

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

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO-FADIGA DO AÇO API 5L X65
REVESTIDO COM AISI 308L SI.

Márcio Ribeiro Antunes

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2008

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

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO-FADIGA DO AÇO API 5L X65
REVESTIDO COM AISI 308L SI.

MÁRCIO RIBEIRO ANTUNES
Engenheiro Industrial Mecânico

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

2008

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

Orientador: Prof. Dr Telmo Roberto Strohaecker.

Banca Examinadora:

Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGEM/UFRGS
Dr. Giovani Dalpiaz, CENPES/PETROBRAS
Dr. José Antônio E. Mazzaferro PROMEC/UFRGS
Dr. Sandro Griza, UNISINOS

Prof. Dr. Carlos P. Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico a meus pais Telmo e Irene
A meus irmãos Jaime, Jair, Adriane, Laércio e Alexandre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que sempre esteve comigo.

Aos meus pais pelo amor e ensinamento do quão importante são a dignidade, a honra, o caráter e a honestidade de um homem.

Ao professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker pela orientação, disponibilidade e pela confiança despendidas.

Aos professores Irionson Antônio Bassani e Flávio Kieckow pela amizade e pela valiosa contribuição em minha formação acadêmica.

Aos ex-colegas de trabalho, Alexandre e Fabiano.

Aos professores do PPGEM.

Aos colegas do GECOR, Aldo, Charles, Gabriel, Guilherme, Henrique, Jair, Marlon, Raphael, Rodrigo e Russel.

Ao colega de trabalho Victor Hugo pela força e confiança dada junto a empresa Randon.

À empresa Copé e Cia Ltda em especial pela contribuição na formação profissional e pelo apoio na realização da parte experimental deste trabalho.

A todos os meus parentes e amigos, os quais sempre acreditaram e torceram por mim.

A todos os que contribuíram para a realização deste trabalho o meu reconhecimento.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1	Processo de Soldagem MIG/MAG.....	3
2.1.1	Vantagens.....	4
2.2	Equipamentos.....	4
2.2.1	Soldagem Manual.....	4
2.2.2	Tochas de Soldagem e Acessórios.....	5
2.2.3	Alimentador de Arame.....	7
2.2.4	Fonte de soldagem.....	7
2.2.5	Gases de Proteção.....	7
2.3	Parâmetros de Soldagem para Aços inoxidáveis.....	8
2.4	Revestimento de Superfícies.....	9
2.5	Processos de Revestimento.....	10
2.5.1	Processo de Revestimento por Soldagem – <i>Weld Overlay</i>	10
2.5.2	Revestimento por Laminação.....	11
2.5.3	Revestimento por Explosão.....	12
2.6	Materiais Depositados – Aços Inoxidáveis.....	13
2.7	Ensaio de Dobramento.....	16
2.8	Fadiga.....	17
2.8.1	Curvas S-N.....	18
2.8.2	Ensaio de Fadiga – Flexão Pura.....	21
2.9	Fadiga em Meio Agressivo (corrosão-fadiga).....	21
2.9.1	Meio Corrosivo (Água do Mar).....	24
2.9.2	Material.....	25
2.10	Ensaio de Corrosão-Fadiga.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	Descrição do Caso.....	27
3.1.1	Material Base.....	27
3.1.2	Material de Adição.....	28
3.1.3	Gás de Proteção.....	29
3.2	Procedimento para Realizar o Revestimento.....	29
3.3	Corpos de Prova.....	32
3.4	Fabricação dos Dispositivos para Ensaio de Dobramento, Push-Off e Corrosão-Fadiga.....	33

3.5	Ensaio de Dobramento.....	34
3.6	Ensaio de Fadiga	37
3.6.1	Fadiga ao Ar	37
3.6.2	Fadiga em Meio Corrosivo (Corrosão-Fadiga)	38
3.7	Análise Metalográfica.....	39
3.8	Ensaio de Microdureza.....	39
3.9	Rugosidade	40
3.10	Ensaio Push-off	41
3.11	Análise Fractográfica.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Ensaio de Dobramento	44
4.2	Análise Química	45
4.3	Ensaio de Fadiga ao Ar	46
4.4	Ensaio de Fadiga em Meio Agressivo Corrosão-Fadiga	46
4.5	Análise Metalográfica.....	47
4.6	Ensaio de Microdureza.....	51
4.7	Rugosidade	52
4.8	Ensaio Push-off	52
4.9	Análise Fractográfica.....	54
4.9.1	Metalografia da Fratura no Momento da Falha	55
4.10	Metalografia da Superfície de Fratura	56
5	CONCLUSÕES	59
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
8	ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo básico de soldagem.....	3
Figura 2 - Modelo de equipamento MIG/MAG	5
Figura 3 - Tocha MIG/MAG típica	6
Figura 4 - Características de queima - arames de aço inoxidável tipo 300.....	9
Figura 5 –Revestimento por Soldagem - weld overlay	11
Figura 6 - Esquema do processo de laminação.....	11
Figura 7 - Detalhe microestrutural do processo de laminação	12
Figura 8 - Processos de revestimento por explosão.....	13
Figura 9 – Detalhe da microestrutura do revestimento por explosão	13
Figura 10 - Processo de revestimento por fricção	16
Figura 11 - Ângulo de dobramento	17
Figura 12 - Curva S-N clássica.....	19
Figura 13 - Flexão Rotativa.....	20
Figura 14- Comparativo entre a curva de fadiga ao ar e em meio corrosivo	22
Figura 15 - Mecanismo de nucleação em discordância ancorada	23
Figura 16 - Esquema dos três tipos de taxa de crescimento de trinca por corrosão-fadiga. 24	
Figura 17 - Esquema do equipamento desenvolvido para ensaio corrosão fadiga.....	26
Figura 18 - Diagrama de Schaeffler.	29
Figura 19 - Posicionamento da tocha no interior do tubo.....	30
Figura 20 - Revestimento sendo executado.....	31
Figura 21 - Tubo já com o revestimento (perspectiva em corte).....	31
Figura 22 - Tubo seccionado	32
Figura 23 - Corpo de prova de fadiga.....	33
Figura 24 - Dispositivo – matriz e punção para realização do ensaio de dobramento.	33
Figura 25 - Dispositivo – matriz e punção para realização do ensaio de Push-off (não normatizado).....	34
Figura 26 - Dispositivo para realizar o ensaio corrosão-fadiga.....	34
Figura 27 - Máquina MTS modelo 810 com o dispositivo posicionado.	35
Figura 28 - Diagrama de momento máximo.....	36
Figura 29 - Corpo de prova de fadiga posicionado no dispositivo.....	37
Figura 30 - Esquema de montagem do ensaio corrosão-fadiga.....	38
Figura 31 - Corpo de prova para análise metalográfica.....	39

Figura 32 - Corpo de prova para ensaios de dureza, a região assinalada mostra onde foi feito o perfil de dureza.....	40
Figura 33 - Corpo de prova para medida de rugosidade.....	41
Figura 34 - Corpo de prova para realização do ensaio push-off.....	42
Figura 35 - Gráfico dos ensaios de dobramento.....	44
Figura 36 - Corpo de prova posicionado no dispositivo de dobramento.....	45
Figura 37 - Corpo de prova dobrado a 180°.....	45
Figura 38 - Curvas S-N com as 4 condições.....	47
Figura 39 - Microestrutura do substrato. Ataque Nital 3%.....	48
Figura 40 - Microestrutura do revestimento composta de grãos colunares. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.....	48
Figura 41 - Micrografia mostrando as frentes de solidificação, as setas indicam a direção na qual a frente se propaga. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.....	49
Figura 42 - Micrografia mostrando a diluição que acompanha o revestimento soldado. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.....	50
Figura 43 - Micrografia mostrando a interface entre o revestimento e o metal base com grãos irregulares no substrato. Ataque Nital 3%.....	50
Figura 44 - Microestrutura do substrato, predominantemente ferrítica. A região assinalada mostra a ferrita acicular.....	51
Figura 45 - Perfis de Microdureza.....	51
Figura 46 - Gráfico perfil de rugosidade.....	52
Figura 47 - Corpo de prova Cisalhado.....	53
Figura 48 - Corpo de prova não Cisalhado.....	53
Figura 49 - Fratura iniciando no canto esquerdo da superfície do revestimento.....	54
Figura 50- Fratura iniciando no canto esquerdo da superfície do revestimento.....	55
Figura 51 - Micrografia da fratura. Iniciação de trincas. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.....	56
Figura 52 - Detalhe da microestrutura na interface ao redor da fratura. Ataque Nital 3%..	56
Figura 53 - Maclas de deformação. 771 ciclos de fadiga.....	57
Figura 54 - Maclas de deformação próximas a fratura. 152141 ciclos de fadiga.....	58
Figura 55 - Orientações das maclas - acabam delineando o grão austenítico prévio.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média da água do mar.....	24
Tabela 2 - Composição química do material base API 5L X65.....	27
Tabela 3 - Composição química do material base API 5L X65 obtida por espectrometria de emissão óptica.	27
Tabela 4 Composição química do material de adição fornecido pelo fabricante.....	28
Tabela 5 - Parâmetros usados para a realização do revestimento.....	29
Tabela 6 - Composição química do do revestimento, obtida por espectrometria de emissão óptica.	46
Tabela 7 – Resultados do cálculo da tensão de cisalhamento ensaio de Push-off	53

LISTA DE SÍMBOLOS

MIG – metal inert gás

MAG – metal arc gás

GMAW – gás metal arc welding

CO₂ – dióxido de carbono

CC – corrente continua

A – ampéres

V – volts

mm – milímetros

TIG - tungstênio inerte gás

CA – corrente alternada

N₂ – nitrogênio

O₂ – oxigênio

H₂O – água

CO – monóxido de carbono

Mn – manganês

Si – silício

H – hidrogênio

Al – alumínio

He – hélio

Ar – argônio

PH – endurecimento por precipitação (precipitation hardening)

L – low

ASTM – American Society for Testing and Materials

NaCl – cloreto de sódio

ppm – parte por milhão

stick-out – distância entre bico de contato e peça

SAE – Society of Automotive Engineers

MTS – Material Test System

σ – Tensão

M – momento

b – largura do corpo de prova

h – altura do corpo de prova

Hz – Hertz

μm – micrometro

A – área cisalhada

F – força

d – diâmetro da área cisalhada

e – espessura do revestimento

MPa – Mega Pascal

MEV- microscópio eletrônico de varredura

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento das propriedades mecânicas e a resistência a corrosão sob fadiga de um segmento de duto de aço micro-ligado API 5L X65 revestido internamente com aço inoxidável AISI 308 L Si pelo processo de soldagem GMAW.

Para esta avaliação, o duto foi revestido por soldagem e seccionado obtendo corpos de prova retangulares a fim de realizar os seguintes ensaios: dobramento, fadiga ao ar, fadiga em meio agressivo, ensaio de push-off, ensaios de microdureza e, ainda, análises metalográfica, fractográfica e análise química. Os ensaios de dobramento e os ensaios de fadiga foram feitos a três pontos. O ensaio de dobramento serviu para qualificar o revestimento e determinar os parâmetros de carga para os ensaios de fadiga. Estes resultados de fadiga ao ar e fadiga em meio agressivo (corrosão-fadiga) foram apresentados em uma Curva S-N. Já os ensaios de push-off foram realizados para verificar a aderência do revestimento, sendo este um ensaio qualitativo. A tensão de cisalhamento obtida pelo ensaio push-off apresentou-se satisfatória. Os ensaios de microdureza juntamente com as análises metalográficas foram empregados para caracterizar o material mecanicamente e microestrutural. A análise fractográfica caracterizou a posição no qual originaram as falhas decorrentes dos ensaios, além do tipo de falha e mecanismo de fratura. Na análise química observou-se que houve uma redução no teor de cromo no revestimento quando comparada a composição química do arame utilizado para a deposição. Esta queda é devido a diluição do metal de adição com o metal base durante o processo de soldagem.

O revestimento apresentou boa ductilidade e com um bom comportamento em fadiga ao ar, e comportamento insatisfatório quando exposto em meio agressivo. As falhas apresentadas nos ensaios de fadiga ocorreram de forma dúctil e iniciaram nos pontos de maior tensão no corpo de prova.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the mechanical properties behaviour and the corrosion fatigue resistance of a micro-alloyed API 5L X65 steel pipe segment internally coated with an AISI 308 L stainless steel by the GMAW welding process.

Rectangular specimens were machined from the coated pipe in order to perform the following tests such as: bending test, in air fatigue test, environment fatigue test, push-off test, microhardness test, metallographic and fractographic evaluation and chemical analysis. The bending test as well as the fatigue test were carried out in a three-point-bending arrangement. The fatigue load parameters and welding qualification were based on results obtained from the bending test. These fatigue results were presented in an S-N plot diagram. The push-off test were performed in order to check the adherence of the covering, layer and being a qualitative test. The shear stress obtained from these test showed itself satisfactory. The microhardness tests as well as the metallographic analysis contributed for the mechanical and microstructural characterization. The initiation failure region and the fracture mechanism involved were obtained by fractographic analysis. The fractographic analysis characterized the position that fatigue tests failure, kind of failure and failure mechanism. This analysis was split in three sub analysis, the visualization of fracture surface, fracture metallographic when a failure was present and metallographic of recover surface before your failure. According to the chemical analysis it was observed a reduction in the chrome content in comparison with the coating wire. This alloying element loss can be probably attributed to the dilution phenomena inherent from the welding process.

The coated showed good ductility and satisfactory in-air fatigue results, however, it was observed an undermatching in the fatigue behaviour when submitted to the aggressive environment. The failures presented a ductile morphology and its initiation were localized in the higher tension points of the specimens.

1 INTRODUÇÃO

Os últimos anos foram de grande crescimento nas áreas de tubulações metálicas, grande parte motivada pelo aumento na prospecção de petróleo, implementação de oleodutos, gasodutos e aquedutos. Em virtude disso, a instalação de tubulações metálicas bem como a interligações entre estas tubulações tiveram uma alta demanda de fabricação.

Uma das aplicações que vem tendo importância crescente são as tubulações que ligam poços de petróleo com as plataformas e navios de produção denominadas “*Risers*”. Os *risers* podem ser em aço (*risers* rígidos) ou compostos por materiais diferentes dispostos em camadas, de forma a obter melhoramento de resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência à corrosão e boa flexibilidade (*risers* flexíveis). Estas tubulações têm como funções básicas transportar petróleo, escoar a produção de gás, além da injeção de água e outros produtos. As pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, manutenção e processos acompanharam o crescimento da indústria petroquímica. Devido a essa grande variedade de produtos processados, diversos materiais, processos de revestimento e união foram estudados.

Algumas aplicações industriais necessitam estruturas com melhoria nas suas propriedades superficiais, tais como boa resistência à corrosão, erosão e abrasão. Comparando com aços carbono comuns, ligas metálicas com estas propriedades são de custo elevado e, normalmente, o contato com o meio agressivo se dá somente na superfície do material. Para atender essas exigências, o uso de aços revestidos com diferentes materiais apresenta-se como uma solução interessante. Isso proporciona uma redução de custos relativos à fabricação associada a um ganho nas propriedades superficiais desejadas.

Existem diversas técnicas para revestimento de ligas metálicas entre elas: laminação, explosão ou soldagem (*weld overlay*). A técnica de revestimento utilizada neste trabalho foi a de revestimento por soldagem pelo processo GMAW. Esta técnica consiste em revestir a superfície desejada com uma camada de material a fim de melhorar algumas propriedades superficiais específicas.

O processo de revestimento pode ser utilizado em indústrias alimentícias, aeroespaciais, tubulações de óleos, vasos de pressão, reatores, indústria da borracha etc. Na maioria dos casos os materiais depositados são aços inoxidáveis em chapas metálicas pelo processo de laminação. Já em tubulações um método possível é depositar o material pelo processo de soldagem.

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de segmento de duto em aço API 5L X65 revestido internamente com aço inoxidável AISI 308 L. Inicialmente, foi efetuada uma avaliação metalográfica, levantado perfil de dureza e o desempenho do material, inclusive na presença de água do mar. Os resultados apresentam resultados satisfatórios na ligação metalúrgica e problemas na avaliação da corrosão fadiga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Soldagem GMAW

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (GMAW - *Gas Metal Arc Welding*), também conhecida como soldagem MIG/MAG (Metal Inerte Gas/Metal Active Gás), um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este alimenta a poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás inerte ou por uma mistura de gases^[1]. A Figura 1 ilustra esse processo de soldagem.

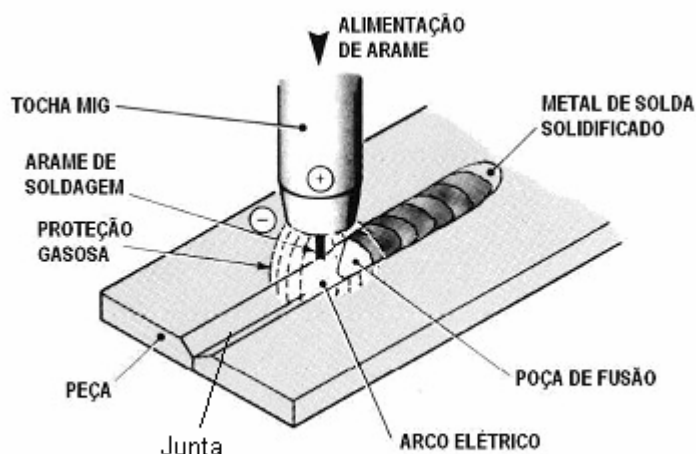


Figura 1 - Processo básico de soldagem.^[1]

O conceito básico de GMAW foi introduzido por volta de 1920 e tornado comercialmente viável após 1948. Inicialmente foi empregado com um gás de proteção inerte na soldagem do alumínio^[1,2]. Conseqüentemente o termo soldagem MIG foi inicialmente empregado e ainda é uma referência ao processo. Desenvolvimentos subsequentes acrescentaram atividades com baixas densidades de corrente e correntes contínuas pulsadas, emprego em uma ampla gama de materiais e o uso de gases de proteção ativos (particularmente o dióxido de carbono, CO₂) e misturas de gases. Esse desenvolvimento posterior levou à aceitação formal do termo GMAW para o processo, visto que tanto gases inertes quanto ativos são empregados. No entanto, quando se

empregam gases reativos, é muito comum usar o termo soldagem MAG (MAG – *Metal Active Gas*). O processo de soldagem funciona com corrente contínua (CC), normalmente com o arame no pólo positivo e também com corrente alternada (CA). Essa configuração é conhecida como polaridade reversa. A polaridade direta é raramente utilizada por causa da instabilidade do arco do metal fundido do arame de solda para a peça. São comumente empregadas correntes de soldagem de 50 A até mais que 600 A e tensões de soldagem de 15 V até 32 V. Um arco elétrico autoajustado e estável é obtido com o uso de uma fonte de potencial (tensão) constante e com um alimentador de arame de velocidade constante. Melhorias contínuas tornaram o processo GMAW aplicável à soldagem de todos os metais comercialmente importantes como os aços, o alumínio, aços inoxidáveis, cobre e vários outros.

2.1.1 Vantagens

O processo de soldagem GMAW proporciona muitas vantagens na soldagem semi-automática automática dos metais para aplicações de alta e baixa produção^[1,2,3]. Suas vantagens combinadas quando comparado com o eletrodo revestido, arco submerso e TIG são:

- a soldagem pode ser executada em todas as posições;
- não há necessidade de remoção de escória;
- alta taxa de deposição do metal de solda, ficando abaixo, quando comparado com processo arco submerso.
- altas velocidades de soldagem; menos distorção das peças;
- Facilidade de executar reparos;
- não há perdas de pontas como no eletrodo revestido;
- facilidade de operação;
- conveniências para robotização.

2.2 Equipamentos

2.2.1 Soldagem Semi-automática

Os equipamentos de soldagem GMAW podem ser usados semi-automático ou automaticamente^[1,2,3,4]. Na Figura 2 é apresentado o esquema de um modelo de equipamento para a soldagem manual.

Equipamentos para soldagem manual são fáceis de instalar. Como o trajeto do arco é realizado pelo soldador, somente três elementos principais são necessários:

- tocha de soldagem e acessórios;
- motor para o controle da soldagem e alimentação do arame;
- fonte de energia.

2.2.2 Tochas de Soldagem e Acessórios

A tocha guia o arame e o gás de proteção para a região de soldagem. Ela também leva a energia de soldagem até o arame. Tipos diferentes de tocha foram desenvolvidos para proporcionar o desempenho máximo na soldagem para diferentes tipos de aplicações. Elas variam desde tochas para ciclos de trabalho pesados em atividades envolvendo altas correntes até tochas leves para baixas correntes e soldagem fora de posição. Em ambos os casos estão disponíveis tochas refrigeradas a água ou secas, e tochas com extremidades retas ou curvas ^[1].

