Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

TENACIDADE À FRATURA E DUREZA NA REGIÃO DA INTERFACE EM AÇOS CLADEADOS POR SOLDAGEM

Mariana da Silva Guimarães

Marie Caroline Kama Etom

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientador: Enrique Mariano Castrodeza

RIO DE JANEIRO

Abril de 2013

TENACIDADE À FRATURA E DUREZA NA REGIÃO DA INTERFACE EM AÇOS CLADEADOS POR SOLDAGEM

Mariana da Silva Guimarães

Marie Caroline Kama Etom

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNIDA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE PETRÓLEO.

Examinado por:

_____

Prof. Enrique Mariano Castrodeza, D.Sc.

_____

Prof. Theodoro Antoun Netto, Ph.D.

_____

Eng. Juliana Souza Baioco, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Abril de 2013

Guimarães, Mariana da Silva.

Tenacidade à fratura e dureza ne região da interface de aços cladeados por soldagem / Mariana da Silva Guimarães, Marie Caroline Kama Etom – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

viii, 82 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Enrique Mariano Castrodeza.

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia de Petróleo, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 80-82

1. Cladeamento. 2. Aço API 5L X-52 e Inconel 625. 3. Mecânica da Fratura. 4. BSI 7448. 5. Metalografia. 6. Microdureza. I. Enrique Mariano Castrodeza. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Petróleo. III.Título.

Dedicatória

Dedico esse trabalho a Deus e à minha família.

Mariana da Silva Guimarães

Je dédie ce mémoire à Dieu et à ma famille.

Marie Caroline Kama Etom

Agradecimentos

A DEUS, por ter me abençoado em todos os momentos da minha vida, por nunca ter desistido de mim, nem me desamparado.

A minha mãe, MÁRCIA PEIXOTO DA SILVA por todo apoio incondicional que me deu, e por todos os lanches noturnos preparados para mim nas vezes que eu não tinha tempo para fazer nada, a não ser estudar.

A minha irmã, MARCELLE DA SILVA GUIMARÃES por ser minha amiga em todos os momentos, inclusive nos meus momentos de mau humor.

À minha amiga e colega, MARIE CAROLINE KAMA ETOM, por ser uma excelente e competente companheira de estudos e projeto e por nunca me deixar na mão.

À minha família, por todo auxílio e felicidade que me possibilitaram ter durante toda minha vida.

Ao meu professor e orientador, ENRIQUE CASTRODEZA, por toda paciência e ensino, durante todo o projeto.

Ao engenheiro ALDECIR ARAÚJO, por toda ajuda e cuidado com o nosso trabalho.

Aos amigos e todos outros que de alguma forma contribuíram para o sucesso desse trabalho.

MARIANA DA SILVA GUIMARÃES

Agradeço infinitamente a Deus Todo Poderoso, sem quem este trabalho não seria possível, Ele que me conduziu desde a minha infância, me deu a Graça de obter esta bolsa de estudos, Ele que sempre esteve comigo neste país que não é meu, e neste curso que o meu país não oferece. Eu Lhe agradeço sem limites por todas as benções das quais Ele me encheu e para todo o reconforto nos momentos difíceis.

Agradeço a meu pai ETOM EMPIME e a minha mãe MARIE LAURENCE NANGA, meus primeiros educadores, que sempre foram para mim uma fonte inexaurível de conselhos. Digo muito obrigada pelo grande apoio moral que me deram, a força e a coragem que me inspiraram durante esta jornada.

Agradeço ao meu orientador ENRIQUE MARIANO CASTRODEZA que não poupou nenhum esforço e sempre se mostrou disponível e paciente, e que, com seus imensos conhecimentos, orientou e supervisionou este trabalho.

Agradeço ao doutorando ALDECIR ARAUJO pela assistência e pela ajuda ao longo deste projeto.

Agradeço a meu amigo e namorado DAVID RENE NKEN NJOCK pela presença incondicional nos momentos de crise e por ter me incentivado tanto em todos os dias da realização do presente trabalho.

Agradeço a minha amiga e colega MARIANA DA SILVA GUIMARÃES que nunca desistiu e revelou-se ser uma fonte de motivação suplementar para mim e que contribui tanto neste projeto. Agradeço também a família dela por ter me acolhido e, principalmente, à mãe que me tratou como uma filha, no momento em que eu estava mais longe da minha mãe.

Agradeço a todos que me apoiaram de perto ou de longe e que de alguma forma contribuíram na minha trajetória na faculdade até o ponto culminante da realização deste projeto.

MARIE CAROLINE KAMA ETOM

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro.

TENACIDADE À FRATURA E DUREZA NA REGIÃO DA INTERFACE EM AÇOS CLADEADOS POR SOLDAGEM

Mariana da Silva Guimarães

Marie Caroline Kama Etom

Abril / 2013

Orientador: Prof. Enrique Mariano Castrodeza

Curso: Engenharia de Petróleo

Aços API recobertos por uma camada resistente à corrosão são cada vez mais utilizados na indústria de petróleo, principalmente para a produção no Pré-Sal. Esse tipo de material, obtido através do cladeamento, é agora o mais adequado para a exploração e produção de óleo altamente corrosivo em condições de pressão e temperatura cada vez mais críticas. Atualmente o cladeamento mais usado é a aplicação de Inconel 625 sobre aços API por processos de soldagem (*welding overlay*). A junção desses materiais por esses processos cria uma interface de características metalúrgicas distintas de seus materiais de origem, por isso, existe a necessidade de um estudo detalhado das propriedades dessa região, visando prever e mitigar possíveis problemas que possam ser causados durante a vida útil do componente cladeado. Uma das falhas prováveis, especialmente em *risers,* é o crescimento de uma trinca na interface recobrimento-metal de base a partir de um defeito pré-existente e a conseqüente fratura do material nessa região. Com o objetivo de prever a integridade estrutural do componente trincado faz-se uso da Mecânica da Fratura. No caso analisado, pelo comportamento dos materiais na região da interface, deve ser utilizada a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica. Assim, a avaliação da tenacidade à fratura do material realizada na região da interface, pelo método do CTOD, é tecnologicamente relevante. Adicionalmente, um estudo microestrutural básico e medidas de microdureza da interface, devem ser feitos a fim de complementar a análise.

Palavras-chave: Cladeamento, Mecânica da Fratura, Tenacidade, Interface, Inconel 625

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

TOUGHNESS FRACTURE AND INTERFACE HARDNESS OF CLADDED STEELS THROUGH WELDING PROCESS

Mariana da Silva Guimarães

Marie Caroline Kama Etom

Abril / 2013

Advisor: Prof. Enrique Mariano Castrodeza

Course: Petroleum Engineering

API Steels coated by a corrosion resistant layer are increasingly used in petroleum industry, particularly for pré-salt oil production. These cladded materials are currently the most suitable for highly corrosive oil exploration and production, under the worst temperature and pressure conditions. Coating API steels with Inconel 625 through a welding process is the most common cladding, for that application. Welding those materials heads to an interface whose metallurgical characteristics differ from both original ones. Therefore, it is necessary to conduct a detailed study of that intermediate zone's properties, aiming to prevent or mitigate issues eventually encountered within the cladded equipment lifetime. One of the likely issues, especially for pipes, is the crack propagation along the coat-steel interface, starting from a preexisting break leading to a fracture all over that materials' region. In order to keep the equipment structural integrity, we resort to fracture mechanics. In our case, with respect to materials behavior around the interface, elastic-plastic fracture mechanics is the specific part we are looking at. Thus, fracture toughness measured in the interface using CTOD method is technologically relevant. Besides, basic microstructure study and evaluation of interface micro hardness are required to complete the whole analysis.

Key words: Cladding, Fracture mechanics, Fracture toughness, Interface, Inconel 625

Sumário

Dedicatória iv

Agradecimentos v

Resumo vii

Abstract viii

Sumário 9

Lista de Figuras 12

Lista de Tabelas 14

Lista de Símbolos 15

Lista Abreviações 17

Introdução 18

Objetivo 19

Motivação 19

Revisão Bibliográfica 20

1. Cladeamento 20

1.1. Definição 20

1.2. Histórico 20

1.3. Técnicas de cladeamento 20

1.3.1. Cladeamento por processos mecânicos 21

1.3.1.1. Cladeamento por co-laminação 21

1.3.1.2. Cladeamento por explosão 22

1.3.2. Cladeamento por soldagem 24

1.3.2.1. Soldagem 25

1.3.2.1.1. Soldagem a arco 25

1.3.2.1.1.1. Soldagem com eletrodos revestidos 25

1.3.2.1.1.2. Soldagem TIG 26

1.3.2.1.1.3. Soldagem MIG/MAG 27

1.3.2.2. Zona Termicamente Afetada 29
1.4. Aplicações industriais do cladeamento 29
1.4.1. Materiais empregados em cladeamento industrial 30
1.4.2. Aplicações industriais 30
1.5. Importância do cladeamento industrial 32
2. Aço API 5L X-52 35
2.1. Introdução 35
2.2. Propriedades mecânicas 35
3. Inconel 625 36
3.1. Introdução 36
3.2. Propriedades mecânicas 37
4. Mecânica da Fratura 39
4.1. Definição 39
4.1.1. Concentração de tensões 39
4.1.2. Modos de carregamento de trinca 40
4.2. Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) 41
4.2.1. Teoria de Griffith 41
4.2.2. Fator de Intensidade de Tensões 42
4.2.3. Restrição à deformação plástica 43
4.2.4. Equações básicas 44
4.3. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica 44
4.3.1. Crescimento de trinca no regime elasto-plástico 45
4.3.2. Avaliação experimental do CTOD pela norma BS 7448 46
4.3.2.1. Princípio 47
4.3.2.2. Testes 47
4.3.2.3. Equipamentos de Teste 48
4.3.2.3.1. Aplicação da Força 48
4.3.2.3.2. Instrumentação para medição de deslocamento 48
4.3.2.3.3. Acessórios de fixação dos corpos de prova (clevises) 49

4.3.2.3.4. Geometria dos corpos de prova 49
4.3.2.3.5. Pré-trincamento por fadiga 51
4.3.2.3.6. Determinação do CTOD 52
4.3.2.3.7. Validade do experimento 53
5. Metalografia 54
Preparação das amostras 54
6. Teste de Microdureza Vickers 56
Materiais e Métodos 58
1. Testes de Fratura 58
2. Medição do comprimento inicial da trinca 61
3. Preparação da amostra para metalografia e medição da microdureza 62
3.1. Lixamento 63
3.2. Polimento 63
3.3. Ataque do Inconel 63
3.4. Ataque do aço API X-52 63
3.5. Medição da Microdureza 63
Resultados e Discussão 65
1. Metalografia 65
1.1. Aço: 65
1.2. Inconel 66
1.3. Interface 67
2. Resultados dos testes de fratura 72
2.1. Medições do comprimento inicial da trinca 73
3. Resultados das medições de microdureza 76
Conclusões 78
Referências Bibliográficas 79

