

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

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

DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS DE CORROSÃO-FADIGA PARA JUNTAS  
SOLDADAS DE AÇO API 5L X60

Fabício Pinheiro dos Santos

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre 2006

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

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

DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS DE CORROSÃO-FADIGA PARA JUNTAS  
SOLDADAS DE AÇO API 5L X60

FABRÍCIO PINHEIRO DOS SANTOS  
Engenheiro Metalúrgico

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

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2006

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

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira, COPPE/UFRJ  
Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGEM/UFRGS  
Dr. Marco André Ronaldo Froehlich, UNISINOS

Prof. Dr. Antonio Carlos Faria Villela  
Coordenador do PPGEM

*Não há nada mais poderoso do que uma idéia cujo momento chegou*  
*Vithor Hugo*

Dedico esta dissertação a minha mãe Erceli e a meus irmãos Juliano e Graziela

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor.Telmo Roberto Strohaecker, pelo apoio fundamental e incentivo para realização deste trabalho.

Ao professor Afonso Reguly pela orientação e paciência ao longo deste trabalho.

A toda a família Lamefiana em especial ao pessoal da CADETEC pela amizade ao longo destes anos.

Aos colegas do grupo de corrosão-fatiga Rafael “Leiteiro”, Aldo Altenhofen, Marlon Brandi, Rodrigo Borre, Guilherme Lemos, Russel Lysyk pela ajuda e amizade ao longo deste projeto.

Aos engenheiros Fabiano Mattei, Gabriel Petry, e Jailson Betanzos pelas contribuições técnicas.

A estudante de iniciação científica Claudia Fanezi pela ajuda com a formatação deste documento.

À Petrobras pela ajuda com o fornecimento do material para a realização deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	XII
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XV
RESUMO .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Fadiga .....	3
2.2 Solicitações de Fadiga .....	4
2.3 Aplicação da Mecânica da Fratura à Fadiga.....	6
2.4 Fadiga em Estruturas <i>Offshore</i> .....	8
2.4.1 Fadiga em Juntas Soldadas.....	9
2.4.2 Influência da Geometria do Cordão .....	10
2.4.3 Influência da Composição Química e da Microestrutura .....	13
2.5 Corrosão-Fadiga .....	15
2.5.1 Material.....	18
2.5.2 Meio Corrosivo (Água do Mar).....	20
2.5.3 Fatores que Influenciam a Corrosão-Fadiga em Água do Mar .....	22
2.6 Ensaios de Corrosão-Fadiga .....	27
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	31
3.1 Desenvolvimento do Equipamento.....	31
3.2 Sistema Hidráulico .....	34
3.3 Sistema de Controle.....	35
3.4 Distribuição de Gás .....	36
3.5 Validação do Equipamento.....	38
3.5.1 Cálculo Analítico da Tensão de Ensaio.....	38
3.5.2 Cálculo Experimental da Tensão de Ensaio .....	39
3.6 Teste do Equipamento .....	41

3.6.1	Materiais .....	41
3.6.2	Soldagem e Inspeção dos Tubos.....	41
3.6.3	Análise da Junta Soldada.....	42
3.6.4	Análise Química .....	42
3.6.5	Retirada dos Corpos de Prova .....	42
3.7	Ensaio de Tração.....	43
3.8	Ensaio de Fadiga (Curvas S/N) .....	44
3.9	Preparação do Meio Corrosivo .....	46
4	RESULTADOS .....	47
4.1	Validação do Equipamento.....	47
4.2	Análise da Junta Soldada.....	49
4.2.1	Ensaio de Microdureza .....	49
4.2.2	Análise Metalográfica.....	50
4.2.3	Análise Química e Ensaio de Tração .....	51
4.3	Resultados dos Ensaio de Fadiga.....	51
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	54
6	CONCLUSÕES .....	57
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
8	BIBLIOGRAFIA .....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Curva de fadiga esquemática (BRANCO 1986).....	4
Figura 2-2: Tipos de solicitações de fadiga (BRANCO 1986).....	5
Figura 2-3: Representação esquemática de ensaios de fadiga. (a) Flexão rotativa com solicitação alternada pura (b) ensaio do tipo push/pull com solicitação flutuante.....	6
Figura 2-4: Diagrama esquemático $da/dN$ , $\Delta K$ , mostrando os três regimes de propagação (BRANCO 1986).....	7
Figura 2-5: Esquema da influência dos movimentos da maré em tubulações para extração. (PINHO 2001) .....	9
Figura 2-6 Exemplos de trincas de fadiga em juntas soldadas iniciadas no pé do cordão (reforço). (METALS HANDBOOK vol 19) .....	10
Figura 2-7: Diferentes soldas em uma tubulação .....	11
Figura 2-8: Parâmetros geométricos do cordão de solda (BRANCO 1986) .....	11
Figura 2-9: Perfil da distribuição de tensões em uma junta de topo transversal. (BRANCO 1986).....	11
Figura 2-10: Variação do fator de concentração de tensões com o ângulo de tangência $\theta$ no cordão de solda. (BRANCO 1986).....	12
Figura 2-11: Influência do ângulo de tangência na resistência à fadiga de uma junta de topo transversal. (BRANCO 1986) .....	13
Figura 2-12: Relação do parâmetro $M_k$ com o ângulo de reforço $\alpha$ e o tamanho da trinca ....	14
Figura 2-13: Diferentes regiões microestruturais de uma junta soldada. (METALS HANDBOOK vol 19).....	14
Figura 2-14: Perfil tensões residuais em uma junta soldada. (BRANCO 1986) .....	15
Figura 2-15: Comparativo entre a curva de fadiga ao ar e em meio corrosivo. (GENTIL 1996).....	16
Figura 2-16: Mecanismo de nucleação em discordância ancorada. (JASKE 1981).....	17
Figura 2-17: Esquema dos três tipos de taxa de crescimento de trinca por corrosão-fadiga. (AUSTEN 1977).....	18



Figura 2-18: Parâmetros que influenciam na corrosão-fadiga. (BRANCO 1986) .....	19
Figura 2-19 : Efeito do tamanho de grão na taxa de propagação de trinca em corrosão-fadiga. (a) Liga Ti-8.6Al (b) Liga Al-5.7Zn-2.5Mg-1.5Cu.....	20
Figura 2-20: Influência do pH no comportamento fadiga de aço carbono em 3% de NaCl. (BRANCO 1986).....	23
Figura 2-21: Efeito da temperatura na corrosão-fadiga. (BRANCO 1986) .....	24
Figura 2-22: Influência da frequência no comportamento à corrosão-fadiga de um aço baixa liga em água do mar. (METALS HANDBOOK vol 19).....	25
Figura 2-23: Diferentes tipos de forma de onda de carregamento em fadiga. (BRANCO 1986).....	26
Figura 2-24: Efeito da forma da onda de carregamento na taxa de propagação de trinca em um aço 15Ni-5Cr-3Mo. (a) Meio inerte (b) Meio corrosivo contendo 3% de NaCl (METALS HANDBOOK vol 19) .....	26
Figura 2-25: Corpos de prova para corrosão-fadiga. (a) Torção. (b) Flexão rotativa com um lado apoiado. (c) Flexão rotativa puro. (d) Flexão reversa. (e) Carregamento axial. (METALS HANDBOOK vol 19) .....	27
Figura 2-26: Sistema de ensaio de corrosão-fadiga com servo hidráulica (WAHAB 2002) .....	28
Figura 2-27: Sistema de ensaio de corrosão-fadiga. (ANGELOVA 1999).....	29
Figura 2-28: Ensaio de corrosão-fadiga por flexão rotativa (WAHAB 2003). .....	29
Figura 2-29: Ensaio de da/dN com corpo de prova tipo CT parcialmente imerso. (METALS HANDBOOK vol 19).....	30
Figura 2-30: Ensaio de da/dN com corpo de prova tipo SENB imerso (SIVAPRASAD 2000).....	30
Figura 2-31: Ensaio de da/dN com cuba encaixada no corpo de prova tipo CT (LIN 1998) .....	30
Figura 3-1: Esquema de retirada de corpos de prova de corrosão-fadiga .....	31
Figura 3-2: Esquema de aplicação de carga e montagem do corpo de prova.....	32
Figura 3-3 Desenho do apoio inferior desenvolvido para os ensaios de corrosão-fadiga ...	33
Figura 3-4 Desenho do apoio superior desenvolvido para os ensaios de corrosão-fadiga ..	33
Figura 3-5: Quadro de reação desenvolvido para o equipamento de ensaio de corrosão-fadiga. ....	33
Figura 3-6 Célula de corrosão utilizada nos ensaio de corrosão-fadiga. ....	34
Figura 3-7: Imagem da unidade hidráulica utilizada nos ensaios de corrosão-fadiga.....	34

Figura 3-8: Cilindro hidráulico utilizado nos ensaios de corrosão-fadiga.....	35
Figura 3-9: Célula de carga utilizada nos ensaios de corrosão-fadiga. ....	35
Figura 3-10 Esquema de controle utilizado nos ensaios de corrosão-fadiga.....	36
Figura 3-11: Fotografia do sistema de controle construído para realização dos ensaios de corrosão-fadiga com a tela de controle.....	36
Figura 3-12: Fotografias do sistema para abastecimento de gases do LAMEF. ....	37
Figura 3-13 : Esquema do equipamento desenvolvido em funcionamento.....	38
Figura 3-14: Fotografia geral dos quatro sistemas de ensaio. ....	38
Figura 3-15 Desenho do esquema de aplicação de carga .....	39
Figura 3-16: Corpo de prova instrumentado para teste de carga.....	40
Figura 3-17: Detalhe da localização dos extensômetros. ....	40
Figura 3-18: Tubo soldado recebido para retirada dos corpos de prova. ....	41
Figura 3-19: Representação esquemática da localização dos perfis de microdureza. ....	42
Figura 3-20: Fotografia do tubo após os três cortes longitudinais. ....	43
Figura 3-21: Desenho do corpo de prova de tração.....	44
Figura 3-22: Desenho do corpo de prova para ensaio de fadiga. ....	44
Figura 3-23: Corpos de prova preparados para o ensaio de corrosão-fadiga. ....	45
Figura 3-24: Macrografia da junta soldada estudada.....	45
Figura 4-1: Gráfico de carregamento do corpo de prova com extensômetros.....	47
Figura 4-2: Gráfico da relação entre tensão analítica e experimental. ....	48
Figura 4-3: Forma da onda do carregamento resultante .....	48
Figura 4-4: Perfil de dureza da junta soldada estudada. ....	49
Figura 4-5: Aspecto metalográfico do material de base. Ataque Nital 2%.....	50
Figura 4-6: Aspecto metalográfico do metal de solda. Ataque Nital 2%.....	50
Figura 4-7: Aspecto metalográfico da ZTA. Ataque Nital 2%.....	51
Figura 4-8: Imagens mostrando a nucleação e a propagação da trinca durante o ensaio. ...	52
Figura 4-9: Fratura final do corpo de prova .....	52
Figura 4-10: Curvas de Wohler obtidas nos ensaios ao ar e em meio corrosivo.....	53
Figura 5-1: Gráfico mostrando a relação do fator de forma em função do comprimento de trinca para uma viga submetida a momento fletor puro (TADA 1985). ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Composição média da água do mar (PANOSSIAN 1993) .....	21
Tabela 2-2: Principais reações de corrosão do ferro em água contendo cloretos.....	21
Tabela 2-3: Reações de oxidação-redução do ferro em meios desaerados. ....	21
Tabela 3-1: Composição química e propriedades mecânicas nominais do material estudado. .....	41
Tabela 3-2: Tabela de parâmetros utilizados nos ensaios.....	45
Tabela 4-1: Formas de onda em função da frequência e a tensão máxima .....	49
Tabela 4-2: Composição química média do metal de base do tubo ensaiado. ....	51
Tabela 5-1: Relação de $\Delta K$ com a amplitude de tensão. ....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\alpha$	Angulo de tangencia do reforço;
$\theta$	Angulo complementar de $\alpha$ ;
$r$	Raio de reforço da solda;
$R$	Razão de carregamento;
$T$	Largura do reforço da solda;
$h$	Altura do reforço;
$P$	Força;
$\sigma$	Tensão na superfície sob tração;
$L$	distância entre apoios externos;
$I$	distância entre apoios internos;
$P$	carga aplicada;
$b$	Espessura do corpo de prova;
$W$	Espessura da tubulação;
$M$	Momento fletor;
$C$	Distância da linha neutra até o ponto de medida da tensão,
$J$	Momento de inércia;
$\sigma$	Tensão aplicada;
$\sigma_{Máx}$	Tensão máxima do ciclo de fadiga;
$\sigma_{Mín}$	Tensão mínima no ciclo de fadiga;
$\sigma_{Méd}$	Tensão média do ciclo de fadiga;
$K_t$	Fator de concentração de tensões;
$\Delta K$	Variação do fator de intensidade de tensões;
$K_I$	Fator de intensidade de tensões para o modo I de deformação;
$K_{II}$	Fator de intensidade de tensões para o modo II de deformação;
$K_{III}$	Fator de intensidade de tensões para o modo III de deformação;
$K_{IC}$	Fator de intensidade de tensões critico;
$\Delta K_{TH}$	Limiar de propagação de trinca por fadiga;
$K_{ISCC}$	Limiar de propagação de trinca por corrosão sob tensão;

$a$	Comprimento de trinca;
$N$	Número de ciclos
$m$	Expoente de propagação de trinca
$C$	Constante de propagação de trinca;
$Y$	Fator de forma;

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um equipamento de ensaios para avaliar a vida de juntas soldadas, provenientes de tubulações para extração de petróleo, submetidas à corrosão-fadiga. Para atingir este objetivo foi estudado em que condições de corrosão-fadiga uma tubulação esta exposta em alto mar sendo então definidos os parâmetros mais relevantes para serem reproduzidos em laboratório em corpos de prova menores. Nesta etapa foram definidos quais seriam os parâmetros de ensaio que o equipamento deveria atender. O equipamento foi construído para ensaiar uma junta soldada circunferencial por flexão a quatro pontos através de um sistema hidráulico com controle de carga com uma frequência de 0,2 Hz e razão de carregamento,  $R=0,1$ . Para validar o equipamento foi usado um corpo de prova instrumentado com extensômetros resistivos para comparar o a carga calculada com a experimental e determinar se o nível de carregamento se mantém constante ao longo dos ensaios. Foi levantada uma curva de fadiga com o equipamento desenvolvido e comparada com uma curva de fadiga feita ao ar do mesmo material em uma máquina servo hidráulica MTS.

## ABSTRACT

The objective of this work is to develop a machine to perform corrosion fatigue tests in welded samples machined from pipeline used in offshore installations. Prior to the design of the equipment it was studied the corrosion fatigue conditions which pipelines are exposed, and which are the most important parameters to be reproduced in laboratory. At that stage it was defined the parameters that the equipment would have to simulate. The equipment was constructed to test a welded joint in four point bending using a hydraulic system with load control at a frequency of 0.2Hz and loading ratio of 0.1. To validate the equipment a sample instrumented with strain gauges was used to compare the calculated load with the actual experimental load. That specimen was also used to evaluate if the load ratio remained constant throughout the tests. A fatigue curve obtained with the equipment developed during this study was compared with a fatigue curve obtained in atmospheric air using a commercially available MTS machine.

## 1 INTRODUÇÃO

A escassez das reservas mundiais de petróleo levou as companhias petroquímicas a procurar, com mais intensidade, a exploração marítima de petróleo (*offshore*). Esta exploração culminou em águas agitadas e profundas, tais como águas do mar do norte, costa norte das ilhas britânicas e na costa da Noruega.

Perfis de secção circular e outros componentes metálicos são utilizados em estruturas de plataformas marítimas necessárias à exploração *offshore*. Este tipo de estrutura está sujeito a processos de fadiga devido a carregamentos variáveis em virtude das solicitações introduzidas por ondas e ventos fortes.

As elevadas solicitações a que estão sujeitas estas estruturas, por ação de ondas elevadas e ventos fortes, obriga a recorrer a estruturas de grandes dimensões, construídas com tubulações de elevada espessura. O problema da fadiga, em particular nas juntas soldadas, tornou-se muito importante e a escassez de resultados confiáveis, quanto ao comportamento a fadiga de juntas tubulares circulares de grandes dimensões, motivou o lançamento de programas de ensaios e investigação, com vista à obtenção de resultados que pudessem ser utilizados pelos projetistas destas estruturas.

A investigação no domínio da fadiga de juntas soldadas de plataformas de exploração teve um forte estímulo nos EUA, Inglaterra e Japão nos anos 60. Os resultados destes estudos estabeleceram códigos e curvas de projeto para fadiga, como é o caso dos códigos da API e AWS dos EUA e o código inglês BS 6235.

Os ensaios de fadiga em perfis tubulares inteiros são bastante dispendiosos, por serem utilizados corpos de prova de grandes dimensões, o que exige equipamentos de alta capacidade de carga. Por este motivo, o custo dos sistemas de ensaio é bastante elevado, bem como toda a instrumentação para leitura e registro dos dados. Em termos comparativos, o custo destes sistemas de ensaios é cerca de 20 a 50 vezes mais elevado que



uma máquina de ensaios de fadiga convencional para pequenos corpos de prova. (BRANCO 1986)

Outro fator importantíssimo é no tocante a influência do meio agressivo no comportamento em fadiga de componentes. A fadiga com corrosão ou corrosão-fadiga nestes tipos de junta tem sido pouco estudada. Poucos trabalhos foram realizados com o material exposto diretamente à ação do meio ambiente (água do mar). Os resultados obtidos mostraram uma diminuição da resistência a fadiga em relação ao ar de trinta a cinquenta por cento.

Existem várias dificuldades em se realizar ensaios de corrosão-fadiga, entre elas está a própria montagem do ensaio, onde se deve expor o corpo de prova ao meio corrosivo (seja aquoso ou gasoso) tendo, normalmente, que ser isolado do meio ambiente. Em alguns casos o meio pode ser tóxico ou de difícil manipulação. Outro ponto é que para se obter resultados válidos em ensaios de corrosão-fadiga deve-se trabalhar com frequências muito baixas (da ordem de 0,1 a 1 Hz), promovendo tempo para que as reações químicas ocorram, o que leva a tempos de ensaios muito longos.

Neste contexto, o objeto desta dissertação é desenvolver um equipamento para realizar ensaios de corrosão-fadiga em juntas soldadas expostas a um meio contendo cloretos. Em função da baixa frequência de carregamento, optou-se por utilizar dispositivos mais simples de controle do ensaio ao invés do uso de sistemas servo-controlados. Para calibração do equipamento, foram realizados ensaios de corrosão-fadiga em juntas soldadas retiradas de uma tubulação offshore API 5L X60.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fadiga

Define-se fadiga como o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. O estudo do fenômeno é de importância para o projeto de máquinas e estruturas, uma vez que a grande maioria das falhas em serviço são causadas pelo processo de fadiga.

As primeiras observações do fenômeno de fadiga datam o ano de 1829, quando W.A.J Albert (SURESH, 1998) publicou alguns resultados de testes realizados em correntes de ferro submetidas a carregamentos cíclicos. No período de 1852 a 1869, em Berlim, Augusto Wohler estudou a ruptura de eixos ferroviários. A ocorrência destas falhas era imprevisível para os engenheiros da época. Vários eixos fraturavam após apenas algumas centenas de quilômetros de serviço e, embora projetados de acordo com critérios de resistência estática, essa fratura ocorria sob condições de carregamento normal. Apesar de ensaios de tração realizados no material antes da entrada em serviço revelarem adequada ductilidade, a ruptura em serviço não apresentava sinais de deformação plástica. Ainda, estes mesmos ensaios realizados no material após a fratura apresentavam as características de ductilidade iniciais.