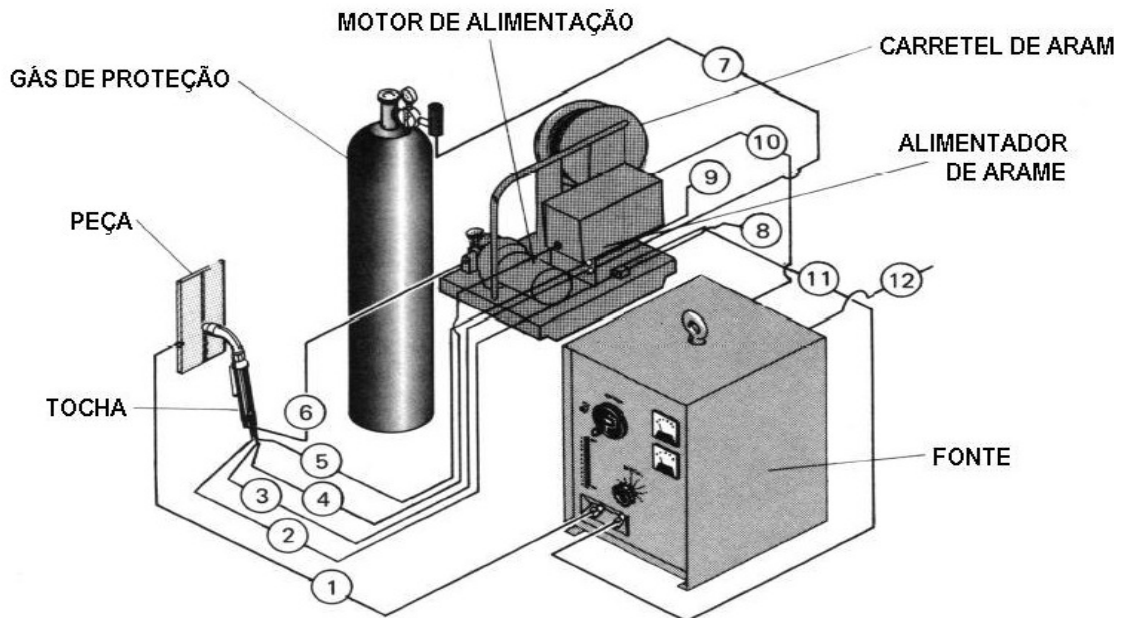


Figura 2 – Modelo de equipamento GMAW ^[1]

1. Cabo de solda (geralmente negativo)
2. Refrigeração da tocha (água)
3. Gás de proteção
4. Gatilho da tocha
5. Água para refrigeração da tocha
6. Conduíte do arame
7. Gás de proteção vindo do cilindro
8. Saída de água de refrigeração
9. Entrada de água de refrigeração
10. Entrada de 115 V ou 220 V (CA)
11. Cabo de solda (geralmente positivo)
12. Conexão para a fonte primária (230/460/575 V)

A Figura 3 mostra as partes de uma tocha seca típica com extremidade curva, contendo os seguintes acessórios:

- bico de contato;
- bocal;
- conduíte;
- cabo.

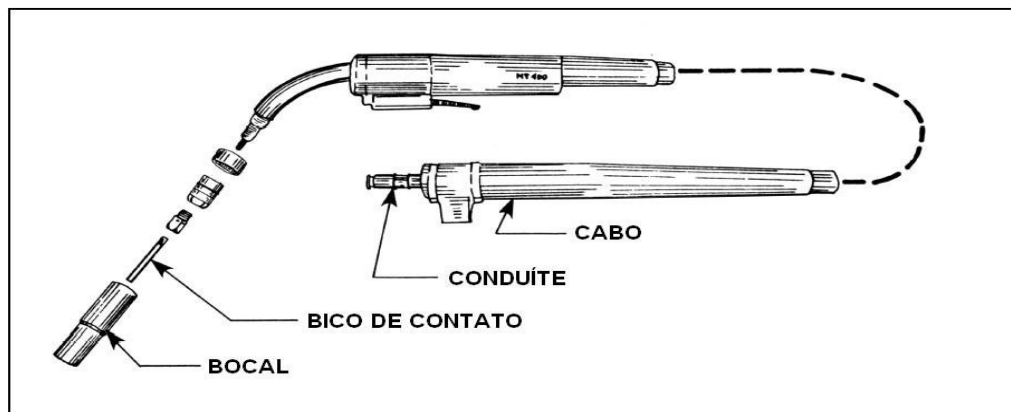


Figura 3 – Tocha GMAW típica^[1]

O bico de contato é fabricado em ligas de cobre e é utilizado para conduzir a energia de soldagem até o arame bem como dirigir o arame até a peça. A tocha (e também o bico de contato) é conectada à fonte de soldagem pelo cabo de corrente. Como o arame deve ser alimentado facilmente pelo bico de contato e também fazer um bom contato elétrico, seu diâmetro interno é importante. O folheto de instruções fornecido com cada tocha relaciona o diâmetro correto do bico de contato para cada diâmetro de arame. O bico de contato, que é uma peça de reposição, deve ser preso firmemente à tocha e centrado no bocal. O bocal direciona um fluxo de gás até a região de soldagem. Bocais grandes são usados na soldagem a altas correntes onde a poça de fusão é larga. Bocais menores são empregados na soldagem a baixas correntes. O conduíte é conectado entre a tocha e as roldanas de alimentação. Ele direciona o arame à tocha e ao bico de contato. É necessária uma alimentação uniforme para se obter a estabilidade do arco. Quando não suportado adequadamente pelo conduíte, o arame pode travar. Quando se usam arames de aço, recomenda-se que o espiral do conduíte seja de aço. Outros materiais como *nylon* e outros plásticos devem ser empregados para arames de alumínio. A literatura fornecida com cada tocha lista os conduítes recomendados para cada diâmetro e material do arame.

2.2.3 Alimentador de Arame

Este componente merece especial consideração, pois de nada vale o ótimo ajuste das condições de soldagem se o arame não for suprido de forma constante. Além disso, existe uma relação quase linear entre velocidade de avanço do mesmo e a corrente requerida para fundi-lo, devendo ser mantido o equilíbrio necessário ^[2]. O motor de alimentação de arame e o controle de soldagem são freqüentemente fornecidos em um único módulo. Sua principal função é puxar o arame do carretel e alimentá-lo ao arco. O controle mantém a velocidade pré-determinada do arame a um valor adequado à aplicação ^[1]. O gás de proteção, a água e a fonte de soldagem são normalmente enviados à tocha pela caixa de controle. Pelo uso de válvulas solenóides os fluxos de gás e de água são coordenados com o fluxo da corrente de soldagem. O controle determina a seqüência de fluxo de gás e energização do contator da fonte. Ele também permite o pré e pós-fluxo de gás.

2.2.4 Fonte de soldagem

Na soldagem GMAW é usual trabalhar com fonte de tensão constante em conjunto com o alimentador de arame de velocidade constante. O pólo positivo é conectado à tocha, enquanto o negativo é conectado à peça. A velocidade de alimentação do arame, a corrente, é regulada pelo controle de soldagem, o ajuste básico feito pela fonte de soldagem é no comprimento do arco, que é ajustado pela tensão de soldagem ^[1].

2.2.5 Gases de Proteção

O ar atmosférico na região de soldagem é expulso por um gás de proteção com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão.^[1] A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e vapor d'água presentes na atmosfera. Como exemplo, o nitrogênio no aço solidificado reduz a ductilidade e a tenacidade da solda e pode causar trincas. Em grandes quantidades o nitrogênio pode causar também porosidade. O oxigênio em excesso no aço combina-se com o carbono e forma o monóxido de carbono (CO), que pode ser aprisionado no metal, causando porosidade. Além disso, o oxigênio em excesso pode se combinar com outros elementos no aço e formar compostos que produzem inclusões no metal de solda - o manganês (Mn) e o silício (Si), por exemplo. Quando o hidrogênio (H), presente no vapor d'água e no óleo, combina-se com o ferro ou com o alumínio (Al), resultará em porosidade e pode trinca induzida pelo hidrogênio (trincas a frio) em aços ferríticos. Para evitar esses problemas associados com a

contaminação da poça de fusão, três gases principais são utilizados como proteção: Argônio (Ar), Hélio (He) e dióxido de carbono (CO₂). Além desses, pequenas quantidades de Oxigênio (O₂), Nitrogênio (N₂) e Hidrogênio (H₂) provaram ser benéficas em algumas aplicações. Desses gases, apenas o Argônio e o Hélio são gases inertes. O Argônio, o Hélio e o dióxido de carbono podem ser empregados puros, em combinações ou misturados com outros gases para proporcionar soldas livres de defeitos numa variedade de aplicações e processos de soldagem ^[1]. A vazão de gás utilizada no processo GMAW varia de 4 a 40 litros/minuto, dependendo do diâmetro do bocal, sendo que as mais indicadas ficam entre 8 a 15 litros/ minuto ^[2] para aços.

2.3 Parâmetros de Soldagem para Aços Inoxidáveis

A transferência por curto-circuito deve ser utilizada na soldagem de materiais de pequena espessura na posição plana, no fechamento de aberturas largas e em toda a soldagem fora de posição. O melhor gás de proteção para se usar na soldagem por curto-circuito de aços inoxidáveis é 90% He / 7,5% Ar / 2,5% O₂. Essa mistura proporciona boa penetração, boa estabilidade do arco e boas propriedades da solda, particularmente a resistência à corrosão em soldas monopasse ou multipasse. A mistura Ar / 25% CO₂ pode ser usada, mas apenas para soldas monopasse onde a resistência à corrosão não seja essencial ao uso final. O dióxido de carbono puro jamais deve ser utilizado.

A transferência por aerossol deve ser empregada na posição plana na soldagem monopasse ou multipasse de materiais com maiores espessuras. Nesse modo de transferência a mistura Ar / 1% O₂ assegura os melhores resultados, particularmente do ponto de vista da aparência do cordão. Se, para uma determinada aplicação, a molhabilidade do cordão de solda ficar prejudicada, a mistura Ar / 2% O₂ poderá ajudar. Entretanto, o aumento do óxido de cromo causará uma leve descoloração do cordão de solda.

As considerações sobre as técnicas de soldagem aplicáveis aos aços de baixo carbono também são válidas para os aços inoxidáveis.

As características de queima para diversos diâmetros de arames de solda de aço inoxidável são mostradas na Figura 4 ^[4].

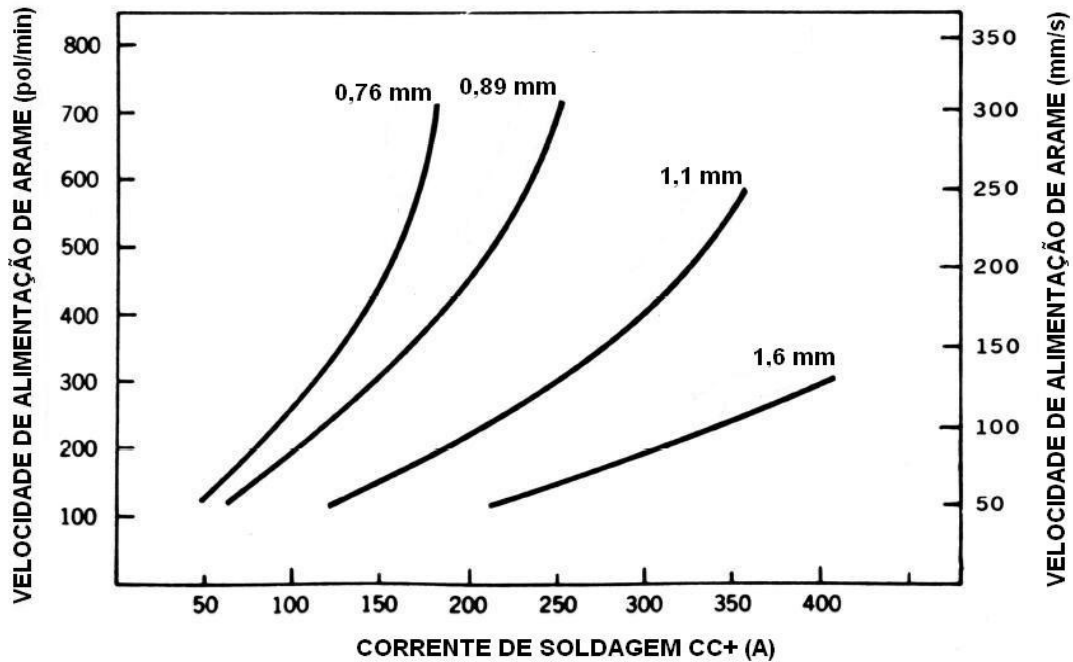


Figura 4 - Características de queima - arames de aço inoxidável tipo 300.^[4]

A diluição é uma propriedade do revestimento que deve ser observada na realização da soldagem e é definida como sendo a participação do material pertencente ao substrato na camada resultante do revestimento, ou seja, metal fundido pela soma do metal fundido e metal adicionado no primeiro passe. Na soldagem GMAW a taxa de diluição é de 15 a 25 %^[5].

2.4 Revestimento de Superfícies

As condições superficiais de componentes mecânicos tem sido um problema constante em aplicações na engenharia. Com isso buscam-se processos que não elevam o custo de projeto e ao mesmo tempo sejam facilmente implantados. Isso aumentou a importância à área de revestimentos superficiais. Basicamente um revestimento consiste depositar uma camada de um material sobre um substrato visando obter determinadas propriedades não originais do substrato.

Este processo é um dos mais eficientes métodos que associam redução de custos com melhoria nas propriedades mecânicas do componente, isto é, com um material composto feito por este processo temos um componente com propriedades metalúrgicas e mecânicas superiores a materiais usualmente empregados (baixo custo) em projetos mecânicos. Com esse processo também é possível o reparo de componentes, como defeitos na superfície do componente^[6,7].

Alguns componentes requerem superfícies inteiramente revestidas ou somente nas áreas críticas (locais onde o componente será mais exigido), com isso são usados materiais resistentes à corrosão, a abrasão, impacto, cavitação, erosão, altas temperaturas ou simplesmente para acréscimo na vida útil do componente. Dentre os materiais que podem ser utilizados estão os mais diversos, aços inoxidáveis, aços ferramenta, níquel e ligas, cobre e ligas, carbeto de tungstênio, etc. Quanto à quantidade de revestimento possível, não existe uma espessura pré-determinada do revestimento, porém, o usual é de 5 a 20% da espessura do conjunto (material depositado mais substrato) [8].

2.5 Processos de Revestimento.

Os revestimentos podem ser feitos de diversas maneiras, o que determina o processo a ser utilizado seriam os custos do processo, material empregado e componente a ser utilizado. Entre os processos mais utilizados na indústria estão os revestimentos por *weld overlay*, laminação e explosão.

2.5.1 Processo de Revestimento Weld Overlay

Segundo Kashani et al 2006 [9] que referencia Bournicon 1994 e Fournier 2000 [10,11] há muitos processos alternativos, métodos e materiais disponíveis para soldagem sendo que cada um tem determinadas características especiais, vantagens e limitações, onde a escolha final pode ser governada pelo meio, vida requerida em serviço e ainda por fator econômicos. O revestimento feito por *weld overlay* normalmente apresenta alta aderência, devido a forte ligação metalúrgica entre metal de adição e metal base [12].

Conforme Tsay et al 1998 [13] que cita Trarbach 1981 e Sniegou 1987 [14,15] este processo é uma técnica usada para modificar a superfície de um dado metal envolvendo um metal de adição com metal base para obter propriedades desejadas. Um exemplo citado são vasos de pressão ou reatores cladeados por *weld overlay* internamente com um aço inoxidável austenítico para melhorar a resistência à corrosão. Na Figura 5 observa-se um exemplo deste processo.

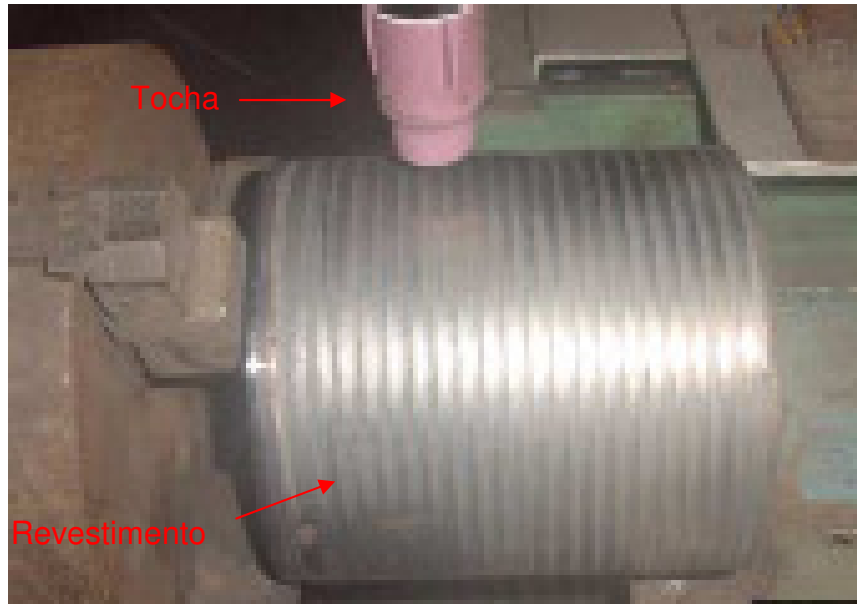


Figura 5 –Revestimento - *weld overlay* ^[13]

2.5.2 Revestimento por Laminação

O revestimento por laminação consiste em laminar a quente duas ou mais placas de forma que a combinação de temperatura e deformação provenientes do processo de laminação formem uma união metalúrgica entre depósito e substrato, (Figura 6).

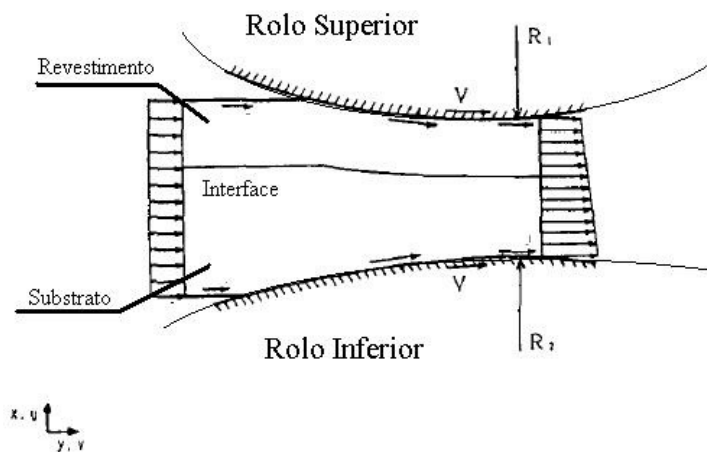


Figura 6 - Esquema do processo de laminação ^[16]

Para um resultado satisfatório é necessário que alguns fatores sejam atendidos como a qualidade superficial, ou seja, as placas a serem laminadas devem apresentar as superfícies de contato previamente limpas e com um bom acabamento superficial. Em

alguns casos é necessária uma atmosfera protetora, pois, devido à temperatura, as placas a serem laminadas podem formar camadas de óxidos. O processo de formação da microestrutura está descrito na Figura 7. Em um primeiro momento as placas são postas em contato (1), então, juntamente com a temperatura, é aplicada uma força proveniente dos rolos de laminação (2). O resultado final é a união formando uma única peça, das duas placas (3 e 4).

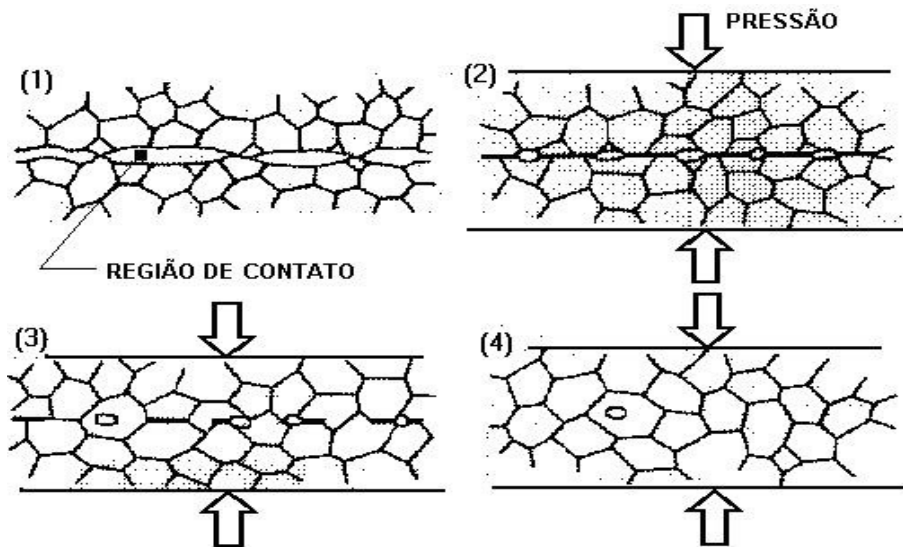


Figura 7 - Detalhe microestrutural do processo de laminação ^[16]

Esta é uma forma mais para produzir placas revestidas devido ao processo ser o mais favorável para produção em série. Cerca de 90% das placas revestidas são obtidas através deste processo ^[16]. As principais aplicações são os revestimentos de chapas de aço carbono e aço baixa liga, com um aço ligado, como por exemplo, o aço inoxidável, na fabricação de chapas de cobre-alumínio (utilizadas na produção de utensílios domésticos) e chapas de aço inoxidável colaminado com cobre (usado em cápsulas de projéteis) ^[17].

2.5.3 Revestimento por Explosão

A soldagem por explosão é um processo de soldagem no estado sólido que é obtido a partir da deformação plástica superficial dos metais ocorrida após colisão de uma peça acelerada, lançada em alta velocidade, contra outra através da detonação calculada de um explosivo ^[17,18]. A colisão entre os dois materiais provoca uma deformação plástica superficial suficientemente grande para promover a união dos dois metais. Existem dois tipos de revestimentos por explosão, em paralelo a esquerda e em ângulo a direita, como podemos observar na Figura 8 ^[19], e na Figura 9 detalhe da microestrutura ^[18].