Lista de Figuras

Figura 1: Ilustração do princípio de junção por laminação (WAYDYANATH, 1960) 21
Figura 2: Arranjo típico dos componentes para cladeamento por explosão. (Adaptado de AWS WHB – 290) 23
Figura 3: Colisão entre as peças (Adaptado de AWS WHB – 290) 23
Figura 4: Processo de soldagem por eletrodos revestidos (Adaptado de AWS WHB). 26
Figura 5: Esquema da soldagem por processo TIG (Adaptado de AWS WHB)..... 27
Figura 6: Cladeamento por processo TIG (adaptado de BORTECH) 27
Figura 7: Equipamento para soldagem MIG/MAG (Adaptado de AWS WHB) 28
Figura 8: Processo de soldagem MIG/MAG (Adaptado de AWS WHB) 28
Figura 9: Perfil térmico da solda 29
Figura 10: Aplicações em vários setores da indústria: a) Reator nuclear em planta. b) Aplicação de cladeamento nas juntas de transição Alumínio X Aço para projetos navais. c) Trocador de calor em construção para indústria química, com espelho (disco) cladeado. d) Turbina de avião. e) Tanque de Fermentação para indústria alimentícia. f) Vagão especial para transporte de materiais corrosivos.(MultiClad, 2012) 31
Figura 11: Desenho esquemático da cadeia de produção de petróleo (SERRA) 32
Figura 12: a)Parte de choke cladeado (3rd Generation Engineering Ltd); b) Flange com Inconel soldado (Wilhem cladding) c) Tubo revestido por Inconel..... 34
Figura 13: Esquema de Fratura (FORTES, 2003)..... 40
Figura 14: Modos de Carregamento, adaptado de ASTM E1823 (2002)..... 41
Figura 15: Esquema de Fratura sob ação de uma tensão trativa (SANFORD,2003)... 42
Figura 16: Campo de Tensões na Ponta da Trinca, (FORTES, 2003) 43
Figura 17: Posicionamento da Trinca de maior Restrição(FORTES, 2003)..... 44
Figura 18: Esquema de crescimento da trinca em um material com comportamento elasto-plástico..... 45
Figura 19: Definição 1 de CTOD..... 46
Figura 20: Definição 2 de CTOD..... 46
Figura 21: Registros F-CMOD típicos de testes de CTOD em metais (ASTM E1290). 47
Figura 22: Clip-gage (CHUNG-YOUB, 2013) 48
Figura 23: Clevises e pinos utilizados nos testes..... 49
Figura 24: Geometria da amostra tipo compacta com entalhe reto (ASTM 1290) 50
Figura 25: Detalhes do entalhe e das facas portaclip (BS 7448)..... 50
Figura 26: Detalhes do formato do entalhe e da pré-trinca (BS 7448)..... 52
Figura 27: Método de obtenção do valor de Vp (BS 7448)..... 53

Figura 28: Pirâmide de diamante (Adaptado CIMM) 56
Figura 29: Tubo de aço API X-52 e amostra retirada para a confecção de CPs C(T).. 58
Figura 30: Corpos de prova C(T) usinados por eletroerosão a partir da amostra inferior. 59
Figura 31: Marcação para o pré-trincamento por fadiga..... 59
Figura 32: Corpo de prova com pré-trinca de fadiga 60
Figura 33: Aparato para ensaio de fratura..... 61
Figura 34 :Esquema de corte..... 62
Figura 35: Amostra cladeada de Aço API 5L X52 com Inconel 625 62
Figura 36: Pontos de análise da microdureza 64
Figura 38: Aço X52 com ampliação de: a)50 vezes, b)100 vezes, c)200 vezes , d)500 vezes e e)1000 vezes 65
Figura 39: Inconel 625 com ampliação de: a) 50 vezes, b) 100 vezes, c) 200 vezes, d) 500 vezes e e) 1000 vezes. 66
Figura 40: Carbetos no Inconel..... 67
Figura 41: Interface com ampliação de: a) 50 vezes, b) 100 vezes, c) 200 vezes, d) 500 vezes e e) 1000 vezes. 68
Figura 42: Estruturas nas proximidades da interface na ampliação de 50 vezes 68
Figura 43: Estruturas com ampliação de 500 vezes: 1. Zona Fundida. 2. ZTA. 3. Zona de aço base 69
Figura 44: Estrutura de Dendritos na ampliação de 1000 vezes 70
Figura 45: Fase Laves dentro de uma região interdendrítica (XU, 2013) 71
Figura 46: Corpos de Prova 5 e 6 já testados 72
Figura 47: Gráficos de Carga versus CMOD para todos os CP 73
Figura 48: Superfícies de fratura do CP2 (à esquerda lado do aço, à direita lado do Inconel)..... 74
Figura 49: Superfície de fratura do CP2 mostrando as linhas igualmente espaçadas, usadas para a medição de a_0..... 74
Figura 50: Perfil de microdureza do material na região da interface..... 76

Lista de Tabelas

Tabela 1: Principais tipos de soldas utilizadas para cladeamento 24
Tabela 2: Propriedades Mecânicas de alguns aços ARBL (Adaptado de BRASTUBO) 35
Tabela 3: Exemplo de composições básicas de aços de diferentes graus (Adaptado de BRASTUBO) 36
Tabela 4: Intervalo de composição química do Inconel 625, %.(VALENCIA, 1994) 36
Tabela 5: Propriedades mecânicas do Inconel 625 para várias formas e condições (VALENCIA, 1994) 38
Tabela 6: Propriedades mecânicas do Inconel 625 à temperatura ambiente (VALENCIA, 1994) 38
Tabela 7: Lista de Reagentes para ataque químico no aço (ROHDE, 2010) 55
Tabela 8: Propriedades mecânicas usadas nos cálculos de CTOD 58
Tabela 9: Resultados dos testes de CTOD 75
Tabela 10: Valores de microdureza do material 76

Lista de Símbolos

α	Constante adimensional.
ε_0	Deformação de referência.
γ_P	Energia associada à deformação plástica.
γ_s	Energia superficial.
δ	CTOD (Crack Tip Opening Displacement).
δ_c	CTOD de instabilidade para crescimento estável de trinca menor do que 0,2mm.
δ_m	CTOD de carga máxima.
δ_u	CTOD de instabilidade para crescimento estável de trinca maior ou igual a 0,2 mm.
ν	Coeficiente de Poisson.
ρ	Raio de curvatura da ponta da trinca.
Π	Energia potencial fornecida pela energia de deformação e forças externas.
σ_0	Tensão de referência.
σ_y	Tensão efetiva de escoamento.
σ_{ys}	Valor limite de escoamento.
σ_{ts}	Tensão limite de ruptura.
a	Comprimento da trinca.
a_0	Comprimento inicial de trinca.
a_p	Comprimento final da trinca.
b_0	Ligamento inicial da amostra.
B	Espessura da amostra.
C	Comprimento total da amostra.
CP	Corpo de prova.
dA	Aumento incremental da área da trinca.

E	Módulo de Elasticidade.
F	Força.
F_C	Força no início da propagação instável da trinca quando o evento é precedido de uma propagação estável menor que 0,2mm.
F_f	Força máxima de pré-trincamento.
F_m	Força máxima.
F_u	Força no início da propagação instável da trinca quando o evento é precedido de uma propagação estável maior ou igual a 0,2mm.
H	Altura da amostra.
K	Fator de intensidade de tensões.
K_{IC}	Tenacidade à fratura em estado plano de deformações.
K_C	Tenacidade à fratura em estado plano de tensões ou em regime intermediário.
N	Expoente de encruamento do material.
r_p	Tamanho da zona plástica.
V	Deslocamento da boca do entalhe.
V_c	Valor de V medido para F_c.
V_m	Valor de V medido para F_m.
V_u	Valor de V medido para F_u.
V_P	Componente plástica do deslocamento da boca do entalhe.
W	Comprimento da amostra.
Wt	Energia requerida para ocorrer o crescimento da trinca.
z	Distância das facas porta-clip até a borda da amostra.
CFC	Corpo de Faces Centradas

Lista Abreviações

API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
MAG	Metal Active Gas
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
MFLE	Mecânica da Fratura Linear-Elástica
MIG	Metal Inert Gas
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
SZW	Stretch Zone Width
TIG	Tungsten Inert Gas
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

Introdução

Com o avanço dos campos de Pré-Sal, apesar da boa qualidade do óleo em suas reservas, a indústria de petróleo se encontrou com grandes desafios a realização da exploração e produção desse óleo. Desafios esses referentes à logística, suprimento de material, gastos e etc., que tiveram de ser minuciosamente estudados a fim de evitar danos à economia desse setor energético, além de problemas ambientais futuros, como por exemplo, o método de tratar e administrar a altíssima quantidade de dióxido de carbono presente nesse óleo do Pré-Sal.

Em projetos de plataformas de petróleo e componentes que ligam os poços de exploração (componentes subsea), sempre foi muito necessário o estudo de seleção de materiais, principalmente devido à severidade dos meios em que estes materiais são operados, tanto no aspecto das propriedades mecânicas, devido às altas profundidades, pressões e meios envolvidos, quanto no aspecto da resistência à corrosão desses meios, devido à composição e características das misturas óleo-gás-água encontrada nos poços, aliadas a altas temperaturas necessárias para escoar esses fluidos. Porém, com o avanço dos campos do Pré-Sal, vem aumentando a importância de usar materiais de propriedades cada vez mais específicas, sem elevar muito os custos com esses.

O uso de materiais cladeados é um passo muito importante na direção de maximizar a produção, minimizando os riscos e custos, direção a qual o setor de petróleo e gás tem procurado atingir em todos os seus empreendimentos. No caso desse tipo de configuração, tem-se a junção de dois materiais de propriedades interessantes à aplicação do equipamento, a fim de um complementar as propriedades do outro, evitando um aumento brusco dos custos que viria junto ao uso de um equipamento feito de só um material. No caso dos equipamentos mais utilizados na indústria de petróleo, existem bombas, árvores de natal, manifolds, cabeças de poço, tubos entre outros, que podem ser revestidos interna ou externamente por ligas de níquel resistentes à corrosão.

Em contrapartida a todas as vantagens que um material cladeado possa oferecer, existem preocupações quanto a sua interface, pois esta é uma região de contato entre os dois materiais que pode desenvolver propriedades bastante diferentes de seus materiais de base, e isso pode vir a se tornar um grande problema.

A interface de um material cladeado pode desenvolver fragilidade, baixa tenacidade à fratura, descolamento. Esses problemas podem se tornar perigosos durante o uso

desses equipamentos, por isso devem ser estudados cautelosamente, a fim de prever e possivelmente, mitigar tais problemas.

No caso do presente trabalho, será feita uma análise das propriedades de tenacidade à fratura e microdureza de todo o bi-material, focando na parte da interface. Os resultados dos diversos testes que serão feitos e da análise serão estudados juntamente a fim de melhor entender a microestrutura desse material, e levantar informações de como a interface influencia nas propriedades de todo material.

Objetivo

O objetivo desse trabalho é a análise completa e metódica de algumas propriedades mecânicas da interface entre o aço base API X-52 e o Inconel 625 depositado através de solda, em específico, a microdureza e a tenacidade à fratura, a fim de verificar se os valores de tenacidade estão dentro de limites aceitáveis.