Wohler projetou aparelhos e desenvolveu métodos para medições das cargas de serviço e introduziu o conceito do limiar de fadiga em metais – tensão abaixo da qual não ocorreriam falhas por fadiga – e definiu o que viriam a ser as curvas S-N (variação de tensão x Número de ciclos) ainda hoje utilizadas no cálculo de vida em fadiga. As principais conclusões foram:

- A falha do material solicitado dinamicamente pode ocorrer bem abaixo da tensão de falha sob carregamento estático;

- A amplitude de tensões é o parâmetro mais importante na vida em fadiga, mas tendo a máxima tensão de tração grande importância.

A figura 2-1 mostra uma curva de Wohler (ou curva S/N) esquemática, que consiste em um gráfico de tensão aplicada por número de ciclos suportados plotados em escala logarítmica, mostrando uma curva com característica assintótica ao eixo do número de ciclos. Isso caracteriza a existência de um limite de fadiga do material abaixo do qual não ocorrerá falha (ruptura) por fadiga. Este limite, em alguns casos, não é observado, por exemplo, quando o material é exposto a algum meio agressivo.

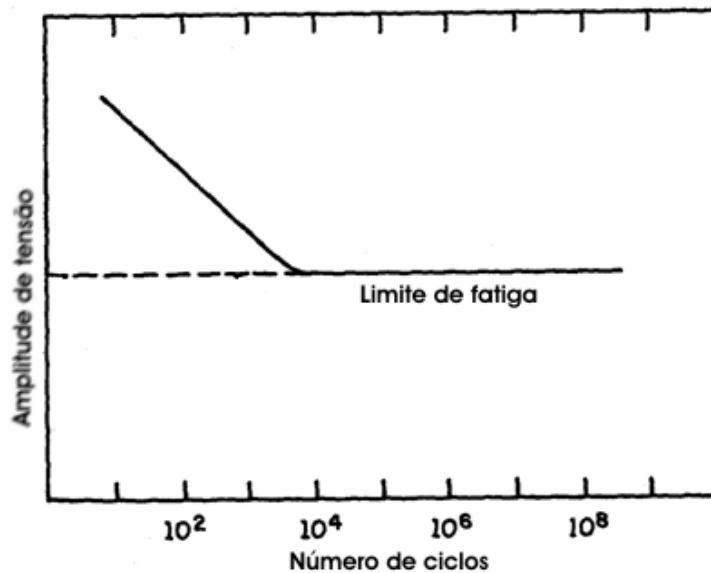


Figura 2-1: Curva de fadiga esquemática (BRANCO 1986).

## 2.2 Solicitações de Fadiga

Falhas por fadiga são causadas por solicitações alternadas. Desta forma é importante definir os diferentes tipos de carregamento que podem ocorrer.

Dado um ciclo de fadiga contido entre uma tensão mínima ( $\sigma_{Mín}$ ) e uma tensão máxima ( $\sigma_{Máx}$ ) pode-se definir uma tensão média dada por:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{Máx} + \sigma_{Mín}}{2} \quad (1)$$

Dependendo do valor da tensão média  $\sigma_m$ , a solicitação será designada alternada pura, alternada, repetida ou flutuante como mostra a figura 2-2.

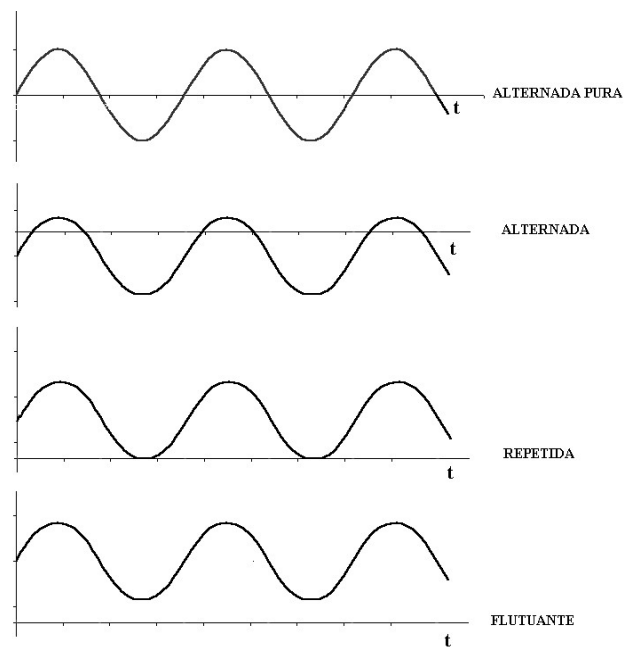


Figura 2-2: Tipos de solicitações de fadiga (BRANCO 1986)

Outra maneira de expressar o tipo de solicitação é pela razão de carregamento e pela amplitude de carga. A razão de carregamento,  $R$ , é dada por:

$$R = \frac{\sigma_{Mín}}{\sigma_{Máx}} \quad (2)$$

E a amplitude de tensão é dada por:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{Máx} - \sigma_{Mín}}{2} \quad (3)$$

Os primeiros ensaios de fadiga foram realizados em máquinas de flexão rotativa como mostra a figura 2-3a. Neste tipo de ensaio a solicitação de fadiga é do tipo alternada pura, sendo a curva de Wohler construída em termos da amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ) por número de ciclos. Atualmente, é comum ensaios de fadiga do tipo tração/compressão (*push/pull*) (figura 2-3b) com uso de solicitação flutuante com uma determinada razão de carregamento. O resultado é um gráfico de tensão máxima por número de ciclos.

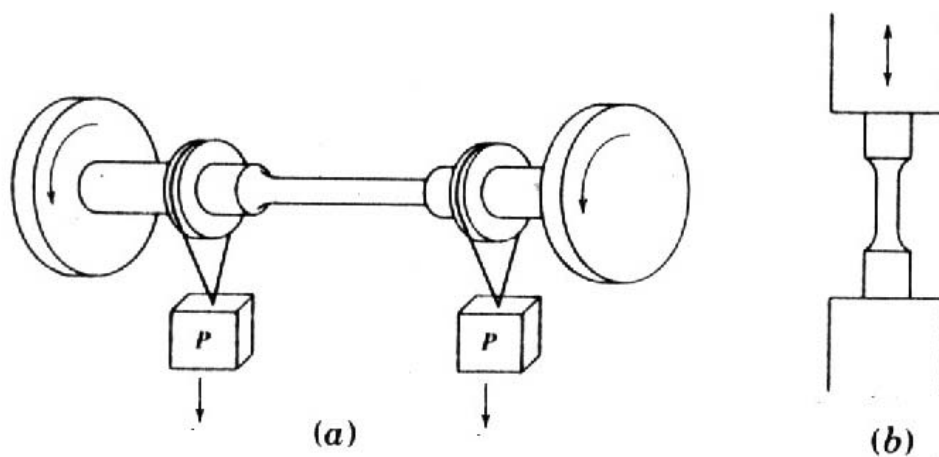


Figura 2-3: Representação esquemática de ensaios de fadiga. (a) Flexão rotativa com solicitação alternada pura (b) ensaio do tipo push/pull com solicitação flutuante.

### 2.3 Aplicação da Mecânica da Fratura à Fadiga

Os testes de fadiga convencionais consistem em ensaiar corpos de prova lisos e polidos com diferentes tipos de solicitações e carregamentos (tração, flexão, flexão rotativa etc). Este tipo de ensaio não distingue a etapa de nucleação e propagação, sendo apenas medido o número de ciclos total para a falha. Desta forma seria aplicável a um componente considerado livre de defeitos superficiais, o que pode superestimar a vida em fadiga (ANDERSON 1995).

Resultados dos estudos da mecânica da fratura originaram novas teorias de projeto em que se assume que o material não é um meio contínuo e que pode conter defeitos originados, por exemplo, de processos de fabricação.

Esta abordagem consiste em um modelo quantitativo do comportamento de componentes com defeitos observados ou cuja existência se suspeita.

O resultado deste estudo é o diagrama  $da/dN$  (Taxa de propagação de trinca por número de ciclos) por  $\Delta K$  (fator de intensidade de tensões). Um diagrama esquemático  $da/dN$  por  $\Delta K$  é mostrado na figura 2.4.

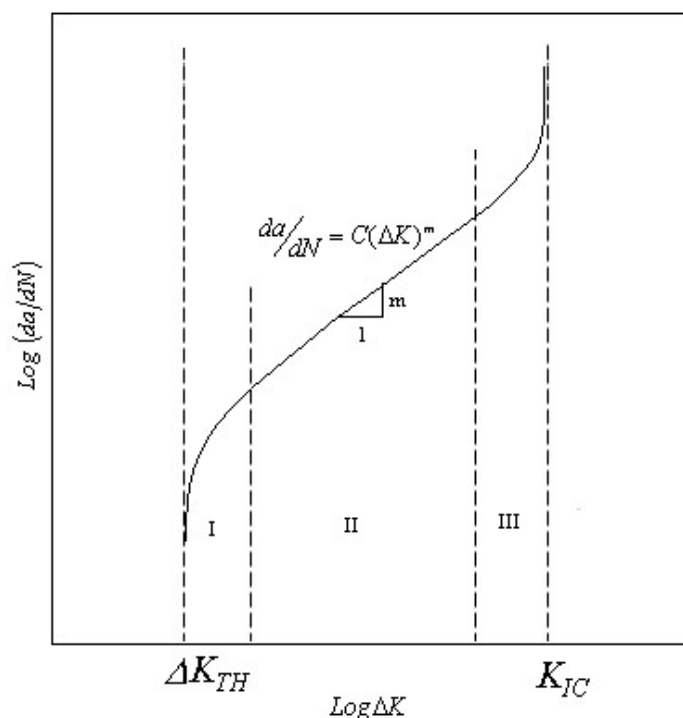


Figura 2-4: Diagrama esquemático  $da/dN$ ,  $\Delta K$ , mostrando os três regimes de propagação (BRANCO 1986)

O diagrama consiste em três regiões básicas: a região I onde a velocidade de propagação depende principalmente do material e microestrutura, havendo um valor de  $\Delta K$  abaixo do qual não há propagação de trinca. Este valor de  $\Delta K$  denomina-se limiar de propagação da trinca (threshold)  $\Delta K_{TH}$ , que pode ser considerado uma propriedade do material e é de grande importância na engenharia, pois pode-se prever se um defeito vai propagar ou não sabendo o  $\Delta K$  atuante no mesmo. No regime II, ocorre propagação de trinca mas a taxa de propagação ( $da/dN$ ) é governada principalmente pela variação do fator de intensidade de tensões. Esta relação é representada pela lei de Paris dada pela equação 6:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6)$$

Esta abordagem permite prever a vida remanescente de um componente em fadiga e pode ser aplicada para materiais dúcteis, mesmo para os quais não se consegue obter valores válidos de tenacidade à fratura no regime linear elástico para a espessura de interesse, uma vez que normalmente as tensões nominais a serem aplicadas para propagar uma trinca são baixas e elas produzem uma pequena zona plastificada na ponta da trinca se comparada com as dimensões da peça. Estas curvas são utilizadas na seleção de materiais,

onde as propriedades requeridas são descritas pelos parâmetros  $m$ ,  $C$  e  $\Delta K_{TH}$ . Em geral deseja-se:

- Valores baixos do expoente  $m$  e da constante  $C$ ;
- Valor elevado de  $\Delta K_{TH}$ ;
- Valor elevado de  $K_{IC}$ .

O ponto de vista da mecânica da fratura não é abordado neste trabalho, para maiores informações sobre o assunto recomenda-se a referência: ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*.

#### 2.4 Fadiga em Estruturas *Offshore*

O fenômeno da fadiga tem sido analisado como sendo um importante fator na integridade de estruturas e instalações em alto mar. Um exemplo de estrutura sujeita a fadiga são os risers acoplados a plataformas flutuantes. Os risers são tubulações que levam o petróleo desde o poço submarino até a plataforma offshore como mostra a figura 2-5. Os *risers* rígidos são formados por tubos fabricados normalmente em aço, podendo ser instalados tanto verticalmente, quanto em forma de catenária, segundo a norma americana *API RP 2RD*.

Neste caso, as solicitações dinâmicas são causadas pelo efeito das ondas, correntes marítimas e, indiretamente, pelos ventos atuando sobre a estrutura da plataforma (PINHO 2001).

Quando destinados a águas profundas, e conectados a plataformas flutuantes, o comportamento mecânico é, em geral, composto por grandes deslocamentos no topo e elevadas deflexões devido ao grande comprimento e pequena rigidez a flexão do riser. A fadiga é caracterizada como sendo de alto ciclo, ou seja, elevada amplitude e baixas taxas de carregamento. A frequência de carregamento é baixa variando da ordem de 0,002Hz (BETANZOS 2004).

As tubulações metálicas estão entre as mais utilizadas por oferecerem as seguintes vantagens:

- Baixo custo;
- Fácil fabricação;
- Impermeabilidade a hidrocarbonetos;

- Capacidade de suportar elevadas pressões externas e internas;
- Maior compatibilidade para trabalho com fluidos;
- Adaptação de técnicas de ensaios não destrutivos.

No entanto, existem considerações a serem levadas em conta no que se refere à corrosão interna ou externa e, como no caso de interesse desse trabalho, do comportamento frente às solicitações dinâmicas de estruturas metálicas. Entre os pontos a serem considerados estão a qualidade das juntas soldadas e a influência do ambiente corrosivo que pode acelerar o processo de fadiga.

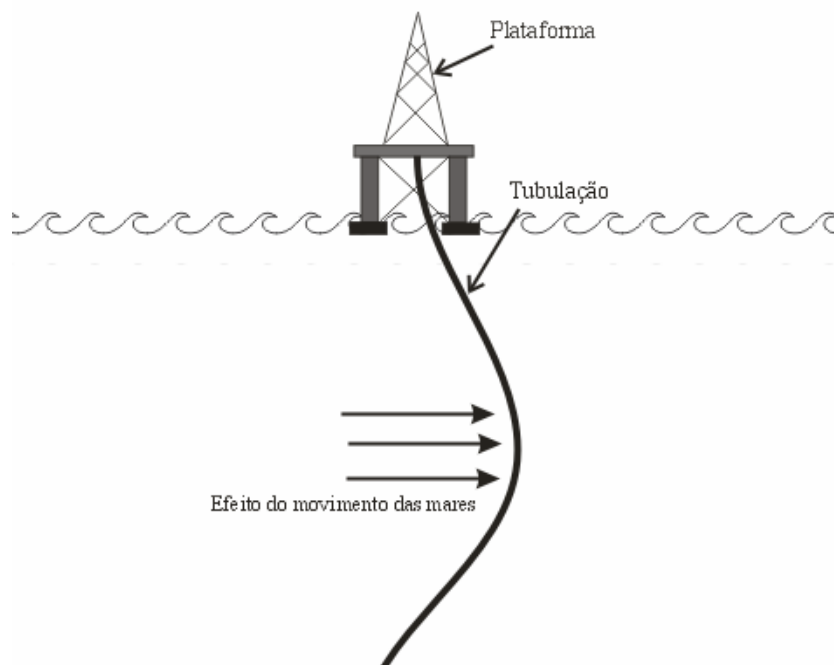


Figura 2-5: Esquema da influência dos movimentos da maré em tubulações para extração. (PINHO 2001)

#### 2.4.1 Fadiga em Juntas Soldadas

O processo de soldagem é amplamente utilizado na união de tubulações para prospecção, sendo as regiões soldadas os pontos mais susceptíveis a falha por fadiga. A figura 2-6 mostra exemplos de trincas de fadiga em duas juntas soldadas. A nucleação das trincas de fadiga ocorre em regiões específicas da junta e é influenciada pela geometria do cordão (NEROLICH 1981), além de sofrer influência da composição química do metal de adição e de base e das suas microestruturas.



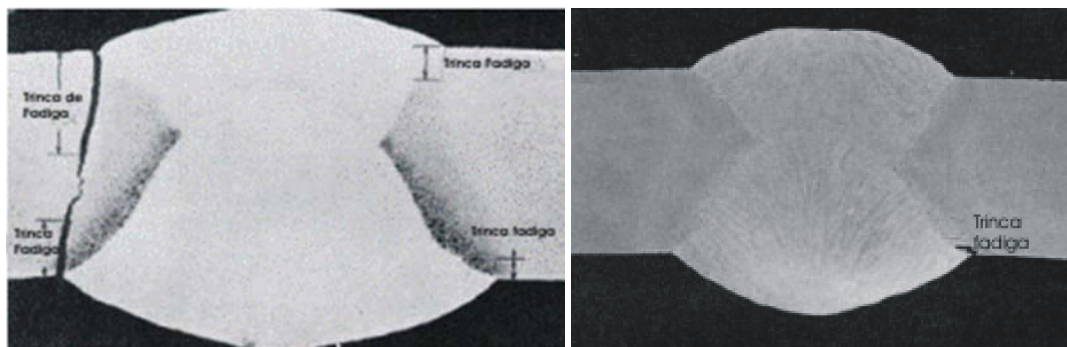


Figura 2-6 Exemplos de trincas de fadiga em juntas soldadas iniciadas no pé do cordão (reforço). (METALS HANDBOOK vol 19)

Entre os vários fatores que podem influenciar a vida em fadiga de uma junta soldada, e que serão tratados neste trabalho, estão:

- Geometria do cordão;
- Material e estado metalúrgico (composição química e microestrutura);
- Meio ambiente.

Vários outros fatores podem influenciar a vida em fadiga em juntas soldadas, como por exemplo: processo de soldagem utilizado, alinhamento dos componentes da junção, qualidade do cordão de solda, quantidade de defeitos, etc; porém, a abordagem de todos estes pontos foge do objetivo deste trabalho e não serão discutidas.

#### 2.4.2 Influência da Geometria do Cordão

Uma tubulação possui, em geral, dois tipos de juntas soldadas: longitudinais e circunferenciais. Nas longitudinais, o cordão é paralelo ao eixo do tubo e é feito durante a fabricação do mesmo. As juntas circunferenciais são feitas ao longo do perímetro do tubo e servem para unir os vários segmentos durante a instalação da tubulação. Um esquema desta montagem é mostrado na figura 2-7.

A figura 2-8 mostra as principais medidas de uma junta soldada. A altura  $h$  na figura 2-8 é chamado de *reforço*, que é uma quantidade de sobremetal colocada com o objetivo de se aumentar a secção da junta elevando a resistência estática da mesma. A geometria do reforço é de extrema importância na vida em fadiga de uma junta, sendo que as variáveis mais importantes são o ângulo  $\theta$  (ou seu complementar  $\alpha$ ), a largura  $T$  e o raio de concordância  $r$ .