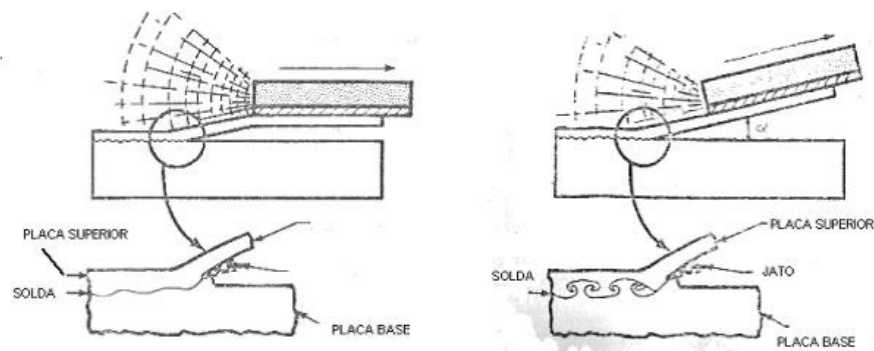


Figura 8 - Processos de revestimento por explosão. [19]

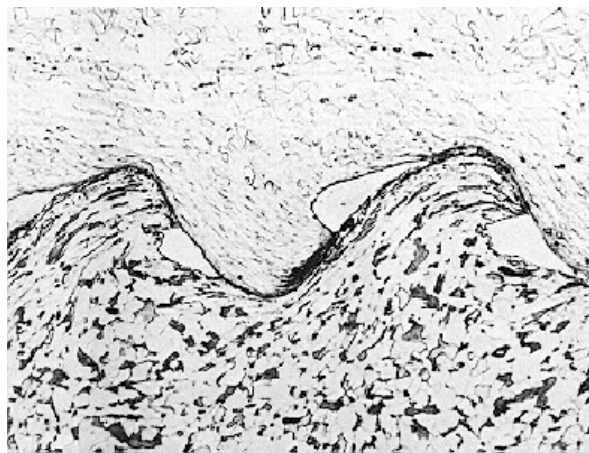


Figura 9 – Detalhe da microestrutura do revestimento por explosão. [18]

Este processo também é utilizado na soldagem de tubos em espelho em trocadores de calor, chapas cladeadas para as indústrias química, petroquímica, alimentícia, papel e celulose; e em reatores nucleares. A vantagem é que é um processo rápido, camada de intermetálicos gerada é muito pequena, não é necessária rígida limpeza das superfícies (exceto a carepa em chapas de aço laminadas a quente) e não há necessidade de investimento com equipamentos. A desvantagem é que para aços carbono e baixa liga as superfícies sofrem endurecimento, sendo necessário um alívio de tensões posterior. Há necessidade de se ter um local adequado e distante dos grandes centros para a execução do processo, e em todos os países, os explosivos tem transporte, mercado, uso e armazenamento controlado, o que dificulta a implantação do processo [19].

2.6 Materiais Depositados – Aços Inoxidáveis

Comparados com os aços ao carbono convencionais, os aços inoxidáveis possuem um custo mais elevado (devido aos elementos de liga empregados). Isso às vezes acaba inviabilizando o projeto de componentes com esse material. Na maioria dos casos a

resistência à corrosão é exigida somente na superfície do componente. Isso fez com que a pesquisa em revestimentos com aços inoxidáveis crescesse bastante nos últimos anos. Essa técnica possibilita projetar o componente, na sua grande parte, com um aço carbono mais simples e revesti-lo com um aço inoxidável, reduzindo o custo total do projeto. Alguns componentes projetados com revestimentos têm uma redução de 80% do custo de material se comparado com um mesmo componente feito inteiramente com o material do depósito. ⁽⁸⁾

Uma grande parte dos revestimentos empregados na indústria é feita com aços inoxidáveis, isso devido às boas propriedades mecânicas e metalúrgicas que os mesmos proporcionam, já que são aços com altos teores de elementos de liga, geralmente contendo cromo, níquel, molibdênio. Estes elementos de liga, em particular o cromo, proporcionam uma excelente resistência à corrosão em relação aos aços convencionais.

Os aços inoxidáveis podem ser divididos de acordo com sua microestrutura, ou seja, aços inoxidáveis austeníticos, martensíticos e ferríticos. Também outros tipos de aços inoxidáveis são encontrados no mercado como os Duplex e os PH (precipitation hardening), porém suas microestruturas são variantes das citadas.

Aços inoxidáveis são na realidade, aços oxidáveis. Isto é, o cromo presente na liga oxida-se em contato com o oxigênio do ar, formando uma película, muito fina e estável, de óxido de cromo. Ela é chamada de camada passiva e tem a função de proteger a superfície do aço contra processos corrosivos. Para que a película de óxido seja efetiva, o teor mínimo de cromo no aço deve estar em torno de 11%. Assim, deve-se tomar cuidado para não reduzir localmente o teor de cromo dos aços inoxidáveis durante o processamento ^[20].

O aço inoxidável 308 L é indicado para atmosferas brandas, marinhas, industriais e águas frescas, não sendo o mais indicado para águas salinas ^[21,22], pois este possui em sua composição química um teor baixo de molibdênio que é responsável pela resistência do material à formação de pites em meios salinos ^[20].

Citando alguns casos de literatura pode-se ver como aços inoxidáveis e outros materiais são avaliados e aplicados em revestimentos de componentes mecânicos devido a danos sofridos durante uso e mesmo para melhoria de suas propriedades.

Noritaka Y. et al 2006 ^[23] relata o uso de *weld overlay* pelo processo TIG para recuperar trincas ocasionadas por corrosão sob tensão em vasos de unidades de geração de energia nuclear realizando estudos em camadas depositadas com diferentes espessuras.

Y. Bhambri, et al 2004 ^[24] usaram *weld overlay* pelo processo TIG, para depositar

uma camada de alumínio em um aço carbono com a finalidade de melhorar a resistência à oxidação em ar e temperatura de 500 a 700°C e concluiu que a concentração atingida após o depósito foi de 15–17 at.% (8–9 wt.%) e que este processo pode ser aplicado em superfície irregulares com bom desempenho e também pode ser realizado em campo.

L. Sexton et. al 2002 ^[25] retratam o estudo de revestimentos com ligas de Níquel (Inconel 625 e Rene 142), em turbinas aeroespaciais também de ligas de Níquel, pelo processo a Laser. Originalmente este tipo de revestimento é feito pelo processo TIG e é feito para recuperar turbinas em geral. Com análises metalográficas e comparando com amostras revestidas pelo processo TIG, os autores apresentaram uma técnica eficiente para efetuar esses revestimentos. As principais características deste tipo de depósito são uma ótima aderência associada a uma baixa diluição, baixa distorção com uma muito pequena ZAC e uma ótima qualidade superficial.

Yoshihiro Y. et. al 2001 ^[26], baseados em observações de materiais empregados em usinas de energia nuclear, os quais perdiam parte de suas propriedades mecânicas devido aos efeitos da radiação e do calor e que os reparos convencionais causavam um alto nível de tensões residuais devido ao calor empregado no processo, buscaram um processo de reparo que apresentasse um baixo aporte de calor, boa viabilidade (aplicação em “campo”) e que atendesse as novas regras de reparos em usinas nucleares. Estas novas regras dizem que não é necessário substituir um componente com um defeito se o mesmo está dentro dos limites admissíveis para um defeito. Isso só foi possível com o conhecimento do comportamento do material admitindo um defeito pré-existente (mecânica da fratura). Com estes requerimentos foi desenvolvido um processo de revestimento por fricção que consistia na deposição de um pino de aço inoxidável austenítico na superfície danificada, Figura 10. Partindo de chapas, foram feitos depósitos com uma análise da temperatura no processo e diferentes geometrias de defeito.

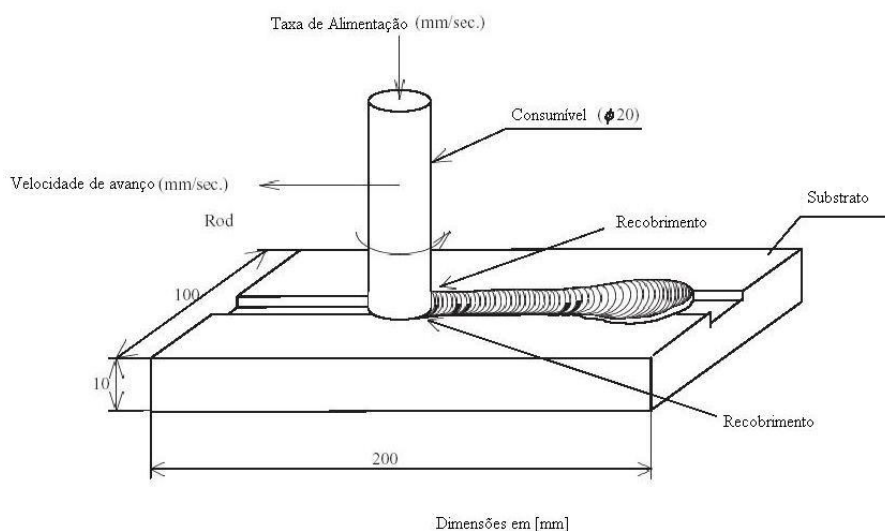


Figura 10 - Processo de revestimento por fricção [26]

O resultado desse trabalho foi um processo que apresentou baixos valores de temperatura – a temperatura máxima atingida no início do revestimento foi de 1200°C e durante o processo essa temperatura ficou na ordem de 400°C e que o mesmo não necessita de alta qualidade superficial. As metalografias mostraram pouca variação na microestrutura para diferentes acabamentos superficiais. Com isso os autores comprovaram que este fator tem pouca influência no revestimento.

2.7 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material. Por ser ensaio de realização muito simples, ele é largamente utilizado nas indústrias e laboratórios.

O ensaio consiste em dobrar um corpo de prova de eixo retilíneo e secção circular, tubular, retangular ou quadrada. O mesmo é assentado em dois apoios afastados a uma distância especificada, de acordo com o tamanho do corpo de prova, por intermédio de um cutelo, que aplica um esforço de flexão no centro do corpo de prova até que seja atingido um ângulo de dobramento α especificado (Figura 11). O ângulo α pode ser de 90°, 120° e 180°, onde atingido esse ângulo, examina-se a olho nu a zona tracionada do corpo de prova, que não deve conter trincas. Caso contrário, o material não passou no ensaio. Se o corpo de prova apresentar esses defeitos, romper antes ou quando atingir o ângulo especificado, o material também não atende à especificação do ensaio. Esse tipo de dobramento é chamado de dobramento guiado.

Como o dobramento pode ser realizado em qualquer ponto e em qualquer direção

do corpo de prova, ele é um ensaio localizado e orientado, fornecendo assim, uma indicação da ductilidade em qualquer região desejada do material [27].

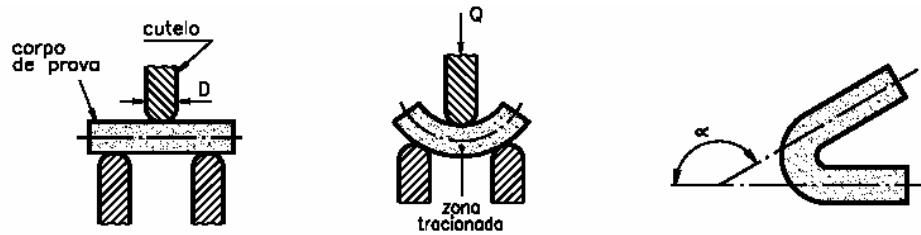


Figura 11 - Ângulo de dobramento [27]

Para realização de ensaios a três pontos e fabricação dos dispositivos usou-se a norma ASTM E 190 – 92 [28].

2.8 Fadiga

Fadiga pode ser definida 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 [29].

Quando um metal é submetido a uma tensão alternante romperá a uma tensão muito inferior aquela necessária para ocasionar fratura devido à aplicação de uma carga estática. As falhas decorrentes destas condições de carregamento cíclico são chamadas de falhas por fadiga [30].

São três os fatores básicos necessários para causar falha por fadiga:

- Tensão de tração máxima suficientemente alta;
- Variação ou flutuação na tensão aplicada suficientemente grande;
- Número de ciclos de aplicação de tensão suficientemente grande.
- Deformação plástica

Além destes, existem outras variáveis que podem levar a fadiga, tais como concentração de tensão, corrosão, temperatura, sobrecarga, estrutura metalúrgica, tensões residuais e tensões combinadas.

A falha por fadiga quase sempre ocorre numa descontinuidade local, por exemplo, um entalhe, uma trinca, fim de uma seção, furo ou qualquer ponto com um elevado concentrador de tensões. Quando a tensão na descontinuidade excede o limite elástico do

material, ocorrerá deformação plástica podendo levar a formação de uma trinca. Iniciada a trinca, o campo de tensões fica severo e a propagação desta trinca fica cada vez mais rápida. A área resistente do componente fica menor e então ocorre a falha do componente.

Em qualquer projeto, os ensaios de fadiga dos materiais a serem empregados são extremamente importantes, pois é de grande valia admitir e conhecer o comportamento do material à fadiga e porque o material acaba falhando. Os métodos de falha por fadiga representam uma combinação de projeto e ciência. Assim enquanto a ciência não tenha explicado o atual mecanismo de fadiga, o projeto deve ser de tal forma que não falhe. A determinação de limites de resistência por testes de fadiga é quase sempre longa e cara. O custo de um projeto justifica os procedimentos experimentais utilizados e a abordagem feita pelo projetista. Um destes importantes testes é mostrado em uma curva S-N, na Figura 12.

2.8.1 Curvas S-N

Para determinar a resistência de materiais sujeitos a ação de um carregamento cíclico, corpos de prova são submetidos a diversas magnitudes de carregamento e, ao mesmo tempo, são registrados os ciclos necessários para a ruptura para cada carregamento. Com um número razoável de corpos de prova é possível estabelecer a resistência à fadiga do material.

Isso consiste em realizar um primeiro teste, estático, na condição que o material será carregado. Isso determinará a resistência deste material (tensão máxima). Com este valor são iniciados os ensaios de fadiga. Um primeiro ensaio é realizado com uma tensão logo abaixo da tensão de ruptura e registrado o número de ciclos necessários para a ruptura. O segundo ensaio é realizado com uma tensão pouco abaixo a empregada no primeiro teste. Esse processo é mantido até que seja encontrada uma tensão (ou um limite de ciclos) no qual o corpo de prova não apresente ruptura. Registrando em gráfico estes resultados tem-se a chamada curva S-N (Figura 12). A ordenada da curva S-N corresponde a resistência à fadiga a um determinado número de ciclos ^[30].

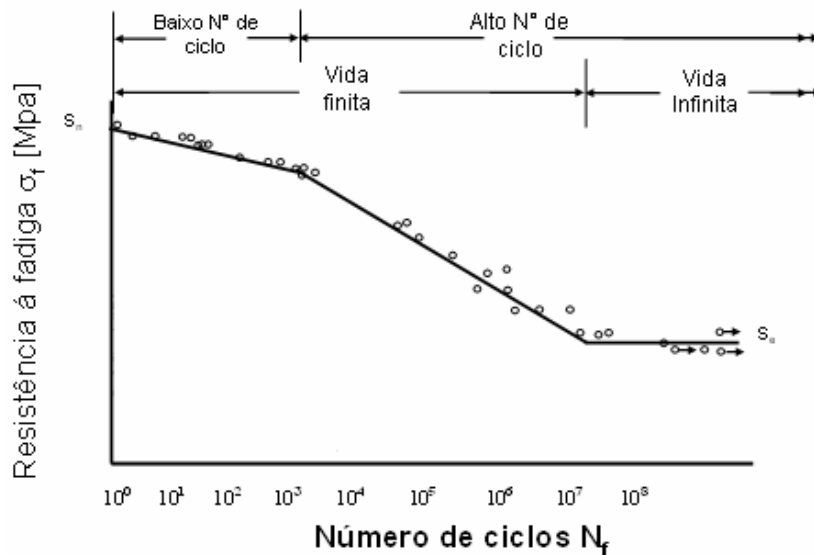


Figura 12 - Curva S-N clássica. ^[30]

Ainda na curva da Figura 12 também pode-se distinguir dois tipos de rupturas. Quando a falha ocorrer num carregamento cíclico variando de 1 a 1000 ciclos, tem-se a chamada fadiga de baixo ciclo. Falhas ocorrendo em carregamentos maiores de 1000 ciclos correspondem à fadiga de alto ciclo. Também é possível visualizar as regiões de vida finita e vida infinita do material. A fadiga de baixo ciclo aplica-se a componentes de uma curta vida útil, como por exemplo, mísseis, ou no projeto de máquinas onde a possibilidade de apenas pequenas sobrecargas durante a vida útil necessita ser considerada. A fadiga de alto ciclo aplica-se a maioria dos projetos de componentes e máquinas, pois, na maioria dos casos queremos que estes componentes tenham a maior vida útil possível.

No caso de alguns materiais ferrosos e ligas, o gráfico apresenta um “ponto de deflexão” e sua curva passa a ser horizontal. Além deste joelho à falha do material não ocorrerá, não importando o quão grande for o número de ciclos. A tensão correspondente a esse joelho é chamada limite de resistência à fadiga ou limite de fadiga, neste tipo de materiais esta tensão é da ordem da metade da tensão de ruptura do material. Para a maioria dos materiais não-ferrosos e ligas a curva não apresenta esse joelho, ou seja, estes materiais não possuem limite de fadiga. Convencionalmente, adota-se 1×10^6 a 1×10^7 ciclos como limite de fadiga destes materiais.

Estes ensaios foram amplamente realizados com máquinas do tipo flexão rotativa Figura 13. Este tipo de máquina sujeita o corpo de prova a uma rotação e, ao mesmo tempo, com auxílio de pesos, é provocada uma flexão no corpo de prova, isso acaba

gerando uma alternância de tensões compressivas e trativas no material, configurando o processo de fadiga.

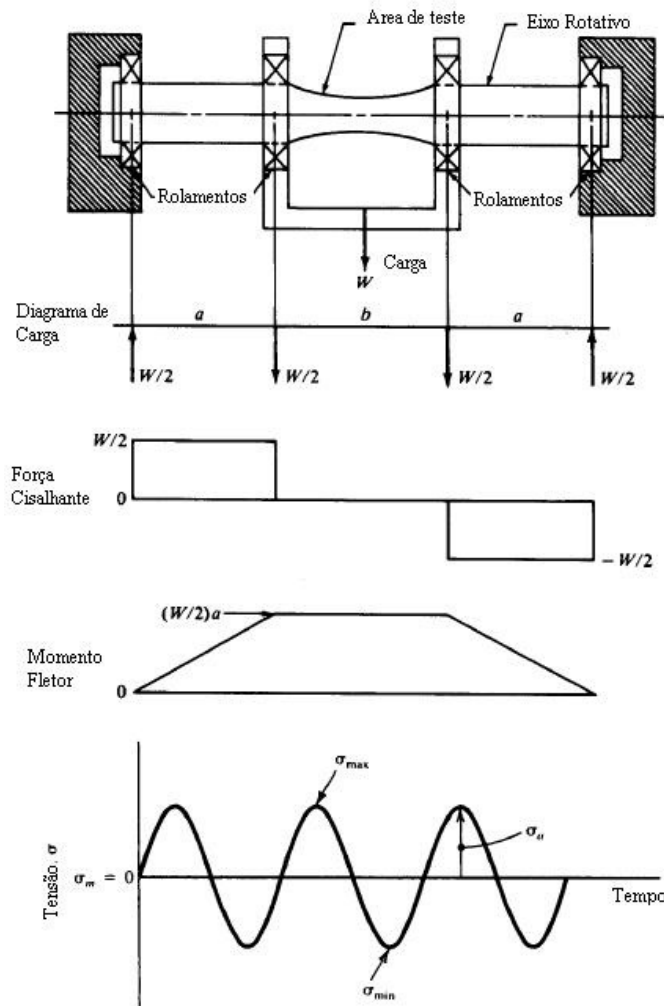


Figura 13 - Flexão Rotativa.^[29]

Outros tipos de máquinas de fadiga estão disponíveis para estes ensaios, como máquinas axiais e atuadores móveis. Estas máquinas podem realizar carregamentos flutuante, reversos, torsionais e flexão (sem a rotação do corpo de prova). Os testes em máquinas de flexão rotativa vem sendo constantemente substituídos por testes em máquinas de carregamento axial devido a facilidade de interpretação de resultados. Em um ensaio de flexão rotativa existe uma dificuldade de medir a deformação no momento do ensaio. Já em ensaios axiais, com o auxílio de extensômetros é possível gerar sinais elétricos que serão proporcionais à tensão e a deformação em equipamentos adicionais ou na própria máquina de ensaio^[29].

2.8.2 Ensaio de Fadiga – Flexão Pura

Com uma carga cíclica aplicada em um corpo de prova, pode-se sujeitá-lo a uma flexão e, com isso, avaliar a tensão aplicada mesmo nas suas fibras inferiores, ou seja, na região mais solicitada do material sujeito a esse carregamento. Usualmente estes ensaios são chamados de fadiga a três ou a quatro pontos. O nome é relacionado a quantos pontos o corpo de prova será apoiado. Estes tipos de ensaios são de grande utilidade para materiais compósitos, pois permite uma boa avaliação da tensão aplicada ao conjunto ou, como no caso de revestimentos, somente de um material. Na literatura é possível encontrar diversos casos deste tipo.

D.AL-Anazi et.al 2005 ^[31] estudaram as propriedades mecânicas da interface do revestimento, usando flexão a três pontos em revestimento feito pelo processo de aspersão térmica em ligas de titânio e constatou que a máxima deformação é obtida na zona de maior deflexão onde iniciou o aparecimento de trinca de fadiga.

T.K O'BRIEN et al 2002 ^[32] descreve a caracterização da vida em fadiga, sob flexão, de compósitos epóxi/fibra de vidro e epóxi/fibra de carbono, com diferentes condições superficiais e com dois tipos de carregamento em flexão, três e quatro pontos. Com o levantamento de curvas S-N e análises estatísticas o trabalho mostra a influência das espessuras das lâminas dos compósitos.

Francine R. et al 2002 ^[33] estudou a fadiga de compósitos epóxi/fibra de vidro usando flexão a três pontos em que os teste de fadiga foram efetuados sob um controle de deflexão. O critério da vida em fadiga adotado foi definido em 10% da perda da carga durante a ciclagem e permitiu uma curva pseudo-Wöhler experimental para ser definido nos termos da amplitude da deflexão ou da tensão máxima.

