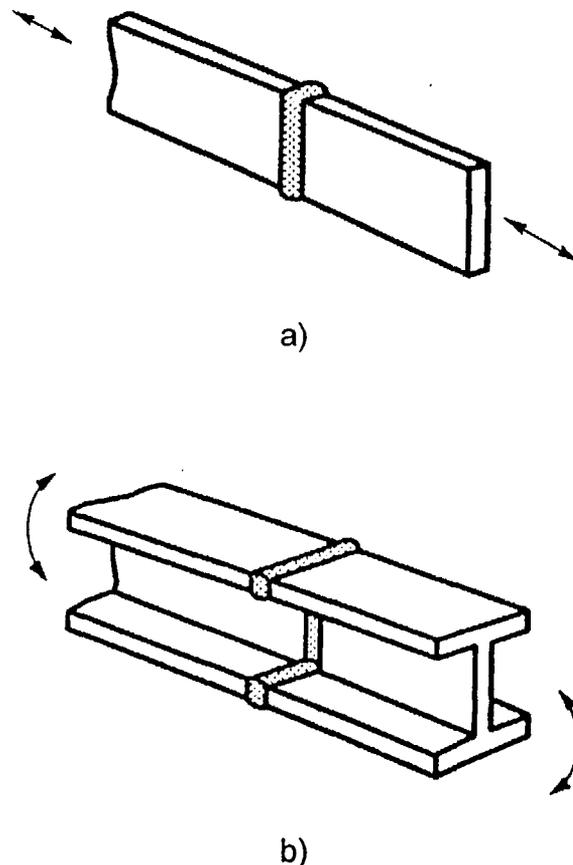


Fig. 2.11 - Exemplos de perfis soldados de topo. a) Chapa retangular solicitada axialmente; b) Perfil "I" com solicitação de flexão, AWS (1996).

A representação gráfica das curvas S-N, mostrada na Figura 2.12, estabelece faixas de tensões de projeto para as categorias de A até F para estruturas secundárias. Estas categorias de A até F representam o tipo de ligação soldada e o tipo de esforços a que estão submetidas.

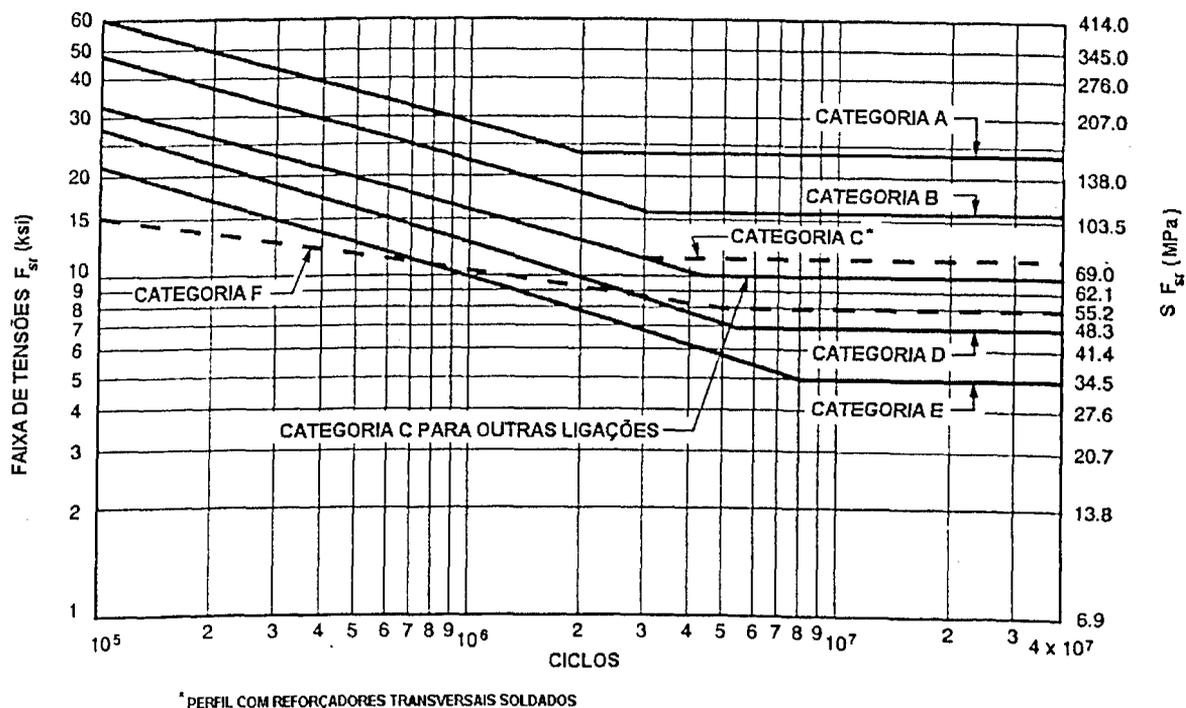


Fig. 2.12 - Curvas de faixas de tensões de projeto para categorias A até F de estruturas secundárias (não tubulares), AWS (1996).

O código da AWS (1996), estabelece os critérios de aceitação para inspeção visual e inspeção através de ensaios não destrutivos de conexões tubulares e não tubulares carregadas estaticamente e ciclicamente e determina que todas as soldas devem ser inspecionadas visualmente e devem ser aceitas se os critérios de inspeção estabelecidos forem atendidos. Estabelece também que para conexões não tubulares carregadas ciclicamente as soldas não devem ter trincas.

Com relação ao perfil do cordão de solda, ou seja a altura do reforço, esta norma estabelece que soldas de chanfro ou topo podem ser feitas com reforço mínimo, salvo se especificado ao contrário. No caso de juntas de topo de placas com espessuras iguais ou juntas em ângulo, o reforço da face não deve exceder

3 mm na altura. Todas as soldas devem ter uma transição gradual para o plano do metal de base, com áreas de transição livres de mordeduras, exceto quando permitido por este código.

Com relação à presença do defeito de mordedura este código estabelece que em membros primários, mordeduras não podem ser maiores do que 0,25 mm de profundidade quando a solda é transversal às tensões de tração sob qualquer condição de carregamento. Mordeduras não podem ser maiores do que 1 mm de profundidade para todos os outros casos.

Este código cita algumas recomendações a serem seguidas, quando da necessidade de se reforçar ou reparar uma estrutura existente. Para isto, as modificações a serem feitas devem alcançar os requisitos de projeto inicialmente especificados pelo engenheiro. Em um projeto visando o reforço e/ou reparo de uma estrutura, o engenheiro deverá fazer várias considerações. Dentre estas, deverá ser feita uma análise das tensões atuantes na área afetada, isto é, deve ser feito um levantamento da história do carregamento inicial da estrutura e quando não for possível, ele deve ser estimado, além de outras considerações. Quanto à qualidade, todos os membros e soldas afetadas pelo trabalho devem ser visualmente inspecionados de acordo com um plano de inspeção abrangente. O método, extensão e critérios de aceitação de ensaios não destrutivos devem estar especificados em documentos de contrato.

2.9.2 - Norma da ANSI/AWS D8.8-89 (SAE HS J1196)

O propósito desta especificação é prover requisitos de qualidade mínimos necessários para a soldagem automotiva e estabelecer limitações para vários tipos de descontinuidades de soldagem encontradas. É uma norma aplicável para projeto e fabricação de carros de passageiros, caminhões e estruturas veiculares similares. Cobre a soldagem de aços carbono sem revestimento, incluindo aços de alta resistência e baixa liga sem revestimento.

A qualidade das soldas prescrita para defeitos geométricos tais como mordeduras, reforço excessivo e penetração incompleta, a não ser que sejam especificados de forma contrária, devem seguir as seguintes recomendações:

mordeduras excedendo uma profundidade de 10% da espessura do material mais fino envolvido, numa distância de 13 mm a partir de cada extremidade da solda, não são permissíveis e mordeduras excedendo uma profundidade média de 20% da espessura do material mais fino em qualquer outra localização não são permissíveis. Com relação ao perfil da solda esta norma estabelece que, para soldas com juntas de topo, nenhum limite deve ser colocado com relação à altura do reforço ou convexidade da solda, se todos os outros requisitos da norma forem satisfeitos e as partes soldadas permaneçam funcionais, atendendo aos requisitos de especificação. Quanto à presença de defeito de penetração incompleta da junta não são admissíveis, ou seja, o tamanho efetivo da solda deve ser igual ou exceder a nove por cento (9%) da espessura do material mais fino que está sendo unido.

2.9.3 - DOC. IIS/IIW-778-83

Este documento é uma recomendação que define três classes de qualidade/requisitos com relação a defeitos geométricos em juntas soldadas. As classes de qualidade relatam o número e tamanhos dos defeitos geométricos, conforme classificação determinada pela ISO 6520 (1982). Esta recomendação é destinada a ser usada para o controle de qualidade de produtos oriundos de processos de soldagem a arco, mecanizados ou manuais, de aços ligados e não ligados. Porém, não é destinado e não deve ser usado como um código de projeto.

Para certos tipos de defeitos, diferentes limites tem sido definidos, em função do defeito ser local ou contínuo. Nesta avaliação, todos os defeitos não excedendo os limites de defeitos contínuos podem ser desconsiderados (IIW, 1983). Os defeitos restantes devem ser locais e eles não devem exceder os limites para defeitos locais.

Conforme estabelecido neste documento do IIW (1983), os limites de qualidade são baseados na altura total do defeito. Salvo os casos em que requisitos mais severos forem definidos. A altura dos defeitos, a qual, reduz a área da seção transversal da junta, não devem exceder:

- Requisitos moderados: 30 por cento da espessura nominal da solda, mas não mais do que 10 mm.

- Requisitos médios: 25 por cento da espessura nominal da solda, mas não mais do que 10 mm.
- Requisitos severos: 20 por cento da espessura nominal da solda, mas não mais do que 10 mm.

Para os defeitos de soldagem de natureza geométrica tais como penetração incompleta da junta, mordedura e reforço excessivo, estes limites são definidos pelo IIW (1983) conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Requisitos de qualidade para defeitos geométricos (Doc. IIS/IIW-778-83)

Tipo de defeito	Comentários	Limites para altura do defeito: requisito		
		Moderado	Médio	Severo
Penetração incompleta da junta	Aplica-se para soldas de topo em juntas de topo, de canto ou T. Se a espessura da solda prescrita for menor do que a espessura da chapa, a altura do defeito é a diferença entre a espessura da solda e a espessura nominal.	Defeitos contínuos detectáveis não são permitidos. Defeitos locais são permitidos se altura for menor do que 2 mm, mas não mais que 20% da espess. da chapa	Defeitos contínuos detectáveis não são permitidos. Defeitos locais são permitidos se a altura não exceder 1,5 mm, mas não mais do que 10% da espess. da solda	Defeitos detectáveis não são permitidos
Mordedura	-	A altura de defeitos contínuos não deve exceder a 0,6 mm. A altura de defeitos locais não deve exceder a 1 mm	A altura de defeitos contínuos não deve exceder 0,4 mm. A altura de defeitos locais não deve exceder 0,6 mm.	A altura de defeitos contínuos não deve exceder a 0,2 mm. A altura de defeitos locais não deve exceder a 0,4 mm.
Reforço excessivo, solda de topo	-	A altura do reforço não deve exceder 10 mm, mas não mais do que 1 mm + 25% da largura do reforço da solda	A altura do reforço não deve exceder 7 mm, mas não mais do que 1 mm + 15% da largura do reforço da solda.	A altura do reforço não deve exceder 5 mm, mas não mais do que 1 mm + 10% da largura do reforço da solda.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Introdução

O desenvolvimento experimental deste trabalho baseou-se na geração de defeitos comuns de soldagem, tais como, penetração incompleta da junta, mordedura e reforço excessivo do cordão de solda. Estes defeitos foram simulados em três diferentes níveis (tamanhos). As soldagens foram executadas de topo, simulando-se uma junta típica utilizada em alterações de chassis de veículos de carga. Estas foram executadas utilizando-se o processo MIG-MAG em uma fonte eletrônica de soldagem. Inicialmente foi feito um levantamento, em literaturas de soldagem, das condições de soldagem que poderiam influenciar na geração de cada tipo de defeito que se desejava simular. A partir disto, foi estabelecido um procedimento experimental para a simulação de cada tipo de defeito. Segue-se agora uma descrição detalhada dos equipamentos, metodologia e procedimentos experimentais utilizados.

3.2 - Equipamentos

3.2.1 - Sistema de Soldagem

O sistema de soldagem utilizado neste trabalho, é composto por uma fonte de soldagem, pelos dispositivos de soldagem responsáveis pela movimentação e posicionamento da tocha de soldagem e pelo sistema de aquisição e tratamento de dados. A seguir será feita uma descrição detalhada de cada componente deste sistema.

Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem utilizada foi uma fonte eletrônica que permite a soldagem em vários processos, tais como, MIG-MAG, TIG, Plasma e Eletrodo revestido, comercialmente denominada de inversal 300. O nome inversal designa a característica inversora e universal da fonte. O numero 300 está relacionado com o valor em ampères da corrente máxima que a fonte pode operar, com fator de serviço igual a um (1). O valor da corrente máxima para a fonte é da ordem de 450 A. Os dados técnicos da fonte estão mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dados técnicos da fonte

Voltagem	220, 380 ou 440 V Trifásica
Tensão em vazio	56 V
Corrente	Contínua ou alternada (constante ou pulsada)
Corrente nominal	300 A
Potência máxima consumida	12 kw
Fator de potência	0,94

Dispositivos de Soldagem

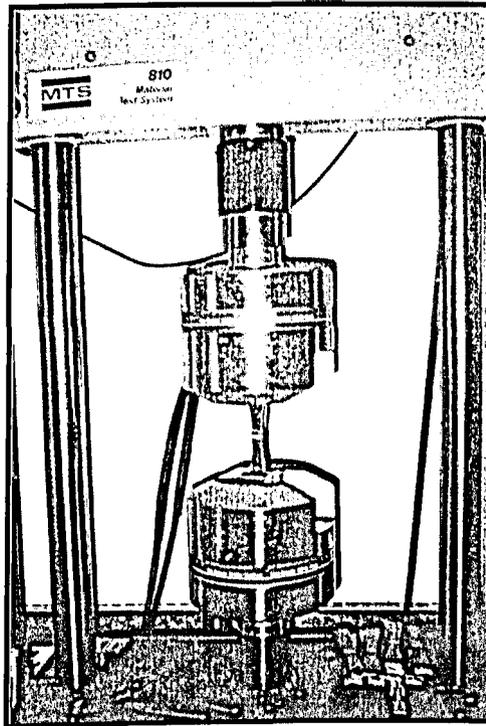
Foram utilizados dois dispositivos de soldagem agregados à fonte de soldagem. Estes dispositivos foram desenvolvidos, anteriormente, pelo Laprosolda-UFU. O primeiro dispositivo é um sistema de movimentação da tocha de soldagem, composto por uma mesa acionada por um fuso. Uma unidade eletrônica de controle da velocidade de soldagem, está ligada a um motor de passo responsável pelo acionamento do fuso. Nesta unidade faz-se, facilmente, a seleção da velocidade de soldagem empregada durante a soldagem. O segundo dispositivo está acoplado ao primeiro. Este é um dispositivo onde é feita a fixação e posicionamento da tocha de soldagem, permitindo a inclinação desejada da tocha, sua movimentação vertical e ajuste da distância do bico de contato até a peça.

Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados

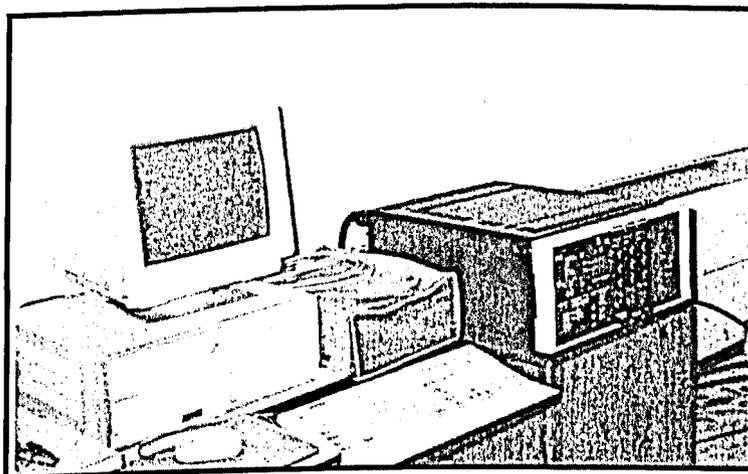
Juntamente com o sistema de soldagem foi montado o sistema de aquisição e tratamento de dados. Este sistema é composto por uma placa de aquisição de dados instalada em um microcomputador e um programa de aquisição e tratamento de dados. Nesta placa são adquiridos os sinais de tensão e corrente para um determinado tempo de soldagem. O tratamento dos dados obtidos é feito através de um programa específico denominado de UBMIG, desenvolvido pelo Labsolda/UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina). Este recurso facilitou a seleção de parâmetros de soldagem que foram utilizados na confecção dos defeitos.

3.2.2 - Equipamento para Ensaio de Fadiga

O equipamento utilizado para a execução dos ensaios de fadiga nos corpos de prova foi um sistema universal de testes de materiais, modelo MTS 810. Este sistema é composto por uma unidade de carga de capacidade máxima de carga de 250 KN, projetado para executar todos os testes mecânicos típicos de tração, compressão, flexão e fadiga, definidos pela ASTM, SAE, DIN, dentre outras normas. Este equipamento é uma unidade servo-hidráulica comandada por um controlador específico, que permite selecionar, em função do tipo de teste que se deseja realizar, a grandeza a ser controlada. O sistema também é dotado de uma placa de controle e aquisição de dados, instalada em um microcomputador. O controle e a aquisição de dados foi feita através de um programa específico do sistema. A Figura 3.1 mostra o sistema universal de testes MTS 810.



(a) Unidade de carga (garra/célula de carga)



(b) Sistema de aquisição de dados e o controlador

Fig. 3.1 - Sistema universal de testes de materiais MTS 810

3.3 - Metodologia

Para a obtenção dos defeitos de soldagem foram manipuladas condições de soldagem, tais como parâmetros de soldagem e projeto da junta de soldagem. Todas as condições utilizadas para geração de cada tipo de defeito estão descritas em procedimentos específicos.

Para verificar a influência do tamanho de cada defeito sobre a propriedade à fadiga, criou-se um critério subjetivo para dividir os defeitos em diferentes níveis. Cada nível corresponde à uma determinada faixa de tamanho de defeito. A definição destes níveis baseou-se em níveis de aceitabilidade definidos por outras normas (AWS.1989 e 1996). Para cada tipo de defeito foi estabelecido três níveis, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Níveis de defeitos

Níveis (1, 2, 3 e 4)	Tipo de defeito (mm)		
	Mordedura	Reforço excessivo	Penetração. incompleta
1	$M = 0,00$	$R \leq 1,00$	$PIJ = 0,00$
2	$0,00 < M \leq 0,75$	$1,00 < R \leq 3,00$	$0,00 < PIJ \leq 2,00$
3	$0,75 < M \leq 1,25$	$3,00 < R \leq 4,00$	$2,00 < PIJ \leq 3,00$
4	$1,25 < M \leq 2,00$	$R > 4,00$	$PIJ > 3,00$

Onde: M = Mordedura; R = Reforço excessivo e PIJ = Penetração Incompleta da Junta.

Para cada tipo de defeito foram soldadas quatro chapas de teste, sendo três chapas de testes soldadas com diferentes níveis de defeito e uma chapa de teste correspondendo ao nível 1, ou seja, à uma junta soldada sem defeito.

As propriedades mecânicas do material utilizado foram levantadas por meio de ensaios de tração. Os resultados estão mostrados no item 3.4. Ensaios de tração também foram executados em corpos de prova com defeito de penetração incompleta nos seus vários níveis. A finalidade destes ensaios de tração foi verificar a resistência mecânica da junta soldada, com presença de defeitos, à esforços estáticos. Estes ensaios de tração foram realizados somente para o defeito de

penetração incompleta da junta, pois este apresentou uma maior redução na área da seção resistente da junta soldada.

Os ensaios de fadiga foram executados em controle de carga segundo um procedimento específico.

3.4 -Materiais e Dimensões

3.4.1 - Chapas de teste:

As chapas de teste foram confeccionadas a partir de barras de ferro chato, laminado a quente, aço ABNT 1020, com dimensões de 250x102x9,5 mm. Perfis com esta especificação e espessura são normalmente utilizados no alongamento de chassis de caminhões e adaptações de terceiro eixo em veículos de carga. As propriedades mecânicas deste material estão mostradas na Tabela 3.3, e foram obtidas através de ensaio de tração em corpos de prova padronizados, conforme estabelece a norma da ABNT - NBR 6152 (1992).

Tabela 3.3 - Propriedades Mecânicas do Metal de Base

Aço ABNT 1020 Laminado a Quente	
Limite de escoamento :	300,00 N/mm ²
Limite de resistência a tração :	465,00 N/mm ²

3.4.2 -Consumíveis de Soldagem

Os consumíveis de soldagem utilizados foram especificados em função do material de base utilizado nas soldagens e do tipo de defeito que se desejava obter. A especificação do arame eletrodo foi a mesma para todas as soldagens, variando-se somente o diâmetro de uma aplicação para outra. Dois tipos de gás de proteção diferentes foram utilizados. Na tabela 3.4, abaixo, estão especificados os consumíveis de soldagem utilizados.

Tabela 3.4 - Especificação dos Consumíveis de Soldagem

 Arame eletrodo : ASME SFA 5.18/92 AD.93 ER 70S-6
Gás de proteção : 100% CO₂Gás de proteção : 75%Ar +25%CO₂

3.5 - Procedimento para Obtenção do Defeito de Penetração Incompleta da Junta

Para a simulação do defeito de penetração incompleta da junta, foi utilizado uma junta em duplo V, com variação da altura do encosto (face de raiz). O encosto do chanfro foi variado em 4 tamanhos (níveis) diferentes, sendo o nível 1 correspondente a uma junta sem raiz. O objetivo do nível 1 é o de gerar juntas soldadas sem a presença de quaisquer tipos de defeitos. Os níveis 2, 3 e 4 correspondem à uma junta com face de raiz de 2.5, 3.5 e 4.5 mm, respectivamente. A Figura 3.2 mostra o parâmetro geométrico "e" que variou para a geração de cada nível de defeito.

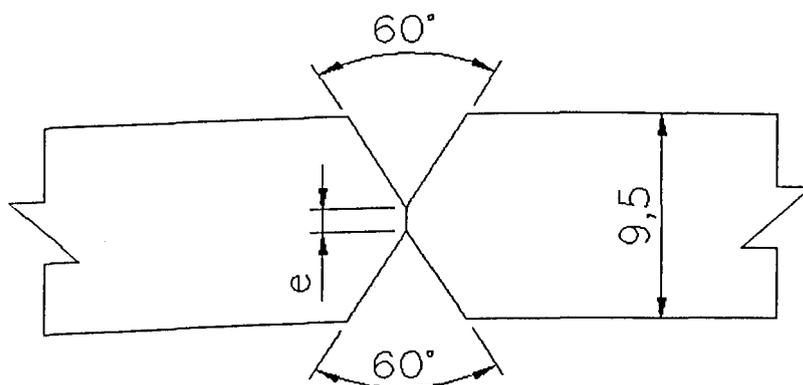


Fig. 3.2 - Projeto da junta utilizada para simulação do defeito de penetração incompleta da junta.

Para a execução das soldagens, foi utilizada uma proteção gasosa com 100% de CO₂ e um eletrodo de diâmetro de 1 mm. Em cada lado da chapa de teste foi dado um passe de solda, o qual foi suficiente para preencher todo o volume do

chanfro, sem falta de fusão em qualquer das paredes do chanfro, evitando, dessa forma, a presença de outros tipos de defeitos. Os parâmetros de soldagem foram mantidos praticamente constantes na execução de todos os níveis deste defeito. A variação na altura do encosto garantiu os diferentes níveis de falta de penetração.

Para evitar a sobreposição do efeitos do reforço sobre o defeito de penetração incompleta, as duas faces da junta foram usinadas. Outra preocupação tomada foi a de verificar se a redução da seção transversal da junta soldada devido aos diferentes níveis de penetração incompleta poderia comprometer a resistência mecânica (estática) da junta soldada. Para isto, ensaios de tração também foram realizados nos corpos de prova com defeitos de penetração incompleta da junta, em todos os seus níveis. Os resultados estão mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Resistência a tração de juntas com defeito de Penetração Incompleta da Junta

Corpo de prova	Tam. do Defeito (mm)	Resistência a Tração (MP _a)	Local da fratura
410	0,00	463,57	MB
212	1,61	471,11	MB
113	2,69	464,06	MB
114	3,20	459,81	S

Onde: MB = Metal de Base e S = Solda

Para a seleção dos parâmetros de soldagem, uma série de testes foram realizados, variando-se a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação do arame. A proteção gasosa e a taxa de fluxo do gás também tiveram um efeito pronunciado sobre as características do arco de soldagem, principalmente na penetração e perfil do cordão. Esta influência foi verificada durante as soldagens e através da análise das seções dos cordões de solda. Os parâmetros de soldagem utilizados na simulação deste defeito estão mostrados na Tabela 3.6. Como pode ser verificado estes parâmetros permaneceram praticamente constantes nas soldagens de todos os níveis de defeitos.

Tabela 3.6 - Parâmetros de Soldagem para Simulação de defeito de penetração incompleta da junta

Passo	Chapa	Nível	DBCP (mm)	Vref. (volts)	Valim. (m/min)	Vsold. (cm/min)	I _m . (A)	V _m . (volts)
1	1	2	12	22	8.0	40.0	186.0	22.4
2	1	2	12	22	8.0	40.0	189.0	22.3
1	2	3	12	22	7.8	40.0	181.0	23.3
2	2	3	12	22	7.8	40.0	178.0	23.2
1	3	4	12	22	8.0	40.0	168.0	22.2
2	3	4	12	22	8.0	40.0	176.0	22.3

3.6 - Procedimento para Obtenção do Defeito de Mordedura

A obtenção do defeito de mordedura em níveis fez-se através da utilização de um projeto de junta específico, da variação dos parâmetros de soldagem e do posicionamento da tocha de soldagem. A geração natural do defeito de mordedura, nos níveis requeridos neste trabalho, mostrou-se muito difícil de ser obtida, mesmo utilizando o processo de soldagem por arco submerso. Em face de tais dificuldades, a simulação deste defeito foi feita de uma forma não convencional, porém com as características e a criticidade que o defeito apresenta.

Para a simulação do defeito de mordedura também foi utilizada uma junta em duplo V, este procedimento teve como objetivo minimizar o empenamento provocado pela soldagem. O projeto da junta está mostrado na Figura 3.3 e foi mantido constante para todos os níveis deste defeito. Observa-se neste projeto de junta que uma das faces da junta foi usinada com um ângulo de abertura maior (45°). Esta característica da junta, juntamente com o deslocamento progressivo do eletrodo em relação à linha central da junta, foi o procedimento adotado para a geração do defeito de mordedura em um dos lados do pé do cordão, em profundidades diferentes. Este entalhe foi gerado na face com maior ângulo de abertura. A preparação da junta em V foi idêntica para os dois lados da chapa (formando um duplo V). Este procedimento foi adotado como segurança, isto é, se a geração do defeito de soldagem não alcançasse o tamanho desejado, teria-se a possibilidade de gerá-lo do outro lado da chapa. Nas soldagens foi utilizado um arame eletrodo de diâmetro de 1 mm com uma proteção gasosa (75%Ar + 25%

CO₂) e foram executadas nos dois lados da chapa de testes. Tal como o defeito de penetração incompleta, o reforço excessivo do cordão de solda foi usinado. Esta usinagem se deu somente na face oposta à presença do defeito. A Figura 3.4 mostra um desenho esquemático deste tipo de defeito.

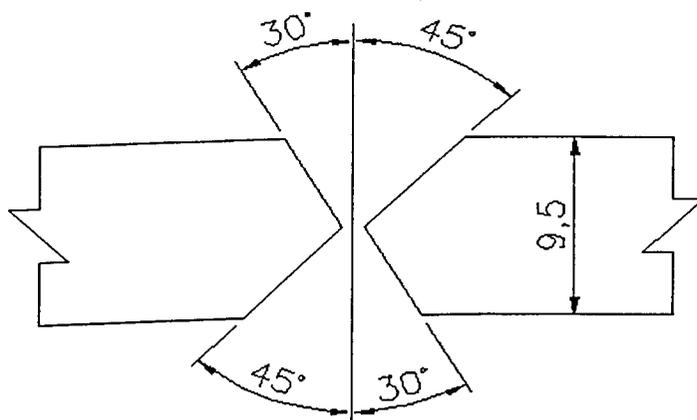


Fig. 3.3 - Projeto da junta utilizado na simulação do defeito de mordedura

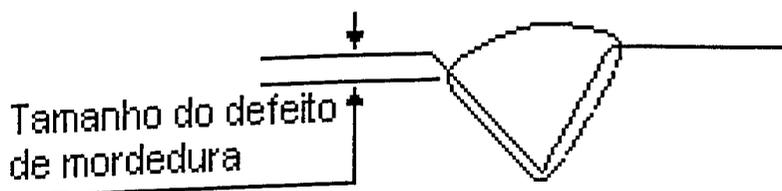


Fig. 3.4 - Simulação do defeito de mordedura

A Tabela 3.7 mostra os parâmetros de soldagem utilizados na simulação de cada nível deste defeito.

Tabela 3.7 - Parâmetros de soldagem utilizados na simulação do defeito de mordedura

Passe	Chapa	Nível	DBCP (mm)	Vref. (volts)	Valim. (m/min)	Vsold. (cm/min)	I _m . (A)	V _m . (volts)
Verso	1;2;3 e 4	N1/N2/N3/N4	12	22	6,0	19,0	166	21,8
Principal	1	N1	12	22	6,0	19,0	167	21,8
Principal	2	N2	12	22	6,0	20,0	165	21,9
Principal	3	N3	12	21	6,1	25,2	168	20,9
Principal	4	N4	12	21	6,1	25,0	167	20,9

3.7 - Procedimento para Obtenção do Defeito de Reforço Excessivo

O reforço excessivo do cordão de solda é considerado como sendo uma defeito, pois provoca uma variação muito brusca da seção na região soldada. Neste trabalho, este tipo de defeito foi simulado, basicamente, através da variação dos parâmetros de soldagem. Para todos os níveis de reforço simulado foi mantida praticamente a mesma largura do cordão. Para a simulação do defeito de reforço excessivo foi utilizada uma junta em duplo V. A Figura 3.5 mostra o projeto de junta utilizado na simulação deste do defeito de reforço excessivo.