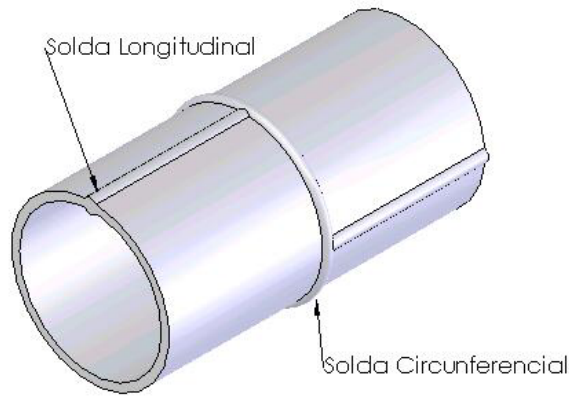


Figura 2-7: Diferentes soldas em uma tubulação

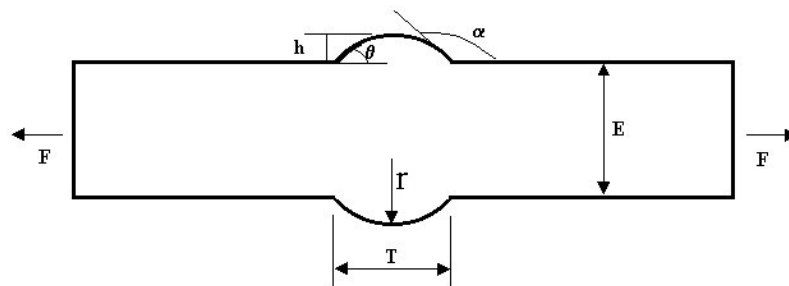


Figura 2-8: Parâmetros geométricos do cordão de solda (BRANCO 1986)

Nas juntas soldadas, os processos a iniciação e propagação das trincas de fadiga são facilitadas devido a concentração de tensões do reforço na região do cordão, sendo o pé do cordão (ponto A) na figura 2-9 o principal ponto de nucleação de trincas. Para componentes mecânicos e estruturais que contenham descontinuidades geométricas, pode-se associar um fator multiplicador de tensão  $K_t$  que é a relação entre a tensão nominal aplicada pela tensão local na região da descontinuidade e é dado por:

$$K_t = \frac{\sigma_{Máxima}}{\sigma_{Nominal}} \quad (7)$$

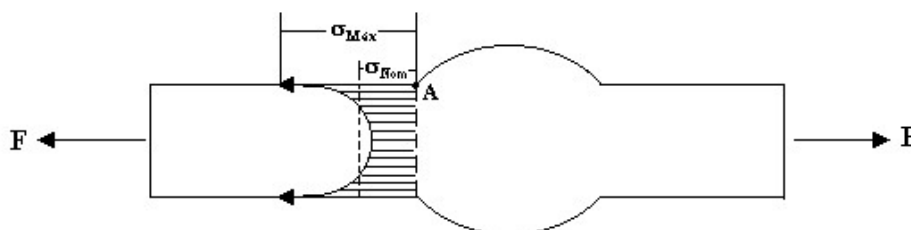


Figura 2-9: Perfil da distribuição de tensões em uma junta de topo transversal. (BRANCO 1986)

Ensaaios de fadiga mostraram que um fator geométrico importante na vida em fadiga de uma junta soldada é o ângulo  $\theta$  (ou o seu complementar  $\alpha$ ). Quanto mais elevado for  $\theta$  maior será o valor do parâmetro  $K_t$ ; e conseqüentemente o valor da tensão máxima local. Por sua vez, menor será a vida em fadiga (NEROLICH 1981). A relação do ângulo  $\theta$  e o parâmetro  $K_t$  é apresentado na figura 2-10.(BRANCO 1986)

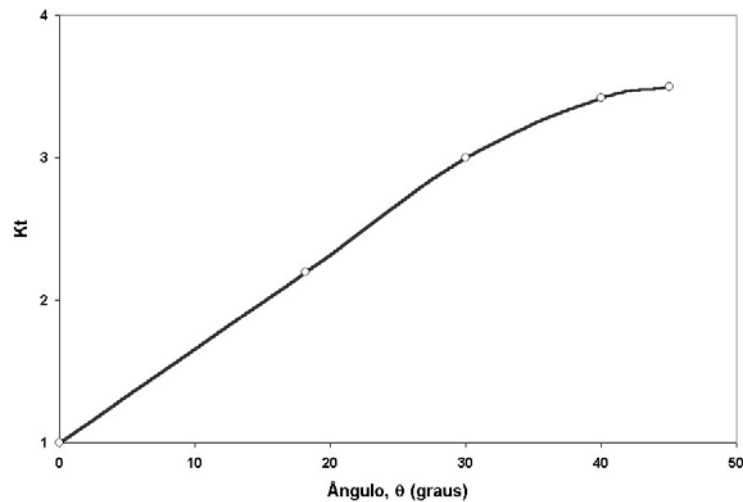


Figura 2-10: Variação do fator de concentração de tensões com o ângulo de tangência  $\theta$  no cordão de solda. (BRANCO 1986)

A figura 2-11 mostra uma relação do ângulo do reforço  $\alpha$  com a resistência à fadiga de uma junta. Neste gráfico observa-se que quanto maior for este ângulo, maior será a resistência à fadiga.

Isto ocorre pela minimização da concentração de tensões no pé do cordão com o aumento do ângulo  $\alpha$ . Para um ângulo de  $180^\circ$ , a resistência à fadiga da junta tende ao valor da placa de material base. Logo, é possível obter um aumento da resistência à fadiga com a usinagem do reforço da solda, eliminando-se o efeito da concentração de tensões ( $K_t=1$ ).

É usual a prática de remover o reforço após a soldagem, com o objetivo de eliminar esta concentração de tensão e, conseqüentemente, aumentar a vida em fadiga. No entanto, esta remoção é trabalhosa e às vezes inviável na prática.

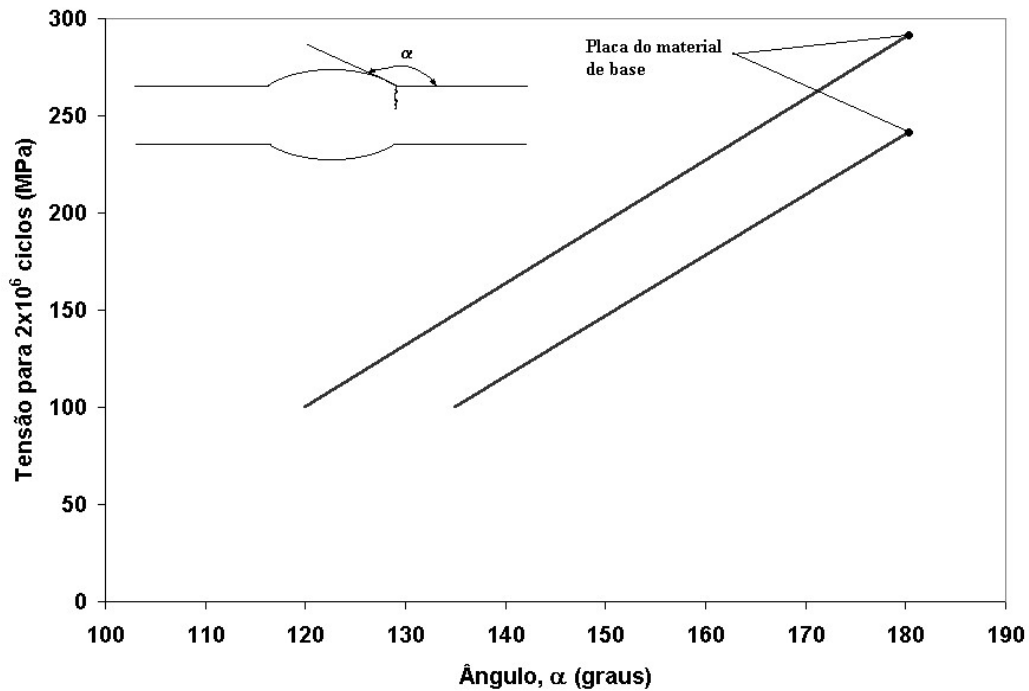


Figura 2-11: Influência do ângulo de tangência na resistência à fadiga de uma junta de topo transversal. (BRANCO 1986)

### 2.4.3 Influência da Composição Química e da Microestrutura

Os materiais normalmente utilizados na construção de componentes estruturais para uso em alto mar são os aços de baixo teor de carbono devido a sua melhor soldabilidade. O processo de soldagem empregado usualmente é o de arco elétrico. Este processo de soldagem produz diferenças microestruturais marcantes na região da solda, como mostra esquematicamente a figura 2-12. A microestrutura consiste em três regiões bem definidas, descritas a seguir:

- Zona de fusão (ZF): Região com microestrutura de solidificação, onde o metal de base é fundido e misturado ao metal de adição. A composição química é função do consumível e do nível de diluição da junta;
- Zona afetada pelo calor (ZAC): Região onde não ocorre variação de composição química, porém ocorrem transformações microestruturais em função do gradiente e ciclagem térmico;
- Metal base (MB): Região do material que não sofre efeito do gradiente térmico.

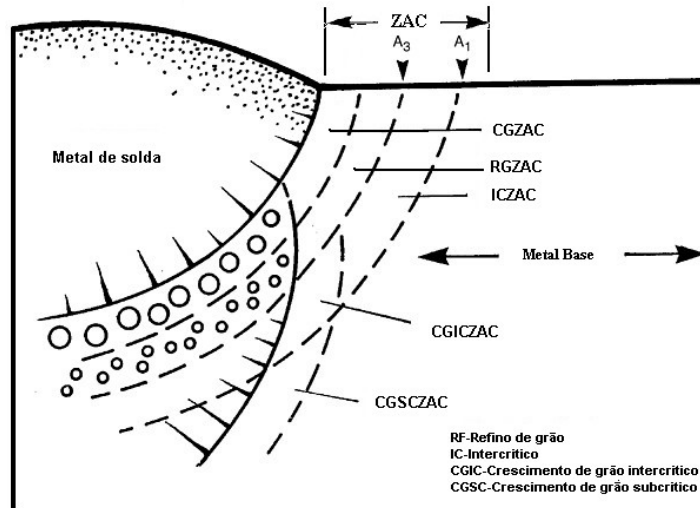


Figura 2-12: Diferentes regiões microestruturais de uma junta soldada. (METALS HANDBOOK vol 19)

A nucleação de uma trinca de fadiga em uma junta soldada é pouco influenciada pela microestrutura, sendo mais dependente de fatores geométricos. Porém, após a trinca haver nucleado, a microestrutura poderá influenciar a propagação da mesma.(BRANCO 1986)

No que se refere às curvas de propagação de trinca  $da/dN$  por  $\Delta K$ , apenas a região I é influenciada pela microestrutura, agindo no valor de  $\Delta K_{TH}$ . Em geral, a ZAC apresenta uma maior taxa de propagação de trinca do que no material base ou metal de solda. Isto se deve, principalmente, às tensões residuais trativas que surgem após a soldagem que são de maior intensidade nesta região, como mostra a figura 2-13. As diferenças de tamanho de grão na região da ZAC também podem influenciar na propagação de trincas, por esta se tratar da região de maior preocupação em termos de tenacidade à fratura de componentes estruturais.

O efeito das tensões residuais é mais pronunciado em chapas de grande espessura (25 mm). Em espessuras menores, não se observa variação significativa na taxa de propagação de trinca nas três zonas características do cordão de solda.

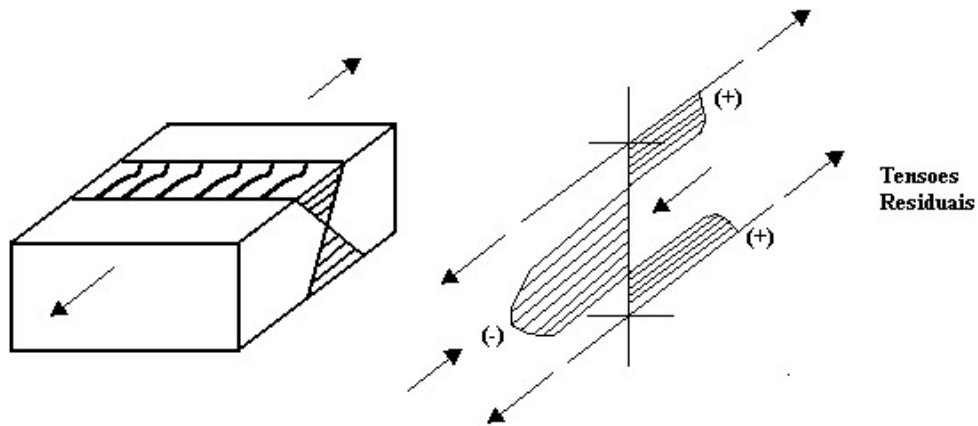


Figura 2-13: Perfil tensões residuais em uma junta soldada. (BRANCO 1986)

## 2.5 Corrosão-Fadiga

Na presença de ambientes corrosivos, a resistência à fadiga sofre mudanças significativas; a este fenômeno dá-se o nome de fadiga com corrosão ou simplesmente corrosão-fadiga.(GENTIL 1996)

A corrosão-fadiga é o fenômeno da susceptibilidade à fratura do material sob ação combinada do carregamento cíclico (fadiga) e um ambiente agressivo (gasoso ou aquoso), que isoladamente, podem não levar a falha do componente. Ao se estudar a contribuição desses fatores conjuntamente, verifica-se que o dano causado é geralmente maior do que a soma dos danos causados pela corrosão e pela fadiga agindo separadamente.

O mecanismo da corrosão-fadiga consiste em uma fadiga acentuada pelo fenômeno da corrosão, não apresentando limite de fadiga definido, como ocorre na resistência a fadiga em meios não agressivos. A figura 2-14 mostra duas curvas de fadiga de ligas ferrosas levantadas ao ar e em solução contendo cloretos, o material ensaiado foi aço de baixo carbono. Verifica-se que quando o material é ensaiado em um meio corrosivo, além da vida em fadiga diminuir, não é detectado um limite de fadiga específico.

Também se verifica que a imersão prévia do material em meio aquoso, antes da aplicação de esforços mecânicos, faz baixar o limite de fadiga.

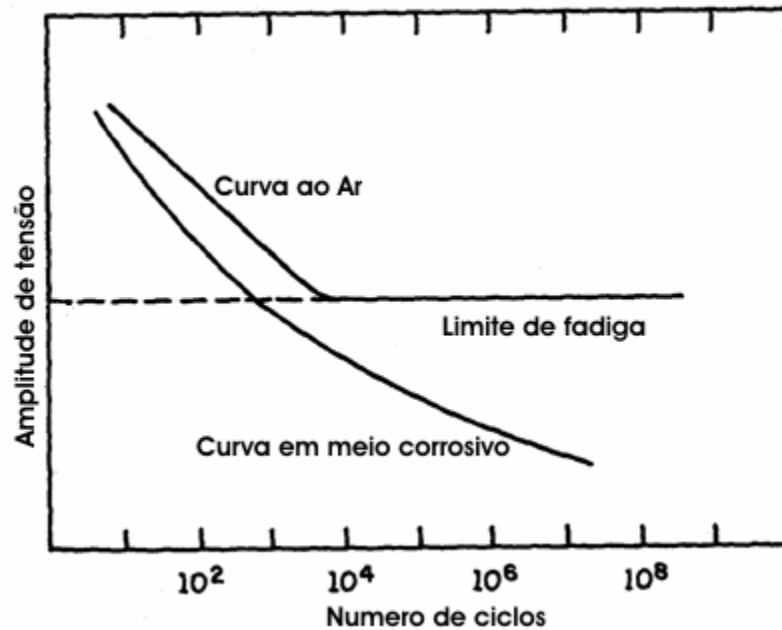


Figura 2-14: Comparativo entre a curva de fadiga ao ar e em meio corrosivo. (GENTIL 1996)

O mecanismo de início da fratura por fadiga em meios corrosivos pode estar associado a:

- Corrosão por pit<sup>1</sup>, onde a trinca inicia em um pit formado por ataque corrosivo;
- Dissolução preferencial em uma região de maior deformação plástica que age como anodo e o material não deformado agindo como catodo;
- Ruptura de filme protetor pelos ciclos de deformação;
- Redução da energia superficial causada pela adsorção das espécies, promovendo propagação de microtrincas.

Nenhum destes mecanismos explica completamente a iniciação de uma trinca por corrosão-fadiga em ambientes aquosos. O mecanismo de iniciação é uma função tanto do material como do ambiente. As bandas de escorregamento formadas pelo processo de intrusão/extrusão (STROHAHECKER 2005) são pontos preferenciais de ataque corrosivo, causando uma concentração de tensão local. O processo de corrosão aumenta a densidade de bandas de deslizamento. Um modelo simples deste tipo de processo é ilustrado na figura

<sup>1</sup> Pit: Forma de corrosão localizada que consiste em produção de cavidades a partir da superfície. Caso extremo onde áreas muito pequenas da superfície metálica são atacadas enquanto a parte principal da superfície permanece inalterada

2-15 onde discordâncias ancoradas na superfície são pontos preferenciais de ataque químico. (JASKE 1981)

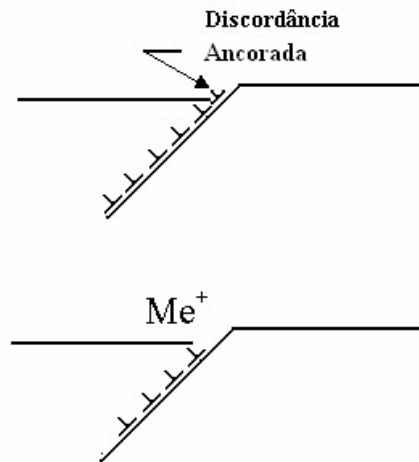


Figura 2-15: Mecanismo de nucleação em discordância ancorada. (JASKE 1981)

Há evidências que existe um efeito eletroquímico na etapa iniciação e propagação da fratura, pois o uso de inibidores e proteção catódica reduz a propagação da trinca.

A propagação de trinca de fadiga pode ser descrita em termos de curvas  $da/dN$  por  $\Delta K$ . Para o caso em que ocorre corrosão-fadiga, existem três situações possíveis como mostra a figura 2-16. O caso A é a corrosão-fadiga propriamente dita, onde existe simplesmente um aumento da taxa de propagação de trinca pela ação do meio corrosivo. No caso B ocorrem mecanismos de corrosão sob tensão e em C ocorre uma situação intermediária, ou a combinação dos casos A e B.

O comportamento mostrado na figura 2-16A é o mais comumente encontrado em estruturas de aço baixo carbono expostos em ambientes marinhos ou de alta concentração de cloretos, desde que a resistência mecânica não seja muito elevada (tensão de escoamento menor que 600MPa) e o material não seja exposto a grandes quantidades de hidrogênio, (o que poderia acarretar fenômeno de corrosão sob tensão).(GENTIL 1996).

O gráfico mostra que para elevados valores de  $\Delta K$ , não existe grande diferença no valor de taxa de propagação de trinca entre o meio inerte e o meio agressivo. Porém à medida que se baixa o valor de  $\Delta K$  a taxa de propagação de trinca em meio corrosivo pode atingir o dobro da taxa verificadas no meio inerte. Quanto ao  $\Delta K_{TH}$  a diferença entre os dois meios pode variar de 2 a 10 MPa m<sup>1/2</sup>.



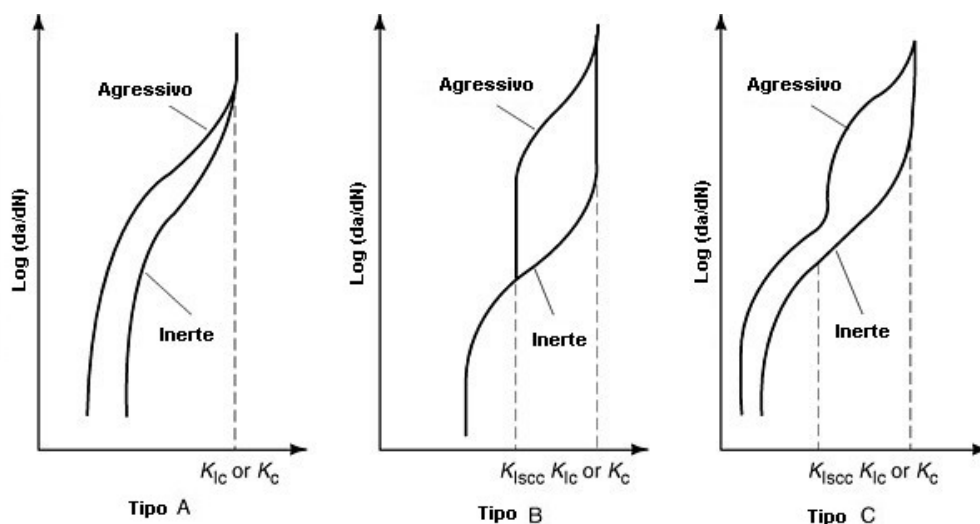


Figura 2-16: Esquema dos três tipos de taxa de crescimento de trinca por corrosão-fadiga. (AUSTEN 1977)

Na análise da corrosão-fadiga muitas variáveis podem influenciar o comportamento do material frente a este fenômeno. Estas diferentes variáveis estão organizadas na figura 2-17. Dos tópicos citados nesta figura, serão descritos aqueles de maior relevância para este trabalho.

### 2.5.1 Material

Segundo GENTIL 1996 a maior resistência à corrosão-fadiga esta mais relacionada com a resistência à corrosão em si do que com a alta resistência mecânica do material (GENTIL 1996).