2.9 Fadiga em Meio Agressivo (corrosão-fadiga).

A ação simultânea de tensões cíclicas e ataque químico é conhecida como fadiga por corrosão ou corrosão-fadiga ^[30]. Quando um componente está sujeito a esforços cíclicos em um meio capaz de atacar quimicamente ou eletroquimicamente o material exposto verificam-se condições para ocorrência da corrosão-fadiga ^[34]. A corrosão-fadiga também pode ser definida como sendo o tipo de falha que ocorre quando um componente é submetido a tensões cíclicas, em um meio que é capaz de atacar continuamente o metal ^[35].

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 ataque corrosivo sem tensões aplicadas produz, muitas vezes, o aparecimento de pites nas superfícies dos metais. Os pites atuam como entalhes e causam a redução da resistência à fadiga. No entanto quando a corrosão e fadiga atuam simultaneamente, o ataque químico acelera muito a taxa de propagação das trincas em fadiga ^[29].

Na maior parte dos sistemas metal-meio ambiente a velocidade de propagação da trinca aumenta no meio corrosivo em relação à velocidade de propagação em ar ou em vácuo, como pode-se observar na Figura 14 ^[35,36]. Vários mecanismos tem sido propostos para explicar a influência do meio ambiente x meio corrosivo na velocidade da propagação das trincas.

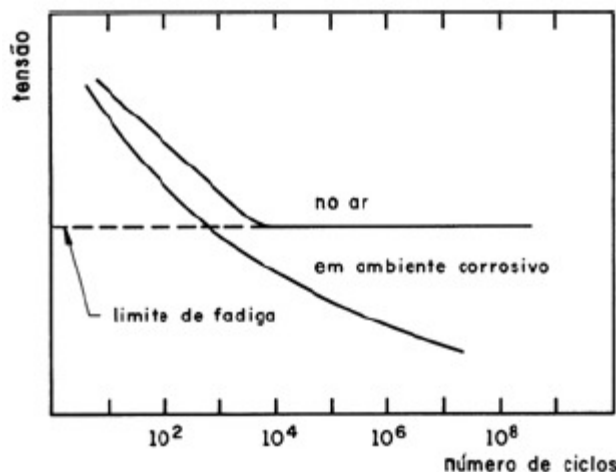


Figura 14- Comparativo entre a curva de fadiga ao ar e em meio corrosivo. ^[35]

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

- Corrosão por pites onde a trinca inicia em um pite formado por ataque corrosivo;
- Dissolução preferencial em uma região de maior deformação plástica que age como ânodo e o material não deformado agindo como cátodo;
- 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 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 15 abaixo onde discordâncias ancoradas na superfície são pontos preferenciais de ataque químico ^[37].

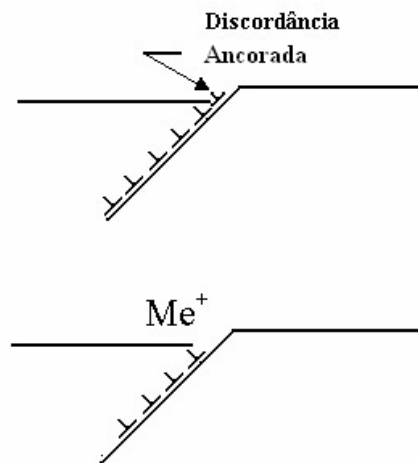


Figura 15 - Mecanismo de nucleação em discordância ancorada. ^[37]

Há evidências que existe um efeito eletroquímico na etapa de 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 ΔK . Para o caso em que ocorre corrosão-fadiga, existem três situações possíveis como ilustra a Figura 16 ^[26]. 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 gráfico mostra que para elevados valores de ΔK , 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 ΔK a taxa de propagação de trinca em meio corrosivo pode atingir o dobro da taxa verificada no meio inerte. Quanto ao ΔK_{TH} a diferença entre os dois meios pode variar de 2 a 10 MPa m^{1/2}.

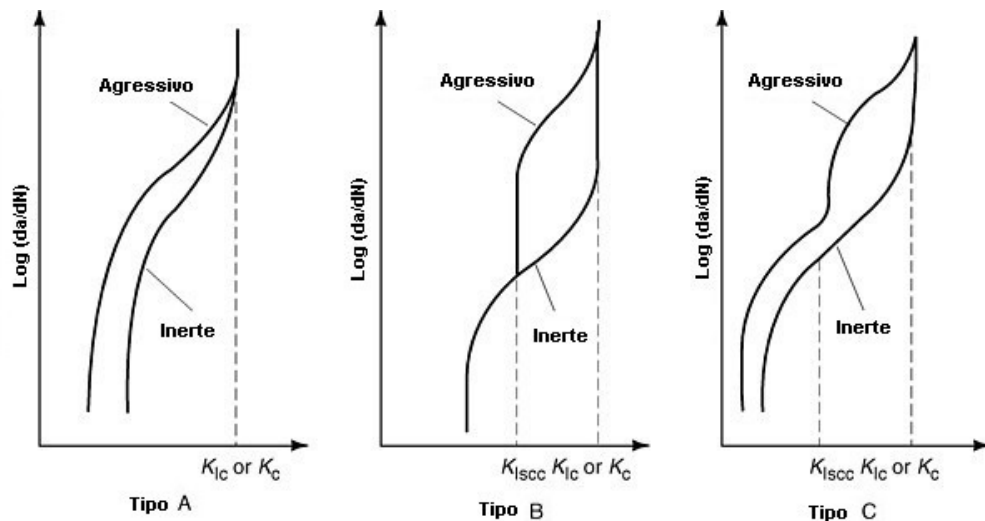


Figura 16 - Esquema dos três tipos de taxa de crescimento de trinca por corrosão-fadiga. [26]

Na análise da corrosão-fadiga, variáveis podem influenciar o comportamento do material frente a este fenômeno, entre eles cita-se o meio e o material.

2.9.1 Meio Corrosivo (Água do Mar)

A água do mar é o material mais abundante e cobre dois terços da superfície terrestre. Ela é uma solução aquosa com cloreto de sódio que contém outros sais. A água do mar normal, oceano aberto tem uma salinidade que varia de 32 a 37 ppm de cloretos ou 3,5 % de cloreto de sódio (NaCl). A composição média pode ser observada na Tabela 1 [36]. Já na extração de petróleo em águas profundas a concentração de cloretos pode chegar a 115.000 ppm^(38, 39) (189,5 g de NaCl / l PA)

Tabela 1 - Composição média da água do mar

Composto	%	Composto	%
Cloreto (Cl ⁻)	1,89 a 3,5	Ácido Bórico (H ₃ BO ₃)	0.0025
Sulfato (SO ²⁻)	0.26	Sódio (Na ⁺)	1.02
Bicarbonato (HCO ³⁻)	0.01	Magnésio (Mg ²⁺)	0.12
Brometo (Br ⁻)	0.01	Cálcio (Ca ²⁺)	0.04
Fluoreto (F ⁻)	0.00	Potássio (K ⁺)	0.04

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

- Possuem alta condutividade;
- Íons Cl^- presentes podem se adsorvidos na superfície do metal e impedir a formação de filmes protetores ou ocasionar a ruptura destes;
- Produtos de corrosão a base de cloretos são, em geral, solúveis em água e não formam filmes protetores.

Fatores que Influenciam a Corrosão-Fadiga em Água do Mar

- Salinidade;
- Concentração de H^+ (pH);
- Temperatura;
- Composição dos Gases;
- Frequência de Carregamento;
- Forma de Carregamento

2.9.2 Material

Em muitos casos o valor máximo de resistência à fadiga é conseguido no meio de menor corrosividade. Pode-se dizer, então, que a maior resistência à corrosão-sob-fadiga está mais relacionada com a resistência à corrosão em si do que com a alta resistência mecânica do material.

Estudos realizados no comportamento de aços sujeitos a corrosão por água salgada mostraram que ^[34]:

- 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.

A influência do tamanho de grão na iniciação ou propagação da trinca em corrosão-

fadiga depende do meio a que está 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.

2.10 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

A Figura 17 abaixo mostra um esquema do equipamento com os seus principais componentes e o equipamento montado para ensaio corrosão-fadiga ^[40].

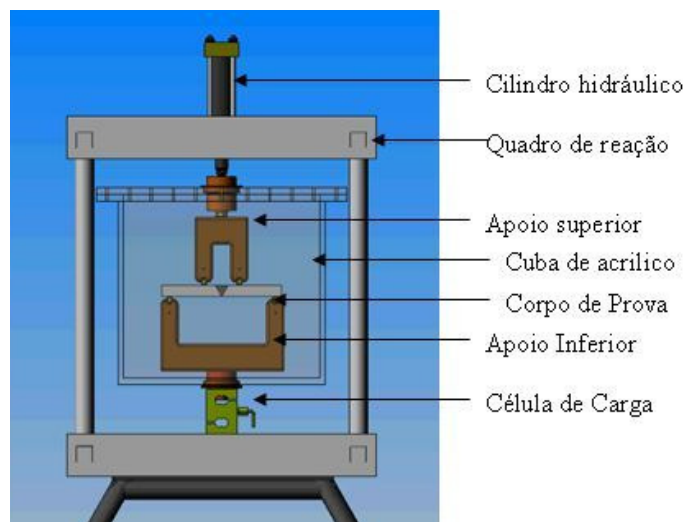


Figura 17 - Esquema do equipamento desenvolvido para ensaio corrosão fadiga. ^[40]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do Caso

3.1.1 Material Base

Os compósitos estudados neste trabalho foram dois materiais dissimilares. O material base foi um aço baixo carbono microligado API 5L X65. O componente revestido foi um segmento de duto, sem defeitos superficiais, com diâmetro interno de 500 mm e espessura de parede de 9,52 mm. Ambos os materiais não possuíam nenhum tipo de tratamento térmico. Sua composição química está mostrada na Tabela 2 conforme especificação API 5L^[41]. Na

Tabela 3 estão os valores obtidos por espectrometria de emissão óptica.

Tabela 2 - Composição química do material base API 5L X65.

Composição	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Química	0,18	0,45	1,7	0,02	0,02	0,3	0,1	0,3
API 5L X65								
Metal base	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
% Wt	0,08	0,02	0,25	0,05	0,06	0,09	0,02	0,004

Tabela 3 - Composição química do material base API 5L X65 obtida por espectrometria de emissão óptica.

Composição	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Química	0,16	0,21	1,4	0,01	0,003	0,01	0,01	0,01
API 5L X65								
Metal base	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
% Wt	0,02	0,02	0,01	0,05	0,01	0,04	0,01	0,002

Propriedades mecânicas do material base.

- Resistência à tração - 500 MPa
- Limite de escoamento - 448 MPa

3.1.2 Material de Adição

O metal de adição utilizado consiste em um aço inoxidável AISI 308L Si. O material de adição estava na forma de um arame consumível e sua composição química está mostrada na Tabela 4 que é fornecida pelo fabricante ^[41]

O arame sólido de liga Cr-Ni com teor de silício controlado é indicado para soldagem de aços inoxidáveis AISI 304, 308 e 308L. Devido ao alto teor de silício o produto apresenta fluidez na deposição do cordão de solda. Mesmo que a literatura não indique que o aço inoxidável AISI 308 L seja indicado para meios agressivos por cloretos, este foi usado para poder confirmar dados da literatura e também em função de redução de custos.

Tabela 4 Composição química do material de adição fornecido pelo fabricante.

Composição Química AISI 308 L Si % wt	C	Si	Mn	Cr	Ni
	0,02	0,5 a 0,8	1,7	20,1	9,8.

Propriedades mecânicas do material de adição:

- Resistência à tração - 600 MPa
- Limite de escoamento 0,2% min. - 450 MPa

O carbono sofre alteração aumentando sua composição devido a diluição durante o processo de soldagem. O diagrama de Schaeffler Figura 18 pode dar uma avaliação prévia sobre uma possível microestrutura formada após a soldagem.

O ponto azul no gráfico mostra a composição química do metal base e em preto mostra a composição química do metal de adição. No ponto vermelho pode-se observar a microestrutura prevista para a composição química originada após a soldagem do consumível considerando que a taxa de diluição para o processo MIG/MAG fica em torno de 15 a 25% ^[5].

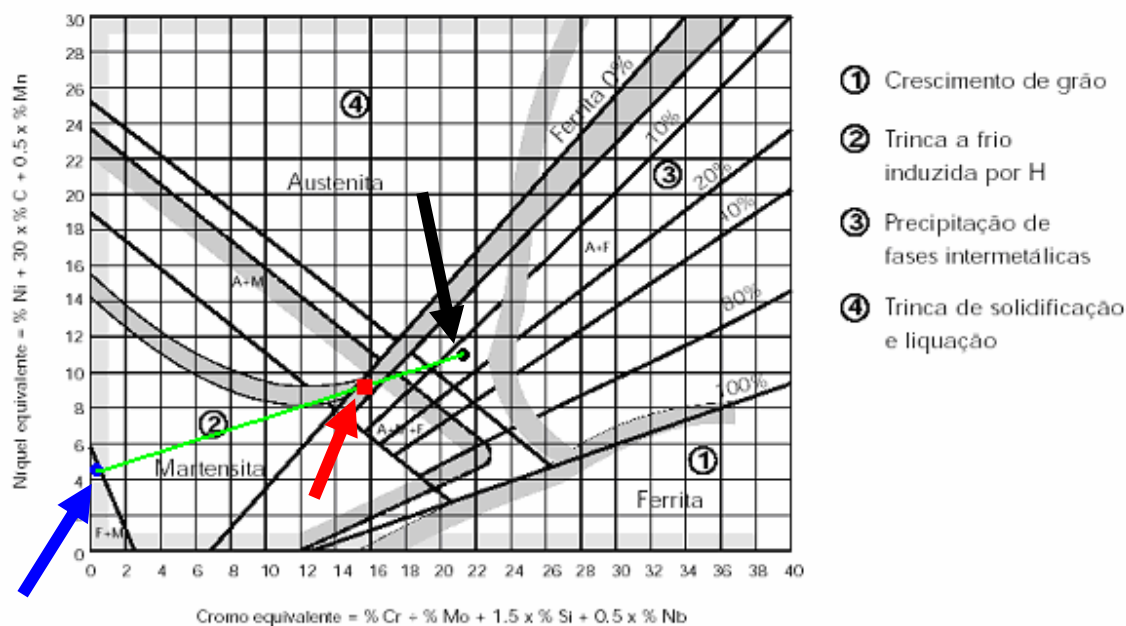


Figura 18 - Diagrama de Schaeffler.

3.1.3 Gás de Proteção

O gás utilizado foi uma mistura de dióxido de carbono e argônio com nome comercial de I 40 (96% Ar + 4%CO₂). A vazão do gás usada é 15 litros/minuto ^[2], e o volume gasto de gás por 1 kg de material depositado é de 1,5 m³ desta mistura.

3.2 Procedimento para Realizar o Revestimento

Para a realização do procedimento foram ajustados alguns parâmetros como: velocidade de soldagem de 360 mm/minuto, passo entre filetes de 6,5 mm e stick-out de 12 mm. Estes parâmetros foram obtidos através de testes empíricos realizados previamente, porem baseados na bibliografia estudada ^[4] e está demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros usados para a realização do revestimento

Parâmetros
Tensão – 29,5 Volts
Corrente – 195 A
Frequência – 150 Hz Pulsado
Velocidade do Arame – 8800 mm /min

Velocidade da Soldagem – 360 mm/min
Distância entre Passe – 6,5 mm
Stick-out – 12 mm
Gás Usado – mistura de 96% argônio e 4 % CO ₂ (I 40)
Energia de Soldagem – 767 J/mm

Para a deposição foi criado um sistema que possibilitou a mecanização do processo. Este sistema está apresentado na Figura 19. O tubo foi fixado à placa de um torno mecânico, e na torre de ferramenta foi fixada uma tocha para soldagem GMAW. Com os parâmetros já determinados o tubo foi rotacionado e, com o arco elétrico aberto, iniciou-se o processo de soldagem no interior do mesmo. Uma vez que o torno possibilita a regulação de rotação da placa e avanço da torre, a combinação do movimento rotacional do tubo com o deslocamento longitudinal da tocha no interior do mesmo resultou na deposição do revestimento sendo de forma helicoidal, conforme pode-se ver na Figura 20 e na Figura 21 em uma perspectiva em corte.

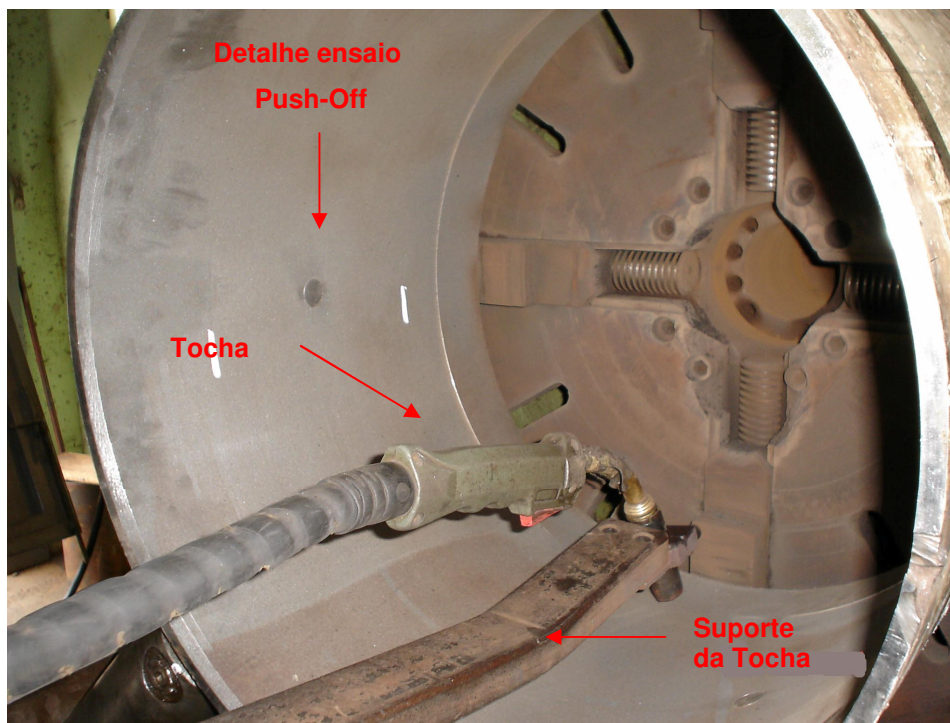


Figura 19 - Posicionamento da tocha no interior do tubo.

Inicialmente a avaliação do revestimento e seus parâmetros foram feitos de maneira

visual. Isso dependeu muito da experiência do operador e principalmente dos dados obtidos na revisão bibliográfica. Com um revestimento apresentando bom acabamento e ausência de defeitos visuais, partiu-se para a confecção de corpos de prova para os demais ensaios. A ausência de todo tipo de defeitos, baseada nos ensaios seguintes, completa a análise do revestimento.

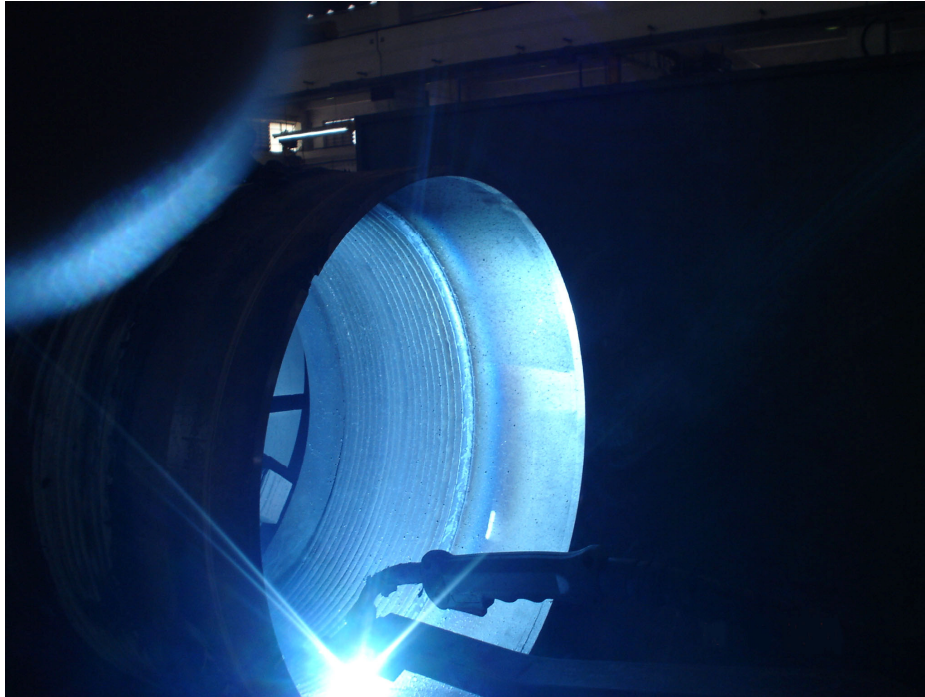


Figura 20 - Revestimento sendo executado.



Figura 21 - Tubo com o revestimento (perspectiva em corte).

3.3 Corpos de Prova

Para obtenção dos corpos de prova, após realizado o revestimento, o tubo foi usinado internamente como pode ser visto na Figura 22 e seccionado com as dimensões seguintes: comprimento(C) - 120 mm, largura(L) - 20,5 mm e espessuras(E) de 11 mm para material com revestimento e 9,52 mm para os sem revestimento apresentadas na Figura 23. Usou-se um torno convencional para o processo de usinagem e uma mandriladora para o seccionamento dos mesmos. A usinagem foi feita para eliminar concentradores de tensões na superfície e melhorar o acabamento superficial, fatores importantes para os ensaios mecânicos. Para poder comparar os resultados de fadiga e corrosão fadiga, corpos de prova do mesmo material base sem revestimento foram confeccionados. Medidas de rugosidade também foram feitas em ambos os corpos de provas com e sem revestimento. Com estes corpos de prova foram feitos os ensaios de dobramento, fadiga, corrosão-fadiga e push-off.