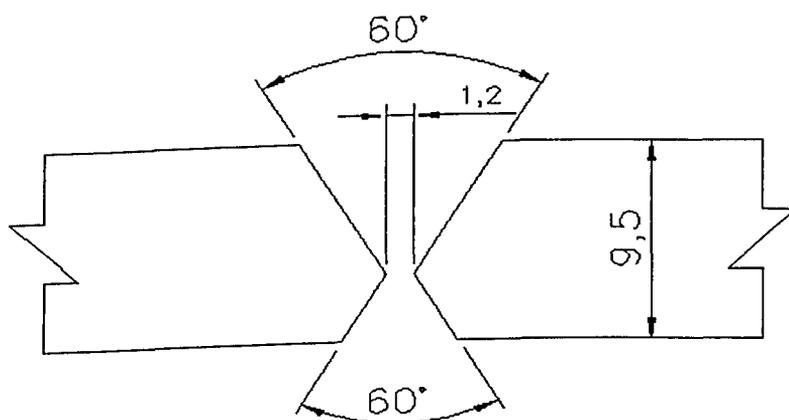


Fig. 3.5 - Projeto da Junta utilizado para simulação de reforço excessivo no cordão de solda

Este defeito foi obtido através de dois passes de solda em um dos lados da chapa de teste. Do outro lado foi dado somente um passe de solda, e o excesso de metal de solda foi retirado através de usinagem. As soldagens foram feitas de forma que fosse alcançada penetração total da junta. As diferentes alturas de reforço foram obtidas variando-se parâmetros de soldagem, tais como, a velocidade de soldagem e a tensão de soldagem. Foi utilizada uma proteção gasosa de 75%Ar + 25%CO₂ e um arame eletrodo de diâmetro de 1,2 mm.

Os parâmetros de soldagem variaram em função do nível de defeito desejado. Três passes de solda foram dados para a obtenção de reforço nos níveis 2, 3 e 4. Para o nível 1 foram necessários somente dois passes de solda. Este nível foi simulado praticamente sem reforço. A Tabela 3.8 mostra os parâmetros de soldagem utilizados para os quatro níveis de reforço. O primeiro e segundo passes foram comuns para todos os níveis, o terceiro passe foi dado para gerar o reforço do cordão de solda para os níveis 2, 3 e 4. Os níveis 3 e 4, por não terem alcançado a altura desejada e por apresentarem o defeito de sobreposição, foram repetidos.

Tabela 3.8 - Parâmetros de Soldagem - Simulação de defeito de reforço excessivo

Defeito	Chapa	Nível	DBCP (mm)	Vref. (volts)	Valim. (m/min)	Vsold. (cm/min)	I _m . (A)	V _m . (volts)
R (passe 1)	1;2;3 e 4	N1/N2/N3/N4	12	23	4,5	30	192	23,1
R (passe 2)	1;2;3 e 4	N1/N2/N3/N4	15	22	5,0	25	187	22,0
R (passe 3)	2	N2	15	22	5,0	25	186	22,0
R (passe 3)	3	N3	15	19,5	5,0	20	175	20,6
R (passe 3)	3 (repet.)	N3 (repet.)	15	22	5,4	21,5	187	22,3
R (passe 3)	4	N4	15	17,5	5,0	17,5	178	18,1
R (passe 3)	4 (repet.)	N4 (repet.)	15	19,5	5,0	18,5	184	19,4

3.8 - Corpo de Prova

Para o estabelecimento dos corpos de prova utilizados neste trabalho, levou-se em conta o tipo de equipamento de teste, sua capacidade, o tipo de teste de fadiga que seria executado e a forma na qual o material estava disponível. Em função de todas estas condições, os corpos de prova foram estabelecidos de acordo com a norma de ensaio de fadiga ASTM E466 (1996), e foram usinados em uma plaina copiadora, segundo um modelo previamente preparado, contendo todas dimensões e geometria estabelecidos pela norma. A Figura 3.6 mostra uma representação esquemática do corpo de prova e suas dimensões.

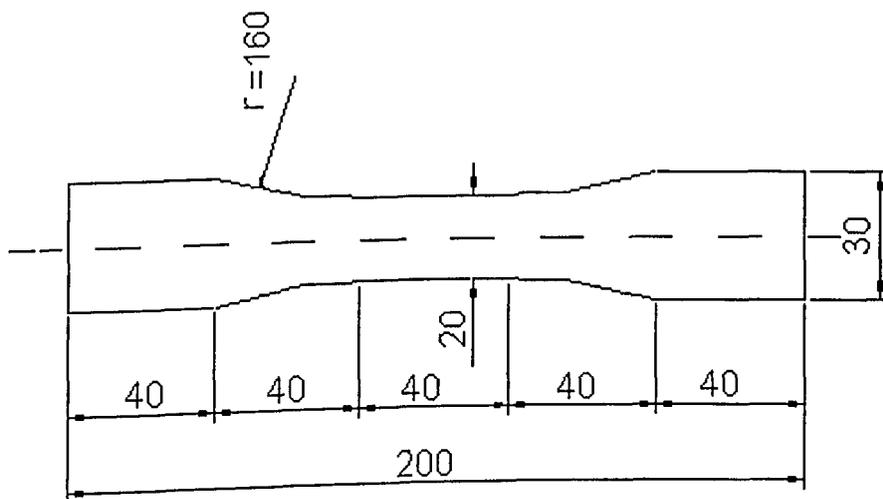


Fig. 3.6 - Corpo de prova para ensaio de fadiga

Os corpos de prova para o ensaio de fadiga foram retirados na direção normal ao cordão de solda. A Figura 3.7 mostra a disposição dos corpos de prova e das amostras das seções das soldas, retiradas das chapas de teste para a análise da seção transversal do cordão de solda.

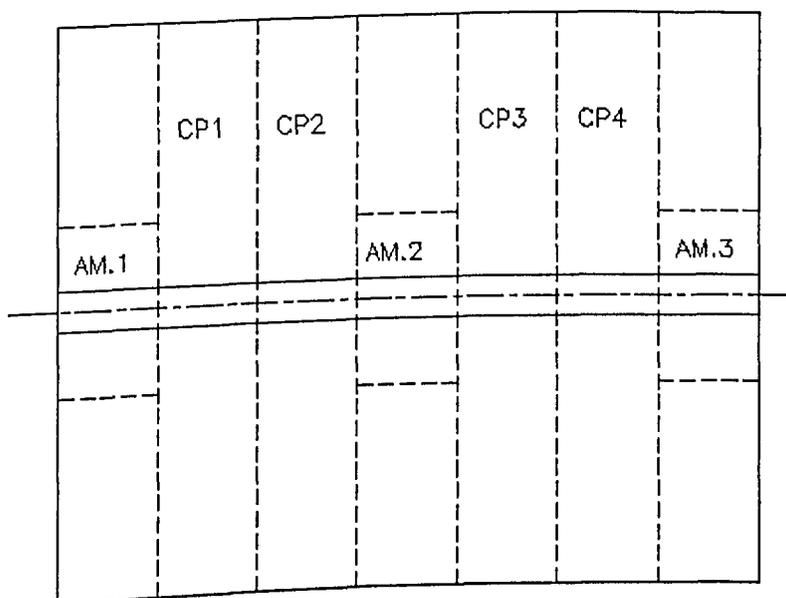


Fig. 3.7 - Chapa de teste

3.9 - Execução dos Testes de Fadiga

Os testes de fadiga foram executados em um sistema universal de testes de materiais MTS 810, descrito anteriormente. O método de ensaio de fadiga utilizado foi o de tração-compressão, com reverso completo. As amplitudes das tensões aplicadas nos ensaios, foram determinadas em função dos limites de resistência à tração e ao escoamento do material. Foram levados em conta fatores de modificação do limite de fadiga, S_e , Shigley (1989).

Para a execução dos testes de fadiga duas fases de preparação do teste foram implementadas. Na primeira fase foi feita a preparação da unidade de carga do sistema de testes de materiais. Esta preparação consistiu na adequação desta unidade em função do nível de esforços que seriam aplicados e da geometria do corpo de prova que foi previamente determinado para uma chapa de seção retangular. As tensões aplicadas ficaram na faixa de 200 e 250 MPa e uma carga aplicada de aproximadamente 50 KN, para este nível de esforço utilizou-se uma garra/célula de carga de 250 KN (25 t).

Preparada a unidade de carga passou-se à programação do teste no controlador, conforme procedimento específico mostrado no anexo I. A execução dos testes de fadiga foi feita em controle de carga, isto é, para praticamente toda a vida suportada pelo corpo de prova, foi mantido o mesmo nível de esforços. Com isso pode-se verificar nos gráficos apresentados no anexo II, os estágios de propagação da trinca (crescimento da trinca) e a fratura súbita do corpo de prova.

3.10 - Medição dos Defeitos

A medição do tamanho dos defeitos foi feita de duas formas distintas, através de um sistema digital de imagem e através de um Kit para medição dimensional de defeitos geométricos, tais como os defeitos de mordedura e reforço excessivo. A utilização do sistema digital de imagem é uma forma de caracterizar, mais detalhadamente, a seção transversal do cordão de solda, não sendo, no entanto uma prática usual de medição em inspeções de soldagem. Tipos de defeitos, tais

como, mordeduras e reforço excessivo, são normalmente medidos através de inspeções dimensionais. Para a avaliação/inspeção da junta soldada, quanto à presença de defeitos internos, outros meios de inspeção/avaliação devem ser usados. A detecção deste tipo de defeitos pode ser feita através de ensaios não destrutivos tais como inspeção por ultrassom ou por meio de raio X. Neste trabalho o defeito de penetração incompleta da junta foi medido através do sistema digital de imagem. Para a utilização do sistema digital de imagem foi necessário preparar amostras da seção transversal do cordão de solda. Estas amostras foram polidas e atacadas quimicamente com uma solução de nital a 10%, o que proporcionou a caracterização da seção da solda, com o respectivo defeito de soldagem. Estas amostras foram retiradas das chapas de teste em quatro posições diferentes, conforme mostra a Figura 3.7.

3.10.1 - Sistema Digital de Imagem

A medição por este processo foi feita utilizando-se o "Software Global Lab Image - GLI". Este "software", permite adquirir imagens monocromáticas e processá-las para uma posterior análise e trabalha em ambiente Windows com uma placa de aquisição de imagens. Este sistema de aquisição e tratamento de imagens possibilita a medição, de forma precisa, da geometria do cordão de solda. Para isto, o sistema depende muito das condições do objeto filmado, ou seja, da obtenção de uma imagem nítida. Este sistema de aquisição e tratamento de imagens é composto por uma câmara filmadora, um monitor, e uma placa de aquisição instalada em um microcomputador.

3.10.2 - Equipamentos de Medição Dimensional

Para os defeitos de mordedura e reforço excessivo, utilizou-se medidores específicos, normalmente usados em inspeções visuais. Para o caso destes dois tipos de defeitos foram utilizados dois medidores que medem tanto o defeito de

mordedura quanto de reforço excessivo. A Figura 3.8 mostra como foi executada esta medição. A largura do cordão de solda foi medida através de um paquímetro.

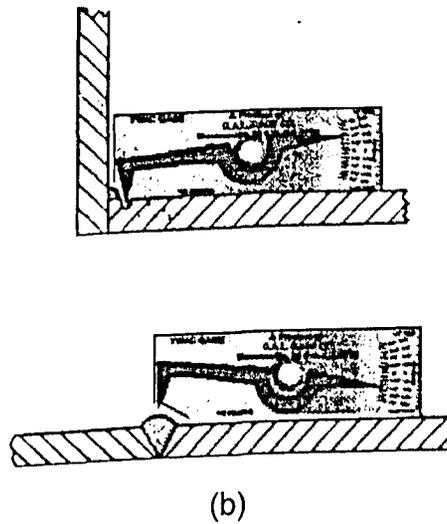
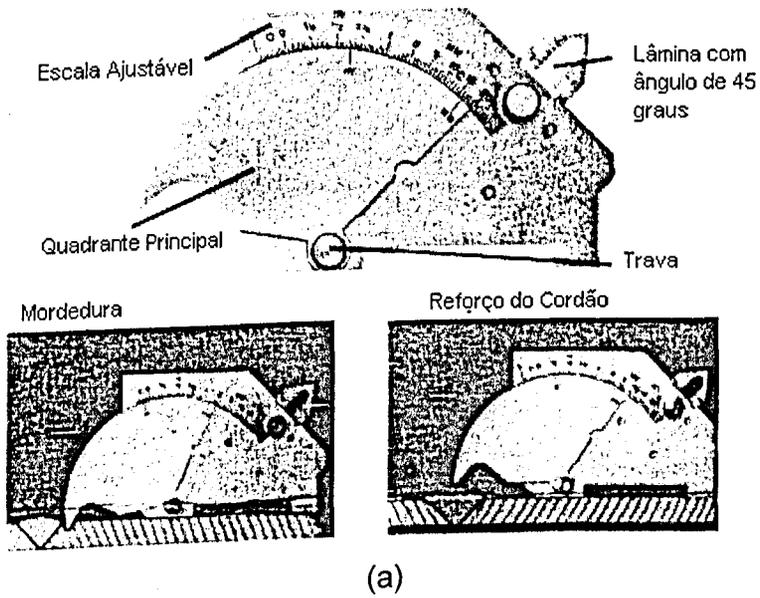


Figura 3.8 - Medidores de defeitos geométricos

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Introdução

Passa-se agora a apresentar os resultados obtidos nos ensaios de fadiga realizados em corpos de prova retirados das chapas de testes soldadas de topo, com presença de defeitos de soldagem em vários níveis.

Foi feita uma análise da influência de cada tipo de defeito sobre a resistência à fadiga das juntas soldadas, avaliando-se a criticidade do defeito sobre a performance da junta. Com os resultados obtidos pôde-se identificar qual tipo de defeito foi mais prejudicial para uma junta soldada, sob carregamento cíclico, e quais foram as características mais relevantes, de cada tipo de defeito, na redução da resistência à fadiga da junta. Todos os tipos de defeitos foram ensaiados com praticamente as mesmas condições de testes. Para estas análises foram feitas representações gráficas (curvas S-N e gráficos do tamanho de defeito x vida e da amplitude de deslocamento x vida), mostrando o comportamento da resistência mecânica à fadiga das juntas soldadas com diferentes tamanhos de defeitos, em função da vida suportada sob carregamento cíclico. Nas representações gráficas não foram consideradas as reduções de área provocadas pelos defeitos. Os cálculos foram feitos com base na área nominal da seção da junta.

Para todos os níveis de defeitos gerados foram obtidas imagens das seções transversais dos cordões de soldas. Estas imagens foram obtidas com a finalidade caracterizar o defeito de soldagem, e também utilizadas para a medição do tamanho do defeito através do sistema digital de imagem.

O objetivo deste capítulo é caracterizar o comportamento de cada tipo de defeito sob condições de carregamento cíclico e procurar estabelecer uma relação

entre o tamanho do defeito e a resistência da junta soldada e, a partir daí, propor uma metodologia para avaliação de estruturas veiculares soldadas, em função do nível de qualidade das juntas soldadas e das condições de serviço a que estão submetidos.

Segue-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos com os ensaios de fadiga, em corpos de prova, para os defeitos de penetração incompleta da junta, mordedura e reforço excessivo. Os resultados mostrados para o nível 1 foram obtidos de juntas soldadas sem a presença de quaisquer tipos de defeitos. Os resultados referentes a este nível são comuns em todas as representações gráficas de curvas S-N, ou seja, a curva referente ao nível 1 é a mesma para todos os defeitos. Estes dados são apresentados na Tabela 4.1.

4.2 - Defeito de Penetração Incompleta da Junta

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos com os ensaios de fadiga em todos os corpos de prova com defeitos de penetração incompleta da junta. Nesta tabela, estão mostradas características geométricas e condições de teste, tais como, área da seção transversal dos corpos de prova, o tamanho do defeito referente a cada nível simulado, os níveis de tensões aplicados para cada tamanho de defeito e a vida suportada, em ciclos, para cada corpo de prova. Os níveis de tensões aplicados, dentro das faixas estabelecidas (200 e 250 MPa), tiveram uma pequena variação de um corpo de prova para outro, isto ocorreu devido à pequenas diferenças geométricas resultantes do processo de usinagem dos mesmos.