Motivação

Frente ao avanço das novas tecnologias, e o uso mais intenso de aços cladeados em equipamentos subsea, é de grande importância a medição de algumas propriedades mais críticas desses bi-materiais, como a dureza e tenacidade à fratura. Hoje em dia, não há nenhuma norma para a medição específica da tenacidade à fratura na interface entre cladeamento e metal base e valores de tenacidade nessa região dificilmente são reportados na literatura. Dessa forma, práticas industriais para a aceitação ou não de defeitos de fabricação na interface não estão baseadas em metodologias da mecânica da fratura e sim em “boas práticas”. Dessa forma, a principal motivação desse trabalho foi a avaliação da tenacidade à fratura na região da interface metal-recobrimento pela falta de informações quanto a esse assunto na literatura.

Revisão Bibliográfica

1. Cladeamento

1.1. Definição

O cladeamento, em inglês *overlay* ou *cladding,* é a deposição de um material dissimilar na superfície de um material base chamado de substrato. Os dois materiais assim unidos têm suas propriedades mecânicas diferentes: módulo de elasticidade, ductilidade, tenacidade, entre outras. O material depositado tem o papel de revestimento e confere algumas características ao componente que não seriam possíveis utilizando somente o material base. Dentre as aplicações mais comuns do cladeamento na indústria estão os recobrimentos para aumentar a dureza superficial das peças e aqueles para aumentar a resistência à corrosão dos componentes. A deposicao desse recobrimento, conhecido pelo termo cladeamento, abrange uma ampla gama de processos, tais como co-laminação, explosão ou soldagem (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983).

1.2. Histórico

O cladeamento assim definido foi originalmente desenvolvido por Strachan & Henshaw, Bristol (MARSHALL, 2007), companhia inglesa de defesa e engenharia nuclear criada in 1879. A técnica surgiu para a Defesa Marinha, onde os equipamentos deviam trabalhar em condições severas da água do mar com o mínimo de manutenção, a profundidades elevadas e sendo capazes de suportar extremas pressões e choques. Várias partes do casco dos navios submarinos, tais como as vedações das portas, eixos, dobradiças e as superfícies expostas, foram cladeadas (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983). Mais recentemente, o cladeamento está sendo usado em várias outras indústrias.

1.3. Técnicas de cladeamento

Existem várias formas de se obter um material cladeado. Os métodos podem ser divididos em dois grandes grupos: os métodos com união mecânica e com união metalúrgica.

1.3.1. Cladeamento por processos mecânicos

Estes são os processos durante os quais não ocorre fusão entre o substrato e o material de revestimento de forma a não se ocorrer mudanças metalúrgicas nas peças. Também não há formação da Zona Termicamente Afetada na interface, que é a região da solda que não se fundiu durante a soldagem, porém teve sua microestrutura e propriedades alteradas calor induzido pela soldagem. Há uma simples aderência mecânica entre os dois materiais. Entre estes processos, podemos ressaltar por exemplo os processos de co-laminação e *pipe-in-pipe*.

1.3.1.1. Cladeamento por co-laminação

O cladeamento por laminação (ou co-laminação) é um processo realizado no estado sólido e produz uma união de peças por aquecimento e deformação superficial pela aplicação de pressão através de rolos laminadores. As peças envolvidas no processo devem apresentar uma ductilidade adequada para permitir uma deformação plástica localizada sem apresentar fratura. A laminação pode ser feita a quente ou a frio, sendo a técnica a frio executada à temperatura ambiente. A laminação causa junção por aderência, isto faz com que haja necessidade de limpar cuidadosamente a superfícies das peças (VAIDYANATH, 1960). A figura a seguir mostra um esquema de junção por laminação:

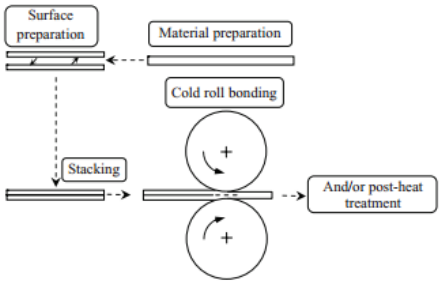


Figura 1: Ilustração do princípio de junção por laminação (WAYDYANATH, 1960)

Os parâmetros que afetam a força de adesão são:

- A preparação das superfícies e condição de deformação
- O tempo decorrido entre a preparação da superfície e a laminação
- O tempo durante o qual tem a pressão normal está aplicada

- A pressão exercida pelos rolos laminadores
- A espessura das peças a serem juntadas

Os rolos laminadores são capazes de produzir a elevada tensão interfacial requerida para induzir a junção entre os componentes. Desta forma, o processo descrito na figura 1 é repetido até que atingir a deformação adequada que produz a junção desejada. Durante a laminação, a espessura dos materiais é bastante reduzida podendo ir até 50% de redução após o primeiro passe nos rolos laminadores. Esta redução gera uma grande quantidade de calor. A junção entre os materiais se dá graças afinidade mecânica e atômica da interface destes (WRIGHT, 1968). Geralmente, para aumentar a força de adesão entre os materiais, é feito logo depois da laminação um recozimento, tratamento térmico que promove certa ligação metalúrgica por difusão, a qual é mais forte.

1.3.1.2. Cladeamento por explosão

O cladeamento por explosão é um processo em estado sólido, que produz uma junção pelo impacto em alta velocidade entre chapas do metal de base e do recobrimento, como resultado de uma detonação controlada. A explosão acelera o material de revestimento a uma velocidade que produz uma adesão metálica entre ambos os materiais após a colisão. A junção é produzida em uma fração de segundo e sem adição de metal. É essencialmente um processo a temperatura ambiente em que não ocorre um grande aquecimento das peças em trabalho. As superfícies de contato, entretanto, são aquecidas pela energia de colisão, e a junção é conseguida pelo fluxo plástico do metal em suas superfícies.

A junção é executada progressivamente junto com a explosão e as forças criadas avançam de uma extremidade da junta a outra. Este procedimento é normalmente executado ao ar livre, mas também pode ser executada em outras atmosferas ou a vácuo quando as circunstancias o exigirem. Ele é muito executado em seções relativamente grandes em área, porém existem aplicações com pequenas superfícies com sucesso também.

Um arranjo típico dos componentes para cladeamento por explosão é mostrado na figura a seguir:

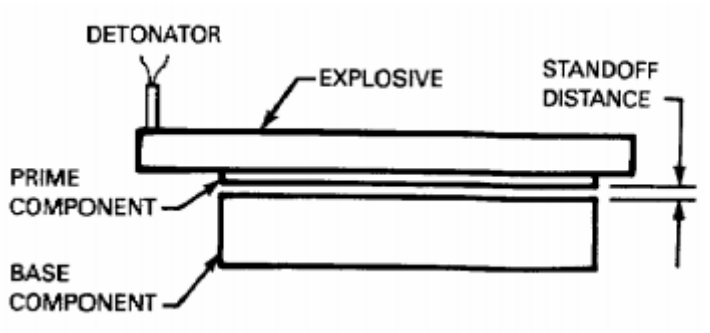


Figura 2: Arranjo típico dos componentes para cladeamento por explosão. (Adaptado de AWS WHB – 290)

Existem basicamente três componentes: o material base, o material de revestimento e o explosivo. O material base permanece estacionário enquanto o de revestimento é juntado a ele. A força que a explosão deve exercer depende das características dos dois materiais e da distância de afastamento. A detonação é feita progressivamente e de forma uniforme através da superfície do material de revestimento. A junção se dá pela intensa pressão da peça de revestimento sobre o substrato, oriunda da explosão em cada ponto de colisão. A figura a seguir ilustra como ocorre a colisão entre as 2 peças.

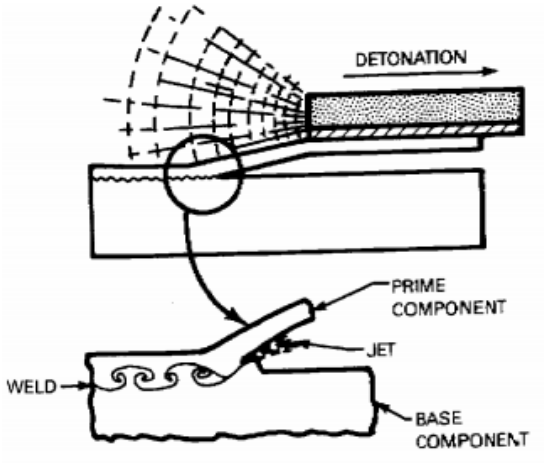


Figura 3: Colisão entre as peças (Adaptado de AWS WHB – 290)

Os parâmetros que entram em linha de conta são a velocidade de detonação, a taxa de detonação, e o ângulo de impacto.

Apesar da alta temperatura gerada pela explosão, não há tempo suficiente para ocorrer transferência de calor entre os materiais. O resultado final é uma junção peça-

peça sem fusão nem difusão. A resistência da interface é geralmente maior do que a do material menos resistente (NOBILI). Este processo é geralmente usado para chapas, podendo ser usado também para tubos, dependendo do diâmetro e da espessura da parede. Ele não é adequado para peças de formas complexas, e quando requerido para tais peças, a junção se faz em chapas e depois se faz a usinagem na forma que se deseja.

1.3.2. Cladeamento por soldagem

No que diz respeito aos processos por soldagem, o cladeamento é feito pela fusão do material de revestimento sobre o substrato, levando à mudança das propriedades mecânicas das regiões ao redor da junção. A interface é constituída de um material diferente do ponto de vista de propriedades tanto do material de revestimento quanto do material base. A alta temperatura aplicada, que permite a fusão dos materiais, também cria uma difusão de calor através o substrato até certa profundidade, ocasionando a chamada Zona Termicamente Afetada.

No passado se utilizava bastante o processo de soldagem por explosão. Atualmente, tal processo de produção em ambientes industriais está baseado em modernos processos a arcos elétricos, principalmente através do processo TIG (MACHADO, 1996). A tabela a seguir apresente os principais tipos de soldagem de aços API com Inconel:

Tabela 1: Principais tipos de soldas utilizadas para cladeamento

Processo	Fonte de calor	Agente protetor	Características
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Argônio, Hélio, Argônio+O_2 ou Argônio+CO_2	Automática/mecânica, ou semi-automática. O arame é sólido
Soldagem TIG	Arco elétrico	Argônio, Hélio ou mistura deles	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.

1.3.2.1. Soldagem

Há um grande número de métodos de soldagem que podem ser separados em subgrupos, por exemplo, de acordo com o tipo de fonte de energia usada para fundir as peças. Dentre estes, os processos que têm como fonte arco elétrico são os de maior importância industrial. O arco é uma descarga elétrica em um meio gasoso parcialmente ionizado.

1.3.2.1.1. Soldagem a arco

O arco elétrico é mantido entre um eletrodo cilíndrico e o substrato de forma a fundir o eletrodo nos casos de eletrodos consumíveis, e somente aquecer o substrato no caso de eletrodos não consumíveis. A quantidade de calor fornecida e, portanto, as dimensões e forma do cordão da solda, dependem da corrente e tensões elétricas fornecidas ao arco e da velocidade da soldagem, isto é, a velocidade com que o arco é deslocado ao longo do substrato.(AMERICAN SOCIETY FOR METALS,1983)

1.3.2.1.1.1. Soldagem com eletrodos revestidos

Em inglês *Shielded Metal Arc Welding – SMAW* é um processo que usa como fonte de calor para fundição do material arco elétrico estabelecido entre a ponta do eletrodo o qual é revestido e a superfície do material base.