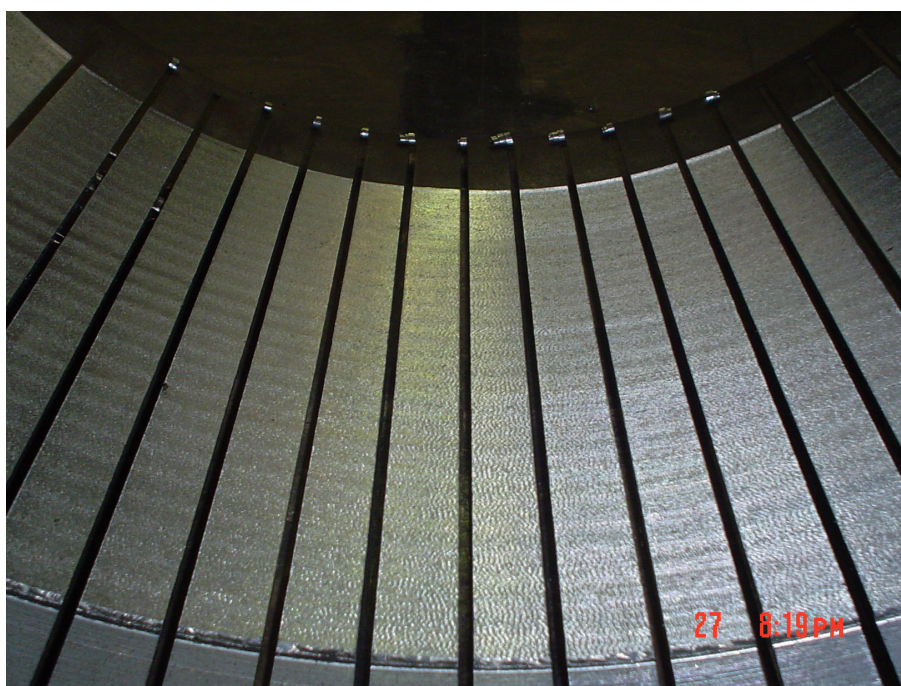


Figura 22 - Tubo seccionado

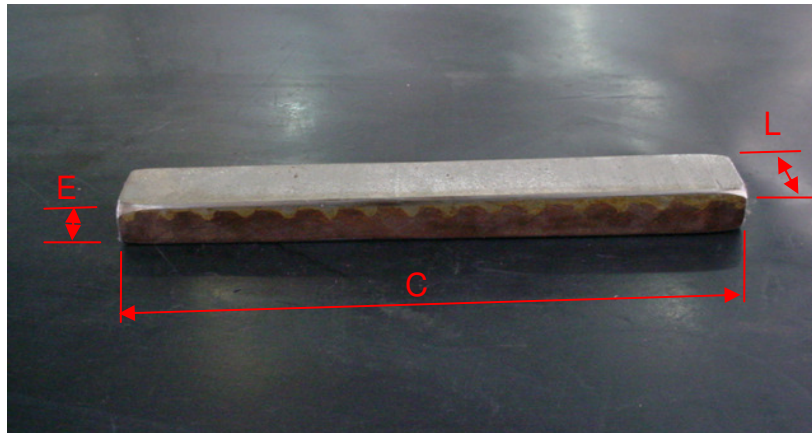


Figura 23 - Corpo de prova de fadiga.

3.4 Fabricação dos Dispositivos para Ensaio de Dobramento, Push-Off e Corrosão-Fadiga.

Para a construção dos dispositivos usou-se material SAE 4340 e SAE 1045, onde ambos passaram pelo processo de fabricação (usinagem). Os dispositivos para dobramento e push-off sofreram tratamento térmico (têmpera e resfriamento em óleo), a fim de evitar o desgaste durante o ensaio.

Para o ensaio de dobramento fez-se um punção e uma base funcionando como macho-fêmea (o qual satisfaz a norma ASTM E 190 – 92) como mostrado na Figura 24 abaixo.

Abaixo são apresentados os dispositivos utilizados para ambos os casos:

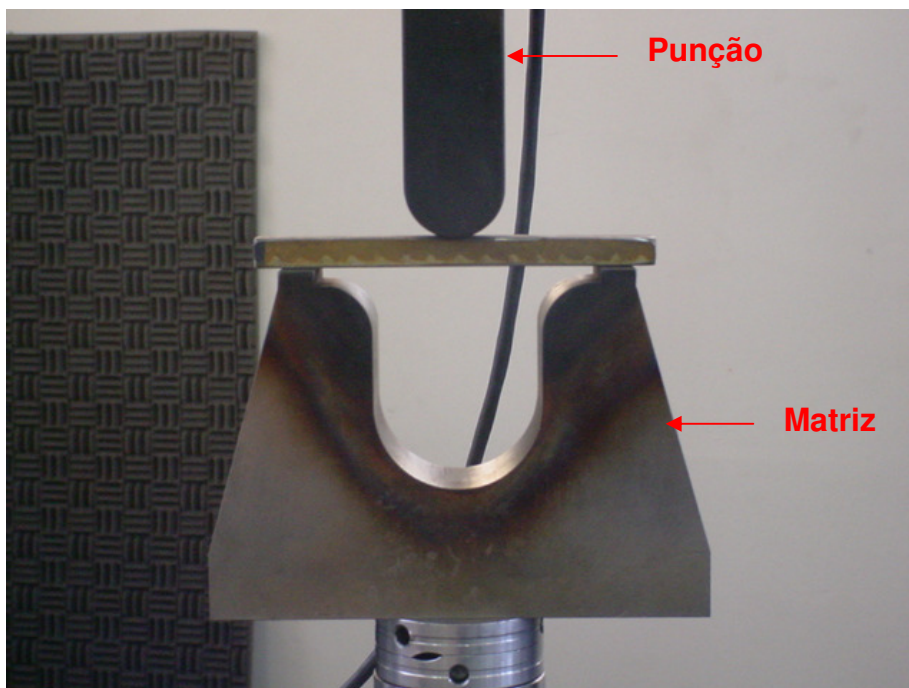


Figura 24 - Dispositivo – matriz e punção para realização do ensaio de dobramento.

Já para o ensaio de push-off construiu-se um punção de corte e uma matriz para que, durante o ensaio, o material sofresse cisalhamento, conforme observa-se na

Figura 25.

O dispositivo para o ensaio de corrosão fadiga foi desenvolvido para que o ensaio fosse realizado em meio agressivo. Este dispositivo também está ilustrado na Figura 26.

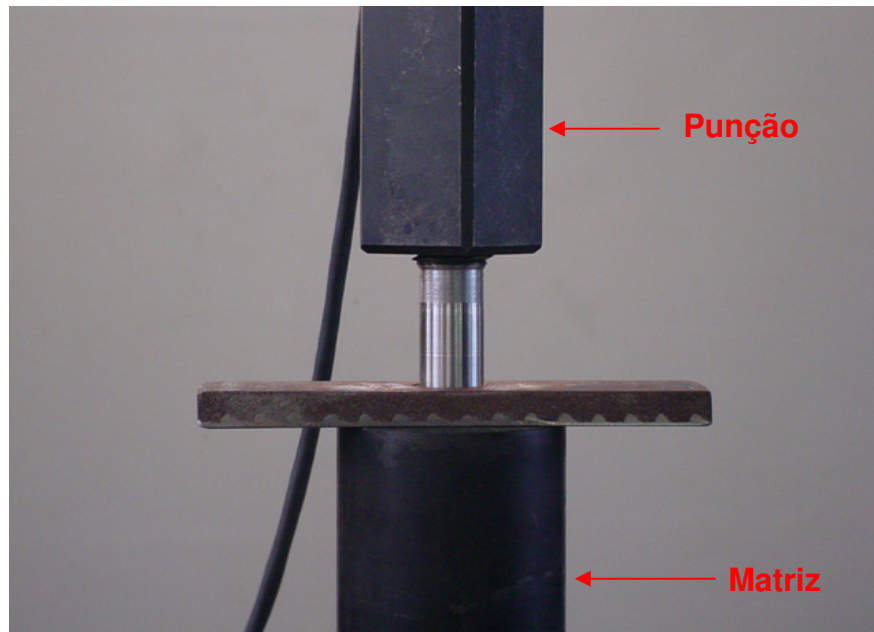


Figura 25 - Dispositivo – matriz e punção para realização do ensaio de Push-off (não normatizado).

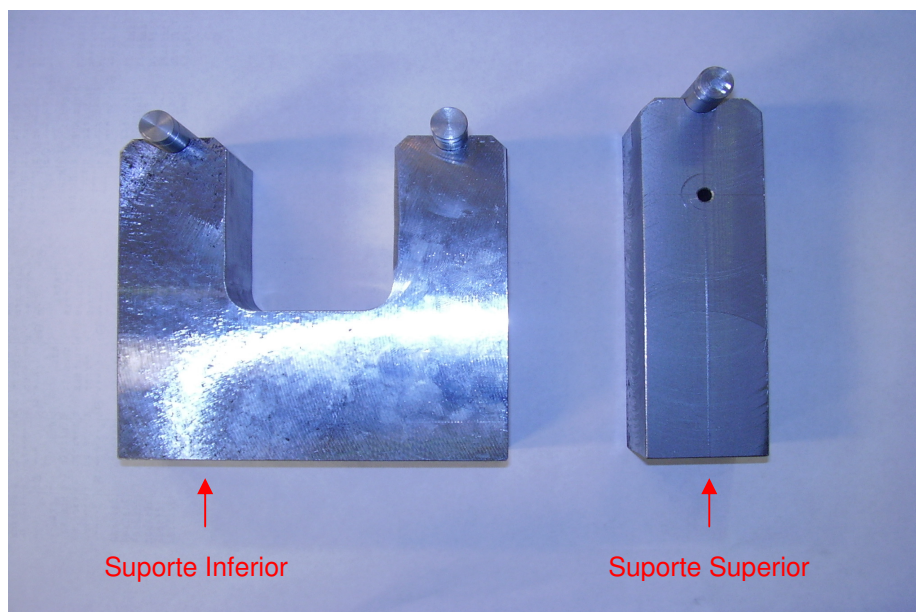


Figura 26 – Dispositivo para realizar o ensaio corrosão-fadiga.

3.5 Ensaio de Dobramento

Principalmente em processos de soldagem, o ensaio de dobramento tem o objetivo de detectar possíveis defeitos, citando, por exemplo, falta de penetração uma vez que este não seja visivelmente detectado. Caso os teste apresentem resultados insatisfatórios os parâmetros do procedimento são revistos para que os defeitos não sejam repetidos.

O corpo de prova foi disposto com o revestimento de forma a sofrer a maior tensão trativa possível. Para efetuar esse carregamento no corpo de prova foi usada uma máquina servo-hidráulica marca MTS modelo 810. Essa máquina possibilita a aquisição de dados de força e deslocamento axial da linha de carga. Através desses dados foi possível obter a resistência à flexão do revestimento. O dispositivo e a máquina utilizada estão apresentados na Figura 27.



Figura 27 - Máquina MTS modelo 810, já com o dispositivo posicionado.

O ensaio de dobramento teve como função principal determinar os parâmetros iniciais para os ensaios de fadiga e o levantamento da curva S-N, ou seja, determinar a tensão necessária para danificar o revestimento. Essa tensão foi determinada de acordo

com a relação:

$$\sigma = \frac{M \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} \quad (1)$$

Onde:

σ : Tensão na superfície do revestimento no corpo de prova;

M: Momento provocado do corpo de prova devido ao carregamento e é dado pela equação

$M = F \cdot C / 2$ (F = carga aplicada e C = comprimento do corpo de prova)

b: Largura do corpo de prova;

h: Altura do corpo de prova.

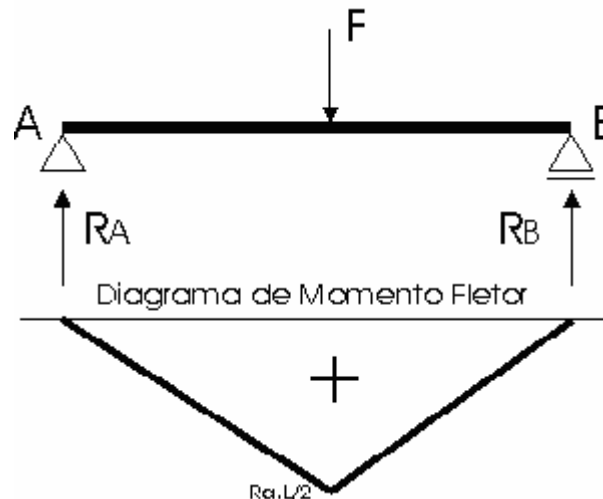


Figura 28 – Diagrama de momento máximo

Esta abordagem de análise de tensões considera o corpo de prova como um conjunto, pois ambos sofrem o mesmo carregamento de flexão. Na Figura 28 tem-se o diagrama onde o momento será máximo.

Foram selecionados dois corpos de prova sendo que um com revestimento e outro sem revestimento para o ensaio de dobramento. O ensaio foi conduzido com uma taxa de 3mm/minuto.

3.6 Ensaio de Fadiga

3.6.1 Fadiga ao Ar

Com os valores de tensão obtidos do carregamento estático (ensaio de dobramento de corpos de prova com e sem revestimento) foram realizados os ensaios de fadiga para a construção da curva S-N e obtenção do limite de resistência à fadiga sob o efeito de flexão do conjunto. Esses ensaios foram realizados na mesma máquina, também sob flexão a três pontos e com a superfície do revestimento como ponto mais tensionado, como pode ser observado na Figura 29.

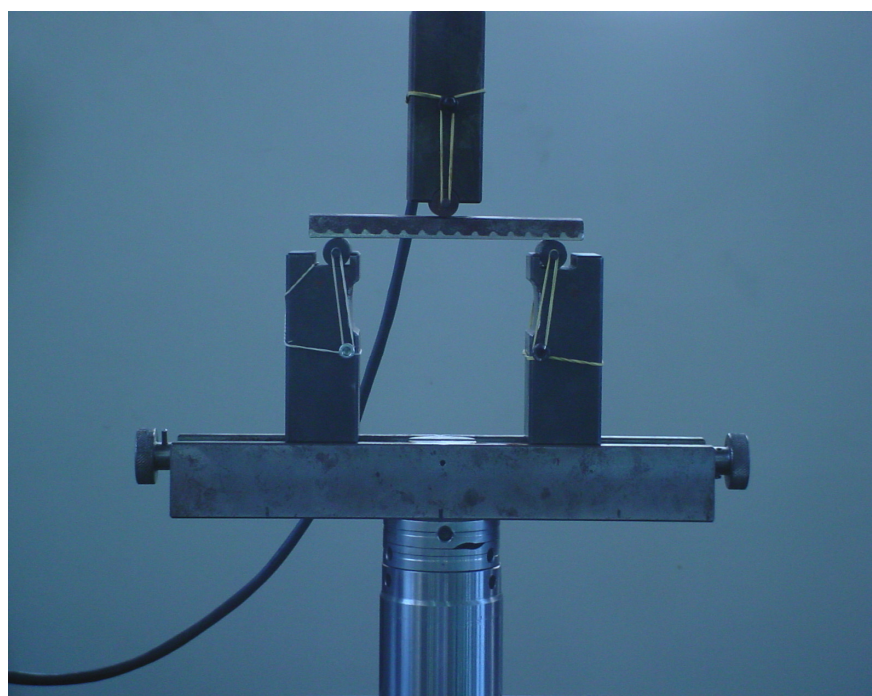


Figura 29 - Corpo de prova de fadiga posicionado no dispositivo.

Para a determinação das tensões aplicadas no ensaio de fadiga foi utilizada a mesma metodologia do ensaio de dobramento. Foram selecionados vinte corpos de prova para os ensaios de fadiga ao ar do material com revestimento para o levantamento da curva S-N. Destes vinte, alguns foram eliminados devidos a problemas nos ensaios, restando dezesseis corpos de prova. Objetivando comparar os resultados da curva levantada ao ar com revestimento, oito corpos de prova sem revestimento foram usados para levantar outra curva S-N sob as mesmas condições e, como critério de parada dos ensaios, foi adotado o deslocamento de 3 mm da linha de carga ou fratura do corpo de prova. A frequência usada no ensaio foi de 30 Hz e razão de carregamento 0,1.

3.6.2 Fadiga em Meio Corrosivo (Corrosão-Fadiga)

Este difere do ensaio de fadiga ao ar devido ao meio em que se encontra exposto. Devido a frequência ser baixa, este ensaio tem um período mais prolongado que quando ensaiado ao ar, o que dificulta o ensaio com um número de amostra maiores. Para obter a curva S-N em meio agressivo do material com revestimento foram usados sete corpos de prova, sendo que um foi descartado por problema obtido durante o ensaio. Também para efeito de comparações, sete corpos de prova sem revestimento foram ensaiados para levantar a curva S-N. Os ensaios foram realizados em uma concentração de cloretos de 115.000 ppm^(38, 39) (189,5 g de NaCl /l PA) ou 11%, de cloreto de sódio, concentração bastante agressiva quando comparada a encontrada na superfície da água do mar que fica em torno de 3,5 % de cloreto de sódio^[36]. Na Figura 30 abaixo pode-se observar a montagem dos mesmos. Estes ensaios foram realizados também sob flexão a três pontos e com a superfície do revestimento como ponto mais tensionado.

Para obtenção da curvas S-N corrosão fadiga usou-se as mesmas tensões usadas ao ar, mudando apenas a frequência que foi de 1 Hz e a razão de carregamento manteve-se em 0,1. O equipamento utilizado foi uma bancada, a qual a carga era aplicada através de um cilindro hidráulico.

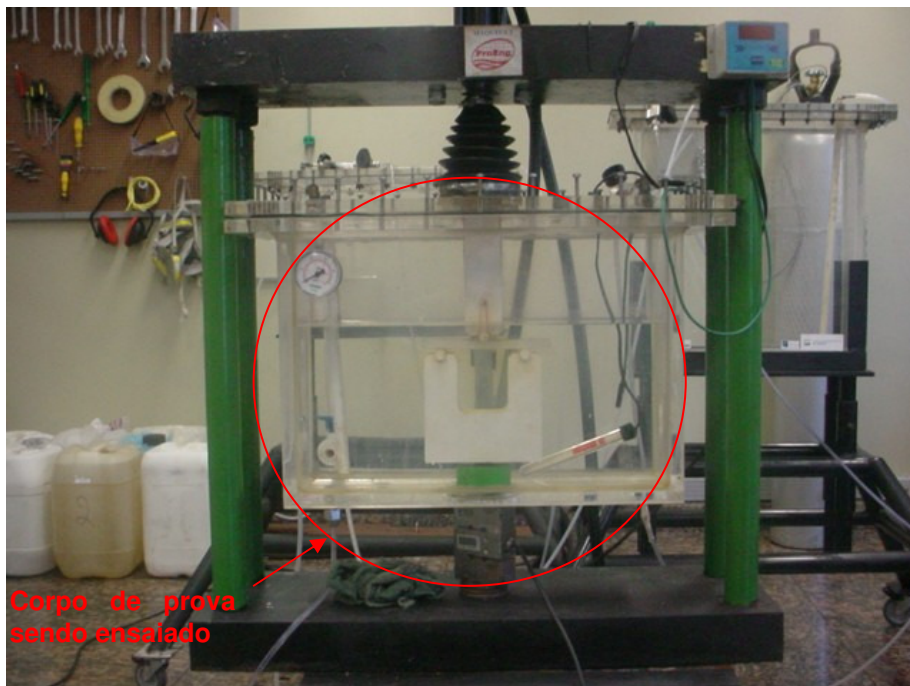


Figura 30 – Esquema de montagem do ensaio corrosão-fadiga.

3.7 Análise Metalográfica

A análise metalográfica tem grande importância, pois pode qualificar o revestimento, bem como ter uma visualização das microestruturas presentes no material.

As amostras para análise foram cortadas e embutidas. O corte nos corpos de prova e as regiões de análise estão na Figura 31.

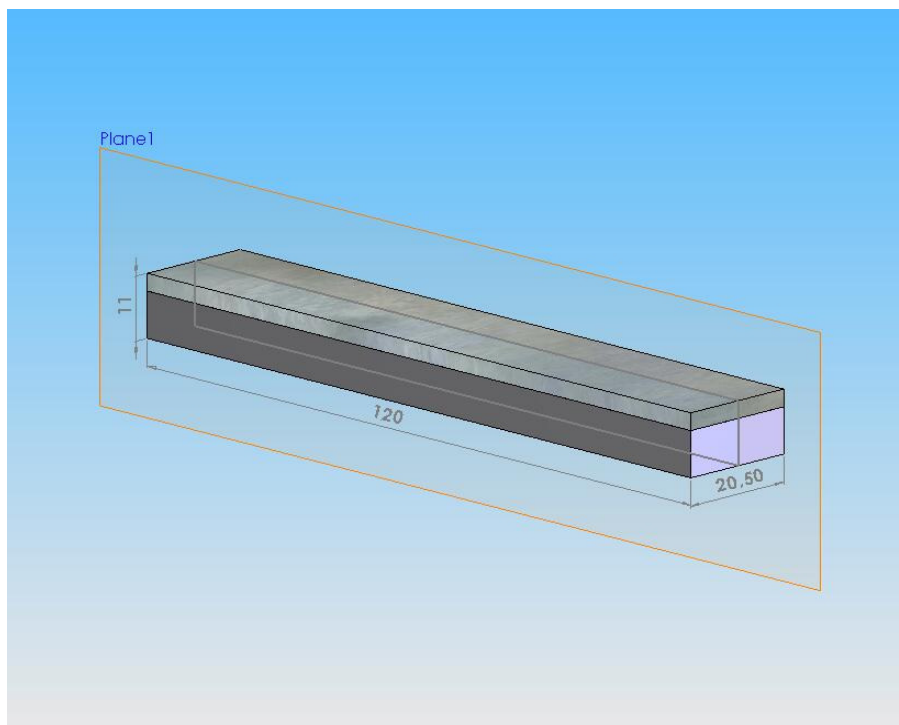


Figura 31 - Corpo de prova para análise metalográfica.