Verifica-se para os resultados correspondentes aos níveis 2, 3 e 4, deste tipo de defeito, uma redução significativa na resistência à fadiga da junta soldada, quando comparado ao nível 1 sem a presença de defeitos.

Os resultados mostram que para um mesmo nível de tensão aplicada a vida suportada pelo nível 4 foi menor que a do nível 3 e esta menor que a do nível 2. A razão desta diferença é que quanto maior é o tamanho do defeito, menor é a área resistente da junta soldada. Consequentemente, o nível de tensões nesta região é amplificado, visto que, a carga aplicada manteve-se constante em todo o tempo de

execução do teste. A tensão real aplicada foi então maior que a tensão nominal. Além disso, após iniciada a trinca, ocorre a intensificação das tensões atuantes, a qual, pode ser estimada pela Equação 2.6. Os resultados obtidos eram esperados, no entanto, não sabia-se o quanto cada tipo de defeito influiria na resistência à fadiga da solda.

Tabela 4.1 - Resultados de testes de fadiga de juntas soldadas com defeito de penetração incompleta da junta

Corpo de prova	Tam. do defeito(mm)	Nível do defeito	Carga aplicada (N)	Área total da seção (mm ²)	Tensão aplicada σ_a (N/mm ²)	Vida (ciclos)	Local da fratura
CP1	0.00	1	45900	186.00	246.8	25176	MB
CP2	0.00	1	43830	179.00	244.8	16458	MB
CP3	0.00	1	45320	186.00	243.7	21471	MB
CP4	0.00	1	45130	186.00	242.7	18600	MB
CP5	0.00	1	39930	186.00	214.7	102098	MB
CP6	0.00	1	39767	186.00	213.8	111600	MB
CP7	0.00	1	39530	185.10	213.6	82201	MB
CP7	0.00	1	39767	186.00	213.8	111600	MB
CP6	0.00	1	39530	185.10	213.6	82201	MB
CP7	0.00	1	39530	185.10	213.6	82201	MB
CP2r	1.0	2	45200	196.00	230.6	11000	S
CP3r	1.0	2	45200	200.00	225.0	16000	S
CP4r	1.0	2	45200	200.00	225.0	22456	S
CP1r	1.0	2	38300	196.00	195.2	34122	S
CP5r	1.0	2	38200	198.50	192.5	29356	S
CP12	2.7	3	50300	196.00	256.6	2850	S
CP33	2.6	3	50100	191.10	262.2	2900	S
CP32	2.5	3	48400	191.58	252.6	4150	S
CP43	2.2	3	38710	193.55	200.0	13704	S
CP22	2.9	3	38600	193.05	200.0	13950	S
CP42	2.8	3	38600	193.54	199.5	16851	S
CP23	2.4	3	38600	194.00	199.0	19400	S
CP14	3.6	4	50200	195.02	257.3	1048	S
CP34	4.0	4	50100	195.02	256.8	1254	S
CP24	3.8	4	38600	194.53	198.5	5944	S
CP44	4.0	4	38600	195.02	198.0	5750	S

Porém, alguns corpos de prova apresentaram resultados diferentes do esperado. Um exemplo disto é o resultado obtido para o CP43, defeito de nível 3, que apresentou uma resistência à fadiga menor do que a esperada, isto é, sua resistência foi menor do que a de corpos de prova com defeitos de tamanhos maiores e, conseqüentemente, submetidos a tensões aplicadas maiores. Uma análise deste corpo de prova mostrou que, apesar do tamanho do defeito ser menor,

outros fatores podem ter contribuído para que a fratura na junta soldada fosse antecipada. Especificamente para este corpo de prova, acredita-se que a fratura tenha se iniciado no pé da solda, em virtude de uma pequena falta de penetração ocorrida nesta região, ou até mesmo em função da concentração de tensões provocadas pelo defeito ou mesmo pelo processo de usinagem do reforço do cordão. Com um exemplo deste tipo, pode-se verificar o quanto a combinação de defeitos de soldagem pode ser prejudicial à resistência à fadiga da junta soldada.

Uma outra observação importante que se fez é que todas as fraturas ocorridas nos corpos de prova, contendo este tipo de defeito, localizaram-se na junta soldada. Exceção feita para os corpos de prova de nível 1, os quais correspondem à uma junta soldada sem defeito. No nível 1 todas as fraturas ocorreram no metal de base, apesar de variações, tais como, mudanças microestruturais, alterações das propriedades mecânicas, indução de tensões residuais, etc., provocadas no metal de base em função do processo de soldagem. Com os resultados obtidos para o nível 1, não dá para afirmar qual foi a influência da junta soldada sobre a resistência à fadiga do material. Certamente, outros fatores diferentes das alterações provocadas pelo processo de soldagem foram mais prejudiciais à resistência a fadiga do material. Não se verificou, portanto, queda da resistência mecânica na junta soldada.

A Figura 4.1, resultante dos dados apresentados na Tabela 1, apresenta as curvas S-N obtidas para o defeito de penetração incompleta da junta que, mesmo em tamanhos muito pequenos, mostraram-se altamente prejudiciais para a resistência à fadiga de juntas soldadas.

A curva do nível 1 representa uma solda livre de defeitos, isto é, sem a presença de reforço, mordeduras e penetração incompleta da junta. Como pode ser visto, a resistência obtida para este nível de defeito é bem superior aos demais níveis. Shigley (1989), afirma que a região de transição de vida finita para vida infinita está situada em algum lugar entre 10^6 e 10^7 ciclos para os aços. Segundo a AWS (1987) a resistência à fadiga para os aços é usualmente constante além de aproximadamente dois milhões de ciclos. Portanto, tomando-se este número de ciclos como sendo o ponto a partir do qual a resistência à fadiga do aço torna-se

constante para um número infinito de ciclos, pode-se, então, estimar o limite de resistência à fadiga das juntas soldadas com presença de defeitos. Com isso, pode-se verificar qual é a redução da resistência à fadiga, em função do nível de defeito gerado em cada situação, em relação à uma junta soldada sem presença de defeito. Isto foi feito, extrapolando-se as curvas obtidas para cada nível de defeito até dois milhões de ciclos. Observa-se que o limite de resistência à fadiga S_e para estes corpos de prova sem presença de defeito foi de aproximadamente 160 MPa. Este valor está bem próximo dos resultados mostrados pela norma da AWS D1.1 (1996), na Figura 2.12, para aços sem a presença de juntas soldadas. Pode-se admitir que a curva do nível 1 é muito mais característica do material de base, do que de juntas soldadas sem a presença de defeitos, face às fraturas terem ocorrido no metal de base em todos os testes. A categoria "B" de faixa de tensões, mostrada na Figura 2.12, a qual, corresponde a perfis soldados de topo, Figuras 2.11(a) e 2.11(b), mostra que o limite de resistência à fadiga de juntas soldadas sem presença de defeitos é próximo de 110 MPa.

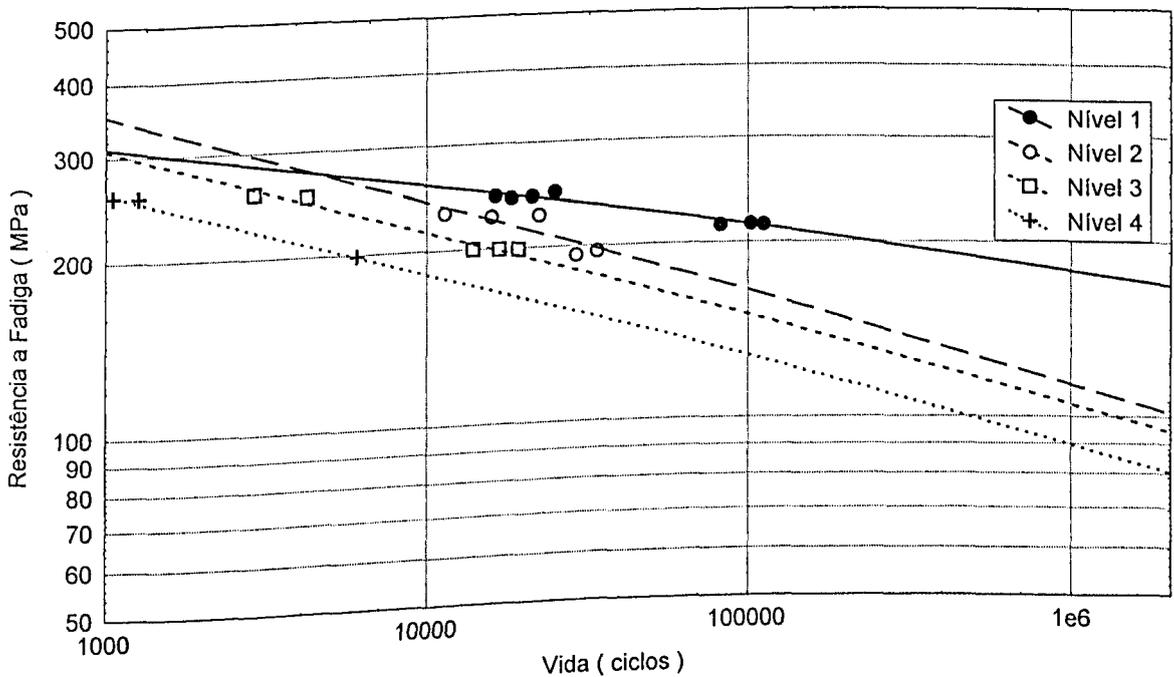


Fig. 4.1 - Curvas S-N para soldas sem defeito e soldas contendo defeitos de penetração incompleta da junta

As curvas S-N, obtidas para o defeito de penetração incompleta da junta, podem ser representadas pela Equação 4.1. Através desta equação, pode-se estimar a vida, em ciclos, da junta soldada com o mesmo nível de defeito para outros níveis de tensões.

$$\text{Log}(S_f) = \text{Log}(a) + b \cdot \text{Log}(N) \quad (4.1)$$

Onde:

S_f corresponde ao limite de resistência à fadiga para vida infinita

N corresponde à vida em número de ciclos

a , b são coeficientes que dependem do nível de defeito segundo a tabela, e

R é o coeficiente de correlação da regressão.

A Tabela 4.2 mostra os coeficientes a , b e R , calculados para as curvas mostradas na Figura 4.1.

Tabela 4.2 - Coeficientes de regressão das curvas S-N para defeitos de penetração incompleta

Coeficientes	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
a	540.961	1090.560	902.031	763.518
b	-0.08038	-0.16381	-0.15570	-0.15528
R	0.97113	0.86235	0.98868	0.99630

Considerando-se que em torno de 2 milhões de ciclos as juntas soldadas alcançam um comportamento de vida infinita, estimou-se, através das equação 4.1 acima, qual seria o limite de resistência à fadiga das juntas soldadas, para os vários níveis de defeitos gerados e a redução desta resistência para estes níveis. Estes dados estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Redução da resistência à fadiga para juntas soldadas com presença de defeito de PIJ

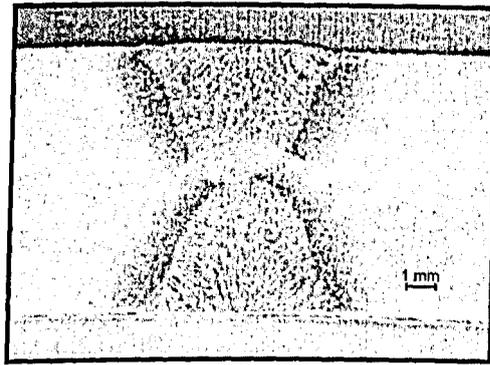
Item	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Resistência à fadiga (MPa)	157.42	101.27	94.25	78.94
Redução da resistência (%)	0.0	35.7	40.1	49.85

PIJ : Penetração incompleta da junta.

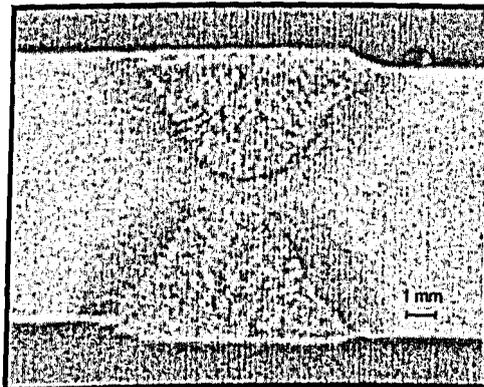
Apesar dos poucos pontos obtidos, as curvas S-N que representam os níveis de defeito, mostram uma redução significativa na resistência à fadiga da junta soldada, a medida que o tamanho do defeito aumenta. Esta redução para os defeitos de níveis 2, 3 e 4, em comparação com resultados obtidos para juntas soldadas sem defeito, foi em torno de 35, 40 e 50%, respectivamente. Resultados similares foram obtidos por Lawrence & Munse (1973), que também fizeram testes desta natureza em corpos de prova com defeito de penetração incompleta da junta. Os autores mostraram que este tipo de defeito reduz drasticamente o limite de resistência à fadiga de uma junta soldada. No seu trabalho, a faixa de tensões para o limite de fadiga (assumido de aproximadamente 2×10^6 ciclos) foi reduzida de 276 MPa em um caso de uma solda sem defeitos para 107 MPa em soldas contendo um defeito de penetração incompleta de 4,8 mm, em uma chapa de 19 mm de espessura, ou seja, para uma relação tamanho de defeito/espessura de 0.25 (redução de 25% da área resistente).

Com base na análise dos resultados obtidos não recomenda-se a aceitação de juntas soldadas com este tipo de defeito, para quaisquer níveis de solicitação. Estes resultados de certa forma explicam a não aceitação deste tipo de defeito por normas tais como, a ANSI/AWS D8.8 (1989), ANSI/AWS D1.1(1996) e a recomendação do IIW (1983).

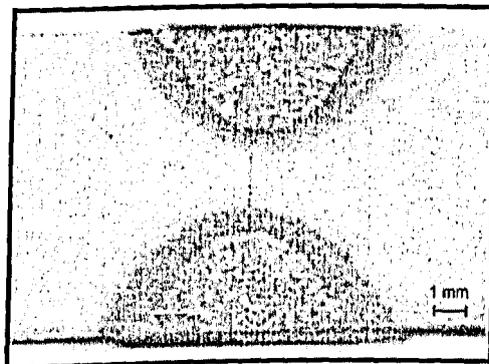
A avaliação geométrica das seções destas juntas soldadas foi feita em 4 pontos diferentes do cordão de solda, conforme disposição mostrada na Figura 3.7. A Figura 4.2(b), 4.2(c) e 4.2(d), mostra as seções da junta soldada com defeito de penetração incompleta da junta para os níveis 2, 3 e 4 respectivamente. A Figura 4.2(a) corresponde ao nível 1, ou seja, à uma junta soldada sem presença de defeito, comum para os três tipos de simulação de defeito.



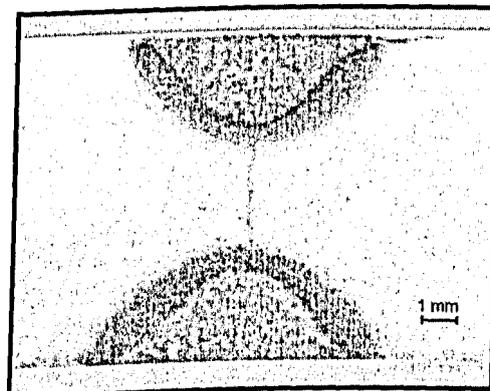
(a) Nível 1



(b) Nível 2



(c) Nível 3



(d) Nível 4

Fig. 4.2 - Juntas soldada com defeito de penetração incompleta

4.3 - Defeito de Mordedura

Segue-se agora, a apresentação dos resultados obtidos para o defeito de mordedura. Uma observação importante a fazer é que, como o defeito de penetração incompleta da junta, este tipo de defeito também reduz a área da seção resistente aos esforços aplicados. Isto, conseqüentemente, provoca uma diminuição na resistência à fadiga da junta soldada, em função da amplificação de tensões e da concentração de tensões. É conhecido que trincas e mordeduras perpendiculares à direção da atuação dos esforços, são os tipos de defeitos que causam as maiores concentrações de tensões e, conseqüentemente, diminuem a resistência à fadiga da junta soldada.