Os eletrodos são constituídos de um núcleo chamado de alma, que conduz a corrente elétrica e serve como material de adição, uma vez fundido; e de um revestimento. O revestimento serve a gerar escoria e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada e também estabilizam o arco. Eletrodos para a soldagem são em geral especificados com base nas propriedades mecânicas do metal depositado, no tipo de revestimento e em suas características operacionais. Os revestimentos variam de um eletrodo para outro, mas possuem algumas características semelhantes, tais como: isolante, ajuda na deposição do material, possui elementos de ligas que influenciam a composição química e características metalúrgica da solda. Os ingredientes que devem formar o revestimento são triturados, dosados e misturados até a obtenção de uma massa homogênea. Esta massa é em seguida conformada sobre a alma do eletrodo. Tem uma parte do eletrodo que não é revestida para permitir o contato com o porta-eletrodo. A Figura 4 apresenta um esquema do processo. (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983)

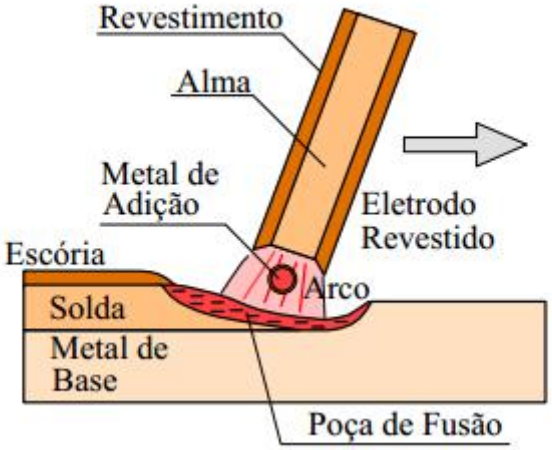


Figura 4: Processo de soldagem por eletrodos revestidos (Adaptado de AWS WHB).

1.3.2.1.1.2. Soldagem TIG

TIG - *Tungsten Inert Gas*, é um processo de soldagem a arco protegido por gás inerte. O arco elétrico é formado entre a peça metálica e um eletrodo de Tungstênio não consumível. Esse processo é também conhecido como GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding*. A proteção da região da solda é feita por uma gás inerte, em geral argônio ou Hélio. A solda, nesse caso, pode ser feita com ou sem metal de adição. O processo TIG é mais usado para solda de alumínio, magnésio e suas ligas, assim como para aço inoxidável e metais especiais como titânio e molibdênio, sendo muito utilizado para processos de cladeamento. Este processo tem a vantagem de não precisar de limpeza ou após a solda, por não ter escória gerada normalmente pelos revestimentos. Ele produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento. A seguir são apresentadas figuras mostrando um esquema do processo de soldagem TIG, assim como uma imagem do cladeamento industrial pelo processo. (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983)

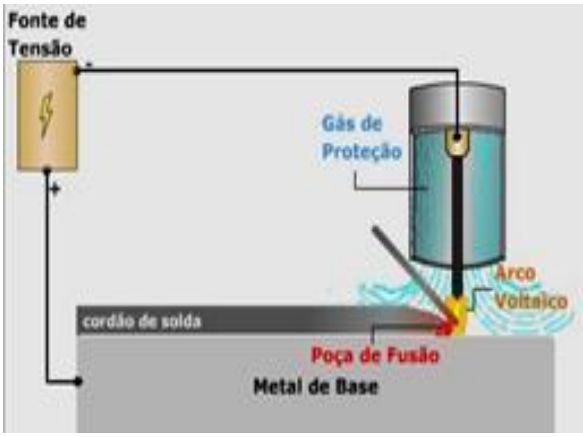


Figura 5: Esquema da soldagem por processo TIG (Adaptado de AWS WHB)

Figura 6: Cladeamento por processo TIG (adaptado de BORTECH)

1.3.2.1.1.3. Soldagem MIG/MAG

Em inglês *Gas Metal Arc Welding* GMAW, este é um processo que permite soldar duas peças através de um arco elétrico com eletrodo consumível e contínuo, sob proteção gasosa. O eletrodo usado apresenta-se em forma de arame maciço, alimentado automática e continuamente, o que permite elevadas densidades de corrente de eletrodo e portanto elevadas taxas de deposição. A proteção gasosa é feita por um gás inerte MIG ou um gás ativo MAG, daí o nome MIG/MAG. Vale ressaltar que o eletrodo neste processo não tem revestimento, o qual não é necessário devido à presença dos gases de proteção. Aqui também, os gases inertes MIG tais como Argônio e Hélio têm por objetivo proteger a solda do ar atmosférico, enquanto que os gases ativos MAG tais como Oxigênio e Dióxido de Carbono influenciam na soldagem. É usada uma tocha para conduzir a corrente elétrica através de um cabo que passa por dentro como mostrado na figura a seguir. (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983)

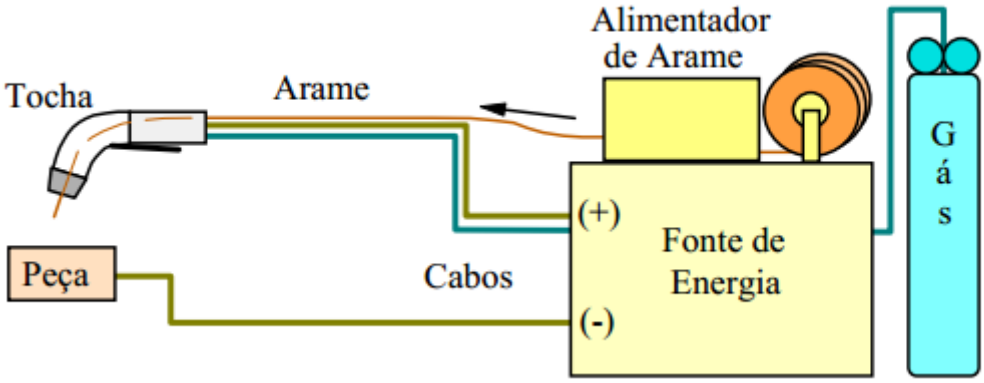


Figura 7: Equipamento para soldagem MIG/MAG (Adaptado de AWS WHB)

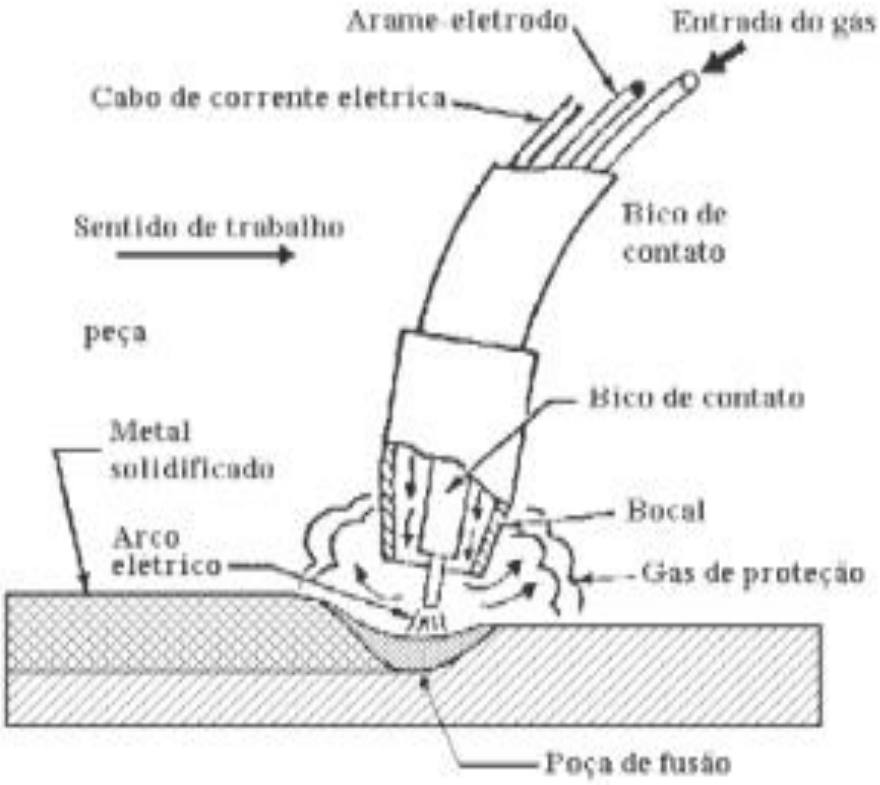


Figura 8: Processo de soldagem MIG/MAG (Adaptado de AWS WHB)

1.3.2.2. Zona Termicamente Afetada

É a região do material base ao redor da solda, que não foi soldada, mas cuja microestrutura se modificou devida a influência da temperatura da própria solda. A ZTA depende de:

- Perfil térmico da solda isto é a variação do material em função do seu cumprimento. A figura a seguir ilustra um perfil térmico de material base:

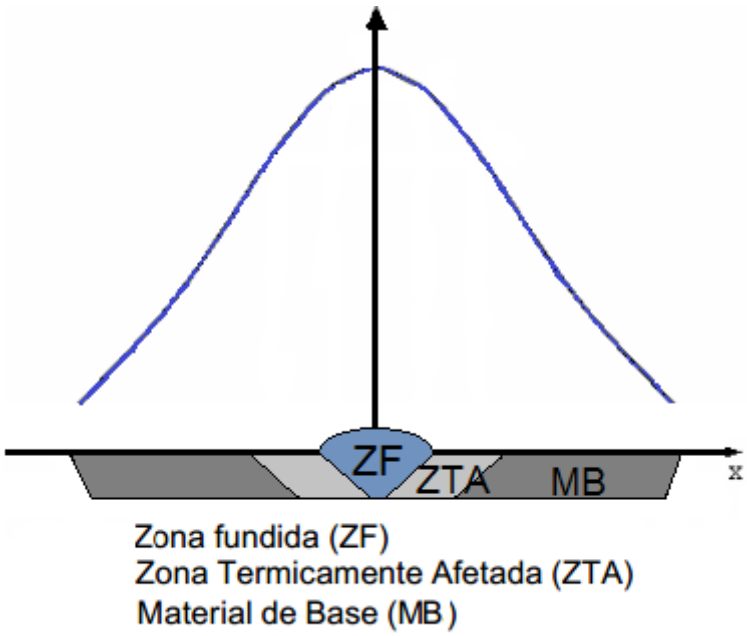


Figura 9: Perfil térmico da solda

- Ciclo térmico na soldagem que é a variação da temperatura de um ponto do material em função do tempo
- Condutividade térmica do material que é a capacidade do material a se deixar atravessar por calor

Os processos metalúrgicos contam principalmente com as técnicas de soldagem. O material fundido em geral tende a reagir com os gases da atmosfera e usa-se então algum meio de proteção para mitigar estas reações.