O plano assinalado mostra o corte que foi feito no mesmo. A análise foi feita perpendicularmente a esse plano.

O procedimento metalográfico adotado foi o seguinte:

- Lixamento manual (lixas de granulometria 100, 320, 400, 600, 1200);
- Polimento manual (panos de polimento com pastas de diamante com diâmetros médios de $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$);
- - Ataque químico Nital 5% por aproximadamente 5s;
- Ataque eletrolítico com eletrodo de cobre por aproximadamente 5s;
- Observação e documentação fotográfica com microscópio Olympus BX60M com câmera digital Olympus DP12 acoplada ao mesmo.

3.8 Ensaio de Microdureza

Com o objetivo de avaliar a variação de dureza ao longo do revestimento, foram

realizados ensaios de microdureza. Os perfis de microdureza facilitam uma avaliação prévia de propriedades mecânicas e microestruturas presentes no revestimento. Eles foram dispostos de acordo com a Figura 32.

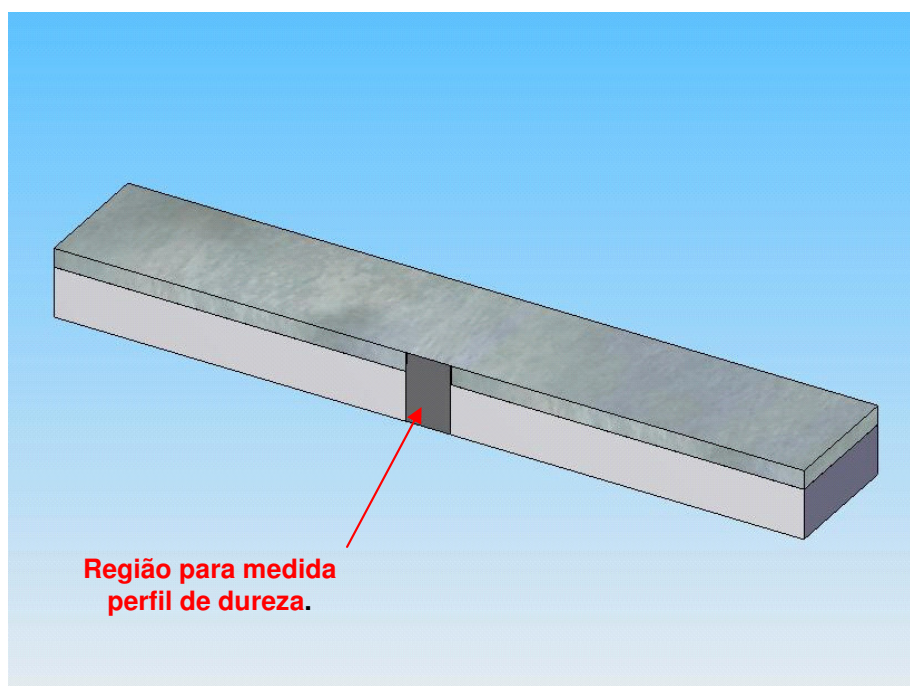


Figura 32 - Corpo de prova para ensaios de dureza, a região assinalada mostra onde foi feito o perfil de dureza.

Foram selecionadas cinco amostras com um perfil médio de 10 mm e 5 mm de distância entre as endentações e uma carga de 0,2 Kg.

Os ensaios foram feitos em um microdurômetro Buehler 1600-6100 com uma Câmera da marca Hitachi acoplada ao mesmo.

3.9 Rugosidade

A rugosidade superficial é função do tipo de acabamento, da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. Um bom acabamento superficial é fundamental onde houver desgaste, atrito, corrosão, aparência, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas e escoamento de fluidos. O acabamento superficial é medido através da rugosidade superficial, a qual é expresso em microns (mm ou m).

Para medida de rugosidade foi usado um rugosímetro da marca SEIMITSU modelo E-MC-S24B, escala 0-800 μ . Dois corpos de prova para as medidas foram selecionados: um sem revestimento e outro com revestimento. Três medidas de rugosidades foram feitas em cada corpo de prova e os resultados são apresentadas em um gráfico contendo a média

de todas as rugosidades. Ambas as amostras foram usinadas com o mesmo ferramental de corte, proporcionando uma rugosidade semelhante em todos os corpos de prova. Na Figura 33 pode-se observar o sentido que a medida foi realizada.

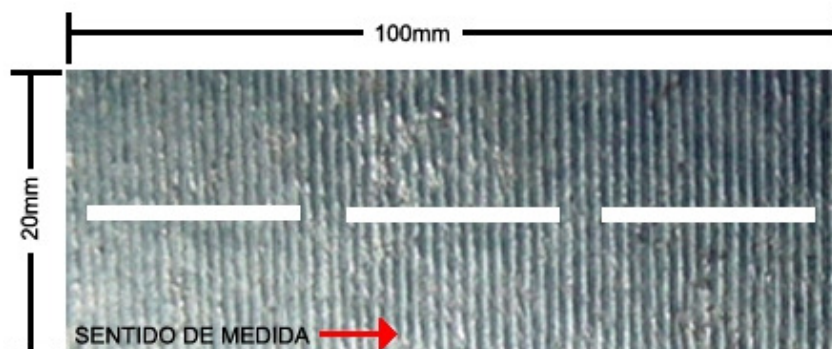


Figura 33 – Corpo de prova para medida de rugosidade

3.10 Ensaio Push-off

Ensaio não normatizado realizado para obter uma aproximação da tensão de cisalhamento da solda através de um ensaio destrutivo. Foi necessário desenvolver uma situação para calcular a tensão de cisalhamento da solda. Fez-se três furos de 20 mm de diâmetro distantes 120° no duto e colocou-se tampões nos mesmos afim de evitar que a solda viesse a ficar irregular nesta área, simulando como se não fosse aberto os furos, detalhe da Figura 19. Para este ensaio apenas três corpos de prova foram confeccionados.

Para cisalhar o revestimento é necessário o uso de um dispositivo punção-matriz, ilustrado na

Figura 25. O dispositivo é usado junto à máquina MTS modelo 810, Figura 27, o qual permite registrar os valores de força aplicada.

Após a realização deste ensaio pode-se calcular a tensão de cisalhamento, através dos dados fornecidos pelo ensaio usando a equação abaixo.

Tem-se:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde τ - tensão de cisalhamento

F - força aplicada para cisalhar o corpo de prova e é obtida através do ensaio.

A – área cisalhada - leva-se em conta a geometria da seção que sofrerá

cisalhamento e é dada por:

$$A = \pi de$$

d – diâmetro da área cisalhada 20 mm,

e – espessura do revestimento considerado devido a penetração - 2,5 mm,

Portanto, aplicando na equação acima temos:

$$A = 3,1416 * 20 * 2,5$$

$$A = 157mm^2$$

Com o cálculo da área pode-se chegar a um valor de tensão de cisalhamento:

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad \tau = \frac{89,32kN}{157mm^2} = 0,56kN / mm^2$$

A tensão de cisalhamento obtida foi de: $\tau = 560N / mm^2 = 560MPa$.

A Figura 34 ilustra o corpo de prova para a realização do ensaio após ser revestido. Nota-se que no centro do mesmo à um furo, o qual permite a entrada do punção.

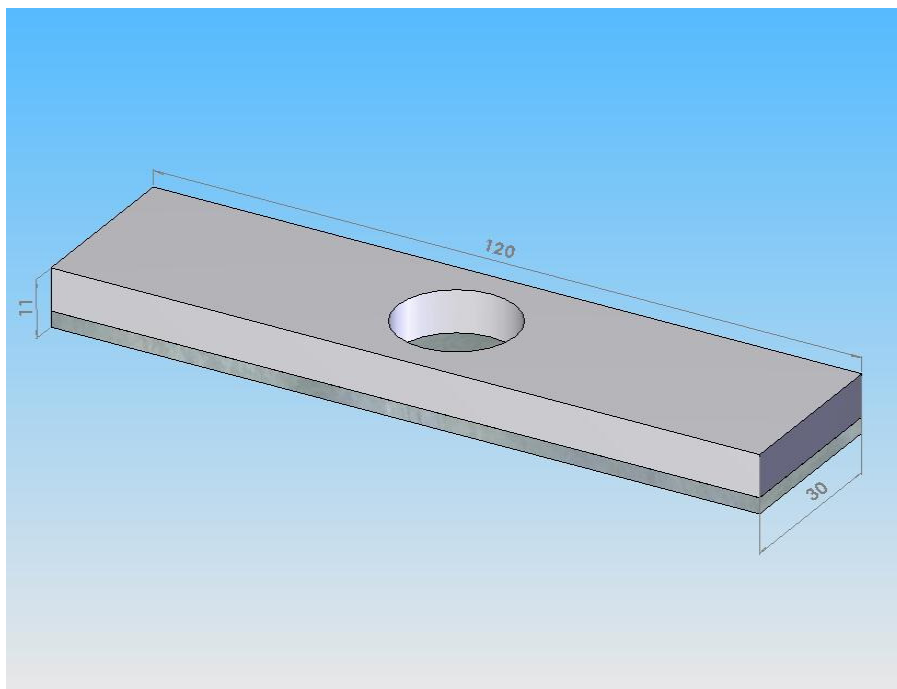


Figura 34 – Corpo de prova para realização do ensaio push-off.

3.11 Análise Fractográfica

A análise fractográfica foi importante para a avaliação da qualidade do

revestimento. Com ela foi possível definir a posição no qual se originaram as falhas decorrentes dos ensaios, que tipo de falha se obteve e o mecanismo de fratura. As forças mecânicas de cisalhamento aplicadas em componentes resultam em um deslocamento atômico em sua estrutura e, com isso, podem surgir maclas de deformação^[43].

Partindo dos corpos de prova com falhas, foram realizadas fractografias, isso possibilitou a análise de possíveis pontos de iniciação de falhas. Para isso os corpos de prova foram fraturados após serem mergulhados em nitrogênio líquido para evitar uma plastificação excessiva no metal base. As fotos foram feitas com o auxílio de uma lupa Olympus SZ40 com uma câmera digital Olympus DP12 acoplada a mesma. Esta análise proporcionou o conhecimento da microestrutura que envolvia a fratura, mostrando eventuais microestruturas indesejadas e ainda para avaliar se a nucleação da fratura aconteceria no metal base ou no revestimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de Dobramento

O gráfico na Figura 35 mostra as duas curvas de carregamento obtidas. Com isso obteve-se valores de tensão máxima, onde para o material com revestimento foi de 1020 MPa e para o sem revestimento foi de 1095 MPa. Esta queda na tensão pode ser devido ao aporte térmico resultante da soldagem onde a estrutura austenítica sofre grande crescimento de grão. A zona fundida é caracterizada por estrutura primária de grãos colunares e grosseiro dando uma baixa tenacidade ao material alterando a microestrutura original do material base.

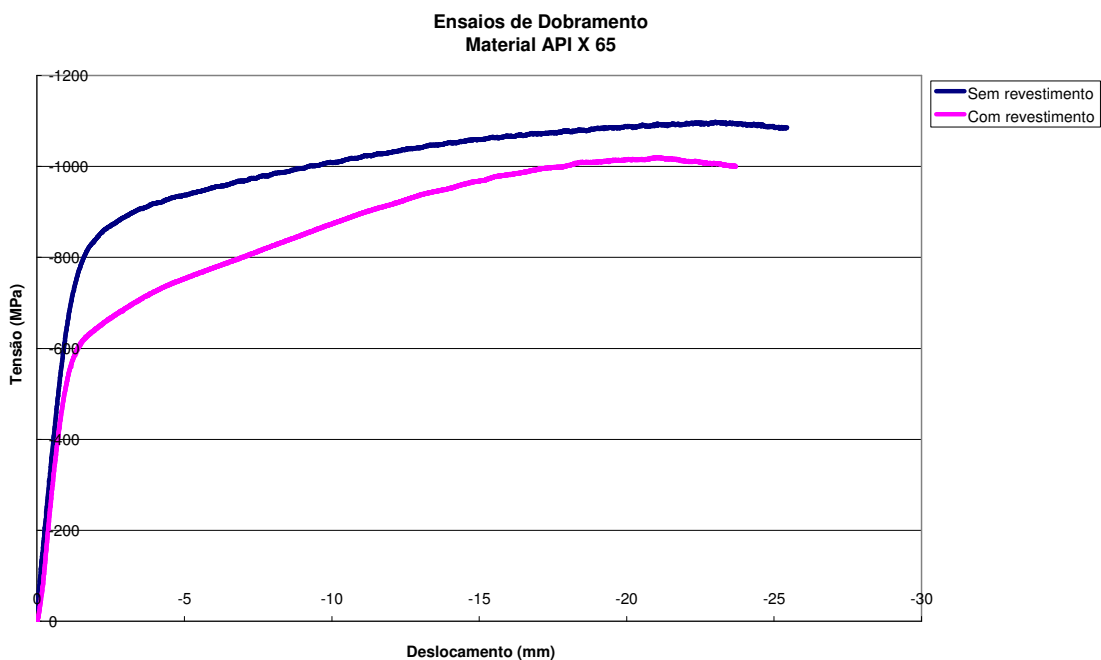


Figura 35 - Gráfico dos ensaios de dobramento.

Também foi possível avaliar qualitativamente o comportamento do revestimento a um carregamento extremo, o corpo de prova foi dobrado até 180° sem apresentar defeito

algum. Isso pôde ser visualizado ao longo do ensaio, nas Figura 36 e Figura 37.

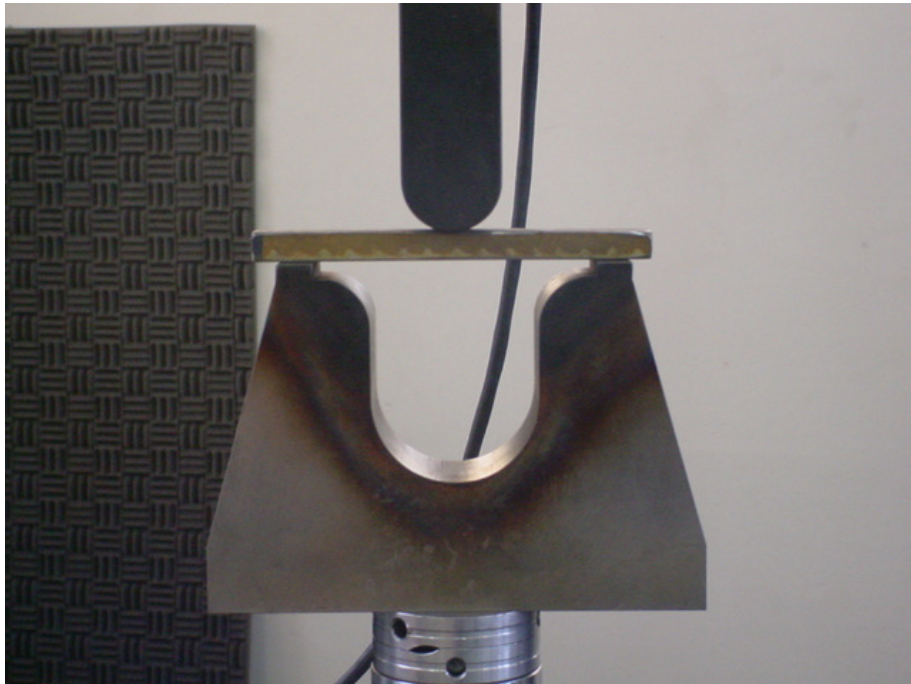


Figura 36 - Corpo de prova posicionado no dispositivo de dobramento.

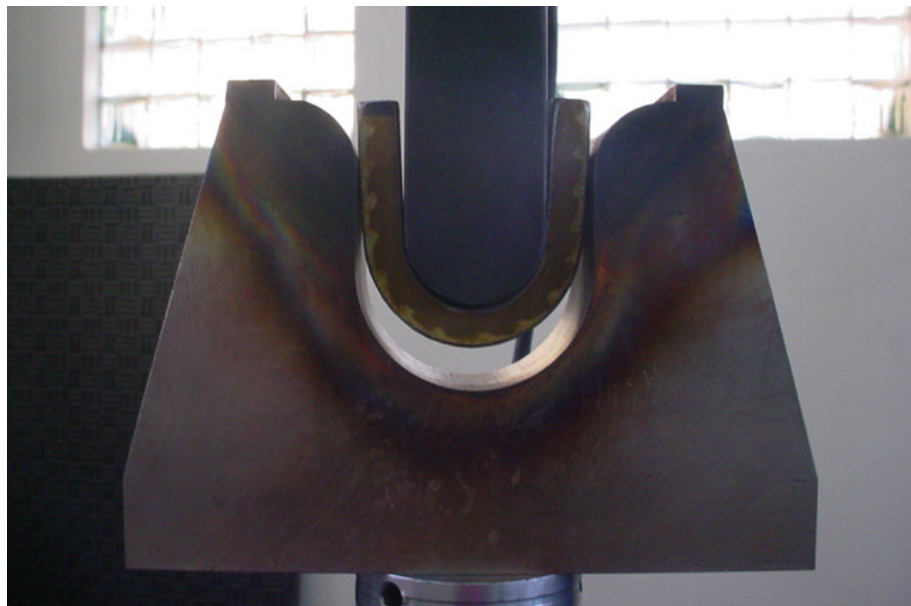


Figura 37 - Corpo de prova dobrado a 180°.

4.2 Análise Química

Através da análise química mostrada na

Tabela 6 observa-se que o baixo teor de cromo do depósito é devido à alta energia de soldagem empregada no processo de deposição sendo que parte deste volatiliza

facilmente devido ao processo de soldagem a arco elétrico, junto com a diluição, porém esta queda no teor de cromo ^[20] não afeta as propriedades de resistência a corrosão do revestimento. Já o percentual de carbono elevou-se no máximo 0,03%(especificação *low Carbon*) em peso para 0,06 %. Fato este devido a diluição do processo MIG/MAG que fica em torno de 15 a 25%^[5]. Este aumento de carbono pode vir a ser deletério para o material, pois os aços inoxidáveis austeníticos estão sujeitos a corrosão intergranular causada pela segregação de carbono no contorno de grão formando carbonetos M₂₃C₆ ricos em cromo. A região próxima ao contorno de grão se torna mais pobre em cromo e susceptível a corrosão.(sensitização)

Tabela 6 - Composição química do revestimento após soldagem, obtida por espectrometria de emissão óptica.

Composição	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Química AISI	0,06	0,569	1,541	0,018	0,0117	14,53	0,0921	8,33
308 L Si								
Metal adição	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
% Wt	0,0071	0,0676	0,0843	0,0403	0,0085	0,0523	0,0126	0,0043

4.3 Ensaio de Fadiga ao Ar

Os resultados estão apresentados numa curva S-N. A curva apresentou um limite de fadiga de 590 MPa. Para servir de base de comparação fez-se o levantamento de uma curva de fadiga ao ar do mesmo material base sem revestimento e o limite de fadiga foi de 346 MPa. Os dados das duas condições estão apresentados na Figura 38.

Este ganho de vida em fadiga pode estar atribuído ao comportamento dúctil do material austenítico o qual pode ter ocorrido deformação plástica na ponta da trinca ocasionando cegamento e conseqüentemente aumento na vida em fadiga. Outro fator se deve a boa resistência à corrosão atmosférica^[21,22] do metal de adição, visto que o fenômeno de fadiga em meio atmosférico não é realizado em meio inerte, sendo o meio atmosférico corrosivo (mas é desprezados em função da concentração baixa) devido a presença de umidade, possíveis produtos de corrosão solúveis, por conservar a umidade em contato com a superfície metálica e também a presença de oxigênio(O₂) e gás carbônico (CO₂)^[36], sendo então o limiar entre fadiga e corrosão-fadiga não muito bem definidos.

4.4 Ensaio de Fadiga em Meio Agressivo Corrosão-Fadiga

Os resultados estão plotados numa curva S-N junto com o do material sem revestimento. Para servir de base de comparação fez-se também o levantamento de uma curva de fadiga do mesmo material base sem revestimento, e os resultados estão apresentados na Figura 38 junto com outras duas condições já citadas. Uma das características do ensaio de corrosão fadiga é de não apresentar limite de fadiga devido a ação simultânea entre fadiga e meio agressivo.

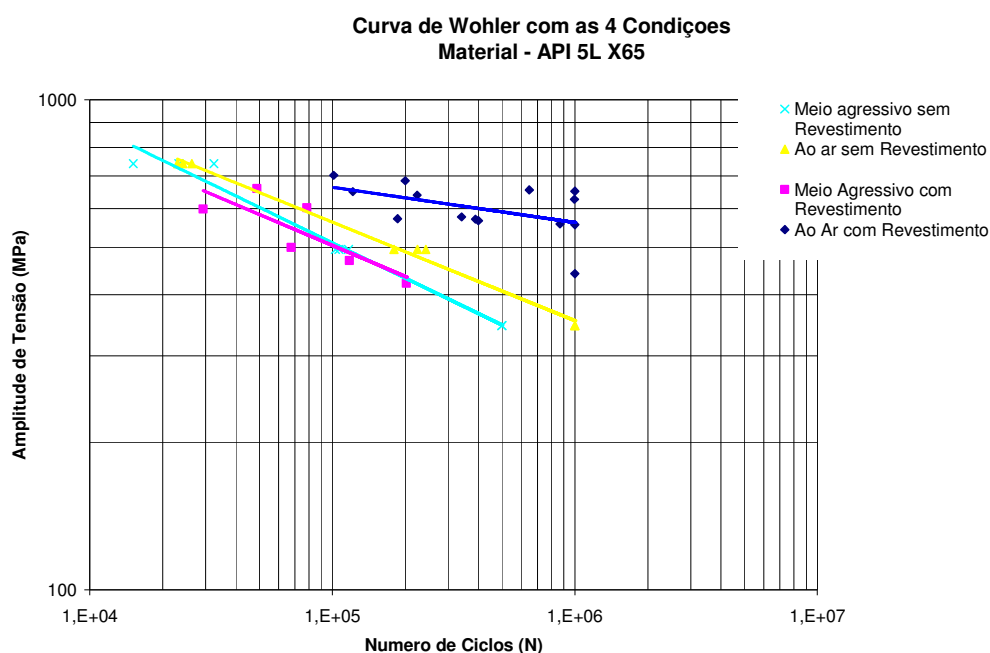


Figura 38 – Curvas S-N com as 4 condições.