Na tabela 4.4 estão mostrados todos os resultados adquiridos com ensaios de fadiga realizados nos corpos de prova com defeito de mordedura. Estes resultados mostram que a resistência à fadiga do material diminuiu em função da presença do defeito.

Corpo de prova	Tam. do defeito(mm)	Nível do defeito	Carga aplicada (N)	Área total da seção (mm ²)	Tensão aplicada σ_a (N/mm ²)	Vida (ciclos)	Local da fratura
Mord12	0.7	2	45900	186.00	246.8	7940	MB
Mord32	0.6	2	46380	186.00	249.4	7366	S
Mord42	0.5	2	38640	186.00	207.8	68828	S
Mord33	1.2	3	46330	186.00	249.10	5820	S
Mord13	1.2	3	44700	186.00	240.32	4813	S
Mord23	1.1	3	38660	186.00	207.85	8808	S
Mord14	1.7	4	46170	185.07	249.50	534	S
Mord34	1.4	4	46100	185.07	247.70	2394	S
Mord44	1.6	4	38610	186.00	207.60	22565	S
Mord24	1.5	4	38800	186.00	208.60	17490	MB

Os resultados obtidos para o nível 3 não representam a simulação do defeito de mordedura de forma isolada, pois, além deste defeito foi observado a presença do defeito de falta de fusão das faces da junta e falta de fusão da raiz do chanfro, conforme mostrado na Figura 4.4 (b). Este tipo de defeito foi detectado na região da

fratura dos corpos de prova de nível 3 e é característico de juntas soldadas executadas com baixa energia de soldagem ou técnica de soldagem imprópria. Este tipo de defeito aliado ao defeito de mordedura mostrou-se altamente prejudicial para a resistência a fadiga de juntas soldadas.

A Figura 4.3 mostra as curvas S-N que representam o comportamento da resistência à fadiga de juntas soldadas contendo o defeito de mordedura em 3 níveis distintos. Como pode-se observar, de uma forma geral, as curvas S-N que representam os níveis 2 e 4 tem o mesmo comportamento, exceção feita à curva que representa o nível 3 deste defeito, que apresentou um comportamento adverso em função da presença de outros tipos de defeitos.

Vários fatores, certamente, contribuíram para esta redução na resistência, dentre os quais estão a redução da área resistente da junta soldada e a concentração de tensão provocada pelo defeito. Um outro fator importante que, sem dúvida, deve ser considerado é o formato no qual o defeito se apresentou.

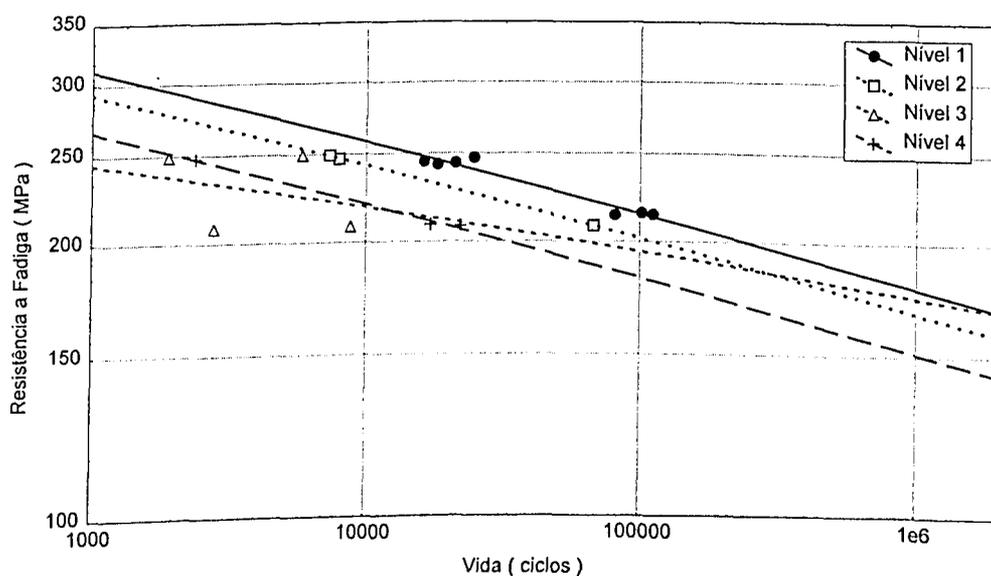
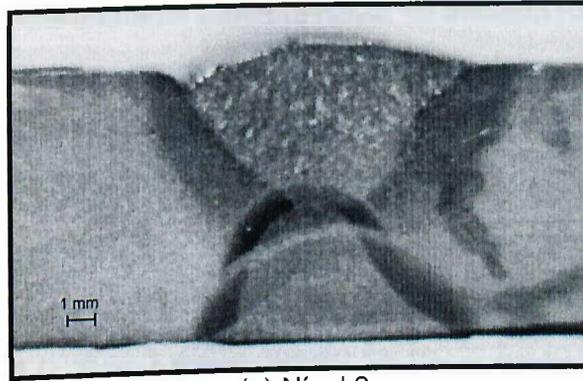


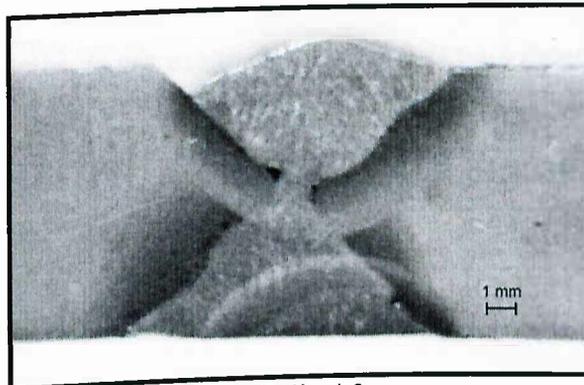
Fig. 4.3 - Curvas S-N para soldas contendo defeitos de mordedura

Na Figura 4.4, estão mostradas as seções de juntas soldadas com defeito de mordedura nos seus vários níveis. Verifica-se por estas imagens que este defeito apresentou-se em forma de um entalhe em "V" no pé do cordão, em virtude do procedimento utilizado para gerá-lo. Este formato, com certeza, o tornou mais severo ainda. O resultado obtido para o corpo de prova Mord14 não foram

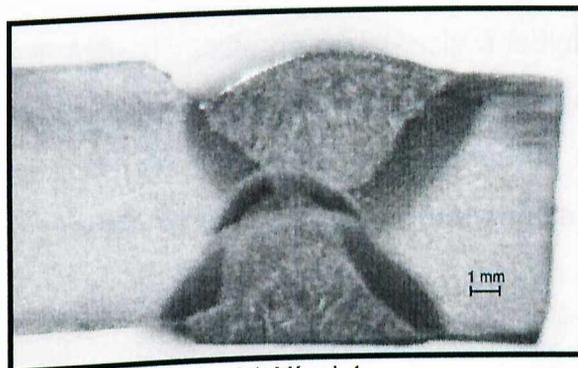
considerados, pois o mesmo fraturou com um número de ciclos correspondente à fadiga de baixo ciclo, ou seja, com menos de 1000 ciclos. Observou-se que este corpo de prova também apresentou falta de fusão em uma das faces da junta, como aconteceu para os corpos de prova de nível 3.



(a) Nível 2



(b) Nível 3



(c) Nível 4

Fig. 4.4 - Seções da junta soldada com defeito de mordedura

A Tabela 4.4 mostra que as fraturas nos corpos de prova ocorreram na junta soldada, com exceção dos corpos de prova de nível 1, que não apresentavam este tipo de defeito, e dos corpos de prova Mord12 e Mord24. O corpo de prova Mord12 foi fraturado no metal de base, não apresentando nenhum sinal de progressão da trinca no pé da solda. O corpo de prova Mord24 fraturou no metal de base próximo à solda, porém verificou-se que uma trinca já havia se iniciado na raiz do defeito. Independentemente do que ocorreu para o nível 3 deste defeito, os resultados obtidos mostram uma redução na resistência à fadiga da junta soldada para os defeitos de níveis 2 e 4, o que de certa forma era esperado. Estas curvas podem ser representadas pela Equação 4.1. A Tabela 4.5 mostra os coeficientes a, b e R, calculados para as curvas mostradas na Figura 4.3. O coeficiente de correlação da regressão obtido para o nível 3 deste defeito foi muito baixo, o que significa que a dispersão dos pontos é muito grande descaracterizando a equação.

Tabela 4.5 - Coeficientes de regressão das curvas S-N para defeitos de mordedura

Coeficientes	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
a	540.961	510.743	343.339	467.917
b	-0.08038	-0.0807	-0.049123	-0.08184
R	0.97113	0.99972	0.32541	0.99731

O limite de resistência à fadiga estimado para cada nível de defeito de mordedura a partir da Equação 4.1, para uma número de ciclos de 2×10^6 , está mostrado na Tabela 4.6. Além do limite de resistência à fadiga estimado, também é mostrada a redução deste limite de resistência, em relação ao nível 1, para cada nível do defeito. Como pode ser verificado, a presença do defeito provocou uma redução na resistência à fadiga da junta soldada, porém não muito significativa.

Tabela 4.6 - Redução da resistência à fadiga para juntas soldadas com presença de defeito de Mordedura

Item	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Resistência à fadiga (MPa)	157.42	148.41	-	142.72
Redução da resistência (%)	0.0	5.72	-	9.34

Observou-se através dos resultados obtidos e pelas análises feitas das seções dos cordões de solda que, a nucleação da trinca depende muito das condições apresentadas pela raiz do defeito, ou seja, do tamanho do defeito e do formato no qual a raiz deste defeito apresentou. Gosch & Petershagen (1996), verificaram que os parâmetros geométricos do defeito de mordedura que causam maior influência sobre a concentração de tensões são: a profundidade do entalhe e o raio de arredondamento da raiz do entalhe. Se o defeito apresentar-se de forma pontiaguda, a vida (número de ciclos) gasta para inicializar a trinca é menor e, conseqüentemente, a maior parte da vida é gasta na propagação da trinca. Isto ocorre devido a influência da geometria do entalhe no fator de concentração de tensão. Isto pôde ser verificado através de testes de fadiga em corpos de prova com este tipo de defeito simulado através de usinagem. Porém, o pequeno número de pontos obtidos para este tipo de simulação foi insuficiente para caracterizar de forma adequada as curvas S-N.

De uma forma geral, verificou-se que a resistência à fadiga das juntas soldadas diminuem a medida que o tamanho do defeito aumenta. Porém o efeito deste defeito, conforme observado pelos resultados, foi menos prejudicial do que o de penetração incompleta da junta, apesar da raiz do entalhe ter sido simulada sem raio de arredondamento.

4.4 - Defeito de Reforço Excessivo

O formato do cordão de solda, quando excessivo, representa um local de concentração de tensões. Isto ocorre devido à variação brusca de seção na região

da solda. Em virtude disto, o reforço excessivo do cordão de solda é considerado neste trabalho como um defeito de soldagem. Tal como os defeitos de mordedura e penetração incompleta da junta, o reforço excessivo foi simulado em 3 níveis diferentes, mantendo-se a mesma largura do cordão de solda e variando-se somente a altura do cordão. A altura do reforço obtida, para os três níveis deste defeito, bem como as condições de teste e os resultados obtidos com os ensaios de fadiga, estão mostrados na Tabela 4.7. Pode-se observar, pelos resultados, que este tipo de defeito não apresentou grande variação, bem como não se mostrou tão sensível quanto aos defeitos de mordedura e de penetração incompleta da junta.

A Figura 4.5 mostra as curvas S-N plotadas, destacando os três níveis de defeitos gerados e o nível 1 que representa uma junta soldada a sem presença de defeitos. Verifica-se que não houve uma clara distinção entre os níveis de defeitos, inclusive com uma inversão no posicionamento das curvas para os níveis 2, 3 e 4, ou seja, o defeito de nível 4 apresentou maior resistência do que o do nível 3 e este maior do que o nível 2. A causa desta inversão no posicionamento das curvas S-N foi a presença, no pé da solda, do defeito de sobreposição. A Figura 4.6 mostra imagens do formato dos cordões de solda para os três níveis simulados

Tabela 4.7- Resultados de testes de fadiga de juntas soldadas com defeito de reforço excessivo

Corpo de prova	Tam. do defeito (mm)	Nível do defeito	Carga aplicada (N)	Área total da seção (mm ²)	Tensão aplicada σ_a (N/mm ²)	Vida (ciclos)	Local da fratura
REF32	3.0	2	45850	186.93	245.30	14000	S
REF12	3.0	2	45200	186.00	243.00	15251	S
REF42	3.0	2	38610	181.35	212.90	45312	S
REF22	3.0	2	38600	186.00	207.50	69388	MB
REF33	3.8	3	46350	172.05	269.40	5260	S
REF13	3.8	3	46310	181.35	255.40	5898	MB
REF83	3.7	3	45600	186.00	245.20	13700	MB
REF93	4.0	3	45200	185.07	244.20	18050	MB
REF63	4.0	3	45600	187.00	243.90	15008	MB
REF73	3.7	3	45330	187.00	242.40	14362	MB
REF43	3.7	3	40570	172.05	235.80	25890	S
REF23	3.8	3	40630	186.00	218.50	35425	MB
REF53	4.0	3	39900	187.00	213.40	48550	MB
REF14	4.6	4	45330	186.00	243.70	19016	S
REF24	4.6	4	43580	179.50	242.80	18902	MB
REF34	5.3	4	40520	182.28	222.30	42578	MB
REF44	5.0	4	40530	184.14	220.10	64638	S