1.4. Aplicações industriais do cladeamento

Geralmente, o cladeamento é usado industrialmente nas seguintes aplicações:

- Proteção preventiva de regiões particulares de uma peça, ou da peça inteira, para resistir contra condições de trabalho severas. Tais condições podem ser um meio altamente corrosivo, e com potencial de desgaste de vários tipos: abrasivo, erosão, incrustação, etc.. Os ambientes de trabalho ainda podem ser de altas pressões e temperatura que necessitam de materiais particularmente resistentes.
- Reparo de peças que apresentam, após certo tempo de trabalho, sinais de desgaste ou de dano. Para executar o reparo de equipamentos, é bastante inconveniente ou impossível desmontar as peças afetadas. Eles, muitas vezes, devem ser reparados nas suas posições de montagem, o que significa soldar sob restritas condições de acesso em todas as posições. Nestes casos, muitos problemas podem ser resolvidos pelo cladeamento, feito com equipamento móvel.
- Deposição de camadas de amanteigamento para permitir a união entre materiais dissimilares. Esta é uma aplicação especial porque, ao invés de usar o equipamento totalmente protegido contra abrasão, ou remover o material danificado, pode se fazer o amanteigamento. O processo de amanteigamento é usado para preparar uma junção intermetálica entre dois ou vários ligas metálicas diferentes. As camadas de amanteigamento exigem o mesmo nível de qualidade que os cordões de solda. Em vários casos, ele só pode ser feito pelo processo de soldagem TIG.

1.4.1. Materiais empregados em cladeamento industrial

O cladeamento oferece flexibilidade uma vez que pode ser aplicado a vários materiais presentes no mercado. Os mais usados são as ligas ferrosas (aços), ligas de níquel e alumínio. Ligas de cobre, de manganês, de cobalto e de titânio também são usadas, em menor grau. Mas, a lista não se restringe a metais. Cerâmicas e materiais compósitos são utilizados nas aplicações de cladeamento (DAVIS, 2004).

1.4.2. Aplicações industriais

Nos últimos anos, o cladeamento vem sendo usado em diversas industrias como as indústrias nuclear, naval, elétrica, química, aeronáutica, de mineração e de transporte. As indústrias de processamento de alimentos e de fertilizantes estão cada vez mais se

aproveitando das vantagens que apresenta a técnica de cladeamento. A seguir são apresentadas figuras para ilustrar aplicações típicas nessas indústrias.

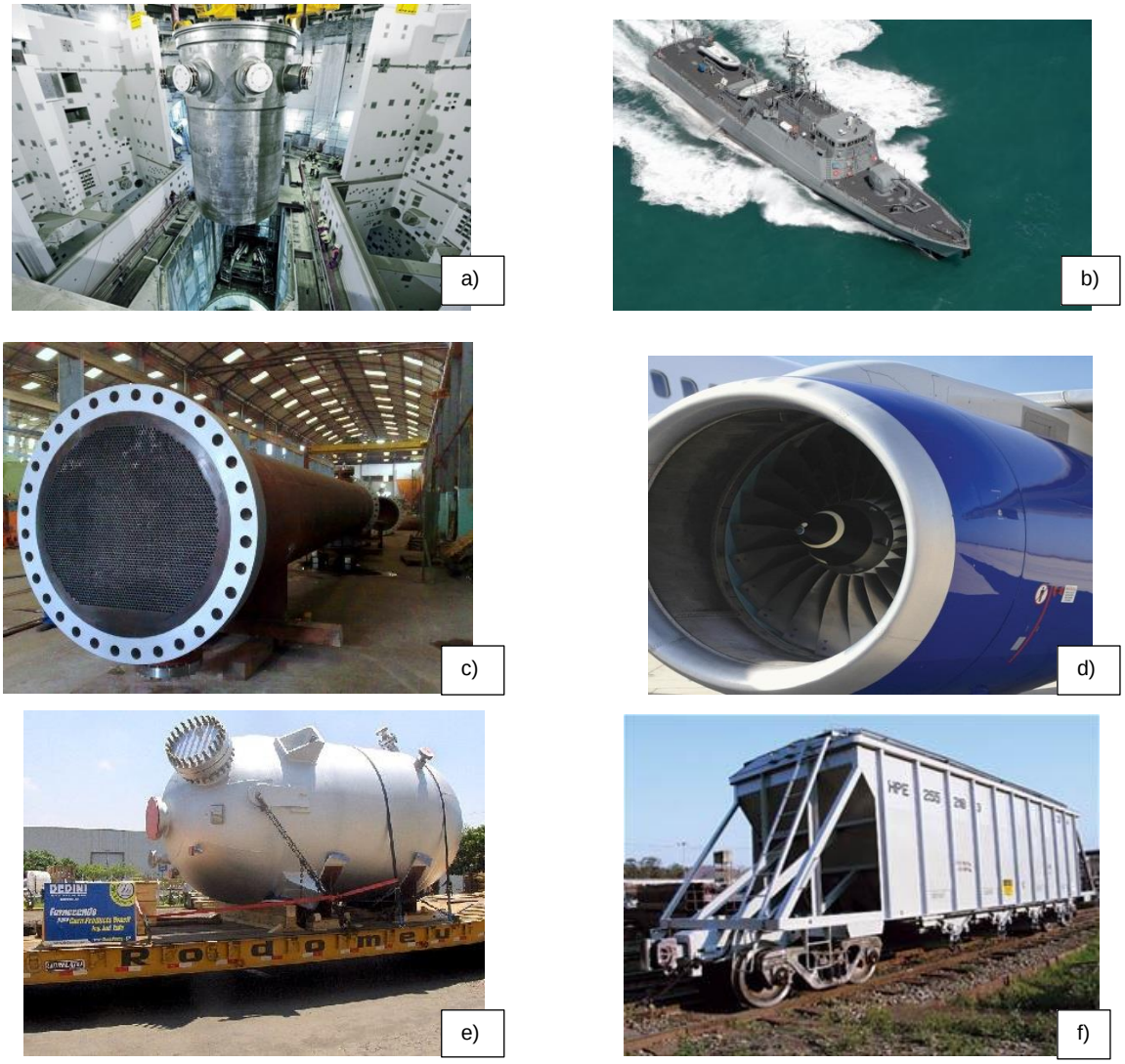


Figura 10: Aplicações em vários setores da indústria: a) Reator nuclear em planta. b) Aplicação de cladeamento nas juntas de transição Alumínio X Aço para projetos navais. c) Trocador de calor em construção para indústria química, com espelho (disco) cladeado. d) Turbina de avião. e) Tanque de Fermentação para indústria alimentícia. f) Vagão especial para transporte de materiais corrosivos.(MultiClad, 2012)

A indústria petrolífera, que seja upstream, isto é, exploração e produção de petróleo, ou downstream, que inclui transporte, refino e comercialização, não derroga a regra. Aqui também tem várias aplicações para cladeamento, já que em geral as condições de trabalho são bastante severas, em meios a desertos, locais muito secos, e glaciais.

1.5. Importância do cladeamento industrial

Até a utilização do cladeamento nas indústrias de extração e processamento de petróleo, os componentes estruturais que exigiam resistência à corrosão e/ou a altas temperaturas eram fabricados em aços inoxidáveis duplex e aços inoxidáveis austeníticos. Tais componentes eram os em contato direto com o petróleo produzido durante todas as fases de exploração e produção. O petróleo encontra-se em formações geológicas chamadas de reservatório. Os reservatórios podem ter profundidades de mais de 2000m e lâmina d'água desta ordem. Com as novas tecnologias, as reservas encontradas são cada vez mais profundas, e o problema de corrosão aumenta proporcionalmente.

A cadeia de produção de petróleo começa com a perfuração e completação de poços. A completação consiste no assentamento de equipamentos e revestimento necessário para o equilíbrio do poço e o escoamento do petróleo entre outros. Através do poço revestido, o petróleo escoa até o leito marinho como mostrado na figura abaixo. Os equipamentos envolvidos além do revestimento do poço são as diversas válvulas de segurança, o choque, a ANM que ficam na cabeça do poço e que permitem controlar o fluxo no poço. Este petróleo traz consigo alto teor de contaminantes, tais que sulfetos, CO_2, e cloretos. Isso, adicionado às altas temperaturas, leva a problemas sérios de corrosão nos equipamentos.

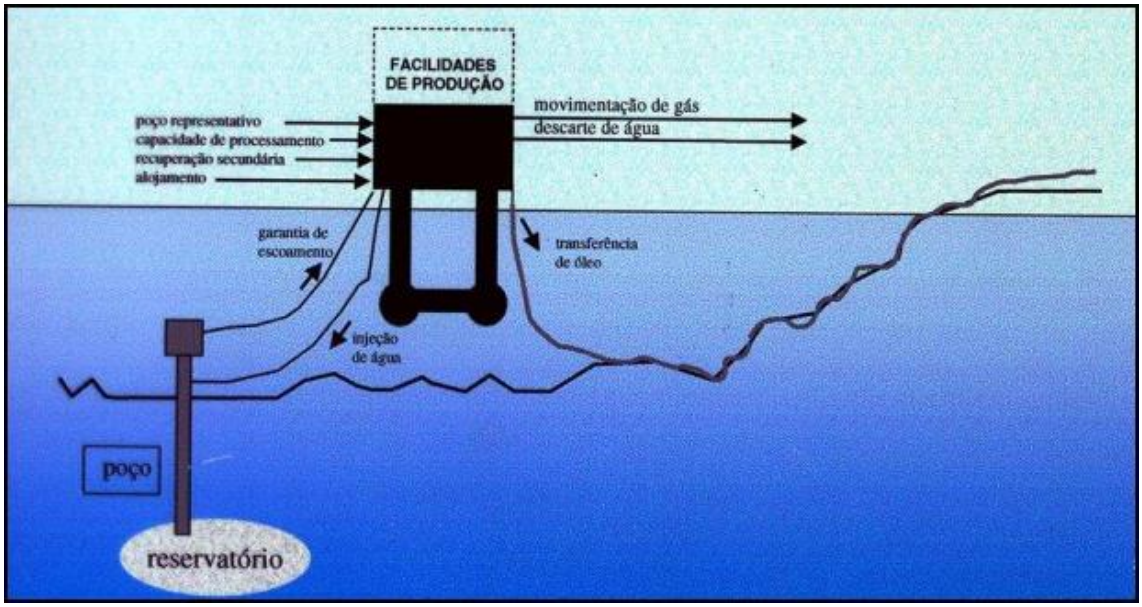


Figura 11: Desenho esquemático da cadeia de produção de petróleo (SERRA)

No leito marinho, o petróleo é geralmente escoado pelos flowlines (tubulações) até um manifold que permite recolher o petróleo oriundo de vários poços e mandá-lo para a superfície através de *risers* e pela ação de bombas. Na superfície, ele é tratado na planta de processamento, constituída de vasos, tanques, compressores, separadores, trocadores de calor e linhas entre outros. O tratamento consiste na separação da água, gás e óleo, para futuro encaminhamento para terra. Este encaminhamento pode ser por gasoduto, oleoduto, ou navios aliviadores.