Foi utilizada alta concentração de cloretos^[38,39] e observou-se que o material com revestimento neste meio comportou-se de acordo com o previsto, visto que não apresentou melhora na sua vida em fadiga quando comparados o aço API 5L X65 com e sem revestimento. Como é de conhecimento o fenômeno de corrosão-fadiga é um fenômeno sinérgico, então, apesar de dados de literatura não indicarem este material para meios salinos^[22], é de importância a realização destes testes para avaliar o comportamento global do material revestido, considerando seu baixo custo. A partir destes resultados cria-se a possibilidade de realizar experimentos usando materiais de revestimento mais nobres como o aço AISI 316L e 317, para avaliar o real comportamento dos diferentes materiais levando-se em consideração também o custo.

4.5 Análise Metalográfica.

Os resultados metalográficos estão baseados nos cortes que foram feitos nos corpos de prova e nas regiões de análise dos mesmos. A microestrutura do metal base está apresentada na Figura 39, a imagem apresenta uma microestrutura ferrítica com grãos refinados.

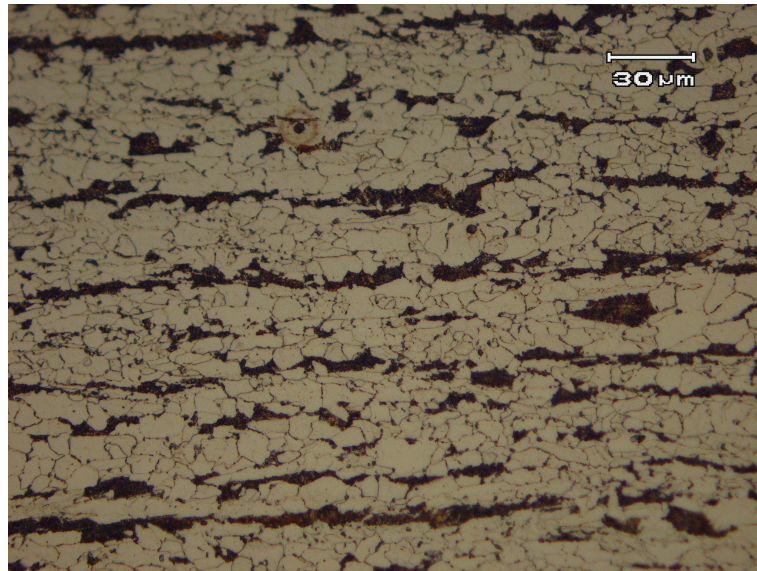


Figura 39 - Microestrutura do Metal Base. Ataque Nital 3%.

Nas figuras a seguir estão apresentadas as microestruturas do material de revestimento, o mesmo apresenta uma microestrutura de grãos colunares, Figura 40. A irregularidade da orientação dos grãos colunares se deve a diversas frentes de solidificação que o material apresenta, isto é, num primeiro momento esta frente vem do metal de base para a superfície do revestimento, no momento que o próximo passe de revestimento é depositado no metal de base, o passe anterior acaba fundindo e a frente de solidificação acaba vindo deste passe para a superfície, Figura 41.

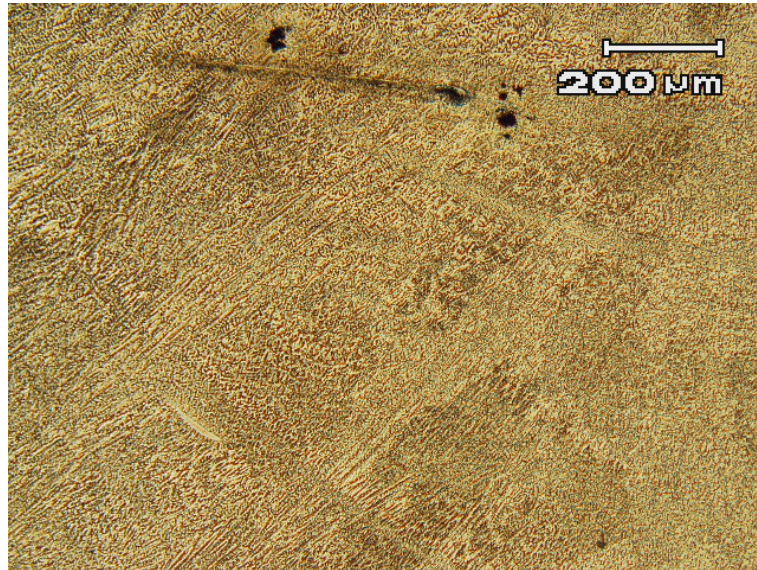


Figura 40 - Microestrutura do revestimento composta de grãos colunares. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.

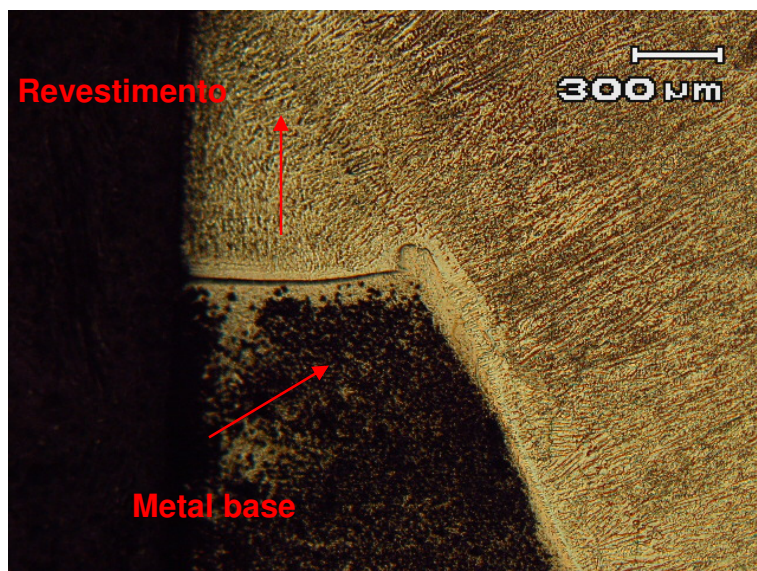


Figura 41 - Micrografia mostrando as frentes de solidificação. As setas indicam a direção na qual a frente se propaga. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.

Com as micrografias seguintes pode-se visualizar a interface metal adição/metal base do compósito. O compósito apresentou boa diluição com uma boa mistura entre os materiais, e nota-se uma linha mais clara que mostra a mistura entre os dois materiais. Figura 42.

O crescimento dos grãos, de ambos os materiais, fica nítido nas imagens. Enquanto o revestimento cresceu de forma colunar perpendicular à frente de solidificação, o metal de base apresentou um crescimento de grão irregular e perpendicular à interface Figura 43,

isso provavelmente foi devido ao calor empregado no processo. A Figura 44 mostra o aparecimento de ferrita acicular próxima a interface do metal base, onde esta nucleia no interior do grão da austenita e em inclusões não metálicas, e este tipo de microestrutura é proveniente do resfriamento do processo de revestimento. Apesar deste super-resfriamento, não foram encontradas microestruturas martensíticas que poderiam prejudicar a qualidade do revestimento. Isso se deve ao fato do metal base ser um aço de baixo teor de carbono e com boa soldabilidade.

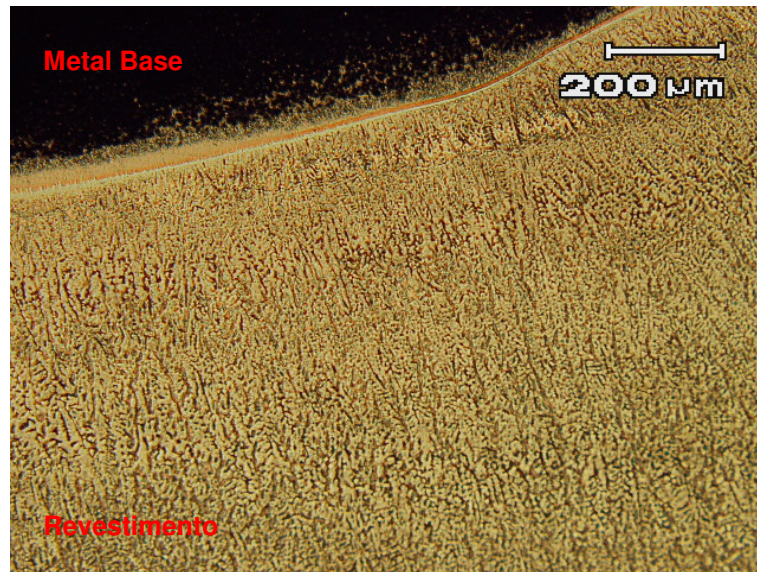


Figura 42 - Micrografia mostrando a diluição que acompanha o revestimento soldado. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.

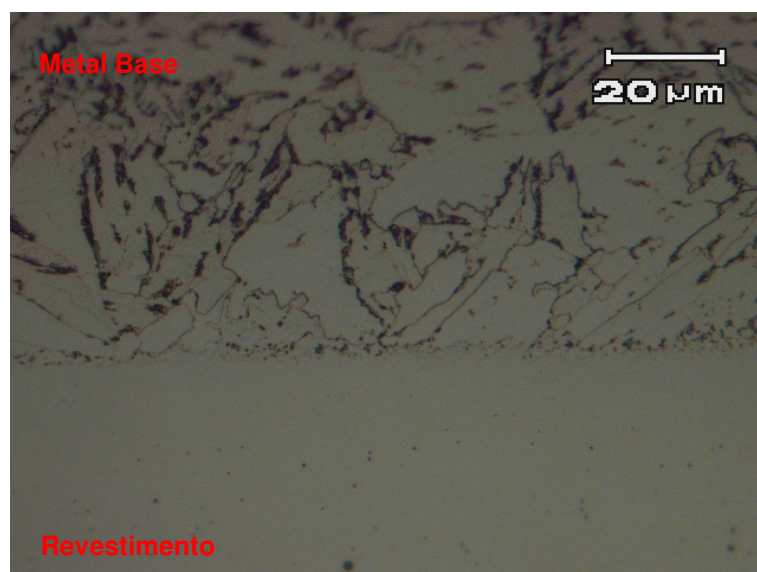


Figura 43 - Micrografia mostrando a interface entre o revestimento e o metal base com grãos irregulares. Ataque Nital 3%.

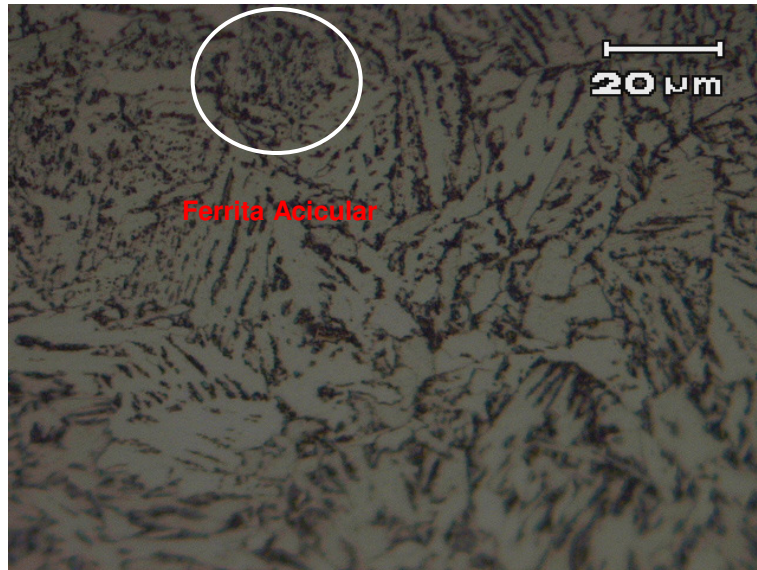


Figura 44 - Microestrutura do metal base, predominantemente ferrítica. A região assinalada mostra a ferrita acicular.

4.6 Ensaio de Microdureza

A Figura 45 mostra a média de perfis de dureza para cinco amostras selecionadas. Como pode ser visto, há um decréscimo de dureza na interface do compósito. Isso fica claro pela microestrutura grosseira apresentada no substrato, próxima a interface.

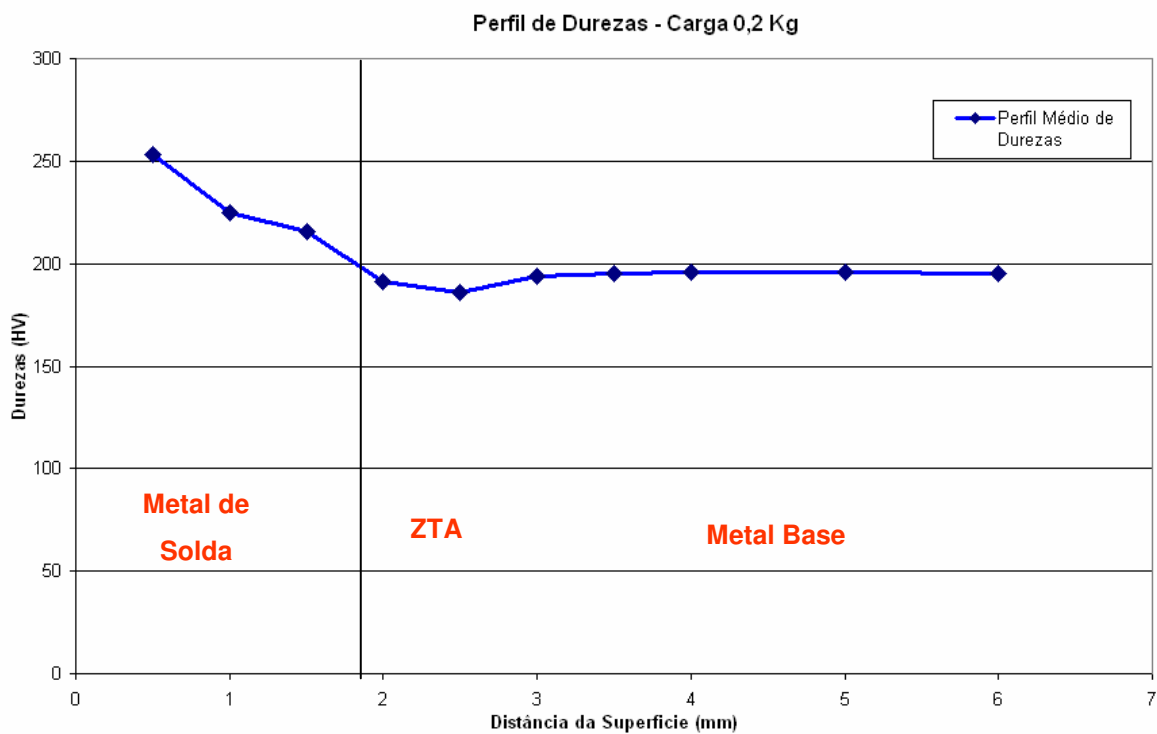


Figura 45 - Perfis de Microdureza

4.7 Rugosidade

A média das medidas de rugosidades estão plotadas no gráfico da Figura 46 abaixo. A média das medidas (Ra) ficou próximo de $4 \mu\text{m}$.

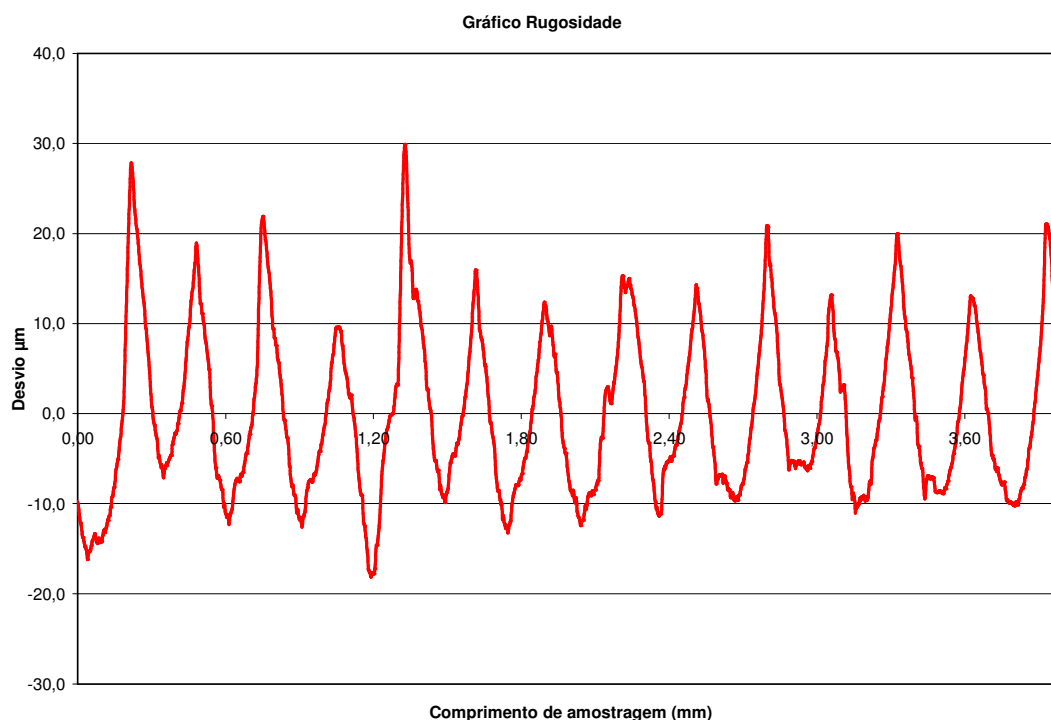


Figura 46 – Gráfico perfil de rugosidade.

Sabe-se que a rugosidade superficial é um fator bastante relevante quando o material é submetido a esforços repetitivos, onde pode ocorrer a nucleação de uma trinca devido a frestas existente sendo este concentrador de tensões.

4.8 Ensaio Push-off

Dos três corpos de provas preparados para este ensaio, o primeiro corpo de prova foi cisalhado com uma tensão de 560 MPa e os outros dois excederam a escala da máquina, ficando superior a 636 MPa não rompendo.

Tabela 7 – Resultados do cálculo da tensão de cisalhamento ensaio de Push-off

Corpo de Prova	Tensão de Cisalhamento (MPa)	Push-Off
01	560	Rompeu
02	636	Não Rompeu
03	636	Não Rompeu

Na Figura 47 e Figura 48 pode-se observar ambos os corpos de provas após os ensaios. Como não foi possível cisalhar os outros dois corpos de prova, ambos foram desconsiderados.



Figura 47 - Corpo de prova Cisalhado.



Figura 48 - Corpo de prova não Cisalhado.

4.9 Análise Fractográfica

As análises seguintes puderam descrever com clareza como ocorreu a fratura do material frente ao carregamento que o mesmo sofreu.

Nas duas amostras que foram analisadas, Figura 49 e Figura 50, os corpos de prova apresentam fraturas que se iniciam no canto superior esquerdo. Como é possível observar, as fraturas tem seu início no revestimento e com propagação paralela a linha de carga. As marcas de praia presentes no corpo de prova atestam estes fatores. O fato de grande parte das fraturas dos corpos de prova revestido e sem revestimento ensaiados ao ar e em meio agressivo terem iniciado no canto do corpo de prova indica que, embora arredondado, o canto serviu como concentrador de tensões. As marcas de ferramentas deixadas durante o processo de usinagem podem também ter influenciado. Outro fator é o não perpendicularismo no ensaio.