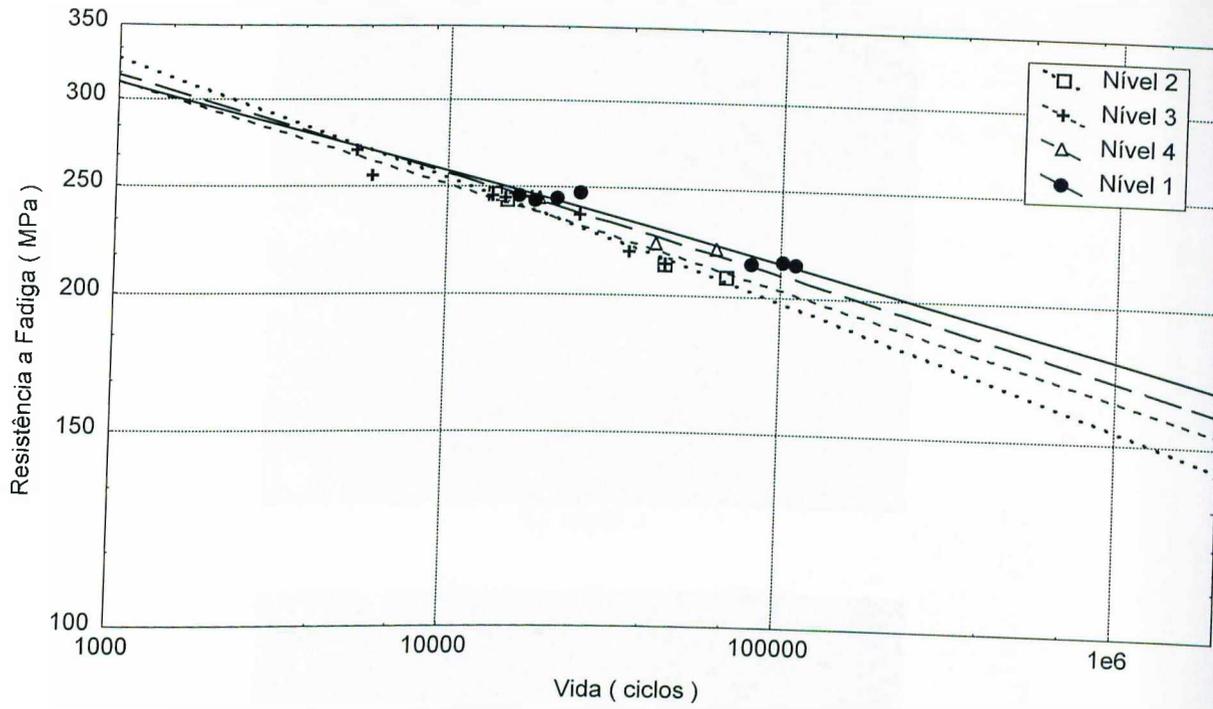
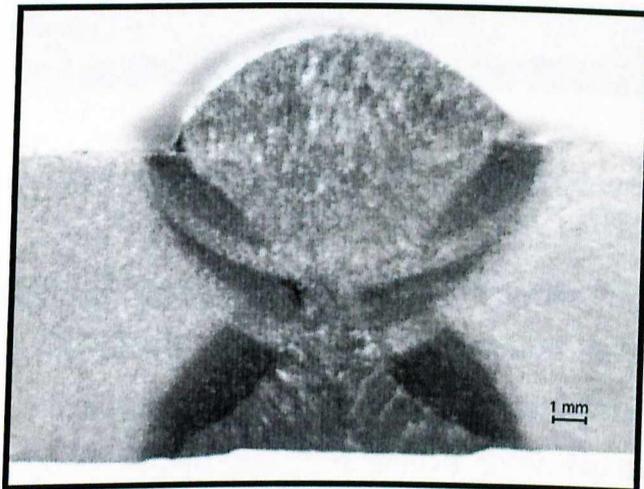
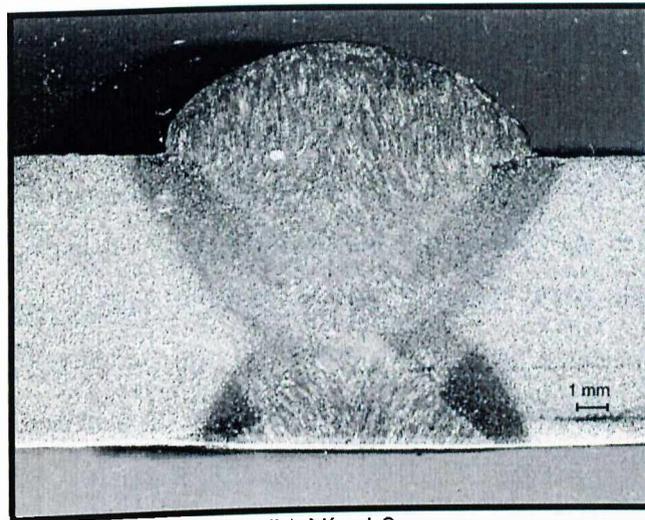


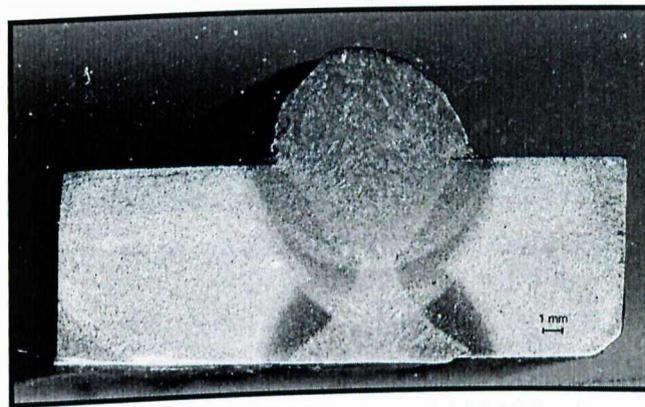
Fig. 4.5 - Curvas S-N para o defeito de reforço excessivo



(a) Nível 2



(b) Nível 3



(c) Nível 4

Fig. 4.6 - Formato dos cordões de solda para o defeito de reforço excessivo

Para a obtenção do cordão em tamanhos diferentes foi variado parâmetros de soldagem, tais como, tensão, corrente e a velocidade de soldagem, conforme mostrado na Tabela 3.5. A seleção destes parâmetros foi suficiente para a obtenção dos defeitos de reforço excessivo que se desejava obter. No entanto, o aporte de calor gerado pela combinação de tais parâmetros não foi suficiente para fundir completamente o pé da solda, provocando, dessa forma, o aparecimento do defeito de sobreposição do cordão. Este defeito consiste na deposição do metal fundido sobre o metal de base, sem contudo fundir o metal de base, face à baixa energia (calor de aporte) gerada durante a soldagem. Os níveis de energia de soldagem transferidos para a peça é função da tensão de soldagem, da corrente e da velocidade de soldagem, conforme mostrado na Equação 2.1. A redução da energia

de soldagem, ou seja, da quantidade de calor transferido para a peça, foi determinante no aparecimento do defeito. Este tipo de defeito apareceu em, praticamente, todas as chapas de testes, em tamanhos diferentes. Em função da presença do defeito de sobreposição, os testes para os níveis 3 e 4 foram repetidos, pois estes níveis de defeito apresentaram-se em tamanhos maiores. A Figura 4.7 mostra uma fratura por fadiga ocorrida em um corpo de prova de nível 2 com defeito de sobreposição. Observa-se que a fratura ocorreu na junta soldada. A trinca por fadiga propagou-se desde o pé da solda, região mais escura da seção de fratura.

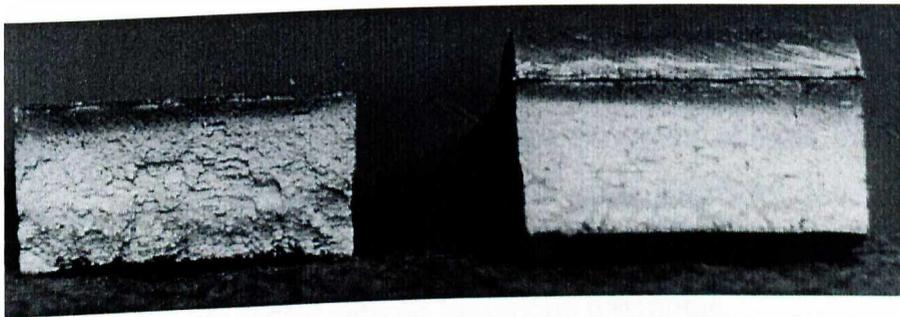


Fig. 4.7 - Corpo de prova de nível 2 fraturado na região da solda

A Tabela 4.8 mostra os níveis de energia de soldagem calculados para as várias condições de soldagem utilizadas na obtenção do reforço excessivo do cordão de solda. Estes cálculos foram feitos de acordo com a Equação 2.1, apresentada por Meyers (1995). Os resultados mostram que os corpos de prova que fraturaram na junta soldada, como por exemplo, os de nível 2, 3 e 4, foram submetidos a níveis de energia de soldagem menores do que os demais, conforme mostra a Tabela 4.8. As soldagens refeitas, tanto para o nível 3 quanto para o nível 4 mostram níveis de energia maiores com relação aos obtidos anteriormente. Observa-se que um mesmo nível de energia foi obtido para os níveis de defeitos repetidos, isto se deu devido à variação dos parâmetros de soldagem (tensão, corrente e velocidade de soldagem). Porém, pode-se verificar que o nível de energia foi maior nestes dois casos, isto pode ter garantido um nível de defeito de sobreposição menor, não tão prejudicial quanto os obtidos inicialmente, garantindo, dessa forma, uma resistência mecânica maior.

Tabela 4.8 - Energia de soldagem utilizada na simulação do defeito de reforço excessivo

Nível	Energia de soldagem (J/mm)
2	23180.00
3	25520.00
3 (repetido)	27460.00
4	26060.00
4 (repetido)	27320.00

As curvas S-N obtidas para o defeito de reforço excessivo podem ser representadas pela equação 4.1. Tabela 4.9 mostra os coeficientes a, b e R, calculados para as curvas plotadas na Figura 4.5. O nível 3/4 corresponde aos dados obtidos para os níveis 3 e 4, dos corpos de prova obtidos das chapas de testes que foram refeitas. A razão de se agrupar estes dados foi devido à variação brusca da seção, na região da solda, ter sido praticamente constante para estes dois níveis, apesar do reforço ter sido de tamanhos diferentes.

Tabela 4.9- Coeficientes de regressão das curvas S-N para defeitos de reforço

Coeficiente	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 3/4
s					
a	541.724	690.780	588.967	581.6129	503.2320
b	-0.08518	-0.10863	-0.09258	-0.08874	-0.07572
R	0.97113	0.99511	0.95675	0.97945	0.94279

Uma observação importante que pode ser feita é que apesar da altura diferente dos cordões de solda, o ângulo feito entre uma linha reta tangente ao pé do cordão com a superfície do material de base, manteve-se praticamente constante para todos os níveis do defeito, ou seja, de aproximadamente 90°. Esta condição propiciou a obtenção de dados muito próximos entre os níveis de defeito gerados. Em função disto, na Figura 4.8, estão plotadas duas curvas S-N, uma representando as juntas soldadas sem presença de reforço e a outra representando os pontos obtidos para os níveis 3 e 4 refeitos. Observa-se, claramente, que a redução da

resistência à fadiga foi muito pequena, inclusive com as curvas S-N convergindo-se para um mesmo nível de resistência à fadiga para um número de ciclos de 2×10^6 . Os resultados obtidos para esta situação não são conclusivos, visto que a própria presença de material com estrutura típica de solda não mostrou-se um fator redutor da resistência à fadiga para este tipo de material de base (nos ensaios onde os defeitos eram usinados, nível 1, a ruptura se dava sempre no metal de base). A altura do cordão de solda pode ter invertido esta situação, mas não o suficiente para degradar tanto a resistência a fadiga da junta soldada (como aconteceu para os outros defeitos). Um número maior de testes seria necessário para uma análise mais acurada e conclusiva.

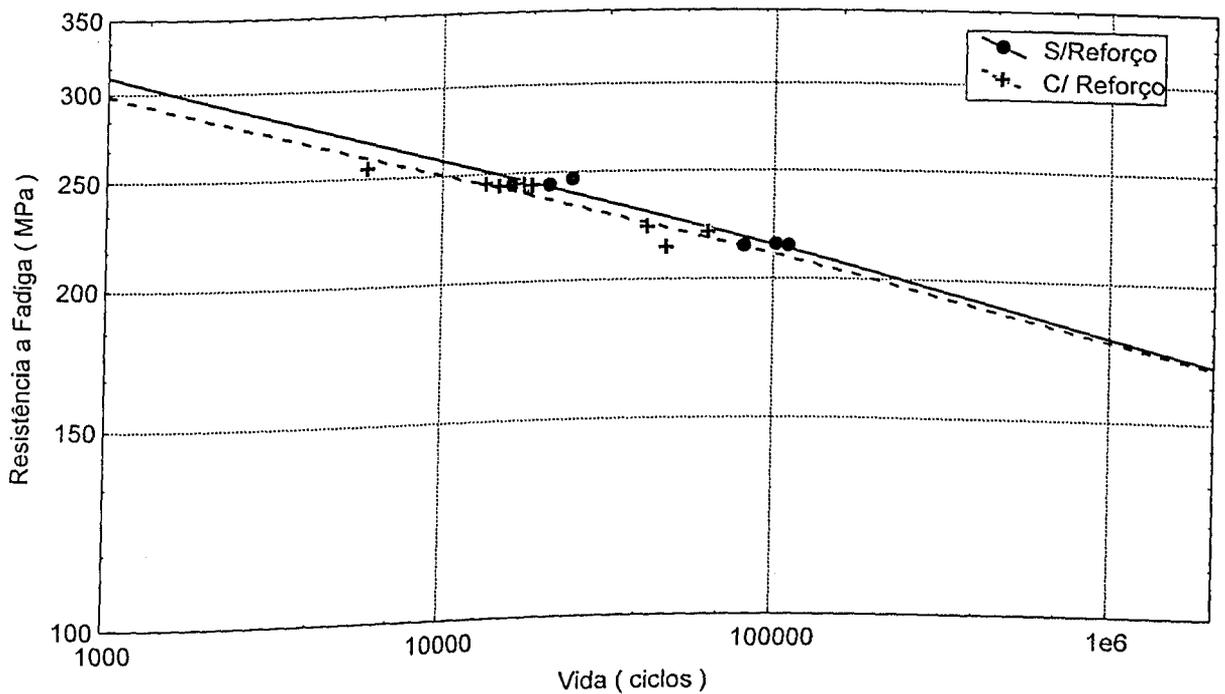


Fig. 4.8 - Curvas S-N de soldas com e sem reforço excessivo do cordão de solda

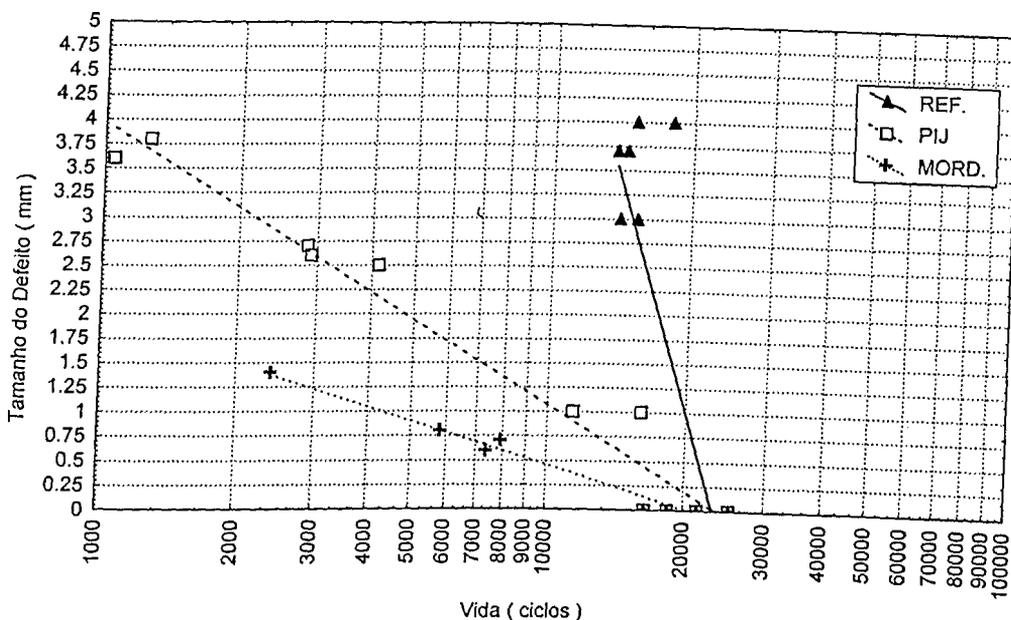
4.5 - Relação Tamanho de Defeito x Vida

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram uma relação feita entre o tamanho do defeito com o número de ciclos suportados para as faixas de tensões utilizadas nos testes de fadiga. Cada curva plotada representa o conjunto de pontos obtidos para os níveis 1, 2, 3 e 4, referentes à um mesmo defeito e testados sob uma mesma faixa de tensões. A geração do defeito se deu de forma contínua, tendo praticamente o mesmo tamanho em toda a extensão do cordão de solda que uniu as chapas de testes. Portanto, com a obtenção destas curvas pode-se levantar a vida a ser suportada pela junta soldada para tamanhos diferentes de defeito, dentro das faixas estabelecidas.