Assim, vários são os equipamentos na indústria de petróleo que precisam de proteção especial para corrosão, além de temperatura (devido à profundidade) e esforços externos tais como a pressão. Dada esta quantidade elevada de equipamentos, além de grandes comprimentos das linhas que se estendem sobre vários quilômetros, se torna cada vez mais caro o uso do aço inoxidável duplex. O cladeamento está ganhando espaço a nível mundial como uma forma alternativa ao aço inox, uma vez que restringe a utilização de materiais nobres somente às regiões que demandam propriedades específicas. A aplicação mais difundida do cladeamento é nas superfícies dos dutos e às regiões que ficam em contato com o óleo. Assim, por exemplo, ao invés de usar um flowline de 500m de comprimento inteiramente feito de aço inoxidável, recorre se a um cladeamento por uma liga de níquel de uma tubulação de aço API de alta resistência. Essa liga de níquel revestida no interior da tubulação garante uma boa resistência à corrosão da tubulação, enquanto o custo global é menor. O cladeamento é frequentemente feito com Inconel, depositado sobre o metal de base pelo processo TIG porque proporciona ao operador mais controle sobre a solda do que outros métodos. As figuras a seguir ilustram alguns exemplos de materiais cladeados com Inconel para uso na indústria de petróleo.

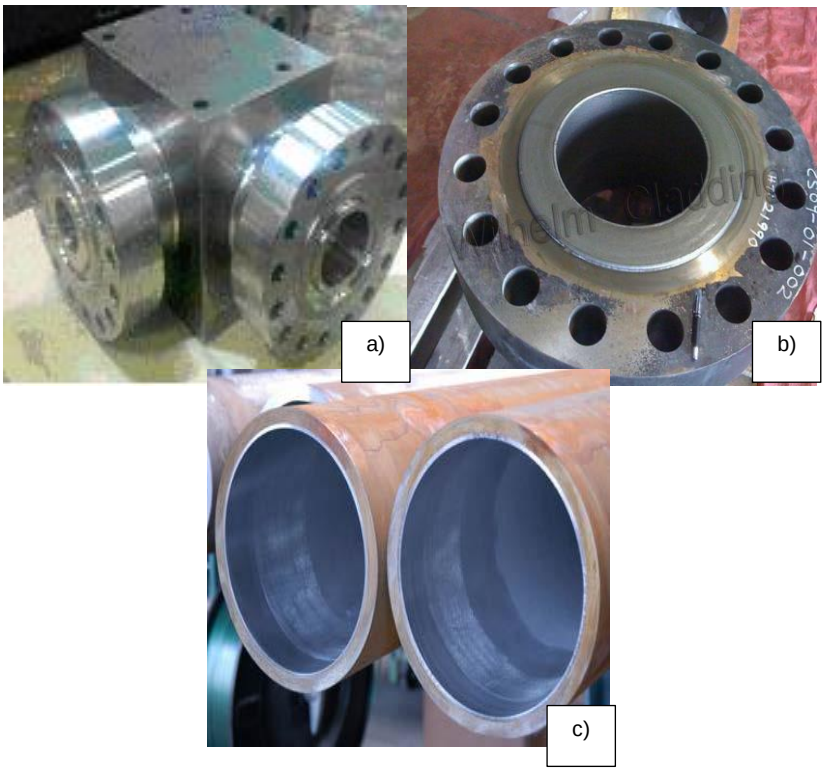


Figura 12: a)Parte de choke cladeado (3rd Generation Engineering Ltd); b) Flange com Inconel soldado (Wilhem cladding) c) Tubo revestido por Inconel.

Metais cladeados, com sua capacidade rara de combinar praticamente qualquer necessidade de um projeto, oferecem à engenharia de projetos alguns benefícios altamente desejáveis. Eles não só permitem que expandir as possibilidades durante a etapa de projeto, mas também podem fornecer melhoras significativas no desempenho de produtos e na sua facilidade de fabricação. Todas essas características contribuem, em muitos casos, para uma redução acentuada nos custos do produto.

2. Aço API 5L X-52

2.1. Introdução

Os aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) são aços microligados que apresentam microestrutura típica de ferrita-perlita. Sua composição química é similar à de um aço baixo carbono, mas com pequenas adições de elementos de liga, tais como Nb, Ti ou V. Esses elementos, mesmo em pequenos teores, provocam um aumento nas propriedades mecânicas, principalmente na resistência e na tenacidade à fratura (FORTES, 2004). Estes aços são processados através de laminação controlada, seguida em muitos casos de resfriamento acelerado.

Tubos API 5L são tubos de aço fornecidos com ou sem costura, para utilização em oleodutos, gasodutos, minerodutos, processos e outras aplicações industriais que necessitam de materiais com alta resistência mecânica, principalmente na área petrolífera. O elevado grau de desenvolvimento dos aços microligados para esta área, na maioria dos casos da classe API de graus mais elevados, possibilitou a obtenção de aços com características de boa soldabilidade, resistência mecânica e alta tenacidade à fratura, tornando-os ideais para a fabricação de dutos. (HIPPERT, 2003).

Em geral, os tubos API são classificados conforme a denominação 5L (API 5L - *Specification for Line Pipe*). Segundo a classe API 5L, estes são sub-classificados segundo a sua composição química e resistência mecânica, que variam desde o API 5L A25 até o API 5L X80. Os dois últimos dígitos especificam valores mínimos de limite de escoamento do material em ksi. Assim, os aços API 5L X80 apresentam valor mínimo de tensão limite de escoamento mínimo de 80 ksi (~550 MPa).

2.2. Propriedades mecânicas

Na Tabela X sao apresentadas as propriedades mecânicas de alguns aços API.

Tabela 2: Propriedades Mecânicas de alguns aços ARBL (Adaptado de BRASTUBO)

Grau	Limite de Escoamento (min)		Limite de Resistência (máx)	
	psi	MPa	psi	MPa
X52	52000	359	66000	455
X70	70000	438	82000	565
X80	80000	552	90000	621

Nos aços API, a composição química de elementos de liga é bastante flexível, podendo ser alterada conforme o acordo pré-definido entre cliente e fornecedor. Na Tabela 3 é dado um exemplo de composições de elementos dentro do aço API 5L X52, fazendo uma comparação com alguns aços de graus diferentes:

Tabela 3: Exemplo de composições básicas de aços de diferentes graus (Adaptado de BRASTUBO)

	Elemento										
Grau	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	Cu	Ti	Nb	Al
X52	0,206	1,257	0,293	0,014	0,017	0,006	0,009	0,011	0,001	<0,03	0,034
X70	0,125	1,68	0,27	0,051	0,04	0,021	0,005	0,045	0,003	0,03	0,038
X80	0,059	1,97	0,315	0,024	0,23	0,315	0,002	0,022	0,022	0,046	0,037

3. Inconel 625

3.1. Introdução

O Inconel 625 é uma liga de níquel com estrutura CFC, muito usado por sua elevada resistência mecânica e resistência à corrosão. A temperatura de trabalho deste material pode atingir quase 1000°C. A composição química típica do Inconel 625 está apresentada na Tabela 4:

Tabela 4: Intervalo de composição química do Inconel 625, %.(VALENCIA, 1994)

Níquel	58,0 mín.
Cromo	20,0-23,0
Ferro	5,0 máx.
Molibdênio	8,0-10,0
Nióbio	3,15-4,15
Carbono	0,10 máx.
Manganês	0,50 máx.

Silício	0,50 máx.
Fosforo	0,015 máx.
Enxofre	0,015 máx.
Alumínio	0,40 máx.
Titânio	0,40 máx.
Cobalto	1,0 máx.

A resistência mecânica do Inconel 625 provém do efeito endurecedor do Molibdênio e do Nióbio na matriz de Níquel-Cromo, que conferem resistência sem necessidade de tratamento térmico. Esta combinação de elementos é responsável também pela resistência a uma ampla gama de meios corrosivos de severidade incomum, assim como a resistência a efeitos de altas temperaturas tais como oxidação e carburização.

As propriedades que fazem do Inconel 625 uma excelente escolha para aplicações submarinas são boa resistência a ataques locais, por exemplo, corrosão por pits e corrosão em frestas, vida a fatiga elevada inclusive a alta temperatura, e elevada resistência à tração. Ele é empregado para revestimentos de dutos, cabos, transdutores de controle submarino, motores de propulsão, elementos de fixação, molas e dispositivo de flexão, entre outras aplicações. Em aplicação química, a capacidade do Inconel 625 de trabalhar em altas temperaturas e pressões, conjuntamente com a sua excelente resistência à corrosão em um grande número de ambientes, permite o seu uso em tanques, colunas de destilação, trocadores de calor e válvulas.

3.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do Inconel 625 estão resumidas nas Tabelas 5 e 6. A Tabela 5 indica as propriedades dependendo da forma da peça de Inconel 625 e do tratamento que foi dado. Como já mencionado, o Inconel 625 apresenta uma muito boa resistência à tração. Ele possui igualmente boa ductilidade principalmente a temperaturas moderadas, o que permite uma facilidade à usinagem e maleabilidade.

O Inconel 625 pode ser soldado com processos convencionais de soldagem, sendo o mais usado TIG. Para tal, usa-se como metal de adição *o Inconel Filler Metal 625* que é um produto de Níquel-Cromo-Molibdênio especialmente desenvolvido para soldar o Inconel 625 consigo e com outros materiais. O eletrodo usado nos processos de

soldagem com eletrodos sendo revestidos ou não, consumíveis ou não, é o *Inconel Welding Electrode* 112 que apresenta os mesmos elementos químicos que o metal de adição.

Tabela 5: Propriedades mecânicas do Inconel 625 para várias formas e condições (VALENCIA, 1994).

Condição	Resistência a tração, MPa	Limite de Escoamento, MPa	Alongamento %	Redução de área %	Dureza Brinell
Haste, barra e chapa					
Laminado	827-1103	414-758	60-30	60-40	175-240
Recozido	827-1034	414-655	60-30	60-40	145-220
Solubilizado / Envelhecido	724-896	290-414	65-40	90-60	116-194
Arame					
Recozido	827-1034	414-621	55-30	--	145-240
Tubo					
Recozido	827-965	414-517	55-30	--	--
Solubilizado / Envelhecido	689-827	276-414	60-40	--	--

Tabela 6: Propriedades mecânicas do Inconel 625 à temperatura ambiente (VALENCIA, 1994)

Módulo de Elasticidade, GPa		Coeficiente de Poisson	
Recozido	Solubilizado	Recozido	Solubilizado
207,5	204,8	0,278	0,312

4. Mecânica da Fratura

4.1. Definição

Todas as estruturas industriais possuem descontinuidades e defeitos tais como trincas e poros. Em alguns casos esses defeitos, em muitos casos advindos da própria fabricação do material ou da montagem da estrutura, tendem a se agravar durante a vida útil da estrutura. Esses defeitos, em especial as trincas, podem ser muito problemáticos quando o componente é sujeito a grandes solicitações mecânicas durante sua atividade funcional (FORTES, 2003).

A mecânica da fratura é uma disciplina da engenharia que estuda os processos que levam à propagação de trincas, provocando fratura. Ou seja, é uma metodologia aplicável na análise do comportamento de estruturas que contem trincas, quando submetidas a solicitações mecânicas. Adicionalmente, a mecânica da fratura permite caracterizar experimentalmente a resistência do material ao crescimento de trincas, isto é, a tenacidade à fratura do material, que é uma propriedade mecânica.