Estudos realizados no comportamento de aços sujeitos a corrosão por água salgada mostraram que:

- O tratamento térmico não melhora a resistência à corrosão-fadiga, embora modifique bastante a resistência mecânica;
- Exceto os elementos de liga que aumentam a resistência geral à corrosão, as adições não influenciam na resistência à corrosão sob fadiga;
- Aços inoxidáveis são mais resistentes do que aços de baixa liga ou aço ao carbono;
- A resistência à corrosão sob fadiga em todos os aços é menor em água salgada do que em água potável.

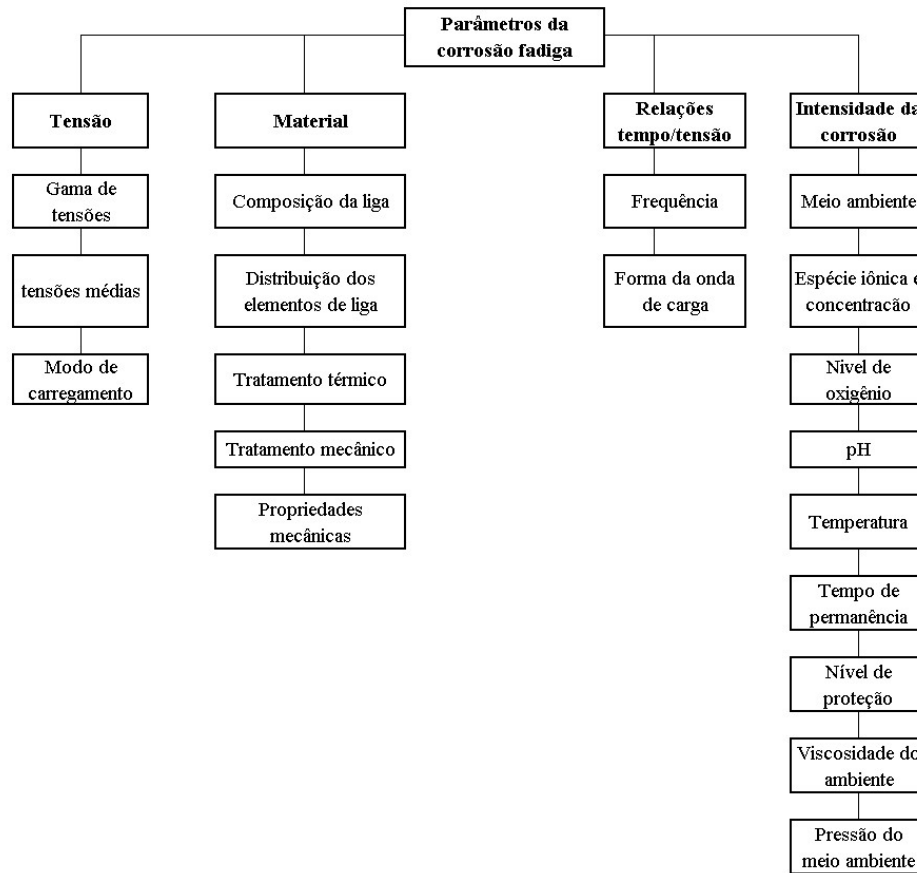


Figura 2-17: Parâmetros que influenciam na corrosão-fadiga. (BRANCO 1986)

A influência do tamanho de grão na iniciação ou propagação da trinca em corrosão-fadiga depende do meio a que esta submetido e se reflete no modo de fratura. Em ambientes inertes, como o vácuo, a propagação da trinca de fadiga é gerada ao longo de uma banda de deslizamento transgranular e a taxa de crescimento de trinca normalmente diminui com o aumento do tamanho de grão. Um exemplo disso está apresentado no comportamento das ligas Ti-8,6Al e Al-5.7Zn-2,5Mg-1.5Cu (figura 2-18). Em ambientes inertes, a taxa de crescimento de trinca de fadiga nas duas ligas com grão grosseiro é menor do que com grão fino. O efeito do tamanho de grão em ambientes inertes pode ser explicado pelo aumento do fechamento de trinca induzido pela interferência entre irregularidades na superfície da trinca durante o descarregamento.

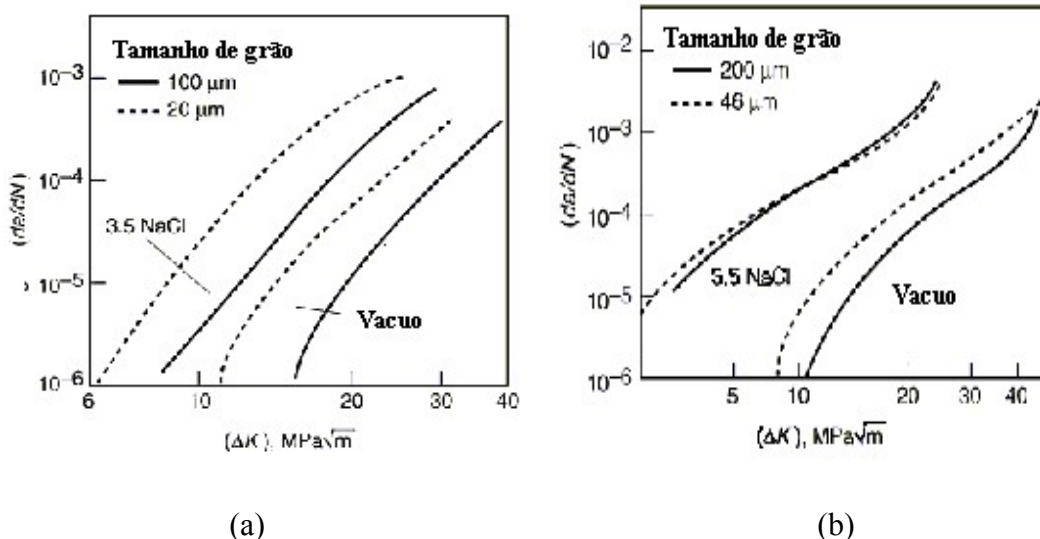


Figura 2-18 : Efeito do tamanho de grão na taxa de propagação de trinca em corrosão-fadiga. (a) Liga Ti-8.6Al (b) Liga Al-5.7Zn-2.5Mg-1.5Cu

Em ambientes agressivos, o efeito do tamanho de grão depende de como o modo de fratura é influenciado pelo meio ambiente. Para a liga de Ti-8.6Al, o modo de fratura em água salgada, tanto com grão fino ou grosseiro, é similar ao que acontece no vácuo (transgranular), as taxas de corrosão-fadiga para grão grosseiro é significativamente menor do que aquela em ligas de grão fino como mostra a figura 2-18a.

No entanto, para a liga Al-5.7Zn-2.5Mg-1.5Cu no ambiente agressivo, a dependência com o tamanho de grão nas taxas de crescimento de trinca em corrosão-fadiga quase desaparece como mostrado na figura 2-18b. Fractografias indicam que o modo de fratura em água salgada passa para intergranular. Estas mudanças no modo de fratura, particularmente as mudanças na separação intergranular, explicariam esta dependência com o tamanho de grão.

### 2.5.2 Meio Corrosivo (Água do Mar)

A água do mar é uma solução aquosa constituída de variadas espécies químicas, iônicas e moleculares, tendo como componentes principais os íons cloretos (2 a 3,5%). Uma composição típica deste meio está apresentada na tabela 2-1.

Tabela 2-1: Composição média da água do mar (PANOSSIAN 1993)

Composto	%
Cloreto (Cl <sup>-</sup> )	1.83 a 3.5
Sulfato (SO <sup>2-</sup> )	0.26
Bicarbonato (HCO <sup>-</sup> )	0.01
Brometo (Br <sup>-</sup> )	0.01
Fluoreto (F <sup>-</sup> )	0.00
Ácido Bórico (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	0.0025
Sódio (Na <sup>+</sup> )	1.02
Magnésio (Mg <sup>2+</sup> )	0.12
Cálcio (Ca <sup>2+</sup> )	0.04
Potássio (K <sup>+</sup> )	0.04
Estrôncio (Sr <sup>2+</sup> )	0.001

Devido a sua constituição iônica característica, a água do mar é classificada como um meio eletrolítico forte. Estes meios favorecem ao aumento das taxas de corrosão do aço baixo carbono, pois:

- Possuem alta condutividade;
- Íons Cl<sup>-</sup> presentes podem se adsorver na superfície do metal e impedir a formação de filmes protetores ou ocasionar a ruptura destes;
- Produtos de corrosão a base de cloreto são em geral solúveis em água e não formam filmes protetores.

As reações eletroquímicas típicas da corrosão do aço baixo carbono em meio aquoso contendo cloretos estão dispostas na tabela 2-2. Como todo processo de óxido-redução, estas reações de corrosão são apresentadas em suas formas anódica e catódica.

Tabela 2-2: Principais reações de corrosão do ferro em água contendo cloretos.

Reação Anódica	$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e$
Reações Catódicas	$2H^{+} + 2e \rightarrow H_2$
	$4H^{+} + O_2 + 4e \rightarrow 2H_2O$
	$2H_2O + O_2 + 4e \rightarrow 4OH^{-}$

Em meios desaerados, isto é, na ausência de oxigênio, as reações de oxi-redução predominantes do aço carbono são mostradas na tabela 2-3:

Tabela 2-3: Reações de oxi-redução do ferro em meios desaerados.

Reação Anódica	$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e$
Reações Catódicas	$2H^{+} + 2e \rightarrow H_2$

Assim sendo, haverá a geração de  $H_2$  na superfície do metal, podendo causar a fragilização deste em caso de excesso do gás citado, diminuindo a vida em fadiga.

### 2.5.3 Fatores que Influenciam a Corrosão-Fadiga em Água do Mar

#### 2.5.3.1 Salinidade

A salinidade é definida como o peso total de sal em 1000g de água. O NaCl é o principal constituinte da água do mar sendo o íon  $Cl^-$  o principal agente corrosivo. O teor de  $Cl^-$  é usado normalmente para indicar a salinidade da água do mar, sendo que este valor é da ordem de 35000ppm. Pela alta salinidade, a água do mar tem alta condutividade. A corrente de corrosão pode fluir entre anodos e catodos através da água do mar.

#### 2.5.3.2 Concentração de $H^+$ (pH)

O pH ou potencial de hidrogênio iônico, é um índice que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de um meio qualquer. Ele indica a atividade do íon  $H^+$  na solução (RAMANATHAN 1995). A escala de pH varia de 0 a 14 sendo que valores menores que 7 representam soluções ácidas e valores superiores a representam soluções alcalinas. O pH da solução tem grande influência na resistência à fadiga com corrosão. Nos aços carbono expostos a solução de NaCl 3,5%, verificou-se que para valores de pH superiores a 10 (soluções mais alcalinas), a resistência à corrosão-fadiga aumenta acentuadamente. Na faixa intermediária de valores (pH entre 4 e 10), este aumento é pouco significativo, mas na faixa de pH inferior a 4,0, existe uma redução bastante acentuada da resistência à fadiga.

A figura 2-19 mostra ensaios em corpos de prova de aço baixo carbono carregados com 322MPa expostos a uma solução de 3% de NaCl em contato com o ar. Nesta figura é mostrado um aumento da resistência a partir de um pH de 8 a 12.

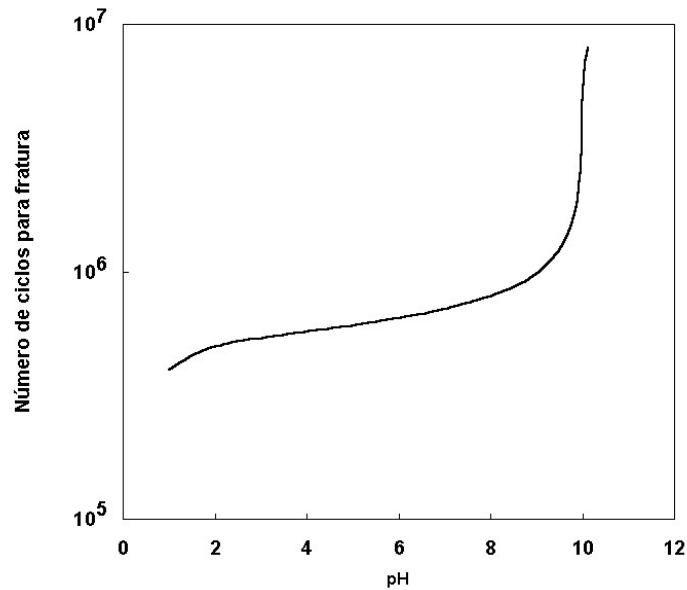


Figura 2-19: Influência do pH no comportamento fadiga de aço carbono em 3% de NaCl. (BRANCO 1986)

### 2.5.3.3 Temperatura

Geralmente, um aumento da temperatura tende a diminuir a vida em fadiga como mostra a Figura 2-20. Com variações de temperatura de 15 para 45°C, a vida em fadiga pode cair em torno 30% dependendo da faixa de tensão (BRANCO 1986) como visto. Isto ocorre, pois em temperaturas mais elevadas, as reações químicas de corrosão e dissolução ocorrem com maior facilidade do que em temperatura ambiente.

A água e as soluções de sais em temperaturas superiores a ambiente (20 a 25°) provocam reduções importantes na resistência à fadiga, que devem ser levadas em consideração, pois estruturas soldadas estão em contato com água quente ou vapores aquecidos.

### 2.5.3.4 Composição dos Gases

O teor de oxigênio dissolvido na solução também é um fator a ser levado em conta na resistência à corrosão-fadiga. Em geral, observa-se que quanto menor o teor de oxigênio dissolvido maior será a vida em fadiga. Este aumento é da ordem de 30% em relação ao meio onde existe livre oxigenação.

A influência do CO<sub>2</sub> em geral é prejudicial por baixar o pH e interferir na camada de óxidos e/ou hidróxidos na superfície, aumentando a taxa de corrosão.

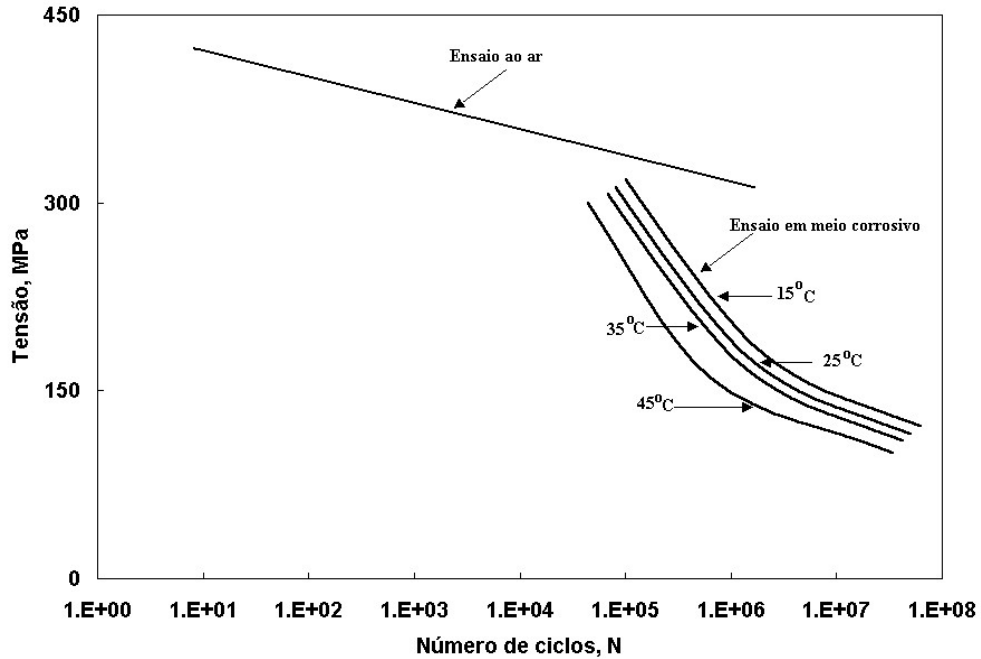


Figura 2-20: Efeito da temperatura na corrosão-fadiga. (BRANCO 1986)

#### 2.5.3.5 Frequência de Carregamento

Na fadiga ao ar, a frequência de carregamento praticamente não influencia nos resultados. No entanto, a mesma possui um papel fundamental no processo de corrosão-fadiga tendo em vista que o efeito do meio ambiente é dependente do tempo. Por exemplo, em altas frequências de carregamento, é comum a ação do meio agressivo ser eliminada ou minimizada devido ao fato de que o tempo disponível (para as reações químicas associadas e a cinética de transporte de massa) seria inadequado (ATKINSON 1977). A figura 2-21 apresenta este efeito, onde pode ser visto que aumentando a frequência de ensaio ocorre uma diminuição na taxa de crescimento de trinca de fadiga. Este efeito ocorre porque a corrosão é um fenômeno dependente do tempo, uma maior frequência nos ciclos de fadiga não permite um tempo suficiente para que as reações químicas ocorram, diminuindo a taxa de propagação de trinca.

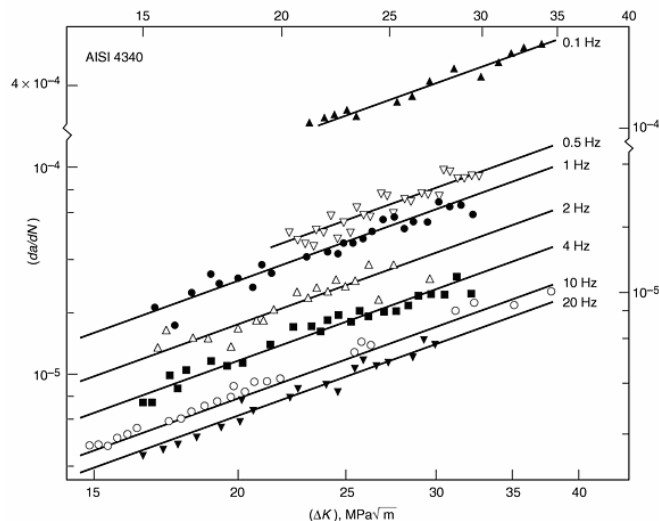


Figura 2-21: Influência da frequência no comportamento à corrosão-fadiga de um aço baixa liga em água do mar. (METALS HANDBOOK vol 19)

#### 2.5.3.6 Forma de Carregamento

Os diferentes tipos de forma da onda de carregamento são ilustrados na figura 2-22. A forma da onda de carregamento tem pequeno efeito na taxa de crescimento de trinca em ambientes inertes como mostra a figura 2-23a. A taxa de crescimento de trinca de fadiga ao ar é idêntica e a forma da onda não influencia nesta taxa.

Porém, dados da literatura indicam que em ambientes agressivos a taxa de crescimento de trinca tem alta dependência com a forma da onda. Este efeito da forma de onda é ilustrado na figura 2-23b.

Esta figura mostra a taxa de propagação de trinca em meio corrosivo, onde a onda dente de serra negativa e quadrada tem pouco tempo de carregamento, logo possuem idênticas taxas de propagação de trinca que ao ar. Isto é, um pequeno efeito do meio ambiente é observado em ondas quadradas ou dente de serra negativa.