Pode-se observar que, através dos dois gráficos plotados, para cada tensão aplicada (neste caso para uma dada faixa de tensões), um posicionamento diferente das curvas, ou seja, a medida que o nível de tensão aplicada na estrutura aumenta, as curvas tendem a se posicionarem à esquerda do gráfico, mostrando que para um mesmo tamanho de defeito a vida suportada, em ciclos, será menor quando o nível de tensão aplicada for maior e vice-versa.

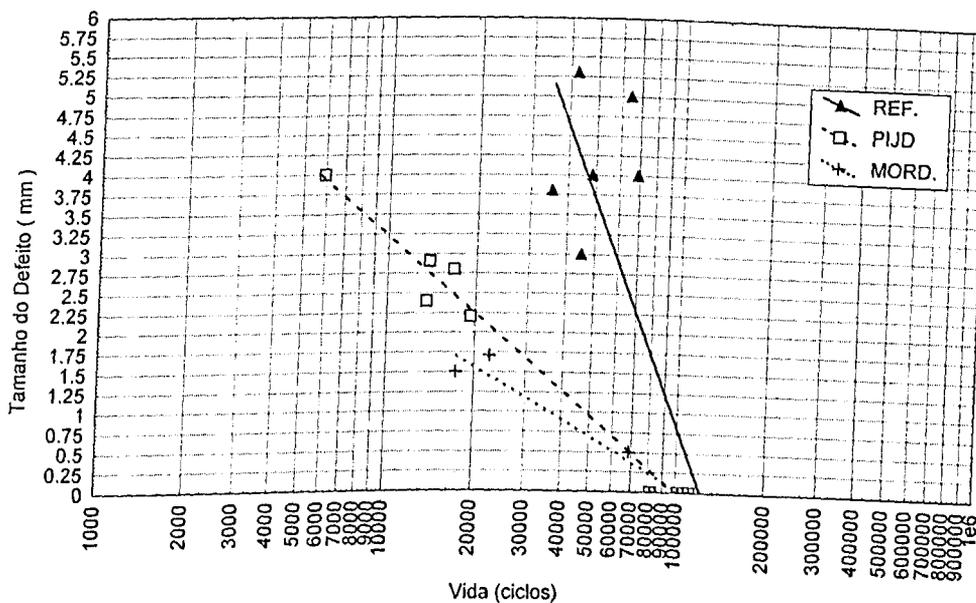
Verifica-se através dos gráficos que, independentemente do nível de tensão aplicada, a relação (tamanho de defeito x Vida) manteve-se praticamente constante para todos os tipos de defeitos. Isto é, para os dois níveis de tensões utilizados, as curvas que representam a relação "tamanho de defeito x vida" tiveram praticamente o mesmo comportamento (inclinação). A variação na inclinação das curvas que representam o mesmo defeito, pode ter sido provocada pela influência de outros tipos de defeitos de soldagem e pela influência de prováveis tensões residuais geradas durante o processo de soldagem. A realização de um maior número de testes, nos quais tente-se eliminar todas as influências que não estejam relacionadas com a condição de teste (defeito) estudada, poderão mostrar resultados mais claros da influência de cada tipo de defeito. Acredita-se que, com a realização de testes em outros níveis de tensões, estas curvas apresentem o mesmo comportamento. Se isto for constatado, torna-se possível estimar o comportamento (influência) de defeitos de soldagem em outros níveis de tensões aplicados. Poderia-se, então, extrapolar estas curvas para um número infinito de

ciclos e calcular a resistência à fadiga de uma junta soldada com um determinado nível de defeito.



REF.: Reforço excessivo; PIJ: Penetração incompleta da junta; MORD.: mordedura

Fig. 4.9 - Gráfico de tamanho de defeito x vida (Tensão \approx 240-250 MPa)



REF.: Reforço excessivo; PIJ: Penetração incompleta da junta; MORD.: mordedura

Fig. 4.10 - Gráfico de tamanho do defeito x vida -(Tensão \approx 200-220 MPa)

4.6 - Análise Final

De uma forma geral, a presença de defeitos de soldagem de natureza geométrica causam uma redução significativa na resistência à fadiga das juntas soldadas. Esta redução na resistência à fadiga atinge níveis inaceitáveis, dependendo do tipo de defeito e de sua magnitude. No tocante à soldagem, acredita-se que dois fatores são primordiais para a obtenção de uma junta com resistência à fadiga aceitável. Primeiro é o estabelecimento de um procedimento de soldagem adequado e segundo é a execução deste procedimento de forma apropriada. Os defeitos geométricos em muito se reduzirão. Com relação às condições de serviço, a estrutura soldada deve estar submetida a um nível de tensões condizente com o limite de resistência a fadiga da junta.

Uma ênfase maior deverá ser dada para defeitos de soldagem que provocam entalhes e redução da área resistente a aplicação de esforços. Principalmente quando estes defeitos apresentarem-se de forma combinada, ou seja, a presença de dois ou mais defeitos na junta soldada. Nas inspeções de alterações veiculares, o formato apresentado pelo cordão de solda não deve ser causa da rejeição da junta soldada, exceto quando for observado outros tipos de defeitos presentes no pé do cordão. O estudo do efeito combinado de defeitos de soldagem não foi o objetivo deste trabalho. No entanto, o que se notou é que esta é uma situação passível de acontecer e que deve ser considerada durante as inspeções de juntas soldadas submetidas à esforço cíclicos.

Normalmente, a magnitude dos esforços atuantes em uma estrutura veicular são determinados na fase de projeto, com uma boa margem de segurança. Porém, quando estas estruturas sofrem adaptações, a distribuição destes esforços alteram-se, e nem sempre um recálculo destes esforços é feito de forma adequada, podendo, dessa forma, deflagrar o início do processo de fadiga. Além disso, outros fatores, também muito importantes, podem influenciar na resistência à fadiga de uma junta soldada, dentre estes, estão o meio ambiente e a temperatura a que será submetida a união soldada. Um meio agressivo poderá induzir corrosão sob tensão e conseqüente diminuição da resistência a fadiga da junta.

Face aos resultados obtidos neste trabalho e ao tipo de inspeção que, atualmente, é feita nas liberações de alterações veiculares, é que se vê a necessidade de se estabelecer um procedimento de inspeção específico. Neste procedimento deverão estar especificados os requisitos mínimos de aceitabilidade, para os vários tipos de defeitos de soldagem, e os critérios de inspeção a serem utilizados (visual e ultra-som). A sua elaboração poderá ser baseada em resultados, tais como, os apresentados neste trabalho, em normas, tais como, AWS (1989 e 1996), recomendações IIW/IIS (1983) e literaturas de soldagem específicas, como por exemplo, AWS (1984). Um exemplo específico, para aplicações veiculares, é estabelecido pela norma da AWS (1989), que estabelece que defeitos de penetração incompleta ou trincas internas não devem ser aceitos, defeitos de mordedura podem ser aceitos em função do tamanho e da localização, e não há restrições quanto a altura do reforço do cordão de solda. Os resultados obtidos neste trabalho concordam plenamente com o que é estabelecido pela norma AWS (1989).

Na inviabilidade econômica da medição de defeitos internos, um critério alternativo de inspeção deve ser adotado, ou seja, uma rastreamento do procedimento de soldagem deve ser feita, exigindo-se a apresentação do procedimento de soldagem utilizado e do registro de qualificação do soldador, ficando estes documentos passíveis de serem avaliados e confirmados por um inspetor de soldagem qualificado.

Apesar do pequeno número de pontos obtidos para cada nível do defeito, os quais demonstram somente a tendência das curvas, os resultados obtidos mostraram que existe um tamanho crítico para cada tipo de defeito, de tal forma que um critério de aceitabilidade pode ser experimentalmente estabelecido. Para estimativas mais precisas do limite de resistência à fadiga de corpos de prova contendo defeitos, sugere-se a execução de mais testes em níveis de tensões mais baixos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Considerando-se que o objetivo principal deste trabalho foi o de verificar a influência que defeitos oriundos do processo de soldagem causam na resistência à fadiga de juntas soldadas, pode-se concluir que:

- A junta soldada apresenta uma resistência mecânica estática maior do que o material de base, mesmo com a presença de defeitos de penetração incompleta de aproximadamente 30% da espessura do material. No entanto, a sua resistência à fadiga é altamente reduzida em função deste tipo de defeito.

- Critérios de inspeção e aceitabilidade devem ser estabelecidos, e podem ser baseados em dados práticos, tais como, os obtidos neste trabalho. Os resultados obtidos, sugerem que :
 - I. Defeitos de penetração incompleta da junta não devem ser aceitos em quaisquer circunstâncias de carregamento cíclico, por apresentarem elevada redução na resistência à fadiga da junta soldada. Defeitos de penetração incompleta em torno de 10% da espessura da junta, poderá levar a uma redução na resistência à fadiga da junta em torno de 36%;
 - II. Um padrão de aceitabilidade pode ser definido para defeitos de mordeduras, por estes não apresentarem uma redução na resistência à fadiga da junta soldada tão significativa quanto ao defeito de penetração incompleta da junta. Os resultados mostraram que a redução na resistência à fadiga da junta soldada não alcançou 10% para o defeito mais severo de mordedura (Profundidade da mordedura em torno de 1,6 mm);

III. Para reforço excessivo, padrões de aceitabilidade podem ser estabelecidos, porém não tão rígidos quanto para defeitos de mordeduras, pois a sua influência na resistência à fadiga não mostrou-se tão relevante.

- A presença de qualquer tipo de defeito externo não deve ser aceita quando na junta soldada estiver presente defeitos internos, tais como, penetração incompleta ou falta de fusão das paredes do chanfro.

- O procedimento atual de inspeção de soldas utilizado pelos órgãos certificadores de alterações veiculares, baseado apenas no aspecto visual da solda, deve ser melhor avaliado, uma vez que os defeitos que mostraram maior risco, são os defeitos de penetração incompleta (não visíveis) e de mordedura (difícil avaliação por pessoal não especializado).

CAPÍTULO 6

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência que concentrações de tensões oriundas de defeitos de soldagem, de natureza geométrica, provocam no comportamento das juntas soldadas sob carregamento cíclico.
- Realizar um maior numero de testes de fadiga em corpos de prova com os mesmos níveis de defeitos, porém em outros níveis de tensões, e a partir daí estabelecer uma metodologia de avaliação de estruturas veiculares em função da qualidade das soldas realizadas e do grau de solicitação imposto na estrutura.
- Utilizar o alívio de tensões e/ou tratamento térmico de normalização nos corpos de prova para evitar o efeito de tensões residuais de soldagem e de alterações microestruturais no comportamento de resistência à fadiga de juntas soldadas contendo defeitos de soldagem.
- Fazer um trabalho para se avaliar os tipos de juntas, posições mais utilizadas e tipos de esforços aplicados em uniões soldadas oriundas de alterações veiculares. Fazer uma avaliação do risco real de fratura que acontece na prática.
- Com base nos resultados obtidos ver a necessidade real de se fazer uma norma específica para avaliação destes tipos de juntas soldadas.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1992)**, NBR 6152: Materiais Metálicos - Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração, 13p.
- ASTM (1996)**, E 466-96: Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, *Standard Practice for*. American Society for Testing and Materials, USA. 4p.
- ATWA, H. A. E. A. (1992)**, Fracture Toughness evaluation of the effects of defects in butt welded pipes, M.Sc. thesis, Cairo University, Giza.
- AWS (1980)**, *Welding Inspection*, American Welding Society, USA, 222 p.
- AWS (1984)**, ANSI/AWS A3.0: Standard Welding Terms and Definitions, American Welding Society, *Welding Journal*, June, USA, pp. 45-47.
- AWS (1987)**, *Welding Handbook - Welding Technology*, Vol. 1, Eighth Edition, American Welding Society, USA.
- AWS (1988)**, Standard for AWS Certification of Welding Inspectors, American Welding Society, USA, 10 p.
- AWS (1989)**, ANSI/AWS D8.8-89: Automotive Frame Weld Quality - Specification for Arc Welding, American Welding Society, USA, 10 p.
- AWS (1990)**, AWS B2.1: Standard for, Welding Procedure and Performance Qualification, American Welding Society, USA.
- AWS (1991)**, *Welding Handbook - Welding Process*, Eighth Edition, Vol. 2, American Welding Society, AWS, USA.
- AWS (1996)**, ANSI/AWS D1.1-96: *Structural Welding Code Steel*, American Welding Society, 440p.
- BRADSTREET, B. J. (1968)**, Effect of Surface Tension and Metal Flow on Weld Bead Formation. IIW/IIS Doc. 212-138-68, 9p.
- DIETER, E. G. (1976)**, *Mechanical Metallurgy*, McGraw Hill, Inc., USA.

- EASTERLING, K. E. (1983)**, *Introduction to the physical metallurgy of welding*. Butterworths & Co., 221pp.
- FBTS N-001/91 (1991)**, Qualificação e Certificação de Inspetores de Soldagem - Procedimento, FBTS, 18 p.
- FEDER, D. K. (1996)**, A System of Weld Quality Levels for Open Cast Mining Equipment Tied to ISO 5817/EN 25817, *Welding in the World/Le Soudage dans le Monde*, vol.38, pp. 207-216.
- GOSCH, T. AND PETERSHAGEN, H. (1996)**, The Influence of Undercuts on the Fatigue Strength of Butt Welds - A Parameter Study. International Institute of Welding, DOC. XIII-1631-96, 12p.
- IIW/IIS (1983)**, Geometrical Defects in Arc Welded Joints in Steel Materials - Classes of Requirements, DOC. IIW/IIS-778-83.
- ISO (1982)**, ISO 6520: Classification of Imperfections in Metallic Fusion Welds, With Explanations. International Organization for Standardization, 11p.
- LAWRENCE F. V. and MUNSE, W. H. (1973)**, Fatigue Crack Propagation in Butt Welds Containing Joint Penetration Defects, *Welding Research Supplement*, May 1973, pp. 221s-232s.
- LEWIS, C. (1996)**, Fatigue Performance of Fusion Welded Automotive High Strength Steels, *Welding & Metal Fabrication*, July, pp. 275-278.
- LYTTLE, K. A. AND STAPON, W. F. G. (1990)**, Select the Best Shielding Gas Blend for the Application, *Welding Journal*, American Welding Society, pp. 21-27.
- MADDOX, S J. (1995)**, Improving the Fatigue Strength of Welded Joints by Penning, *Metal construction*, April, pp. 220-224.
- MASUBUCHI, K. (1966)**, Effects of Stresses on Fracture Behavior of Weldments, Battelle Memorial Institute Columbus, Ohio, *Weld Imperfections*, pp. 567-583.
- MEYERS, J. C. (1995)**, Problematic Weld Discontinuities and Their Prevention, *Welding Journal*, AWS, Vol. 74, Nro. 6, June, pp. 45-47.
- NORTON, R. L. (1996)**, *Machine Design : An Integrated Approach*, Prentice Hall.
- OHARA, M.; FUJITA, H. & NISHI, T. (1986)**, A New Approach to Avoiding Undercut for High Speed Submerged Arc Welding, *Transactions of ISIJ*, Nr. 26, pp. 403-409.