O estudo da mecânica da fratura pode ser dividido em dois grandes grupos, dependendo do comportamento mecânico do material até o momento da fratura. Assim, existem a mecânica da fratura linear elástica, ou MFLE, e a mecânica da fratura elasto-plástica, ou MFEP, que serão vistas brevemente mais adiante.

Existem métodos padronizados para a determinação da tenacidade à fratura sob condições de deformação plana (K_{Ic}), que são válidos quando o tamanho da zona plástica à frente da ponta da trinca é pequeno, e é utilizada, neste caso, a MFLE. No entanto, para materiais que apresentam uma parcela significativa de plasticidade antes do início do crescimento da trinca, os métodos K_{Ic} não são mais aplicáveis. Sob tais situações, a MFEP utiliza diversos métodos para lidar com relações não lineares entre o campo de tensões e o de deformações, como, por exemplo, o CTOD e a integral J.

No presente trabalho a tenacidade da região da interface metal-clad será avaliada mediante o método CTOD, que baseia-se na medição do deslocamento da abertura da ponta da trinca como parâmetro crítico de iniciação do processo de fratura.

4.1.1. Concentração de tensões

O efeito da concentração de tensões por um furo vazante elíptico em uma chapa infinita submetida a tensões uniformemente distribuídas foi quantificado por Inglis, em 1913. A partir de suas análises, ele conseguiu determinar uma expressão que relaciona a tensão aplicada na extremidade do maior eixo da elipse com as

características geométricas do furo elíptico e a tensão aplicada, como exemplifica a figura abaixo:

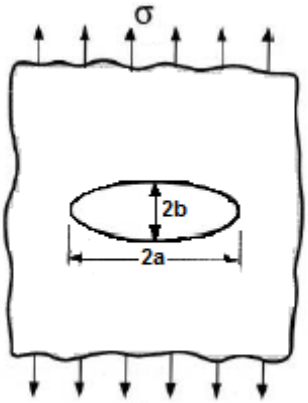


Figura 13: Esquema de Fratura (FORTES, 2003)

A equação que expressa a tensão na extremidade do eixo maior é:

$$\sigma_A = \sigma\left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \qquad \textit{Eq. 1}$$

Onde $\rho = \frac{b^2}{a}$ e representa o raio da curvatura da extremidade do eixo maior da elipse. Pode-se notar que a partir da equação descrita acima, o efeito da concentração de tensão fica maior quanto menor fica o raio de curvatura da elipse No caso de uma trinca aguda, onde o raio de curvatura de sua ponta tende a zero, o modelo (baseado na teoria da elasticidade) prevê tensões infinitas.

4.1.2. Modos de carregamento de trinca

Os campos de tensões que circundam a extremidade de uma trinca podem ser decompostos em três modos principais de carregamento, que acabam por causar deslocamentos diferenciados nas superfícies das trincas, como na figura abaixo:

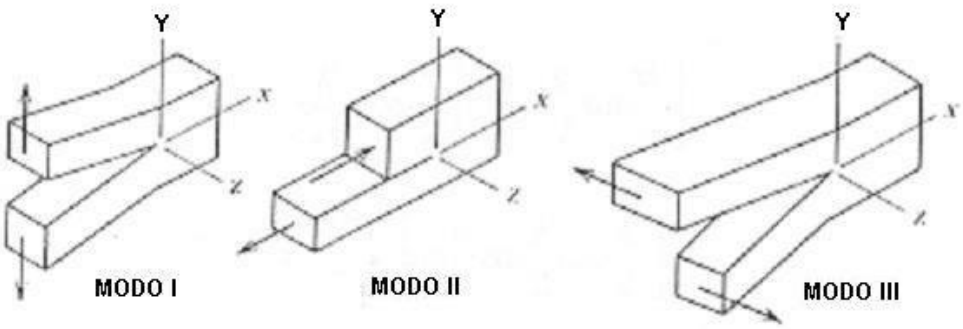


Figura 14: Modos de Carregamento, adaptado de ASTM E1823 (2002)

O modo I de carregamento é o mais comum, por isso, apresenta um maior desenvolvimento nos métodos analíticos e experimentais que outros modos de carregamento.

4.2. Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

4.2.1. Teoria de Griffith

A.A. Griffith propôs, em 1920, um balanço energético considerando a introdução de uma trinca vazante em uma placa de material elástico submetida a tensoes trativas. De acordo com Griffith, a trinca se propaga de maneira instável quando a energia elástica de deformação liberada com o avanço da trinca fosse maior que a energia requerida para formar as novas superfícies da trinca.

O balanço energético de Griffith para um aumento incremental da área da trinca (dA), na condição de equilíbrio pode ser expresso da seguinte forma (SANFORD,2003):

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dWt}{dA} = 0 \rightarrow -\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dWt}{dA} \qquad \textit{Eq. 2}$$

Onde W_t é a energia potencial fornecida pela energia de deformação e forças externas e Wt é a energia requerida para ocorrer o crescimento da trinca. Para uma chapa infinita de um material elástico contendo uma trinca vazante aguda, como na figura abaixo, Griffith conseguiu observar a seguinte expressão de tensão crítica de fratura do material:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \textit{Eq. 3}$$

Onde *E* é o módulo de elasticidade do material, γ_s é a energia superficial do material por unidade de área e *a* é o tamanho da trinca.

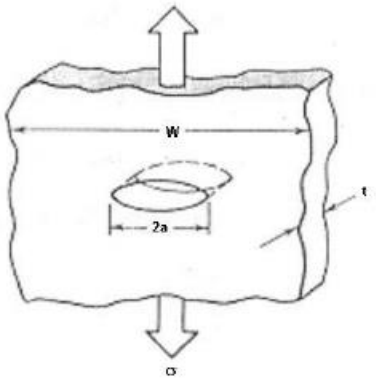


Figura 15: Esquema de Fratura sob ação de uma tensão trativa (SANFORD,2003)

Griffith, em sua análise, considerou apenas um material idealmente frágil, como o vidro, e a equação apresentada era bastante representativa para este tipo de material. Quando se trata de materiais dúcteis, onde a energia de fratura é algumas ordens de grandeza maior que a energia de superfície, essa equação não funciona. A fim de corrigir esse problema, Irwin e Orowan, independentemente, introduziram um fator que considera a deformação plástica, o trabalho plástico por unidade de área γ_p, e a equação de tensão de fratura fica da seguinte forma (SAXENA, 1998):

$$\sigma_f = \left(\frac{2E(\gamma_s+\gamma_p)}{\pi a}\right)^{1/2} \qquad Eq.\ 4$$

Pode-se usar esta equação para o caso de materiais com comportamento linear elástico, sendo que qualquer efeito não linear, como a plasticidade deve estar confinado a uma pequena região da ponta da trinca.

4.2.2. Fator de Intensidade de Tensões

A distribuição de tensões em torno de qualquer trinca em uma estrutura é similar e depende somente dos parâmetros referentes ao raio e ângulo da extremidade da trinca. O que difere a distribuição de tensões em torno de uma determinada trinca de outra reside no fator de intensidade de tensões, K, que é um fator de escala que representa a magnitude do campo de tensões atuante na ponta da trinca de um material linear elástico. O fator de intensidade de tensões incorpora em seu valor o comprimento da trinca, o seu raio e o nível de tensões (FORTES, 2003).

Se o fator de intensidade de tensões de um determinado material é conhecido, é possível determinar o máximo fator de intensidade de tensão que viria a causar falha. Esse valor crítico, K_c, é chamado de tenacidade à fratura do material. Acima de uma

determinada espessura de um corpo, quando a ponta da trinca está predominantemente em um estado plano de deformações, e com isso em máxima restrição, o valor de K_c torna-se constante. Esse valor de K_{Ic} é considerado uma propriedade do material e é chamado de tenacidade à fratura em deformação plana.

Como existe uma dependência da espessura com o estado de tensões, é importante salientar que a determinação experimental de K_{Ic} só será possível se o corpo de prova atingir uma determinada espessura. Dessa forma, as normas para realização de ensaios de tenacidade à fratura sempre impõem requisitos relativos à dimensão mínima do corpo de prova que sevem ser atendidos para que seja garantido um estado plano de deformações e plasticidade a um nível muito restrito.

4.2.3. Restrição à deformação plástica

À frente da extremidade de uma trinca aguda, existe uma restrição à deformação plástica do material, que aumenta com o aumento da espessura da placa. Essa restrição funciona como uma inibição do escoamento plástico devido à triaxialidade de tensões. A figura abaixo ilustra a triaxialidade de tensões da extremidade da trinca:

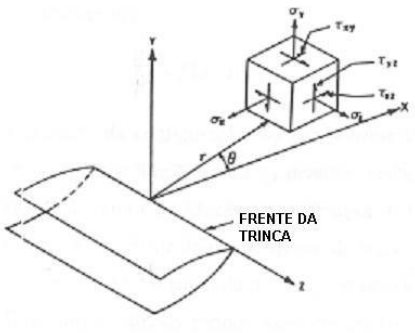


Figura 16: Campo de Tensões na Ponta da Trinca, (FORTES, 2003)

Os corpos de prova de fratura devem ser retirados do material respeitando a direção de trinca de máxima restrição, como na Figura 17. Essa escolha de direção de corpo de prova se deve ao fato de que, nessa posição, a trinca terá máxima restrição ao escoamento, logo, não chegará a deformar plasticamente, e a propagação da trinca será mais crítica. Dessa forma, torna-se muito interessante analisar a tenacidade à fratura nessa situação mais crítica.

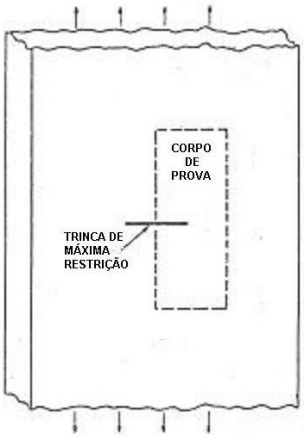


Figura 17: Posicionamento da Trinca de maior Restrição(FORTES, 2003)

4.2.4. Equações básicas

A interação da tenacidade à fratura com a tensão de projeto e com o tamanho da trinca controla as condições para a fratura em um componente. Para uma placa infinita contendo uma trinca centralizada vazante, o valor de K_I aplicado na estrutura é dado pela equação:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \qquad Eq.\ 5$$

A fratura dessa chapa ocorrerá quando K_I atinja um valor crítico, K_{IC}, que é a tenacidade à fratura do material. Como pode ser visto, K_I depende tanto da tensão aplicada quanto do comprimento da trinca.

Para outras geometrias as equações de K_I em função da tensão e do comprimento da trinca são diferentes, sendo possível o cálculo de K_I para qualquer geometria e estado de tensões.

4.3. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

A mecânica da fratura linear-elástica só é válida para casos em que a zona plástica na ponta da trinca é pequena, por isso, a deformação plástica não interfere tanto na propagação da trinca. Porém, em caso de materiais dúcteis, há uma formação de uma zona plástica considerável na ponta da trinca, por isso, a metodologia de K_I já não é mais adequada.

Essa situação sai da linearidade da análise por mecânica da fratura linear-elástica, e há uma perda bem maior de energia para a deformação plástica do corpo. Energia

essa que não será mais utilizada pela propagação da trinca. Por isso, deve-se fazer outro tipo de análise que preveja esse tipo de comportamento.