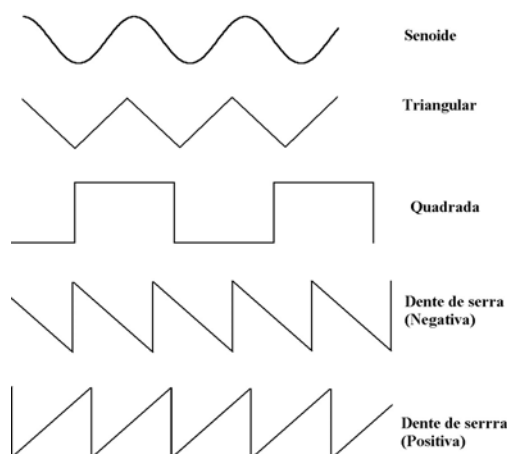


Figura 2-22: Diferentes tipos de forma de onda de carregamento em fadiga. (BRANCO 1986)

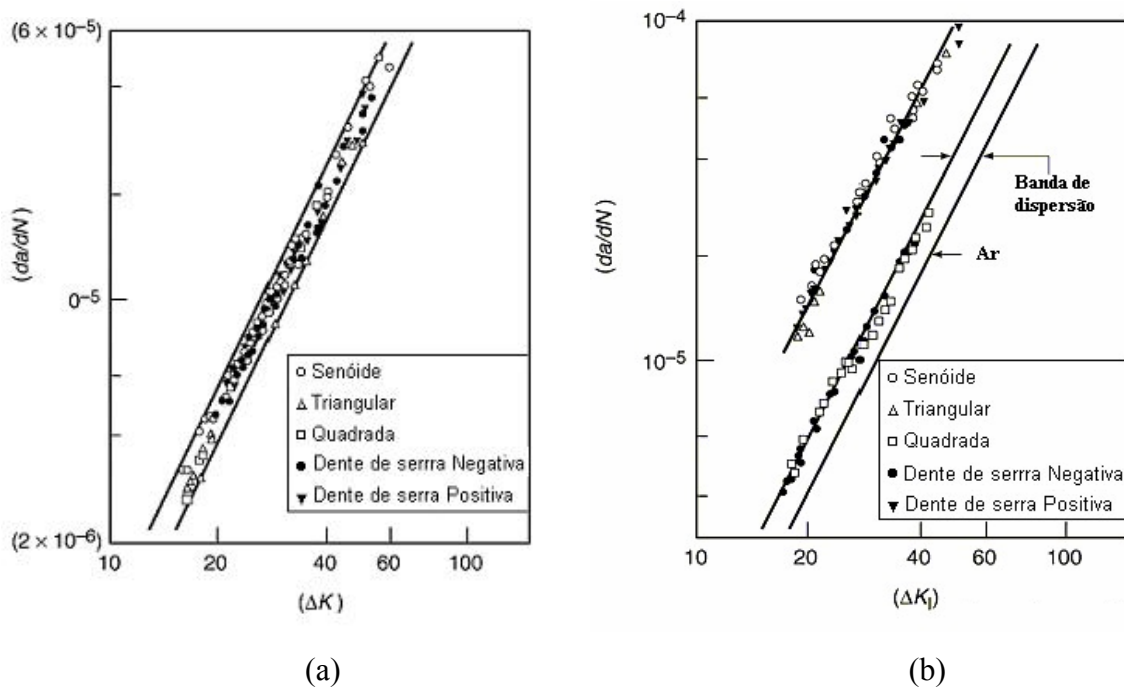


Figura 2-23: Efeito da forma da onda de carregamento na taxa de propagação de trinca em um aço 15Ni-5Cr-3Mo. (a) Meio inerte (b) Meio corrosivo contendo 3% de NaCl (METALS HANDBOOK vol 19)

Um aumento do efeito do meio ambiente no crescimento de trinca pode ser substancial se a forma da onda possuir um significativo período de carregamento. As taxas de crescimento de trinca em uma onda senoidal, triangular e dente de serra positiva, as quais possuem longos períodos de subida de carga, são idênticas e tem uma taxa de crescimento de trinca três vezes maior que a onda quadrada e dente de serra negativa.

Isto sugere que o aumento da taxa de propagação de trinca é causado, principalmente, pela interação entre o meio ambiente e o metal durante a etapa de

carregamento de cada ciclo e não é afetada pelo tempo de permanência. Logo se o tempo de subida de carga é pequeno, a influência do meio agressivo é minimizada e vice-versa.

## 2.6 Ensaio de Corrosão-Fadiga

De uma maneira geral, pode-se citar as seguintes dificuldades na montagem e realização de ensaios de corrosão-fadiga:

- Dificuldade de isolamento do meio corrosivo (seja líquido ou gasoso);
- Necessidade de vedações;
- Necessidade de recirculação do meio;
- Monitoramento de variáveis de corrosão (pH, potencial elétrico, corrente, etc);
- Longos tempos de ensaios em função das baixas frequências;
- Possibilidade de uso de reagentes tóxicos;
- Alta dispersão dos resultados.

Os corpos de prova normalmente utilizados para levantamento de curvas S/N são mostrados na figura 2-24. A seleção do corpo de prova dependerá do tipo de máquina de fadiga disponível e do objetivo do estudo.

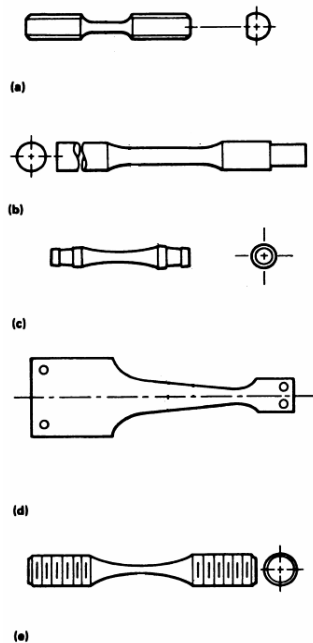


Figura 2-24: Corpos de prova para corrosão-fadiga. (a) Torção. (b) Flexão rotativa com um lado apoiado. (c) Flexão rotativa puro. (d) Flexão reversa. (e) Carregamento axial. (METALS HANDBOOK vol 19)

Os equipamentos para ensaios de corrosão-fadiga são os mesmos utilizados nos testes de fadiga ao ar. A diferença principal é a adaptação de recipientes que possam armazenar o meio corrosivo ao redor do corpo de prova enquanto é realizado o ciclo de carregamento. Estes equipamentos têm várias classificações: (a) Parâmetros de controle (carga, deflexão, deformação, torque, etc.); (b) Características de projeto da máquina (carregamento axial, flexão rotativa etc.) (c) Características de acionamento (hidráulica, servo-hidráulica, eletromecânica, etc.).

Na figura 2-25 e figura 2-26 são mostrados exemplos de sistemas de ensaios de corrosão-fadiga comumente utilizados. O ensaio consiste em adaptar os recipientes em máquinas do tipo servo-hidráulica e conduzir os ensaios monitorando o meio corrosivo. A desvantagem é a utilização de um equipamento caro e sofisticado por um longo período de tempo.

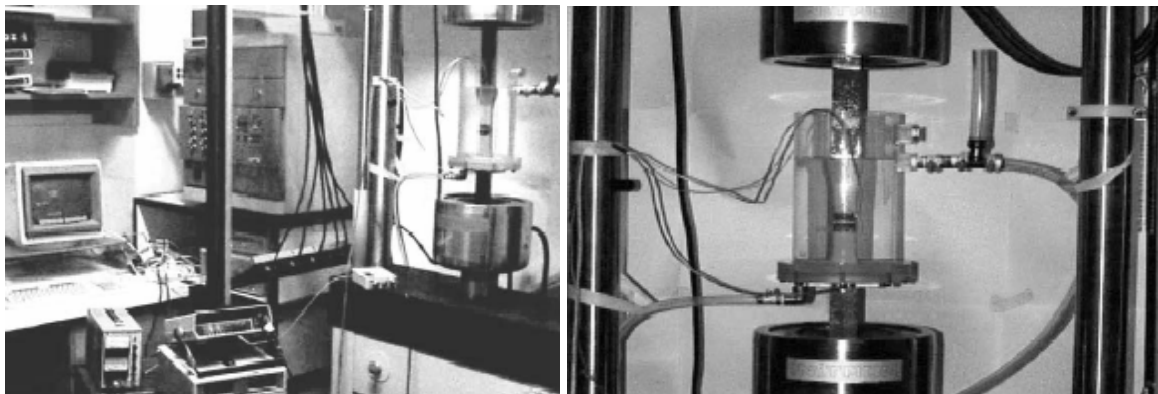


Figura 2-25: Sistema de ensaio de corrosão-fadiga com servo hidráulica (WAHAB 2002)

Para se atingir o limite de fadiga para  $10^6$  ciclos a uma frequência de 0,2 Hz o tempo necessário seria de 57 dias, o que pode inviabilizar o ensaio. Uma outra opção é a construção de sistemas mais simples em maior quantidade, o que pode reduzir o tempo de obtenção de uma curva de Wohler.



Figura 2-26: Sistema de ensaio de corrosão-fadiga. (ANGELOVA 1999)

Um exemplo disto é visto na figura 2-27, onde é mostrado uma máquina de ensaio de corrosão-fadiga por flexão rotativa. Apesar deste tipo de ensaio de fadiga ser mais comum, ele é usado apenas para corpos de prova redondos, com acabamento liso e polido e não é apropriado para juntas soldadas.

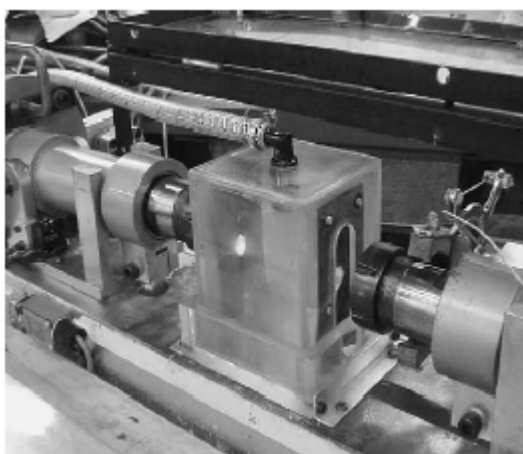


Figura 2-27: Ensaio de corrosão-fadiga por flexão rotativa (WAHAB 2003).

No caso de ensaios de fadiga para propagação de trincas, existe a dificuldade de se monitorar o crescimento da trinca ao longo do ensaio. As figuras 2-28 a 2-30 mostram exemplos de como esta dificuldade pode ser contornada. SIVAPRASAD trabalhou com corpos de prova do tipo flexão a três pontos com a trinca na posição vertical com a boca do entalhe para cima, usando *clip-gage* sem que o mesmo seja exposto diretamente ao meio corrosivo (figura 2.31). Dados da literatura citam o uso uma “mini-cuba” localizada na região da trinca de modo que se pode usar uma máquina servo controlada (figura 2.32). A

vantagem é um melhor controle do ensaio, porém existe a dificuldade de controle e monitoramento do meio corrosivo.

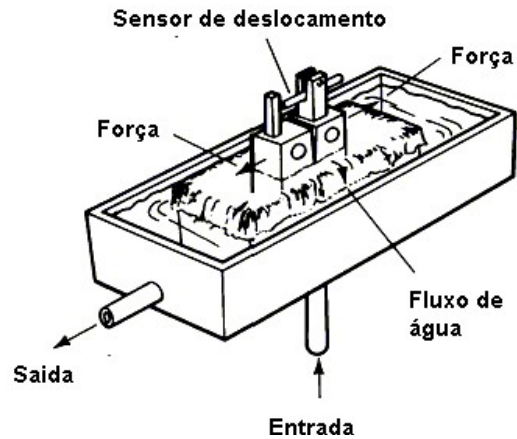


Figura 2-28: Ensaio de da/dN com corpo de prova tipo CT parcialmente imerso. (METALS HANDBOOK vol 19)

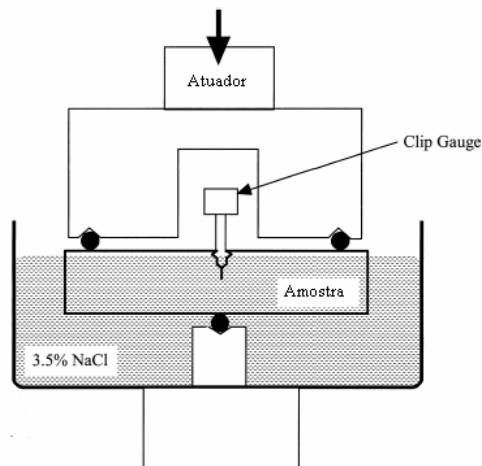


Figura 2-29: Ensaio de da/dN com corpo de prova tipo SENB imerso (SIVAPRASAD 2000)

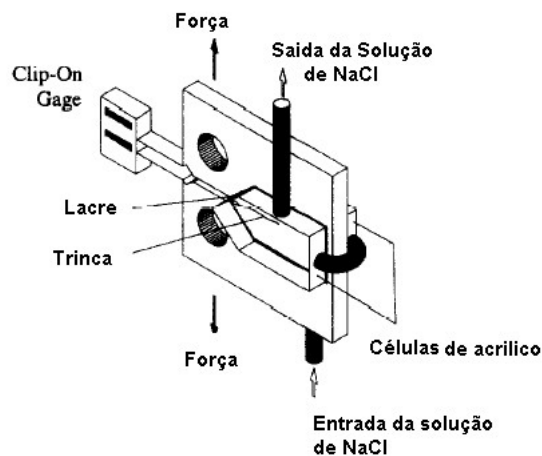


Figura 2-30: Ensaio de da/dN com cuba encaixada no corpo de prova tipo CT (LIN 1998)

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho constitui no desenvolvimento de um equipamento de ensaios para corrosão-fadiga em juntas soldadas retiradas de uma tubulação. Será descrita a metodologia para a montagem do equipamento e os ensaios de realizados com o mesmo.

#### 3.1 Desenvolvimento do Equipamento

O projeto inicial consiste em um equipamento que possa avaliar a vida em corrosão-fadiga de juntas soldadas de tubulação. Visto que é muito dispendioso o ensaio de uma tubulação em escala real, optou-se por ensaiar corpos de prova menores retirados da mesma.

A junta soldada mais crítica em uma tubulação em geral é a circunferencial, ou seja, a junta utilizada para união dos diferentes segmentos de tubo, em virtude desta solda ser realizada em campo durante a montagem. O corpo de prova para este trabalho foi escolhido de tal forma que se avalie esta junta específica e sejam conservadas as características geométricas originais do cordão. A figura 3-1 o esquema de retirada dos corpos de prova de uma tubulação.

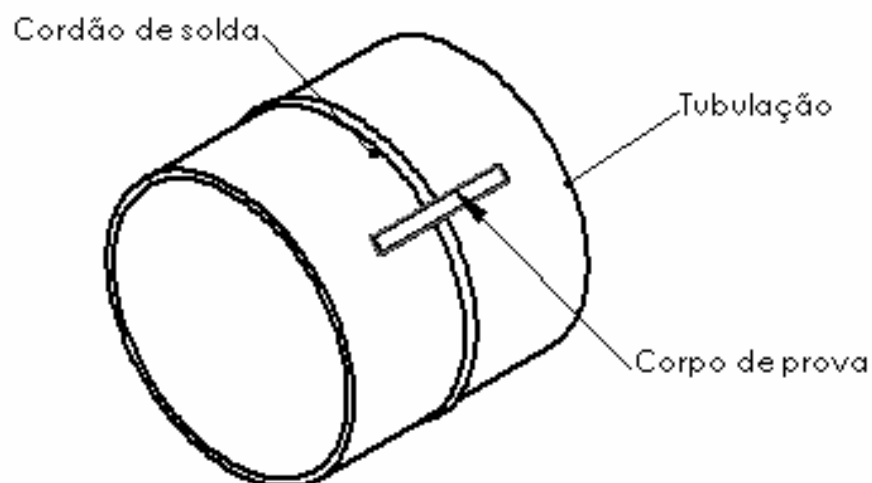


Figura 3-1: Esquema de retirada de corpos de prova de corrosão-fadiga

O tubo estudado

Foi estudado em que condições de corrosão-fadiga uma tubulação estaria exposta no fundo mar durante a elevação do petróleo. Os seguintes parâmetros foram seleccionados para que o equipamento desenvolvido simulasse:

- Aplicar uma solicitação de flexão a quatro pontos no cordão de solda de modo que a máxima tensão trativa seja aplicada na parte interna do tubo;
- Envolver o corpo de prova com uma solução de 115000ppm de NaCl;
- Impedir o contato da solução com o ar atmosférico;
- Permitir o borbulhamento de gás CO<sub>2</sub> durante o ensaio;
- Carregamentos da ordem de 1 a 15kN;
- Frequência de 0,2Hz;
- Razão de carregamento de 0,1;
- Temperatura de 35°C.

O esquema de aplicação de carga e a montagem do ensaio são mostrados na figura 3-2. As distâncias I e L foram definidas com 80mm e 240mm respectivamente, desta forma, pode-se manter toda a junta soldada dentro de uma mesma região de momento fletor máximo, o que produz uma tensão homogênea em todas as regiões da solda.

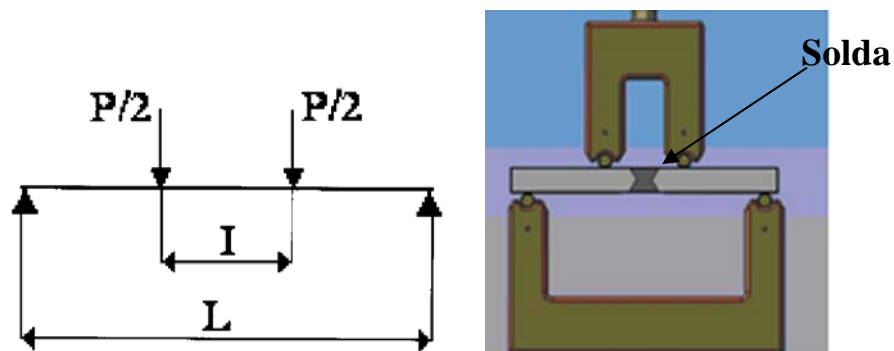


Figura 3-2: Esquema de aplicação de carga e montagem do corpo de prova.

Para aplicação da carga foram usinados 2 dispositivos em aço AISI 1045 como mostram a figura 3-3 e figura 3-4.

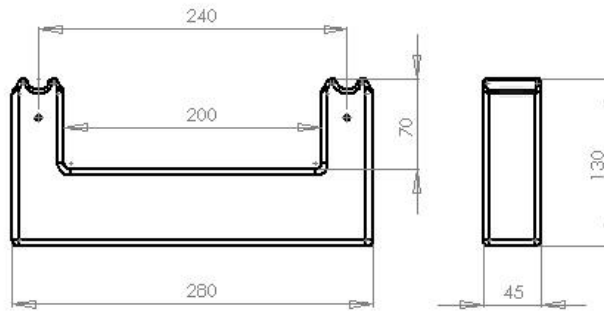


Figura 3-3 Desenho do apoio inferior desenvolvido para os ensaios de corrosão-fatiga

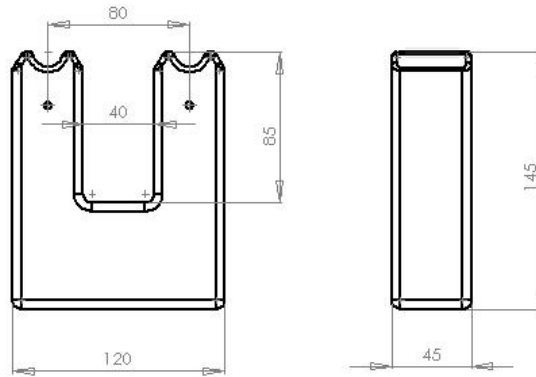


Figura 3-4 Desenho do apoio superior desenvolvido para os ensaios de corrosão-fatiga

Para a montagem do quadro de reação foram utilizadas chapas de aço SAE 1020 com espessura de 19,05mm soldadas de maneira que formassem um perfil “U” e quatro barras maciças redondas com diâmetro de 42mm. O quadro é composto então por dois perfis “U” acoplados pelas quatro barras, como é mostrado na figura 3-5.