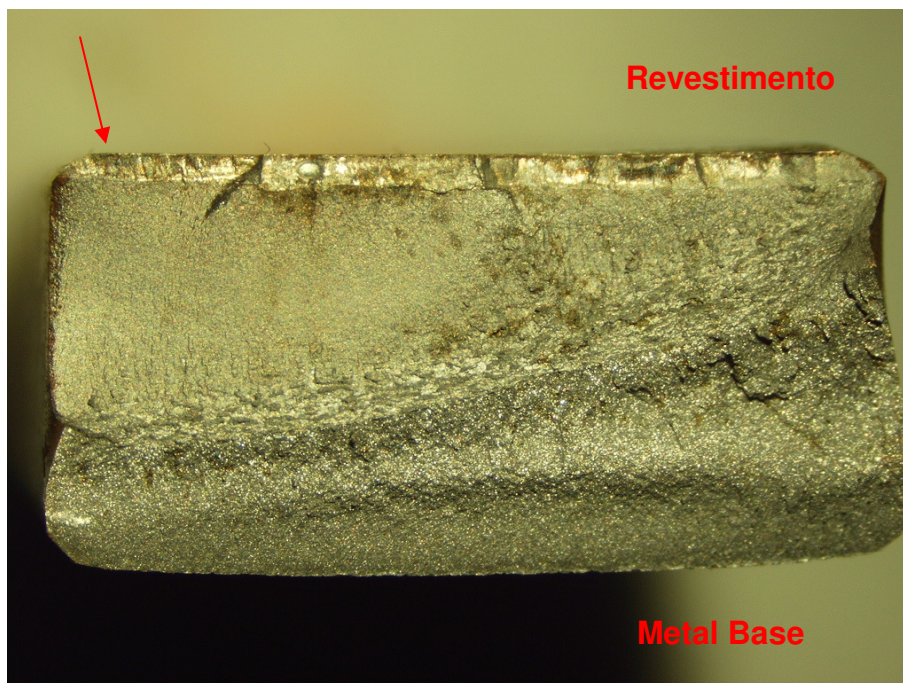


Figura 49 - Fratura iniciando no canto esquerdo da superfície do revestimento

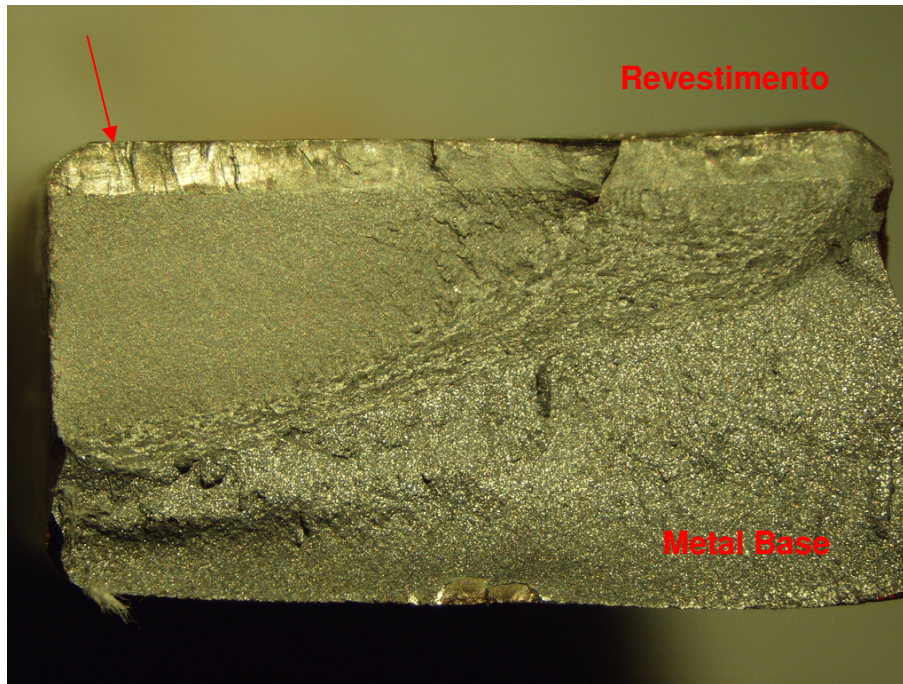


Figura 50- Fratura iniciando no canto esquerdo da superfície do revestimento.

4.9.1 Metalografia da Região de Início da Fratura

Foram realizados novos ensaios de fadiga, porém, com o cuidado de interromper o ensaio no momento que ocorresse o início da falha. Para isso a máquina de ensaios foi programada para que o ensaio fosse interrompido com o mínimo de deflexão observada.

As microestruturas apresentadas nos corpos de prova foram semelhantes as apresentadas anteriormente na análise metalográfica. Para isso foram escolhidas algumas micrografias que representam o comportamento das fraturas. A Figura 51 mostra que a fratura teve origem na superfície do revestimento. A trinca maior não foi paralela à orientação colunar e sim ao carregamento aplicado (região mais tensionada). No entanto, a menor teve início no ponto onde as estruturas colunares se dividem e sua propagação foi paralela a orientação colunar.

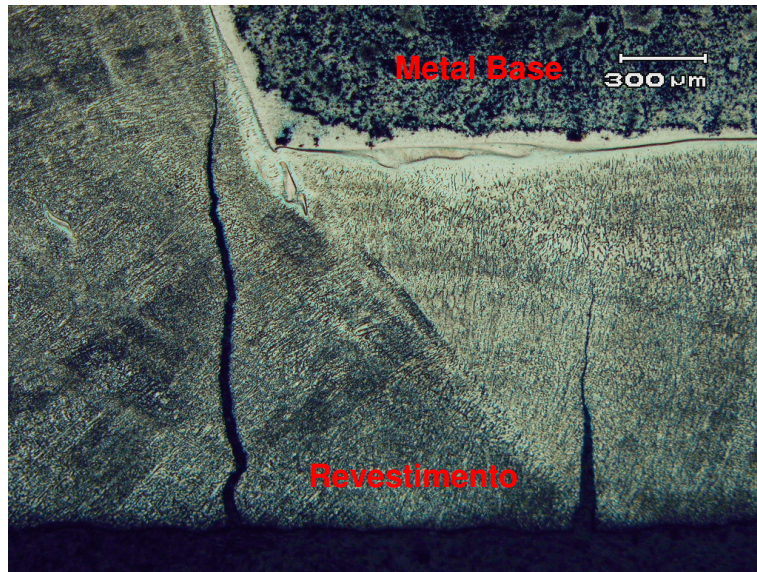


Figura 51 - Micrografia da região de fratura. Iniciação de trincas. Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%.

Na Figura 52 pode-se ver como essa fratura passa pela interface do compósito, fica claro que nenhuma microestrutura fragilizante ou deformação excessiva são as causas desta fratura.

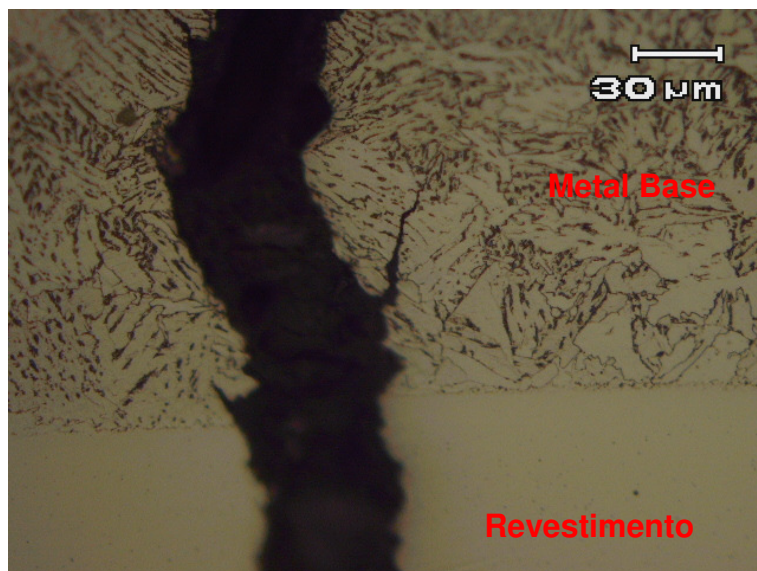


Figura 52 - Detalhe da microestrutura na interface ao redor da fratura. Ataque Nital 3%.

4.10 Metalografia da Superfície de Fratura

Foi investigada a formação de maclas de deformação no compósito em estudo. A Figura 53 seguinte mostra a microestrutura superficial formada desde o início do

carregamento cíclico com 771 ciclos de fadiga, e estas maclas quando vistas de cima se apresentam como montanhas. O conhecimento do comportamento de fadiga do compósito foi determinante para esta análise, pois o corpo de prova foi carregado com os mesmos parâmetros de um corpo de prova da curva de fadiga.

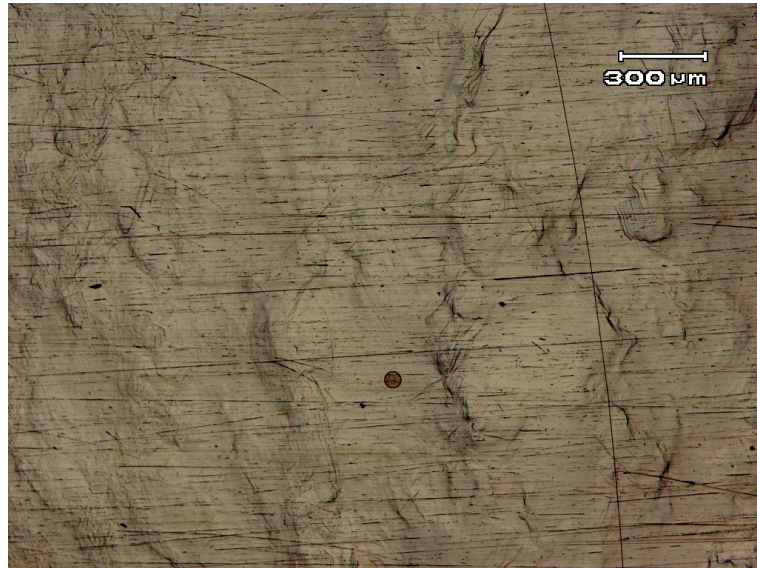


Figura 53 - Maclas de deformação. 771 ciclos de fadiga

Este ensaio foi conduzido até a ruptura do corpo de prova, porém com o mínimo de deflexão possível, para que a abertura da trinca também fosse a mínima possível. Com isso o corpo de prova foi cortado paralelamente a sua fratura e analisado no microscópio eletrônico de varredura.(MEV).

Em uma microestrutura austenítica, a formação destas maclas pode delinear os grãos austeníticos sem nenhum ataque químico. No compósito estudado, como o depósito possui uma microestrutura bruta de fusão, foi difícil à visualização desta delineação.

A Figura 54 mostra as maclas formadas em diferentes direções ao redor da fratura, ficando claro a orientação das maclas. Na Figura 55 pode se ver a delineação dos grãos austeníticos prévios, onde as diversas orientações das maclas acabam delineando o grão austenítico.

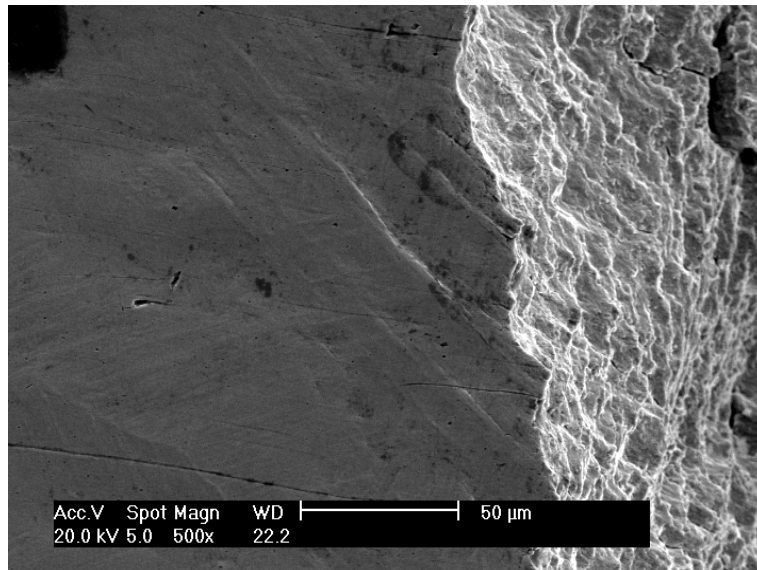


Figura 54 - Maclas de deformação próximas a fratura. 152141 ciclos de fadiga.

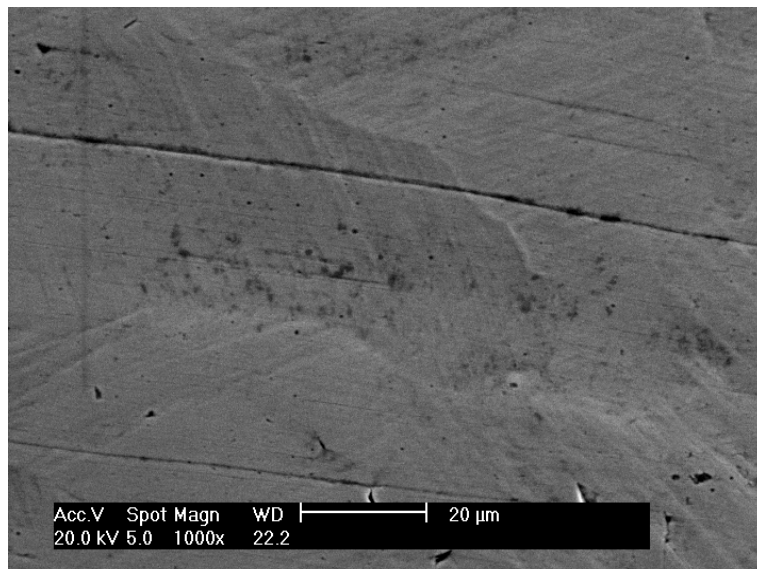


Figura 55 - Orientações das maclas - acabam delineando o grão austenítico prévio.

5 CONCLUSÕES

O revestimento estudado neste trabalho apresentou uma boa qualidade sem defeitos superficiais visíveis a olho nu o que evidencia também o sucesso da mecanização do sistema de deposição. Estas afirmações estão baseadas nos ensaios de dobramento e metalografias prévias, mas vale salientar que o processo utilizado não se apresenta adequado para aplicações onde o material revestido sofra ciclo de temperatura na faixa entre 550-850°C, pois pode ocorrer sensitização. O material sensitizado não deve ser submetido a meios que o torne susceptível a corrosão intergranular. Durante o processo de soldagem a temperatura máxima atingida ficou entorno de 450 °C abaixo da temperatura crítica citada acima.

O revestimento em aço inoxidável AISI 308L Si submetido a condições atmosféricas apresenta ganho significativo na vida em fadiga (em torno de 40%).

Quando exposto à um meio agressivo não há variação significativa da vida em fadiga do material com e sem revestimento no meio estudado.

Pode-se concluir que através do ensaio de push-off, que o revestimento teve uma excelente diluição/aderência no material base, ou seja o revestimento teve uma boa ligação metalúrgica, na qual o cálculo de tensão de cisalhamento ficou dentro do esperado, 560 MPa, ou seja próximo ao limite de resistência à tração que é de 600 MPa.

A rugosidade foi um fator relevante para a diminuição da vida em fadiga em meio agressivo do material devido às marcas de ferramenta deixadas durante a preparação dos corpos de prova, que agem como sendo fendas servindo também como pontos concentradores de tensão reduzindo a vida em fadiga.

A análise metalográfica do compósito mostrou uma microestrutura favorável a aplicação do componente, isto é, os grãos colunares refinados concedem uma boa resistência ao revestimento. A ausência de microestruturas indesejadas (martensita) e deformações excessivas também atestam a boa qualidade do revestimento.

A queda de dureza na interface apresentada pelos ensaios de microdureza foi em função do crescimento de grão (devido à zona afetada pelo calor) na região citada, porém essa queda não é significativa para o processo.

A análise fractográfica mostrou-se como ferramenta muito importante na análise de como ocorre esta falha. Pela análise das fraturas foi possível estudar como acontece a

propagação da fratura. Pela micrografia da fratura podemos ver se a fratura inicia na interface ou no meio do substrato. Pela visualização da superfície do corpo de prova pode-se ver como é o mecanismo de fratura.

Vale salientar que a propagação de fratura, em um primeiro momento, não segue a orientação dos grãos colunares, isso mostra que esta orientação não é fator para propagação de fraturas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aprofundar a avaliação metalográfica na interface do corpo de prova para identificar as microestruturas na interface do compósito, ou seja, se há alguma microestrutura não identificada neste trabalho.

Uma análise da influência no comportamento em fadiga de diferentes espessuras de revestimento e diferentes parâmetros no revestimento.

Também no comportamento em fadiga o uso de diferentes rugosidades após usinagem a fim de diminuir a concentração de tensões.

Avaliar a resistência da vida em fadiga ao ar e em meio menos agressivo usando materiais com um índice maior de molibdênio, por exemplo: AISI 316L e 317 L.

Realizar ensaios de fadiga em meio saturado com CO₂ e H₂S com diferentes níveis de cloretos e ainda com variação de pressão e temperatura.

Seria interessante o estudo de outras propriedades do revestimento, como por exemplo, resistência à abrasão, erosão e cavitação, com um controle de material perdido ao longo do ensaio.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - **ESAB MIG Welding Handbook** 2004
- 2 – Ivan Guerra Machado, **Soldagem e Técnicas Conexas: processos** – Porto Alegre 1996 pag 194 – 218
- 3 – Okumura, T. Taniguchi, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações** – Rio de Janeiro 1982, pág 21-33,
- 4 - WAINER, Emilio. **Soldagem: Processos e Metalurgia** Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo p. 9-29 e 99-124 1992.
- 5 - MARCONI, M. **II Plasma and Arco – II Process PTA**, PlasmaTeam, 2002. http://www.acesita.com.br/port/aco_inox/pdf/apostila_aco_inox_soldagem.pdf acesso em 27 de junho 2007
- 6 – ZHENG, S. **Twin Wire Gas Tungsten Arc Cladding**. SIMTech Technical Report (PT/99/004/JT). 1999.
- 7 - A. K. Motorjemi et. al **Mechanical and Fracture Characterization of a Bi Material Steel Plate**. GKSS Research Center, Institute of Materials Research, Geesthacht, Germany 2002.
- 8 - THE LINCOLN ELETRIC COMPANY. **The Procedure of Arc Welding**. 11.ed. Lincoln Eletric 1994
- 9 – H. Kashani et al. **Room and High Temperature Wear Behaviors of Nickel and Cobalt Base Weld Overlay Coatings on Hot Forging Dies**. School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, *P.O.* Box 11365-4563, Tehran, Iran 2006
- 10 – C. Bournicon, **Hot forging dies and matrices: procedure for choosing materials and surface treatments**, Bulletin du Cercle d' Etudes des Metaux (France) 16 (9) (1994) 22.1–22.16.
- 11 - P. Fournier, A. Bennani, **Interet du Rechargement des Outils de Forgeage a Chaud Fortement Sollicites**, Bulletin du cercle d' Etudes des Metaux (France) 18 (2000) 17.1–17.20.
- 12 – B.F. Levin, J.N. Dupont, A.R. Marder, **Weld overlay coatings for erosion control**, Wear 181–183 (1995) 810–820.

- 13 - L. W. TSAY et. al.. **Hydrogen Sulphide Stress Corrosion Cracking of Weld Overlays for Desulfurization Reactors.** Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, 1998.
- 14 – Trarbach, K.O. **Met. Constr.**, 1981, 13(9), 508.
- 15 – Sniegón, K. **Weld. Inr.** 1987, 1(12), 1143.
- 16 - <http://www.infosolda.com.br> acessado em 11/06/2007
- 17 – Marques V. P **SOLDAGEM Fundamentos e Tecnologia** Editora UFMG Belo Horizonte, 2005.
- 18 - **ASM Specialty Handbook Stainless Steels** 1994
- 19 – <http://www.infomet.com.br> acessado em 01/06/2007]
- 20 – Sergio Augusto de Souza. **Composição Química dos Aços**, Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo SP, 1989.
- 21 – TEBECHERANI, C. T. P. Aços Inoxidáveis. Disponível em: www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html acesso em 29 de junho de 2007.
- 22 – Apostila Aços Inoxidáveis <http://www.eutectic.com.br/Catalogo%20Inox.pdf> acesso em 29 de junho 2007.
- 23 - Noritaka Y. et.al. **Detection of Embedded Fatigue Cracks in Inconel Weld Overlay and the Evaluation of the Minimum Thickness of the Weld Overlay using Eddy Current Testing.** *International Institute of Universality, Japan* 2006
- 24 - Y. Bhambria et. al. **Al Enrichment of Carbon Steels Through Weld Overlay Process for Improved Oxidation Resistance.** Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, P.O. Box 2008, Oak Ridge, TN 37831-6083, USA 2004.
- 25 – L. Sexton et.al. **Laser Cladding of Aerospace Materials.** Department of Mechanical Engineering, University College Dublin, Belfield, Dublin 4, Ireland 2001.
- 26 - Yoshihiro YAMASHITA et al. **Newly Developed Repairs on Welded Area of LWR Stainless Steel by Friction Surfacing.** Nuclear Plant Service Engineering Departament. Hitachi Ltd. 2001.
- 27 – Souza S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos** fundamentos teóricos e práticos. São Paulo 1995.

- 28 - AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM E 190 – 92: **Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds**. United States, 1997.
- 29 - BRANCO, C. A., Fernandes A.A., Castro P.M.S.T. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986.
- 30 - DIETER, G. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill Inc. cap. 12 1986.
- 31 - D. Al-Anazi et.al. **Three-Point Bend Testing of HVOF AMDRY 9954 Coating on Ti-6Al-4V Alloy** Dublin City University, Ireland 2005.
- 32 - T. Kevin O'Brien et.al. **Transverse Tension fatigue Life Characterization Through Flexure Testing of Composite Materials** - US Army Research Laboratory, Vehicle Technology Directorate, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA 2002.
- 33 - Francine R. et.al. **Fatigue of Glass/Epoxy Composite in Three-Point-Bending with Predominant Shearing**. Laboratoire de Mécanique de Lille (URA CNRS 1441), France 2002.
- 34 - GENTIL, V., **Corrosão**. 3º ed. Rio de Janeiro 1996.
- 35 – PANASSION Z. **Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas**. IPT 1993
- 36 - RAMANATHAN L. V. **Corrosão e seu Controle** – 3 edição Hemus.
- 37 - JASKE, C.E., PAYER, J.H., BAILE V.S. **Corrosion Fatigue of Metals in Marine Environments**. Battelle's Columbus Laboratories, Ohio, 1981.
- 38 - **Water-Resources Investigations Report** 03-4260 Department of Energy National Petroleum Technology Office, California, 2003.
- 39 - RODRIGUÉS W. **Aplicacion de Estudios Integrados en el Desarrollo de Vacimientos Maduros** Peru 1999.
- 40 – F. P dos Santos. **Desenvolvimento de Ensaios de Corrosão-Fadiga para Juntas Soldadas de Aço API 5L X60** – Dissertação de Mestrado - 2006
- 41 – **Specification for Line Pipe** ANSI/API SPECIFICATION 5 L – FORTY-FOURTH EDITION, OCTOBER 1, 2007.
- 42- **Böhler Thyssen** Fabricante de consumível para solda.
- 43 - William D. Callister, Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução** Quinta Edição, Editora LTC pág. 55 e 116.

8 Anexos

Custo Total de Fabricação:

Material de adição	AISI 308 L Si
Gás de proteção	Ar + CO ₂ (I40)
Tempo de solda	4,5 hs
Custo de Fabricação	R\$ - 764,00
Preço de Venda	R\$ - 1250,00
Volume consumido arame	R\$ - 11,5 Kg
Gás consumido	2,5 m ³