- OKUMURA, T. e TANIGUCHI, C. (1982)**, *Engenharia de Soldagem e Aplicações*, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A.; Tóquio: The Association for International Technical Promotion, 460p.
- QUITES, A. M. e DUTRA, J. C. (1979)**, *Tecnologia de Soldagem a Arco de Soldagem* - Florianópolis, EDEME, 248 p.
- RADING, G. O. (1993)**, The Effect of Welded on the Fatigue Crack Growth Rate in a Structural Steel, *Welding Research Supplement*, AWS, July, pp. 307-312s.
- SCOTTI, A. (1991)**, *Process Modeling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW*, PhD Thesis, Granfield Institute of Technology (School of Industrial and Manufacturing Science), 273p.
- SHIGLEY, J. E. and MISCHKE, C. P. (1989)**, *Mechanical Engineering Design*, fifth edition, McGraw-Hill, USA.
- SURESH, S. (1991)**, *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, First edition, 617p.
- WAINER, E., BRANDI, S. D. E MELLO, F. D. H. (1992)**. *Soldagem - Processos e Metalurgia*, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 494 pp.
- WRIGHT, D. H. (1987)**, Metal Fatigue of Welded Assemblies, *Automotive Engineer*, MIRA Report, August, pp. 36-38.
- XIULIN, Z. and TIENXIE, C. (1989)**, Life Prediction of Butt Welds Containing Welding Defect, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, No. 5/6, pp. 1005-1011.

ANEXOS

ANEXO I - Procedimento de Execução de Ensaio de Fadiga no Sistema Universal de Testes MTS 810.

- 1 - Estabelecer o modo de controle (Carga)
- 2 - Verificar o "Range " mais adequado para execução do ensaio.
- 3 - Trocar os cartuchos, se necessário.
- 4 - Habilitar "Upper Limite e Lower Limite", no modo de deslocamento e carga.
- 5 - Verificar se a célula de carga está zerada.
- 6 - Certificar se o gerador de função está em "Output" igual a zero, se não pressionar "Return to 0".
- 7 - Colocar a máquina em controle e deslocamento.
- 8 - Ajustar o erro para zero.
- 9 - Ressetar.
- 10 - Ligar a máquina em alta pressão. Obs.: ligar primeiro em baixa pressão.
- 11 - Posicionar o atuador no centro mecânico ("Set Point" de deslocamento em 500).
- 12 - Transferir o modo de controle para controle de carga.
- 13 - Zerar a carga através do "Set Point".
- 14 - Ressetar o "interlock" de programa auxiliar.
- 15 - Colocar o "Span" em zero no módulo de deslocamento e módulo de força.
- 16 - Colocar o gerador de função em "Remote" e "Run Enable".
- 15 - Criar o programa gerador de função.
- 16 - Acionar o programa.
- 17 - Ajustar o "Preset Count".
- 18 - Zerar o "Current Count".
- 19 - Selecionar o "Display" em "Peak" e "Valley".
- 20 - Mandar rodar o programa, abrindo o Span do módulo de força até 100%.
- 21 - Verificar se o contador está contando corretamente, caso contrário ajustar o "Count Level Ajust" , na segunda placa.
- 22 - Ajustar e habilitar o "UnderPeak".

Parada do Ensaio: O ensaio poderá ser paralisado sob as seguintes circunstâncias:

Primeiro: Parada devido término da contagem, sem ruptura do corpo de prova.

Proceder da seguinte forma:

- 1 - Desabilitar o "Underpeak"
- 2 - Pressionar "Return to 0" no gerador de função.
- 3 - Se necessário, com o "Set Point" de força, zerar a força.
- 4 - Transferir para controle de deslocamento.
- 3 - Retirar o corpo de prova.

Segundo: Parada do ensaio devido ao acionamento de um dos limites de segurança. O ensaio deve ser reiniciado, porém antes de reiniciar o ensaio, proceder da seguinte forma:

- 1 - Verificar a causa da parada do ensaio.
- 2 - Caso necessário, redefinir os limites apropriados.
- 3 - Desabilitar o "UnderPeak".
- 4 - Ligar a alta pressão.
- 5 - Ressetar.
- 6 - Caso necessário, corrigir o contador.
- 7 - Rodar o programa.
- 8 - Habilitar novamente o "underpeak".

ANEXO II - Exemplos do Comportamento do Deslocamento Axial em Função do Número de Ciclos

A seguir serão apresentados os gráficos deslocamento x vida, que mostram a progressão do deslocamento na direção de aplicação da carga, em função do número de ciclos. O aumento progressivo deste deslocamento significa uma perda de rigidez do corpo de prova, decorrente do crescimento da trinca, enquanto a carga é mantida constante. De uma forma geral, os gráficos deslocamento x vida mostram

inicialmente um crescimento acelerado do deslocamento, devido à acomodação do sistema às cargas aplicadas. Após esta fase inicial, os deslocamentos se mantêm aproximadamente constantes, o que caracteriza um estágio de nucleação de trincas. O estágio final, onde o deslocamento volta a aumentar, caracteriza a propagação de trincas que atingiram o tamanho crítico, seguido da ruptura do corpo de prova.

As Figuras A2.1 e A2.2 representam o comportamento dos corpos de prova com defeitos de mordedura nos níveis 2 e 4, respectivamente. Os dados da tabela 4.4 mostram todas as condições em que foram realizados os testes. Na legenda está especificado o nível de tensão aplicado no teste e o tamanho do defeito. Os resultados mostram que um aumento de tensão aplicada em torno de 16% é altamente prejudicial a resistência à fadiga da junta soldada com defeito.

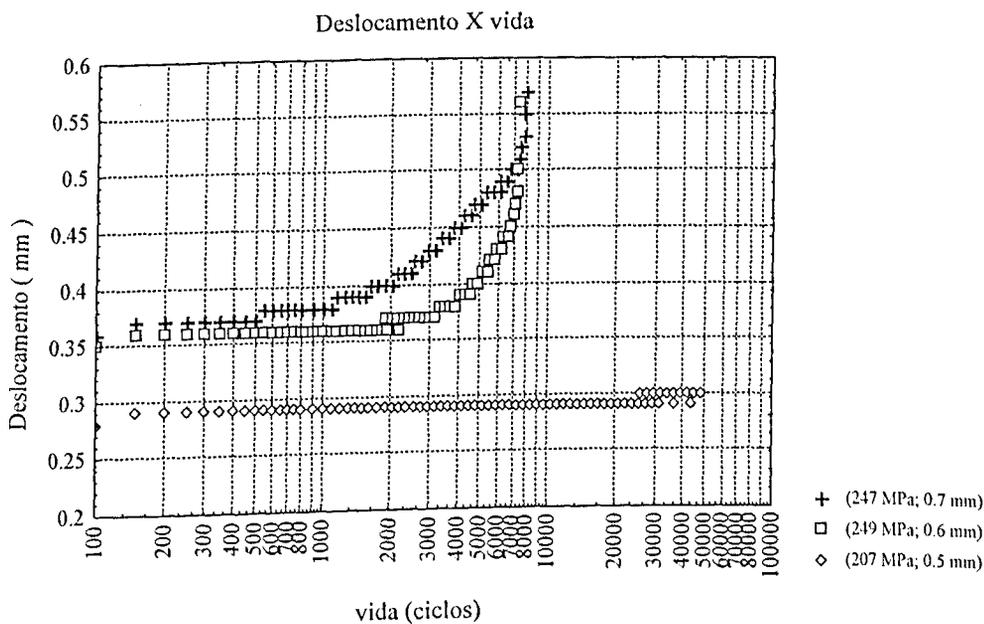


Fig. A2.1 - Defeito de mordedura : Nível 2

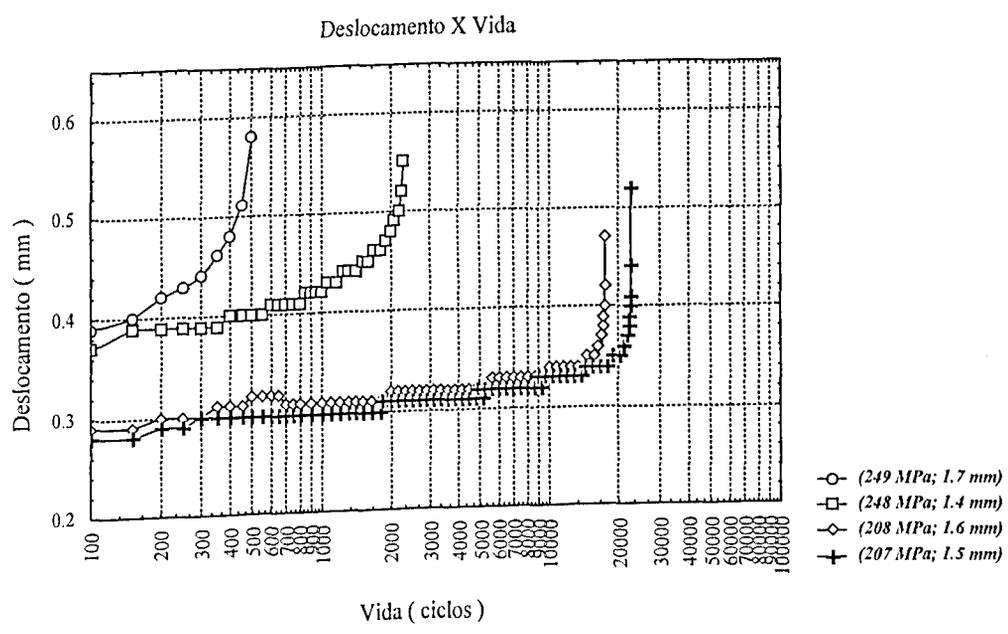


Fig. A2.2 - Defeito de Mordedura : Nível 4

Os gráficos de níveis 2 e 3 para reforço excessivo, mostrados nas Figuras A2.3 e A2.4, mostram a influência deste defeito no comportamento à fadiga da junta soldada. Verifica-se que em todos os níveis de tensão a resistência à fadiga do nível 2 foi muito baixa. Isto ocorreu devido à presença do defeito de sobreposição.

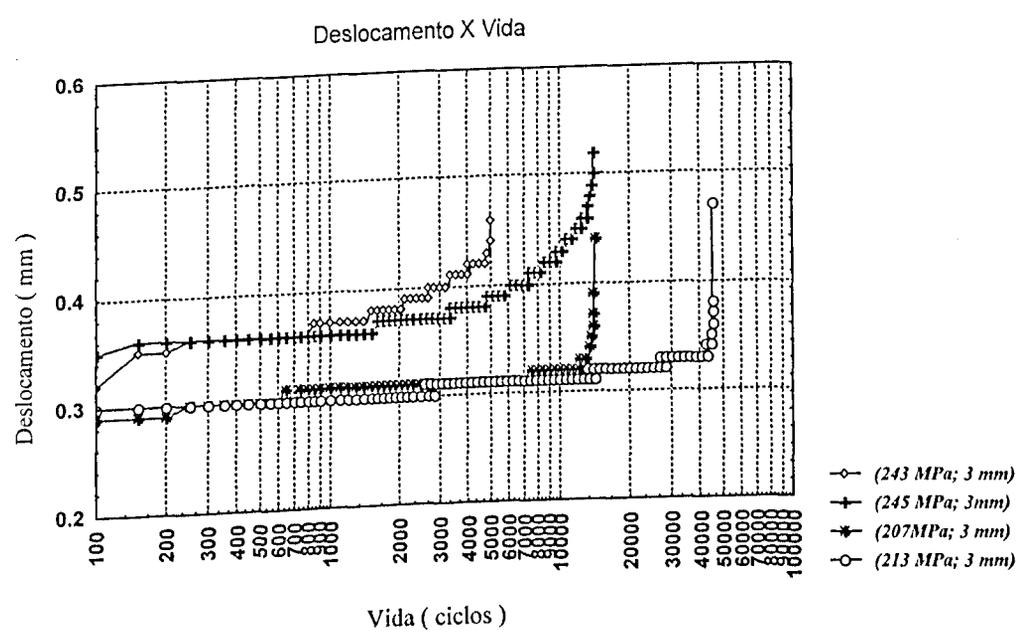


Fig. A2.3 - Defeito de Reforço Excessivo : Nível 2

O gráfico referente ao nível 3 mostra os testes em corpos de prova com defeito de sobreposição (REF 13, 33, 33 e 43) e em corpos de prova sem defeitos de sobreposição (REF 53 e 83), dados da Tabela 4.7.

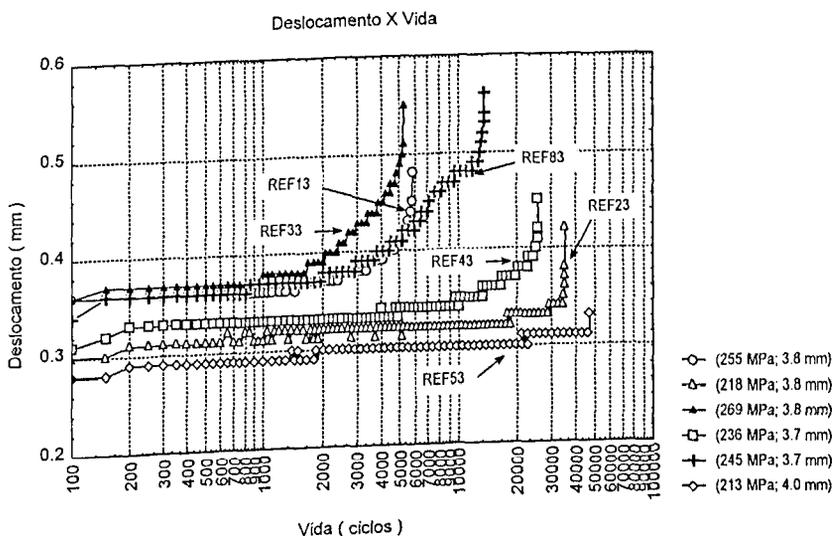
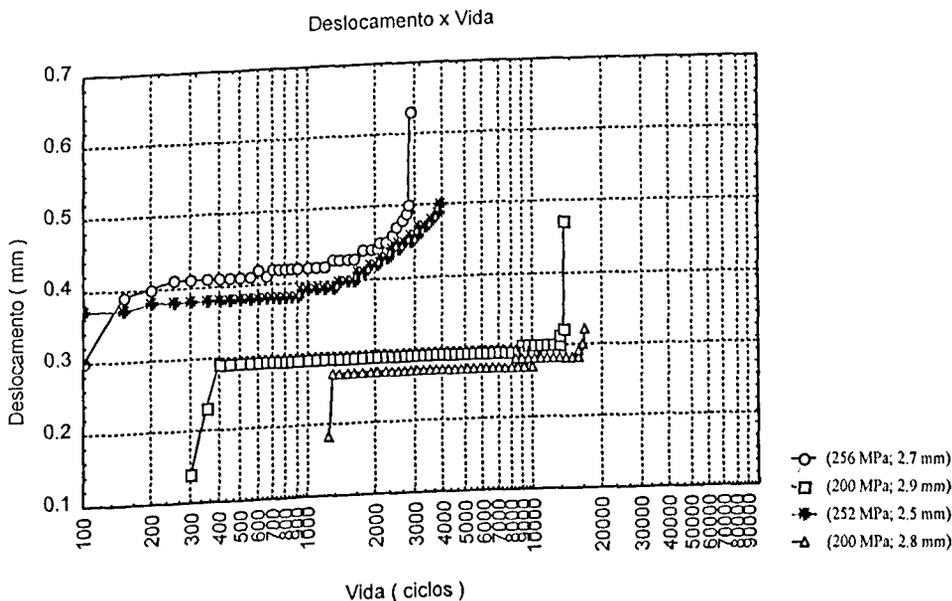


Fig. A2.4 - Defeito de Reforço Excessivo : Nível 3

O gráfico A2.5 mostra a influência do defeito de penetração incompleta da junta no comportamento de fadiga da junta soldada. As curvas plotadas neste gráfico correspondem aos dados dos corpos de prova (12; 22; 32 e 42) mostrados na Tabela 4.1.



A2.5 - Penetração Incompleta da Junta : Defeito de Nível 3