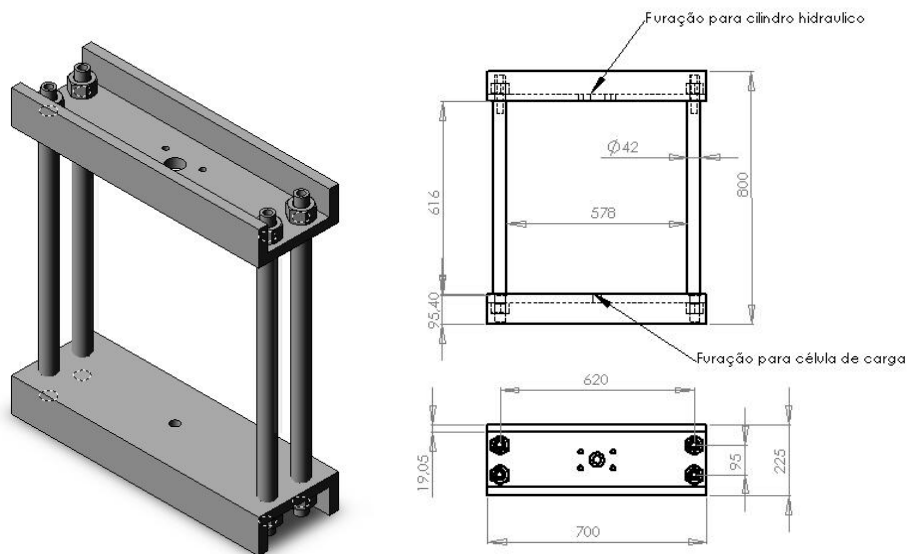


Figura 3-5: Quadro de reação desenvolvido para o equipamento de ensaio de corrosão-fatiga.



A células de corrosão foram construídas com chapas de material acrílico, por este material possuir estabilidade química em meios contendo cloretos, boa transparência e ser de fácil usinagem. As dimensões da célula de ensaio com capacidade para 20L são mostradas na figura 3-6.

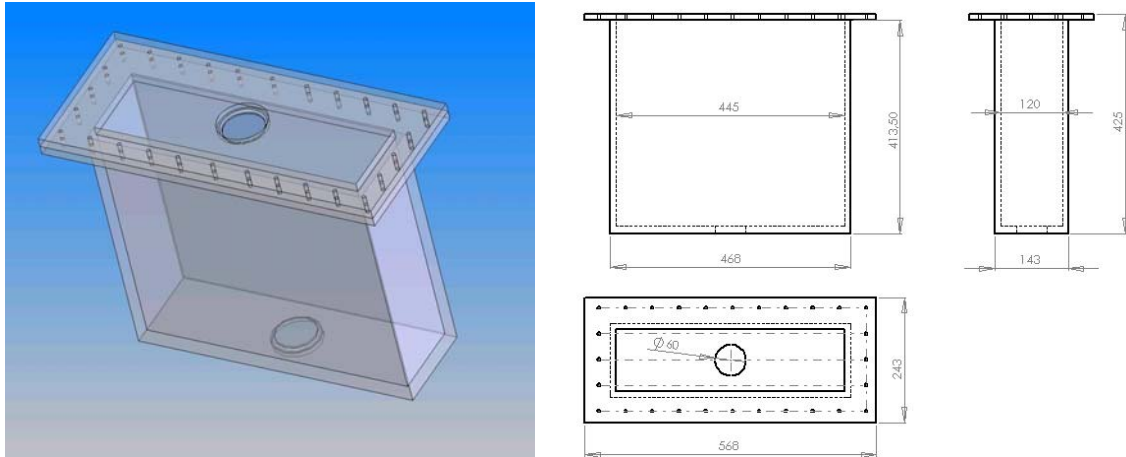


Figura 3-6 Célula de corrosão utilizada nos ensaios de corrosão-fadiga.

### 3.2 Sistema Hidráulico

Foi escolhido um sistema hidráulico para acionamento do equipamento por este permitir maior capacidade e controle de carga do que um sistema puramente mecânico.

Foi utilizada uma bomba hidráulica modelo Parker com pressão máxima de 150psi, trabalhando em uma faixa de 60psi a 70psi e potência de 7,5HP. A figura 3-7 mostra a bomba com capacidade de operar quatro ensaios de corrosão-fadiga simultaneamente.



Figura 3-7: Imagem da unidade hidráulica utilizada nos ensaios de corrosão-fadiga.

Um desenho do atuador hidráulico utilizado para aplicação da força é mostrado na figura 3-8. Este consiste em um cilindro hidráulico comercial de dupla ação Parker com capacidade para 50kN. O diâmetro interno do corpo é de 50mm, o diâmetro da haste é de 25,4mm com curso de 100mm.

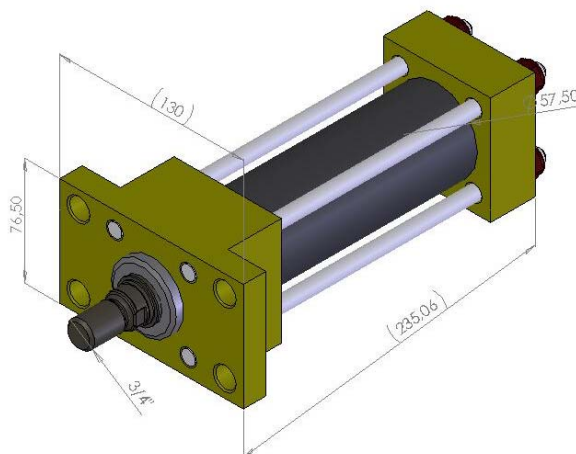


Figura 3-8: Cilindro hidráulico utilizado nos ensaios de corrosão-fadiga

### 3.3 Sistema de Controle

Como sensor de carga, foi utilizado uma célula de carga modelo em “S” da HBM com capacidade de operação de no máximo 20kN como mostra a figura 3-9.



Figura 3-9: Célula de carga utilizada nos ensaios de corrosão-fadiga.

Em função da baixa frequência necessária para a realização de ensaios de corrosão-fadiga (da ordem de 0,1 a 1Hz), para o controle do ensaio não houve a necessidade do uso de sistemas servo-controlados usados normalmente em ensaio de fadiga. Para este trabalho, optou-se por controlar a própria válvula direcional hidráulica da bomba para realizar o

controle dos ciclos de fadiga. Desta forma, o fluxograma de controle pode ser resumido na figura 3-10.

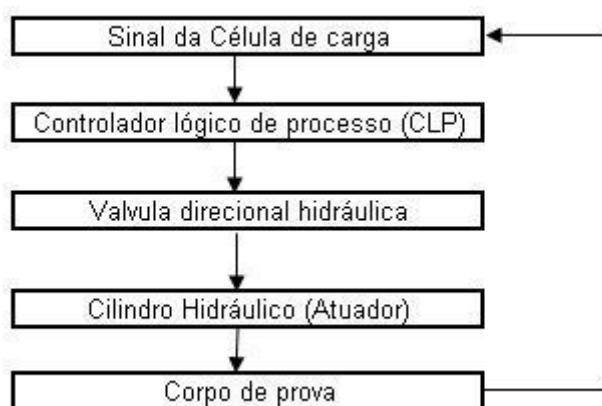


Figura 3-10 Esquema de controle utilizado nos ensaios de corrosão-fadiga

O sistema de controle dos ensaios de corrosão-fadiga é realizado por um controlador Novus 1500. Esse controlador exerce a função de monitoramento de picos máximos e mínimos provenientes diretamente da célula de carga. A figura 3-11 apresenta os controladores utilizados juntamente com a tela de supervisão desenvolvida para os ensaios.



Figura 3-11: Fotografia do sistema de controle construído para realização dos ensaios de corrosão-fadiga com a tela de controle.

### 3.4 Distribuição de Gás

A distribuição de gás ocorre através de uma linha de transmissão de cobre, que vai desde o cilindro até uma das quatro válvulas agulhas utilizadas para regulagem fina da vazão de gás para as cubas de ensaio. O controle de vazão primário é feito através da abertura de uma válvula diretamente na saída do cilindro.

O controle da pressão de ensaio foi efetuado através de um manômetro conectado a linha. Em caso de necessidade de troca de cilindro, o sistema foi projetado com saídas secundárias para realização da purga da linha principal, evitando assim a contaminação dos ensaios com oxigênio. O gás utilizado no ensaio foi CO<sub>2</sub> ultrapuro da White Martins (99,995%). A figura 3-12 mostra fotografias do sistema para abastecimento instalado.



Figura 3-12: Fotografias do sistema para abastecimento de gases do LAMEF.

A distribuição secundária de gases ocorre através de tubos de teflon e válvulas de aço inox AISI 316L para as cubas de alimentação e de ensaio. Essa distribuição ocorre segundo uma seqüência adequada de fechamento e abertura de válvulas.

A figura 3-13 mostra um esquema do equipamento com os seus principais componentes e o equipamento montado para ensaio em funcionamento. Em função da baixa freqüência dos ensaios, foram montadas 4 máquinas de ensaios para otimizar o tempo de obtenção dos resultados como mostra a figura 3-14

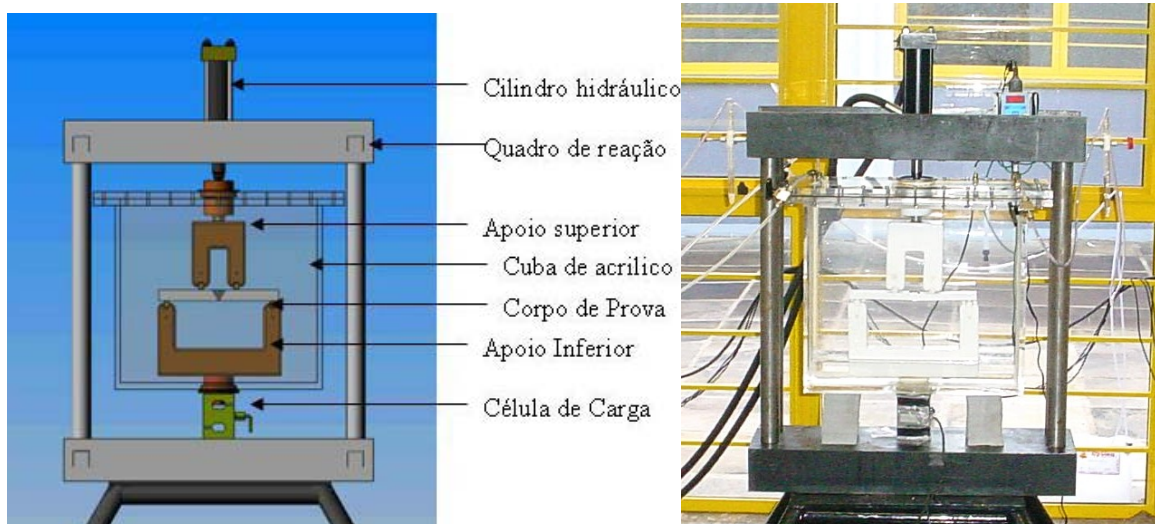


Figura 3-13 : Esquema do equipamento desenvolvido em funcionamento



Figura 3-14: Fotografia geral dos quatro sistemas de ensaio.

### 3.5 Validação do Equipamento

Para validar o equipamento desenvolvido, foram realizados testes com um corpo de prova instrumentado com extensômetros resistivos. Os resultados foram comparados com o cálculo analítico da carga como indicado na seqüência.

#### 3.5.1 Cálculo Analítico da Tensão de Ensaio

A tensão foi calculada considerando o corpo de prova uma viga de secção retangular em flexão a quatro pontos como mostra figura 3.15. O cálculo da tensão para esta configuração é retirada da teoria clássica de resistência dos materiais e é dada por:

$$\sigma = \frac{M.c}{J} \quad 3.1$$

Onde:

$\sigma$ : tensão na superfície sob tração (MPa);

M: Momento fletor (Nmm);

c: Distância da linha neutra até o ponto de medida da tensão, (mm);

J: Momento de inércia da secção (mm<sup>4</sup>);

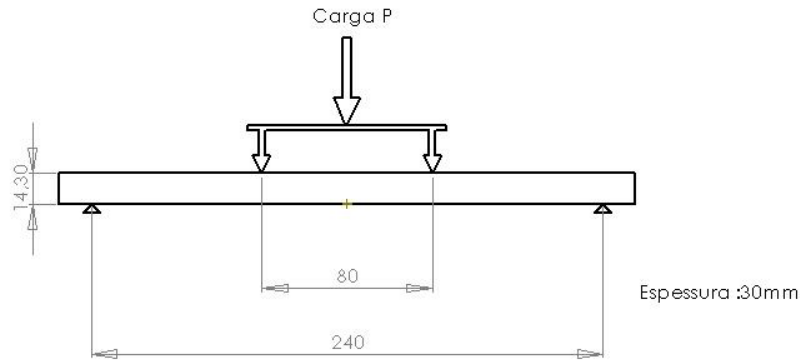


Figura 3-15 Desenho do esquema de aplicação de carga

Para esta configuração a tensão analítica é dada pela equação 3.2:

$$\sigma = \frac{3 \cdot (L - I) \cdot P}{2 \cdot b \cdot W^2} \quad 3.2$$

Onde:

$\sigma$ : tensão na superfície sob tração (MPa);

L: distância entre apoios externos (240mm)

I: distância entre apoios internos (80mm)

P: carga aplicada (N)

b: Espessura do corpo de prova (30mm)

W: Espessura da tubulação (aprox. 14,3mm)

### 3.5.2 Cálculo Experimental da Tensão de Ensaio

Para o cálculo da tensão experimental do ensaio, um corpo de prova foi instrumentado com dois extensômetros resistivos de 120 ohm na região de carga nominal constante, próximo ao reforço, como é mostrado na figura 3-16 e na figura 3-17.

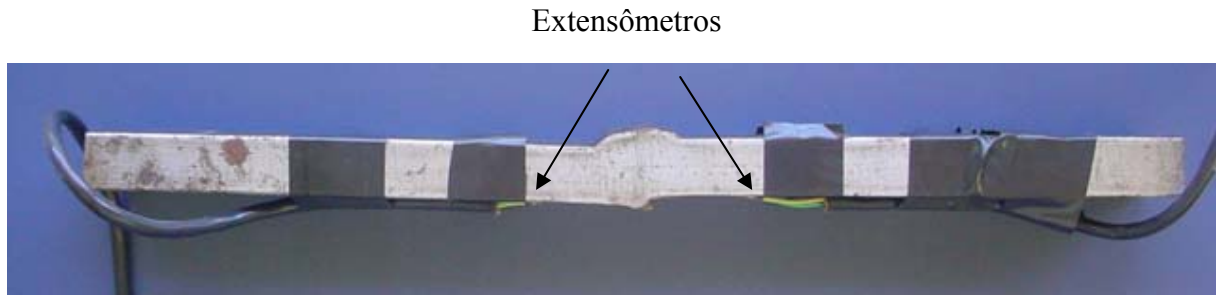


Figura 3-16: Corpo de prova instrumentado para teste de carga

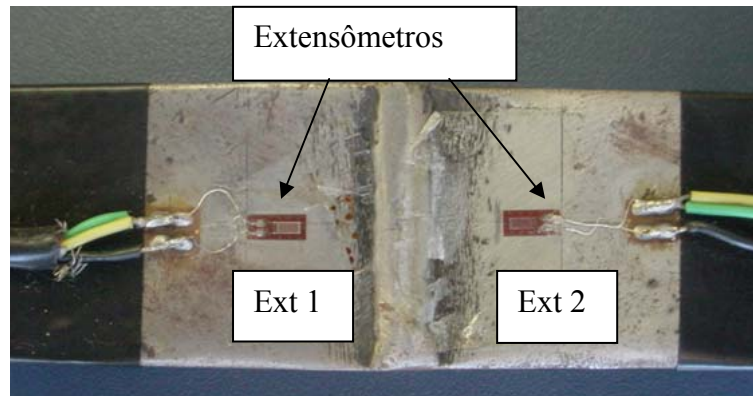


Figura 3-17: Detalhe da localização dos extensômetros.

Em seguida, o corpo de prova foi montado para ensaio e carregado com diferentes cargas (de 1000 N a 11000N com passo de 1000N). A carga foi medida com a própria célula de carga do ensaio da marca HBM e o sinal de deformação foi medido com sistema de aquisição de dados Spider 8 da HBM.

Com o sinal de deformação obtido dos extensômetros, pode-se calcular a tensão aplicada pela equação 3.3.

$$\sigma = \frac{\varepsilon \cdot E}{1000000} \quad 3.3$$

Onde:

$\sigma$ : Tensão na superfície sob tração (MPa);

$\varepsilon$ : Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

E: Módulo de elasticidade (210000 MPa)

Após a realização destes testes, o equipamento foi colocado em operação para que fosse monitorado o espectro de carregamento resultante em diferentes condições de carga e frequência. Como o objetivo é trabalhar com frequências da ordem de 0,2Hz, foram selecionadas as frequências de 0,1, 0,2, e 0,5Hz. As tensões máximas de carregamento foram de 100, 210 e 400MPa, sendo que a razão de carregamento foi fixada em 0,1.

### 3.6 Teste do Equipamento

Para testar o equipamento foram realizados ensaios de corrosão-fadiga para levantamento de uma curva S/N e comparado com os mesmos ensaios realizados ao ar. A metodologia para a realização destes é descrita a seguir.

#### 3.6.1 Materiais

O material utilizado consiste em tubos de aço de alta resistência de baixa liga que atende a especificações API 5L X 60. As propriedades mecânicas nominais do aço são dadas pela tabela 3-1 segundo a norma API 5L.

Tabela 3-1: Composição química e propriedades mecânicas nominais do material estudado.

Composição Química %						Propriedades Mecânicas	
C Max	Mn Max.	P Max.	S Max	Ti Max.	Nb +V Max.	Tensão de Escoamento (MPa)	UTS (MPa)
0,24	1,4	0,025	0,015	0,04	0,15	414	517

#### 3.6.2 Soldagem e Inspeção dos Tubos

A soldagem e a inspeção dos tubos foram realizadas no centro de pesquisa da Petrobras. Após a soldagem, foi realizada uma inspeção por ultra-som na região da solda onde não foram encontrados defeitos significativos (maiores que a resolução do sistema de inspeção). A inspeção foi realizada conforme o procedimento de inspeção em soldas PR-011 da ABENDE. A figura 3-18 mostra o tubo recebido para a retirada dos corpos de prova. O diâmetro do tubo é de 495,3mm e a espessura da parede é de, aproximadamente, 14,3mm.



Figura 3-18: Tubo soldado recebido para retirada dos corpos de prova.



A solda ensaiada foi a circumferencial, utilizada para a união dos diferentes segmentos de tubo. Apesar desta solda em geral ser realizada com o processo de eletrodo revestido, para este tubo específico, a soldagem foi realizada por arco submerso com chanfro duplo por este processo apresentar menos dispersão nos resultados dos ensaios de fadiga.

### 3.6.3 Análise da Junta Soldada

Foi retirada uma secção transversal da junta solda para análise metalográfica e ensaio de microdureza. Para metalografia foi usado procedimento padrão de corte, embutimento, lixamento (até # 1000), polimento e ataque químico. Para o ataque foi utilizado o reagente Nital 2%.

Foram realizados dois perfis de microdureza ao longo da seção transversal da junta soldada como mostra a figura 3-19. A escala de dureza utilizada foi a Vickers com carga de 200g e espaçamento de 0.3mm entre cada medida e de dureza. O microdurômetro utilizado foi da marca Buehler.

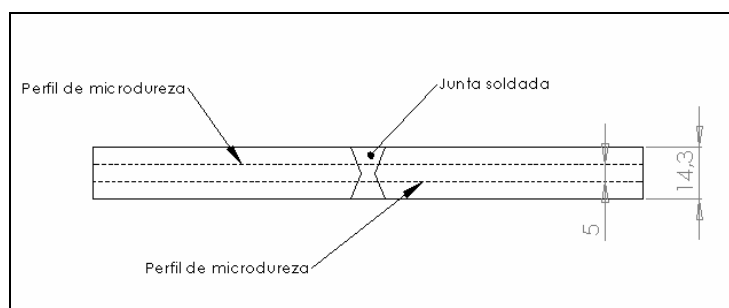


Figura 3-19: Representação esquemática da localização dos perfis de microdureza.

### 3.6.4 Análise Química

Foram retiradas amostras do material base do tubo para a realização de análise química, sendo utilizado um espectrômetro de emissão ótica (modelo Spectrolab, Spectro). O aparelho é calibrado com padrões da Spectro de acordo com a norma DIN ISO 100012.1. Os resultados apresentados são uma média de três análises.

### 3.6.5 Retirada dos Corpos de Prova

Para a retirada dos corpos de prova foram realizados três cortes longitudinais no tubo, sendo este dividido em três regiões denominadas AB, BC e CA, conforme apresentado na figura 3-20. Posteriormente, cada região foi dividida em tiras com

dimensões próximas às dos corpos de prova, sendo então usinadas para adquirir as dimensões finais. Cabe ressaltar que foram identificadas duas regiões distintas ao longo da solda circunferencial. Estas regiões, onde ocorre o encontro entre a solda circunferência e a solda longitudinal, foram isoladas por possuírem características diferentes do restante do tubo.



Figura 3-20: Fotografia do tubo após os três cortes longitudinais.

### 3.7 Ensaio de Tração

Foram retirados dois corpos de prova para ensaios de tração, sendo que a média dos valores de tensão máxima obtida nos ensaios foi utilizada como base para construção da curva de Wöhler. As dimensões dos corpos de prova de tração seguiram a Norma Offshore OS – C401 da DNV, como mostra a figura 3-21. A espessura do corpo de prova ficou limitada à espessura do tubo. O corpo de prova foi retirado de tal maneira que a solda circunferencial ficasse centralizada, sendo que o material de reforço foi usinado.

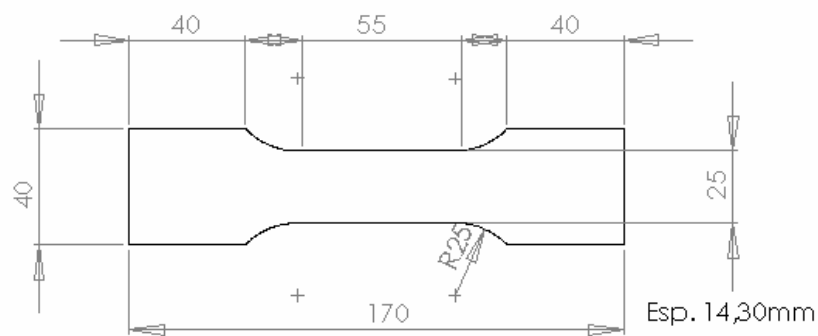


Figura 3-21: Desenho do corpo de prova de tração.

### 3.8 Ensaio de Fadiga (Curvas S/N)

Nos ensaios de fadiga para levantamento de curvas S/N foram utilizados corpos de prova com dimensões de 30mm de largura x 14,3mm de espessura x 270mm de comprimento para flexão a quatro pontos. O desenho utilizado para a confecção dos corpos de prova de fadiga é apresentado na figura 3-22. Pode ser visto que a região da solda não foi planificada, ao contrário do ensaio de tração, pois desta maneira o efeito de concentração de tensões devido à geometria do reforço estará presente durante o ensaio de fadiga, sendo então os resultados mais próximos das condições reais em serviço.

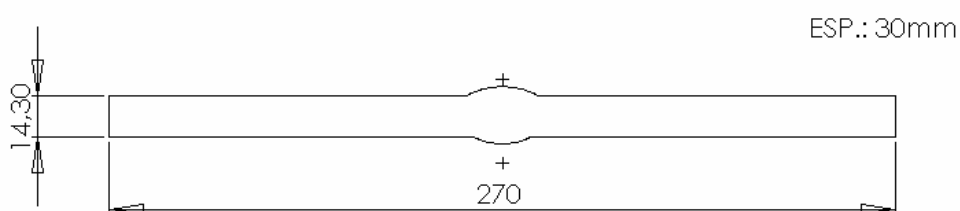


Figura 3-22: Desenho do corpo de prova para ensaio de fadiga.

Devido a ausência de um sistema de recirculação do meio corrosivo, os corpos de prova de fadiga foram pintados deixando apenas uma “janela” na região da solda. A exposição de todo o corpo de prova ao meio corrosivo poderia implicar em um excesso de produto de corrosão no meio de ensaio, aumentando seu pH e, conseqüentemente,

diminuindo a taxa de corrosão da amostra, o que influenciaria os resultados dos ensaios. Na figura 3-23 são mostrados corpos de prova preparados para o ensaio.

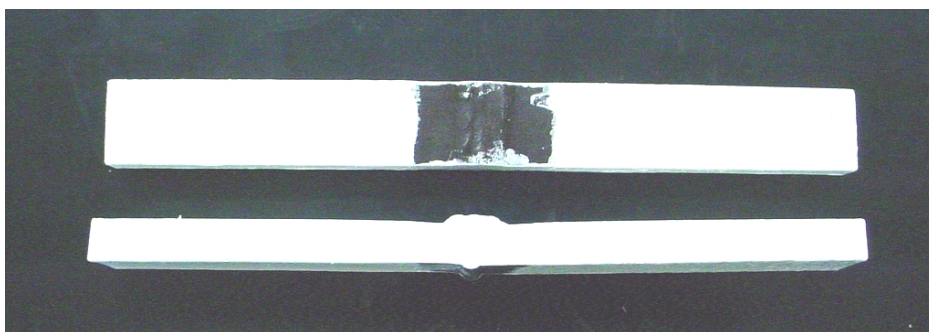


Figura 3-23: Corpos de prova preparados para o ensaio de corrosão-fadiga.

A figura 3-24 mostra um desenho esquemático da geometria média do cordão de solda resultante. O ângulo de reforço, tanto externo como interno do tubo, ficou em torno de  $156^\circ$  o que, segundo BRANCO (1986), resulta em um fator  $K_t$  de aproximadamente 2,5.



Figura 3-24: Macrografia da junta soldada estudada

Os parâmetros dos ensaios para levantamento das curvas S/N são mostrados na tabela 3-2. Nela são mostradas a frequência e a razão de carregamento utilizadas.

Tabela 3-2: Tabela de parâmetros utilizados nos ensaios.

Parâmetro	Fadiga ao Ar	Corrosão-Fadiga
Frequência (Hz)	10	0,2
Razão de carregamento	0,1	0,1
Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	25	35

As tensões aplicadas foram: 75%, 50% e 40% da média do limite de resistência (UTS) obtida nos dois ensaios de tração realizados.

Posteriormente, os resultados foram plotados em um gráfico amplitude de tensão x Log número de ciclos.

### 3.9 Preparação do Meio Corrosivo

A solução utilizada nos ensaios era composta por: 115.000 ppm de cloreto obtido através da adição de NaCl em água destilada e deionizada. O cálculo de adição de cloreto de sódio foi baseada em seus pesos moleculares. O resultado é a adição de 189,5g de cloreto de sódio por litro de água destilada.

Como é importante que a solução fique isenta de O<sub>2</sub>, a solução é preparada em uma cuba separada, saturada com o gás do ensaio e depois de pronta ela é transferida para a cuba de ensaio. Durante o ensaio foi borbulhado gás contendo 100% de CO<sub>2</sub> visto que este gás é encontrado junto com a água de produção e, como já foi citado anteriormente, possui o efeito de diminuir o pH de uma solução aquosa acelerando o desta forma o processo de corrosão.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Validação do Equipamento

Os resultados dos testes de extensômetros são mostrados a seguir. A figura 4-1 consiste em um gráfico de tempo por tensão para cada carga aplicada. Nesta figura é mostrada a tensão resultante para cada nível de carregamento realizado. A figura 4-2 consiste em uma relação entre a tensão medida com a média da tensão calculada acompanhada de uma regressão linear.

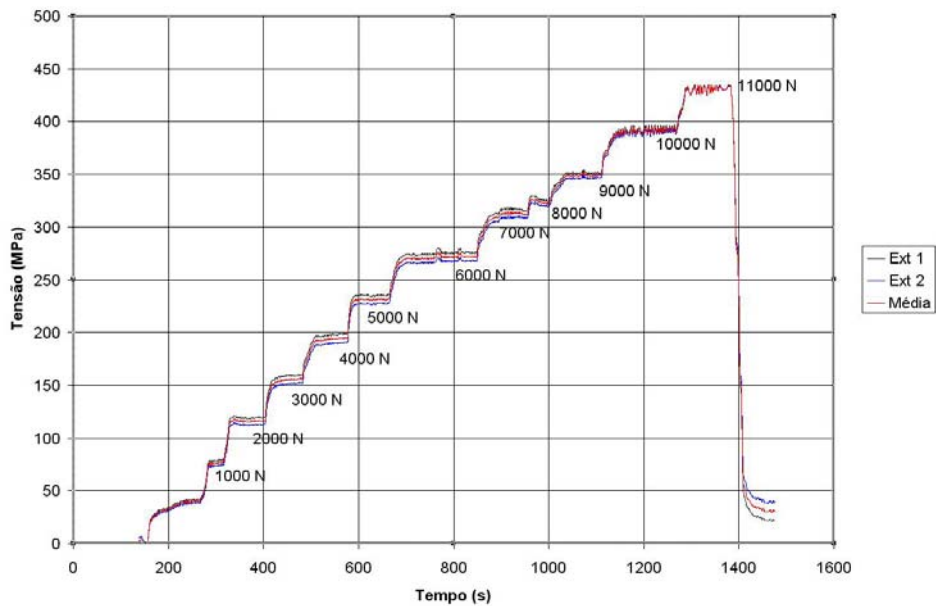


Figura 4-1: Gráfico de carregamento do corpo de prova com extensômetros

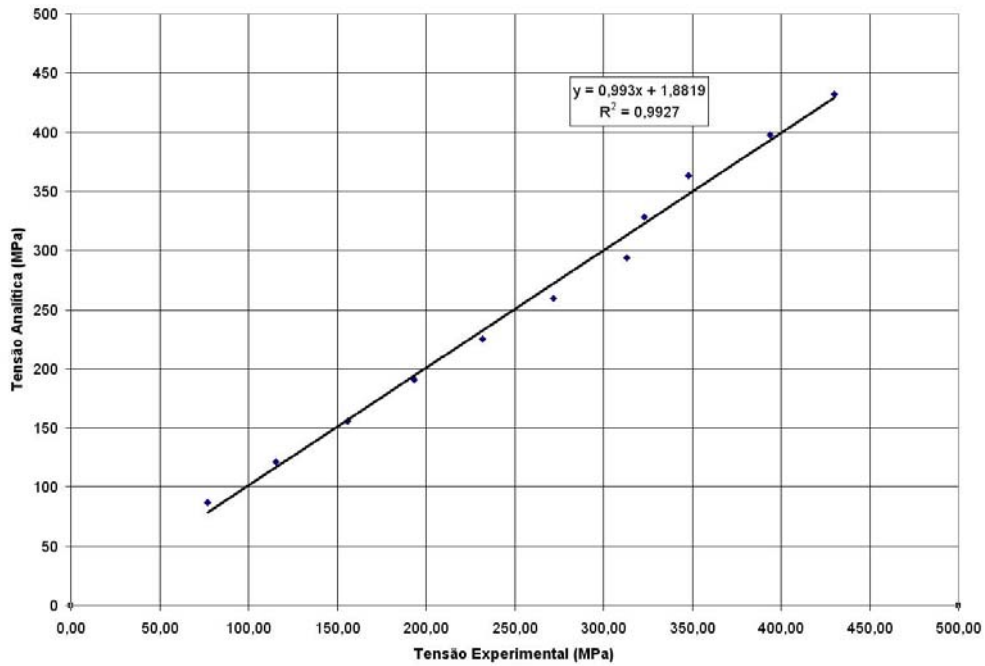


Figura 4-2: Gráfico da relação entre tensão analítica e experimental.

A tabela 4-1 mostra as formas de onda obtidas das diferentes condições de carregamento e frequência. A figura 4-3 mostra condição de 400MPa a 0,2Hz em destaque.

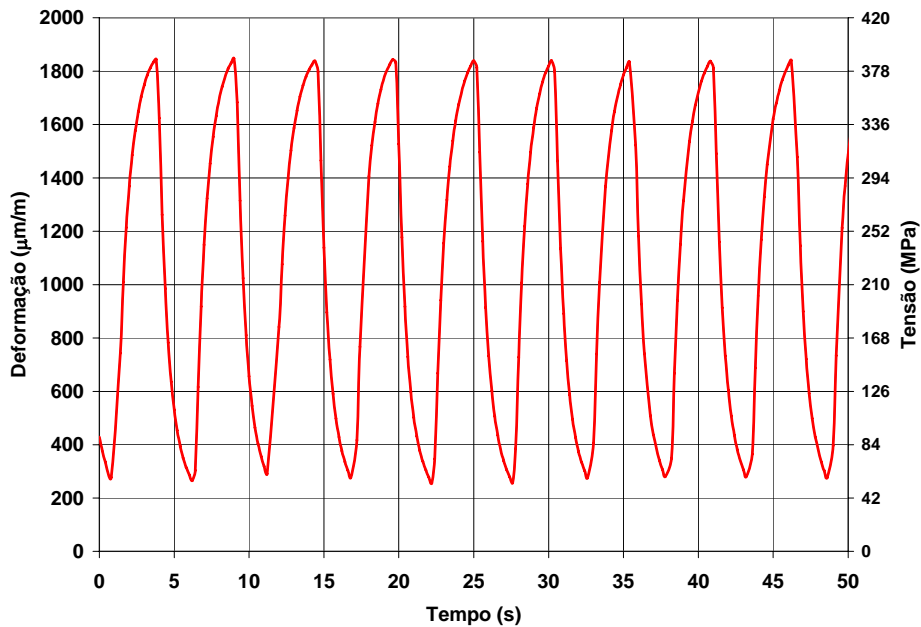
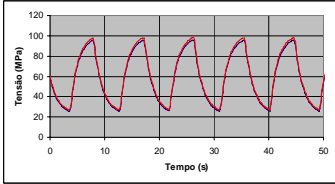
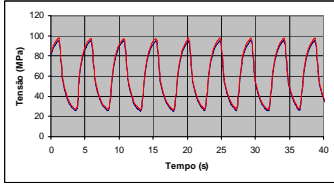
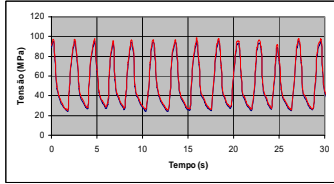
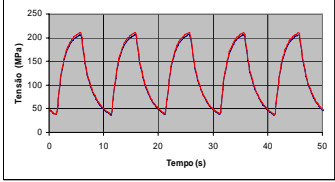
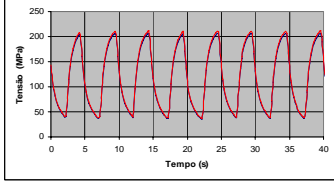
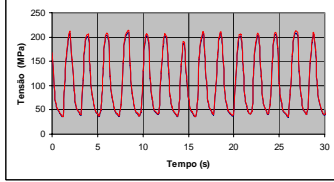
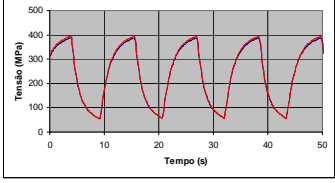
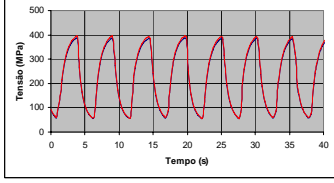
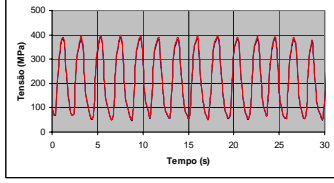


Figura 4-3: Forma da onda do carregamento resultante

Tabela 4-1: Formas de onda em função da frequência e a tensão máxima

		Frequência Hz		
		0,1	0,2	0,5
Tensão Máxima (MPa)	100			
	210			
	400			

## 4.2 Análise da Junta Soldada

### 4.2.1 Ensaio de Microdureza

A figura 4-4 mostra o resultado do ensaio de microdureza realizado na junta soldada. A figura consiste em um gráfico de dureza por distância do centro da junta. Os resultados mostram uma dureza relativamente homogênea ao longo de toda solda com tendência a uma elevação na região da ZAC e ZF.

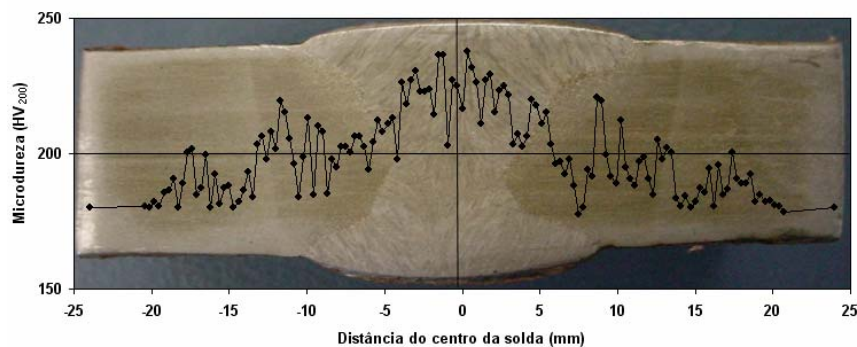


Figura 4-4: Perfil de dureza da junta soldada estudada.



#### 4.2.2 Análise Metalográfica

Da figura 4-5 até figura 4-7 são apresentadas as micrografias das diferentes regiões da união (MB, ZF e ZAC). O material base consiste em uma microestrutura contendo perlita e ferrita típicas do aço estudado. A zona de fusão consiste em uma estrutura bruta de solidificação acompanhado de uma ZAC com grãos refinados.

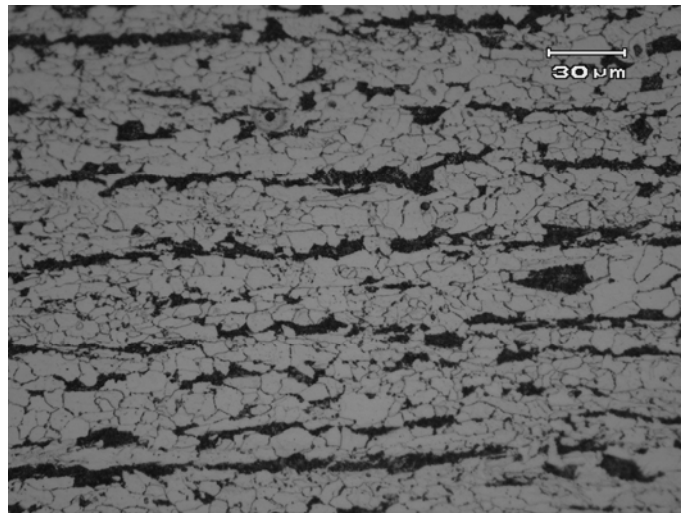


Figura 4-5: Aspecto metalográfico do material de base. Ataque Nital 2%

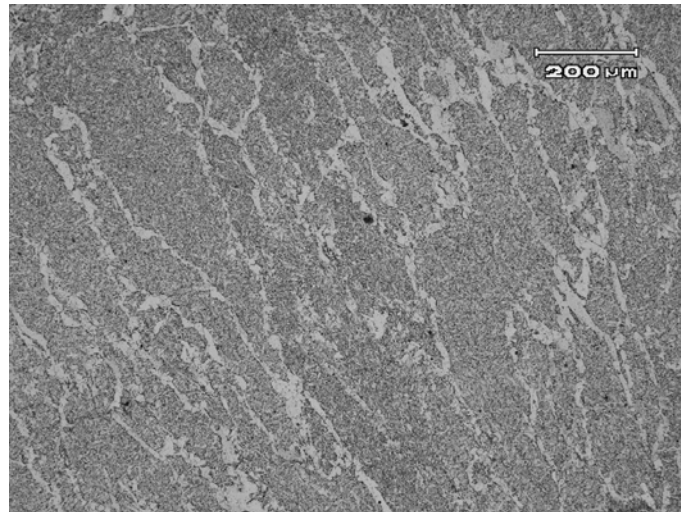


Figura 4-6: Aspecto metalográfico do metal de solda. Ataque Nital 2%

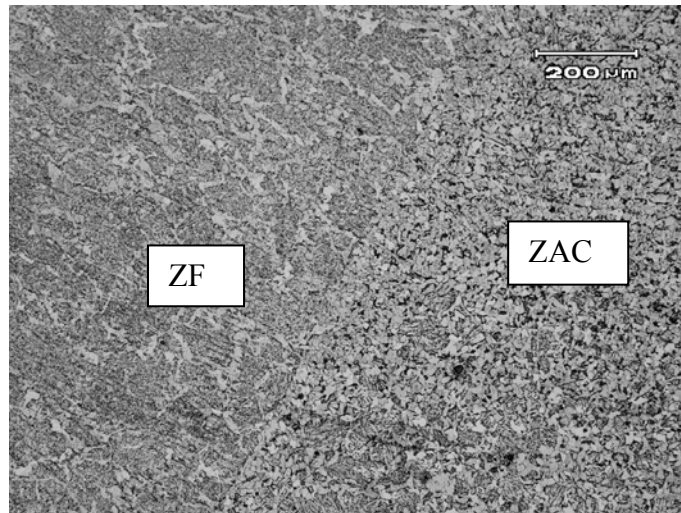


Figura 4-7: Aspecto metalográfico da ZTA. Ataque Nital 2%

#### 4.2.3 Análise Química e Ensaio de Tração

Os resultados da análise química estão mostrados na tabela 4-2.

Tabela 4-2: Composição química média do metal de base do tubo ensaiado.

Composição química (%)										
C	Mn	Si	P	S	Mo	Nb	V	Ni	Cu	Cr
0,12	1,49	0,26	0,026	0,005	0,005	0,04	0,05	0,01	<0,01	0,01

A média do limite de escoamento (LE) e do limite de resistência (UTS) dos ensaios de tração em dois corpos de prova foram de 550 MPa e 615 MPa, respectivamente sendo que a fatura dos corpos de prova de prova ocorreu fora da região da solda.

#### 4.3 Resultados dos Ensaio de Fadiga

A figura 4-8 mostra as etapas de nucleação e propagação da trinca de fadiga durante os ensaios. Em todos eles, a trinca sempre nucleou no ângulo de reforço da solda e seguiu uma direção praticamente perpendicular à máxima tensão trativa. A partir de 2 a 3mm, a trinca já podia ser detectada visualmente ou com auxílio de uma lupa manual. A figura 4-9 mostra a ruptura final de um corpo de prova.

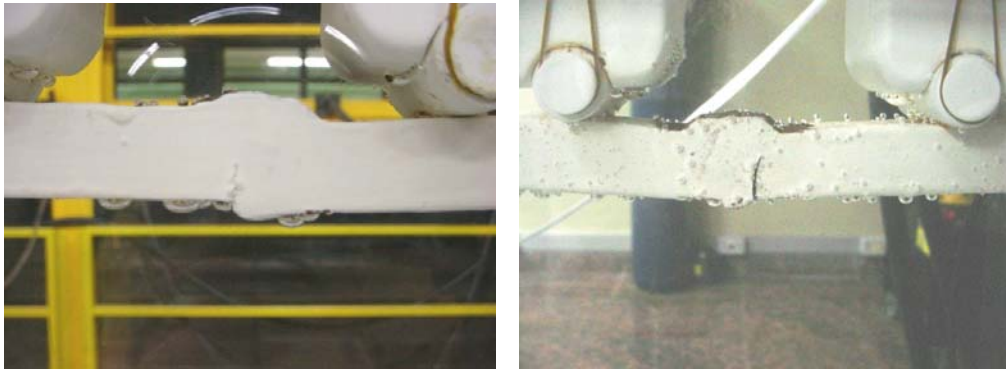


Figura 4-8: Imagens mostrando a nucleação e a propagação da trinca durante o ensaio.

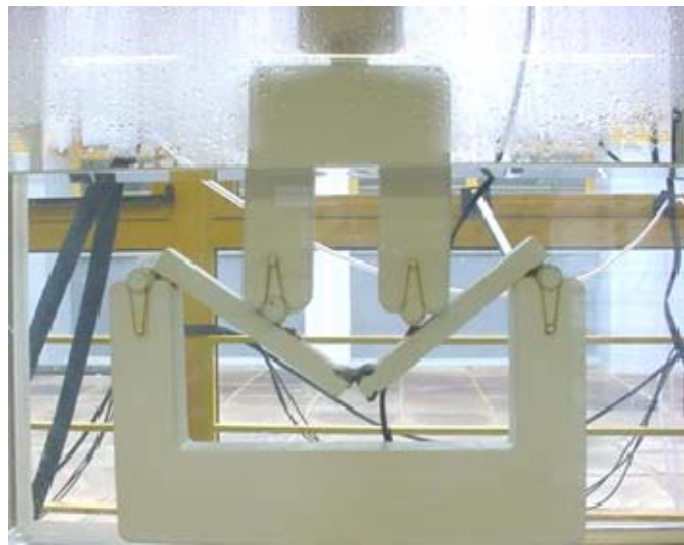


Figura 4-9: Fratura final do corpo de prova

As curvas de Wohler obtidas neste ensaio são mostradas na figura 4-10 juntamente com curvas de projeto ao ar e em água do mar com proteção catódica retiradas da referência: “*BS 7608 Code of Practice for Fatigue and Assessment of Steel Structures*”. A curva de projeto selecionada é da classe “C”, que se refere a soldas feitas em tubos, dos dois lados, mantendo o material de reforço da solda. Em função da baixa frequência de ensaio, o limite de fadiga foi estipulado em  $10^6$  ciclos, sendo que todos os pontos obtidos se referem à ruptura total do corpo de prova.

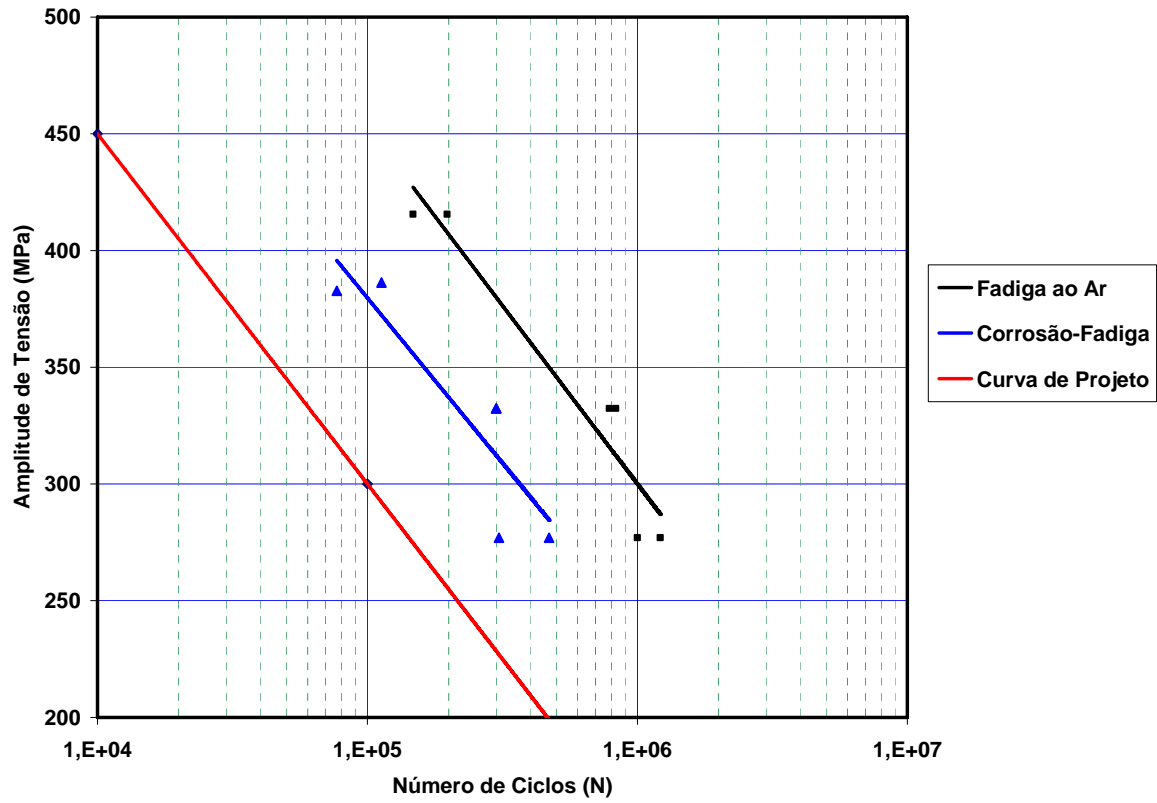


Figura 4-10: Curvas de Wohler obtidas nos ensaios ao ar e em meio corrosivo

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tanto a composição química como os resultados do ensaio de tração classificam o material estudado atendendo a especificação API 5L X60.

A tensão analítica calculada ficou muito próxima da tensão experimental; visto que na regressão linear obteve-se um  $R^2$  de 0,99227, o que mostra uma boa correlação linear entre a tensão calculada e medida; isto também mostrou que o fato de se aproximar secção transversal do corpo de prova por uma viga de secção retangular (ignorando a curvatura da tubulação) se mostrou eficaz para este estudo, porém cabe ressaltar que a tubulação estudada apresentava um diâmetro de 495,3mm. Para o caso de tubulações de menor diâmetro, onde a curvatura é maior, este cálculo deve ser compensado por um fator de correção.

Em frequências mais elevadas, a forma da onda tende a se assemelhar a uma onda triangular produzindo o mesmo efeito de uma onda senoidal em corrosão-fadiga. Em frequências menores a onda apresenta um comportamento intermediário entre uma senóide e uma dente de serra positiva.

Em todos os ensaios, a partir do momento em que a trinca de fadiga foi detectada visualmente (2 a 3mm), o número de ciclos para fratura do corpo de prova não ultrapassou 5000 ciclos. Isto mostra que a etapa de nucleação da trinca representou em torno de 90% da vida total em fadiga. Isso pode ser explicado usando conceitos da mecânica da fratura aplicada a fadiga, que diz que o  $\Delta K$  governa a taxa de propagação de trinca. Segundo TADA (1985), pode-se calcular o fator  $K_I$  para uma viga submetida à flexão pura segundo a equação abaixo:

$$K_I = f(a/W) \frac{6M}{bW^2} \sqrt{\pi a} \quad (5.1)$$

Onde:

$K_I$ : Fator de intensidade de tensões no modo I ( $\text{MPam}^{1/2}$ );

$M$ : Momento Fletor máximo (Nmm);

$W$ : Largura (mm);

$b$ : Espessura (mm);

$a$ : Comprimento da trinca (m);

$f(a/W)$ : Fator de forma

O fator de forma  $f(a/W)$  para uma viga em flexão pura é retirado graficamente da figura 5-1. O cálculo do  $\Delta K$ , em função do diferentes níveis de carregamentos utilizados, para um trinca de 2mm (fator de forma igual a 1) é mostrado na tabela 5-1. Segundo JASKE 1981,  $\Delta K$  maiores do que  $20\text{MPam}^{1/2}$  geram taxas de propagação de trincas superiores a  $10^{-4}$  mm/Ciclos.

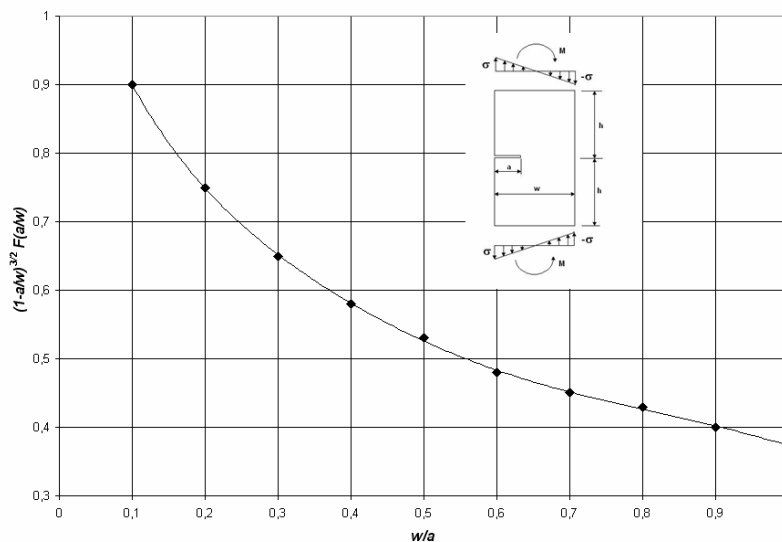


Figura 5-1: Gráfico mostrando a relação do fator de forma em função do comprimento de trinca para uma viga submetida a momento fletor puro (TADA 1985).

Tabela 5-1: Relação de  $\Delta K$  com a amplitude de tensão.

% UTS	Amplitude tensão (MPa)	$\Delta K$ ( $\text{MPam}^{1/2}$ )
75	460	34
60	370	27
50	305	23
40	245	18

Em todos os ensaios de fadiga (ao ar e em meio corrosivo) a trinca sempre nucleou no ângulo de reforço da solda, o que mostra uma grande influência da geometria do cordão na vida em fadiga do material.

A ZTA apresentou uma região de refinamento de grão, o que pode ser responsável pelo aumento de dureza nesta região.

Os resultados mostram que ocorreu uma influência do meio corrosivo durante os ensaios, pois houve uma diminuição da vida em fadiga. Apesar disto, ambas curvas ficaram acima da curva de projeto mostrando uma boa qualidade da junta.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho podemos concluir que:

O equipamento desenvolvido se mostrou eficaz para realização dos ensaios de corrosão-fadiga nas condições descritas;

O uso de sistemas mais simples e em maior quantidade se mostrou uma ótima alternativa para realização de ensaios de corrosão-fadiga em baixa frequência;

A carga máxima utilizada foi de 12kN, sendo esta limitada pela capacidade da célula de carga e da bomba, porém, trocando-se a célula de carga por uma de maior capacidade, pode-se trabalhar com carregamentos da ordem de 50kN;

O comportamento do ciclo de carregamento foi mais homogêneo em carregamentos e frequências baixas;

A forma da onda praticamente não mudou com a mudança da tensão máxima, o que mostra ser possível a regulação da carga a partir dos controladores utilizados;

O mecanismo de controle implementado no sistema limita a frequência de trabalho do equipamento em 1Hz.

A geometria da junta foi o fator mais importante na vida em fadiga.

A junta estudada apresentou um comportamento acima do esperado no que se refere à vida em fadiga.



## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, sugere-se o estudo dos seguintes tópicos:

- Adaptar o equipamento desenvolvido para realizar ensaios de fadiga com deslocamento prescrito;
- Adaptar a célula de corrosão, eletrodos para medida de potencial químico e outras variáveis eletroquímicas.
- Estudar e desenvolver uma técnica que possa ser usada para o monitoramento da trinca de fadiga ao longo dos ensaios;

## 8 BIBLIOGRAFIA

- 1 API Specification 5L. **Specification for Line Pipe**, 43° ed 2004
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Metals Handbook Fatigue and Fracture**, Vol 19, 9ed. 1987.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Metals Handbook, Corrosion**, Vol 13, 9ed. 1987.
- 4 AMERICAN STANDARDS OF TESTING MATERIALS. **E 399-97:Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials**.1997
- 5 AMERICAN STANDARDS OF TESTING MATERIALS. **E 647-00:Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates**.EUA 2000
- 6 ANDERSON, T.L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 2° ed.,CRC Press.1995
- 7 ANGELOVA, D., AKID, R., **A Normalization of Corrosion Fatigue Behaviour: A Example Using na Offshore Structural Steel in Chloride Environments**. Londres. 1999.
- 8 ATKINSON, J.D., LINDLEY, T.C. **The Effect of Frequency and Temperature on Environmentally Assisted Fatigue Crack Growth Below KISCC in Steels**. The Influence of Environment on Fatigue, Londres: I mech E conference publications, 1977.
- 9 AUSTEN, I.M., WALKER, E.F. **Quantitative Understanding of the Effects of Mechanical and Environmental Variables on Corrosion Fatigue Crack Growth Behaviour**. The Influence of Environment on Fatigue. Londres: I mech E conference publications, 1977.
- 10 ÁVILA, G.G. **Cálculo de Fadiga de Risers Rígidos Átraves da Mecânica da Fratura**.Dissertação.Rio de Janeiro, 2005
- 11 BETANZOS, J.T., **Projeto, Construção e Teste de Equipamento Para Ensaios de Fadiga de Risers Flexíveis**.Tese. Porto Alegre, 2004.
- 12 BRANCO, C. A., FERNANDES. A.A., CASTRO P.M.S.T. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986.

- 13 BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 7608 Code of Practice for Fatigue and Assessment of Steel Structures.** London, 1993
- 14 GENTIL, V., **Corrosão. 3º ed.** Rio de Janeiro 1996.
- 15 HARTT, W.H., **Selected Aspects of the Design of Offshore Structures for Fatigue Resistance.** Design of Fatigue and Fracture Resistant Structures. ASTM STP, 1982, pp. 91-109
- 16 HORSTMANN, M., GREGORY, J. K., SCHWALBE, K.H. **Geometry Effects on Corrosion-fatigue in Offshore Structural Steels.** GKSS Research Centre, Institute for Materials Research, Postfach 1160, D-21494 Geesthacht, Alemanha, 1994.
- 17 JASKE, C.E., PAYER, J.H., BAILE V.S. **Corrosion Fatigue of Metals in Marine Environments.** Battelle's Columbus Laboratories, Ohio, 1981.
- 18 LIN, C.K., YANG, S.T. **Corrosion fatigue behavior of 7050 aluminum alloys in different tempers.** Engineering Fracture Mechanics Vol. 59. No 6. pp779-795. 1998
- 19 NEROLICH, S.M., MARTIN, P.E., HARTT, W.H. **Influence of Weld Profile on Fatigue of Welded Estructural Steel in Seawater.** Corrosion Fatigue: mechanics, metallurgy, electrochemistry and engineering, Missouri: ASTM committees, 1981.
- 20 PANOSSIAN, Z. **Corrosão e Proteção Contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas vol II,** 1 ed. São Paulo, IPT, 1993
- 21 PINHO, A.L.S. **Redução de Tensões em Risers Rígidos de Plataformas TLP.** Tese. Rio de Janeiro, 2001.
- 22 POPOV, E.P. **Introdução a Mecânica dos Sólidos.**
- 23 PRAVIA, Z.M.C. **Estabilidade de Estruturas de Pontes Metálicas com Fraturas.** Rio de Janeiro 2003.
- 24 RAMANATHAN, L.V., **Corrosão e Seu Controle.** Hemus, São Paulo, 1995
- 25 RECOMMENDED PRACTICE DNV-RP-C203. **Fatigue Design of Offshore Steel Structures,** 2005.
- 26 SIVAPRASAD, S., TARAFDER, S., TARAFDER, M., RAY, K.K. **An Alternative Method of Decreasing  $\Delta K$  FCGR Desting.** International Journal of Fatigue 22, 2000 593–600
- 27 STROHAECKER, T.R., **Comportameto de Aços Estruturais de Alta Resistência Mecanica Frente a Ambientes Agressivos.** Tese. Rio de Janeiro, 1989.
- 28 STROHAECKER, T.R., **Comportameto de Aços Estruturais de Alta Resistência Mecanica Frente a Ambientes Agressivos.** Tese. Rio de Janeiro, 1989.
- 29 SURESH, S., **Fatigue of Materials,** Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom, 1998

- 30 SWANSON, R. C. et al. **Metal Tube Umbilicals - Deepwater and Dynamic Considerations.** OTC 7713, 1995.
- 31 TADA, H., PARIS, P.C., IRWIN, G.R. **The Stress of Crack Handbook**, 3<sup>o</sup> ed, Fracture Prof Design, Saint Louis, MO. 2000.
- 32 TOMKINS, B. **The Role of Crack Tip Opening in Corrosion Fatigue for the Ductile Ferritic Steel-Water System.** The Influence of Environment on Fatigue. Londres: I mech E conference publications, 1977.
- 33 TRANT, P.J. **A Quantitative Assessment of the Superpositon Model of Corrosion fatigue.** The Influence of Environment on Fatigue. Londres: I mech E conference publications, 1977.
- 34 WAHAB, M.A., SAKANO, M. **Corrosion and Biaxial Fatigue of Welded Structures.** Journal of Materials Processing Technology 143–144.2003.