4.3.1. Crescimento de trinca no regime elasto-plástico

A figura 18 apresenta esquematicamente o comportamento da ponta de uma trinca em um material com comportamento elasto-plástico. Na medida em que a carga é aplicada ocorre um embotamento da ponta da trinca e as faces da mesma, na posição em que originalmente encontrava-se a ponta da trinca, ficam afastadas uma certa distância.

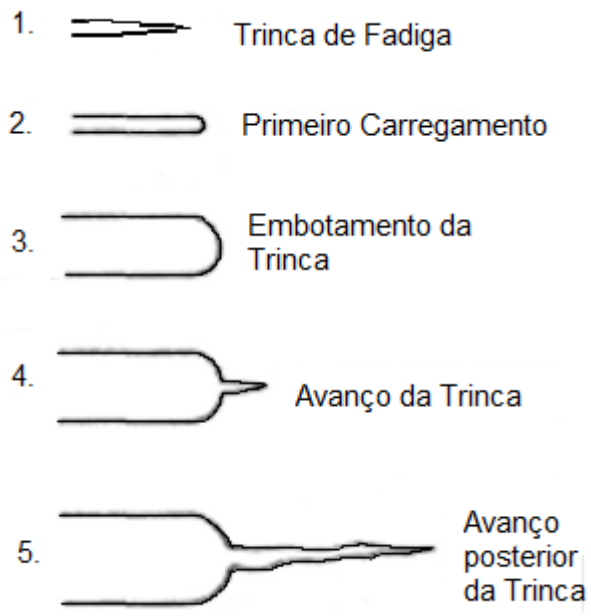


Figura 18: Esquema de crescimento da trinca em um material com comportamento elasto-plástico.

O termo CTOD, do inglês *crack tip opening displacement*, representa a distância entre as duas superfícies da trinca, medida na extremidade original da mesma. Diversas definições do CTOD podem ser apresentadas, porém, as mais conhecidas são:

1. Deslocamento normal ao plano da trinca em relação a posição original da mesma (vide Figura 19):

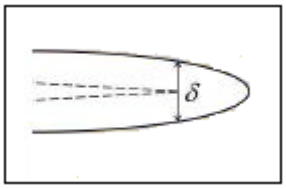


Figura 19: Definição 1 de CTOD

2. Distância entre as interseções de duas retas ortogonais posicionadas na ponta embotada da trinca com as suas faces (vide Figura 20):

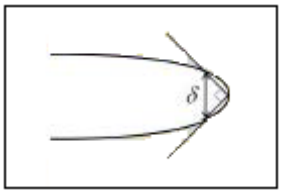


Figura 20: Definição 2 de CTOD

Naturalmente, se o embotamento é semicircular, ambas as definições são coincidentes.

A utilização do CTOD como critério de fratura indique que para haver crescimento da trinca é necessário que a abertura na ponta da trinca (CTOD) atinja um valor crítico. Esse valor crítico depende do tipo de material, da temperatura, da taxa de deformação e do estado de tensões reinante na ponta da trinca e pode ser medido experimentalmente.

Existem alguns tipos de CTOD que podem ser utilizados como tenacidade à fratura em cálculos de integridade estrutural. Eles são o CTOD de início de propagação estável da trinca, ou CTOD de iniciação, o CTOD de início de propagação instável da trinca e o CTOD de carga máxima.

4.3.2. Avaliação experimental do CTOD pela norma BS 7448

Os testes de CTOD são testes de mecânica da fratura realizados de acordo a alguma das normas internacionais (dentre as mais comuns: BS 7448 e ASTM E1820). Os corpos de prova, em geometrias normalizadas, devem ser pré-trincados por fadiga e testados monotônicamente em máquinas de ensaios mecânicos instrumentadas com extensômetros especiais.

4.3.2.1. Princípio

Um corpo de prova em geometria normalizada é pré-trincado por fadiga aplicando uma força alternada dentro de limites controlados. A amostra é então submetida a uma força crescente monotônica. Força e deslocamento da boca do entalhe devem ser continuamente registrados durante o teste. A força aplicada é plotada contra deslocamento e esse registro é analisado. Os valores de CTOD são calculados em algum ponto específico do registro (instabilidade ou carga máxima), de acordo com critérios estabelecidos nas normas. Caso o material apresente instabilidade na região elástica (ou muito próximo dela) o teste deve ser analisado de acordo com a mecânica da fratura elástica-linear.

4.3.2.2. Testes

Os registros típicos obtidos a partir de testes de CTOD estão apresentados na Figura 21. De acordo com o tipo de registro obtido de um teste em particular, é determinado o valor de CTOD em um dos seguintes casos: CTOD de instabilidade com propagação estável da trinca > 0,2 mm, δ_u, o CTOD de instabilidade com propagação estável da trinca <= 0,2 mm, δ_c, e o CTOD de carga máxima, δ_m.

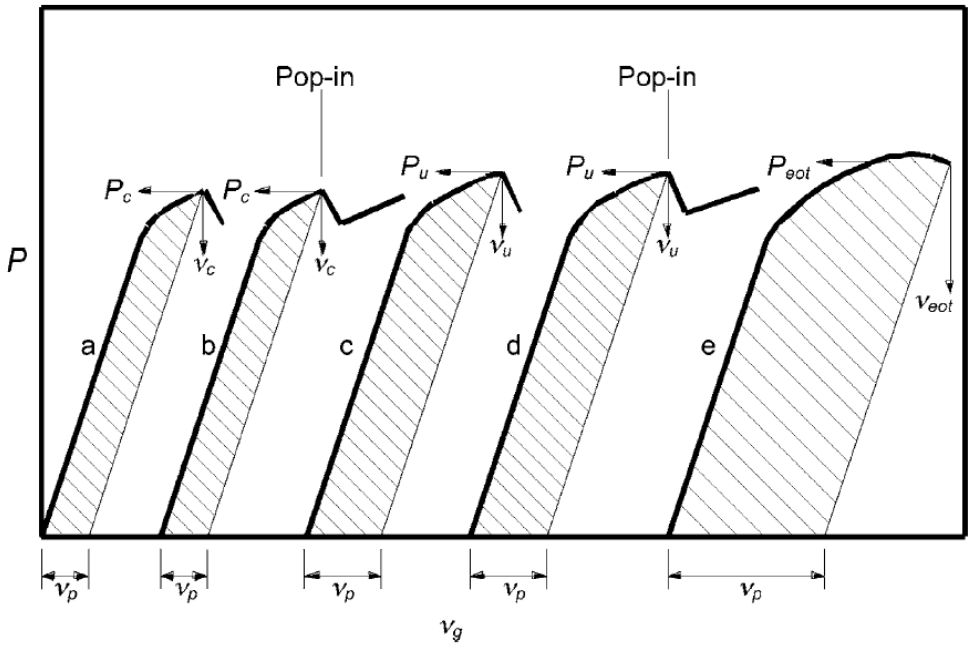


Figura 21: Registros F-CMOD típicos de testes de CTOD em metais (ASTM E1290)

Para o cálculo dos valores de CTOD em cada caso são necessários os valores da força no ponto (Fu, Fc ou Fm), assim como a componente plástica do deslocamento naquele ponto, Vp. Esses valores são lidos diretamente dos registros apresentados na Figura 21.

4.3.2.3. Equipamentos de Teste

4.3.2.3.1. Aplicação da Força

Os sistemas de aplicação de força devem permitir que o sinal de força seja continuamente registrado e a medição de força aplicada deve ser observada com uma exatidão de ±1%.

4.3.2.3.2. Instrumentação para medição de deslocamento

Em testes de fratura devem ser utilizados extensômetros especiais, fixados na boca do entalhe. O extensômetro deve ter um output elétrico que representa o deslocamento que ocorre durante o teste. A resposta do extensômetro deve ser tal que o desvio medido em relação ao verdadeiro deslocamento não seja maior que ±0,003 mm para deslocamentos até 0,3mm e não seja maior que ±1% do valor registrado, para deslocamentos maiores.

O extensômetro deve ser calibrado antes de qualquer registro. Será usado na nossa análise um medidor do tipo *clip-gage*.

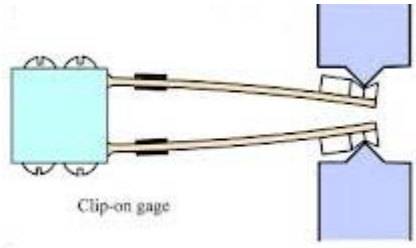


Figura 22: Clip-gage (CHUNG-YOUB, 2013)

O dispositivo de medição de deslocamento para o tipo de amostra compacta (C(T)) é apoiado em facas portaclip, na boca do entalhe. Deve-se ter cuidado ao escolher o *clip-gage*, a fim de não atingir a abertura máxima do mesmo antes de atingir a carga máxima durante os ensaios, pois desse modo o sinal de deslocamento será perdido antes do fim do teste, invalidando os resultados.

4.3.2.3.3. Acessórios de fixação dos corpos de prova (clevises)

Os aparatos de fixação utilizados nesse ensaio foram dois *clevises* com pinos, através dos quais foi aplicado o carregamento uniaxial à amostra.

Os clevises deverão ser de tal forma que permita a rotação da amostra durante o ensaio. Tanto os pinos quanto os clevises deverão ter um elevado grau de dureza (acima de 40 HRC) e resistência, a fim de que resistam elasticamente a forças de endentação, e devem ter um coeficiente de atrito baixo.

O material adotado para a fabricação tanto dos clevises quanto os pinos deve ser um aço de tensão de escoamento por volta de 1930,53 Mpa.

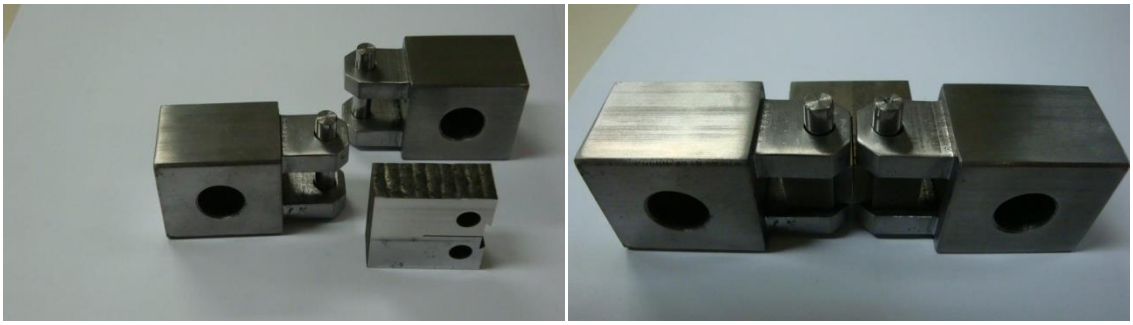


Figura 23: Clevises e pinos utilizados nos testes

4.3.2.3.4. Geometria dos corpos de prova

A geometria das amostras recomendadas pela norma podem ser de flexão ou de tração. A geometria do corpo de prova é apresentada na Figura 24. Essa configuração prevê a utilização de clevises e pinos, por isso a amostra possui furos.

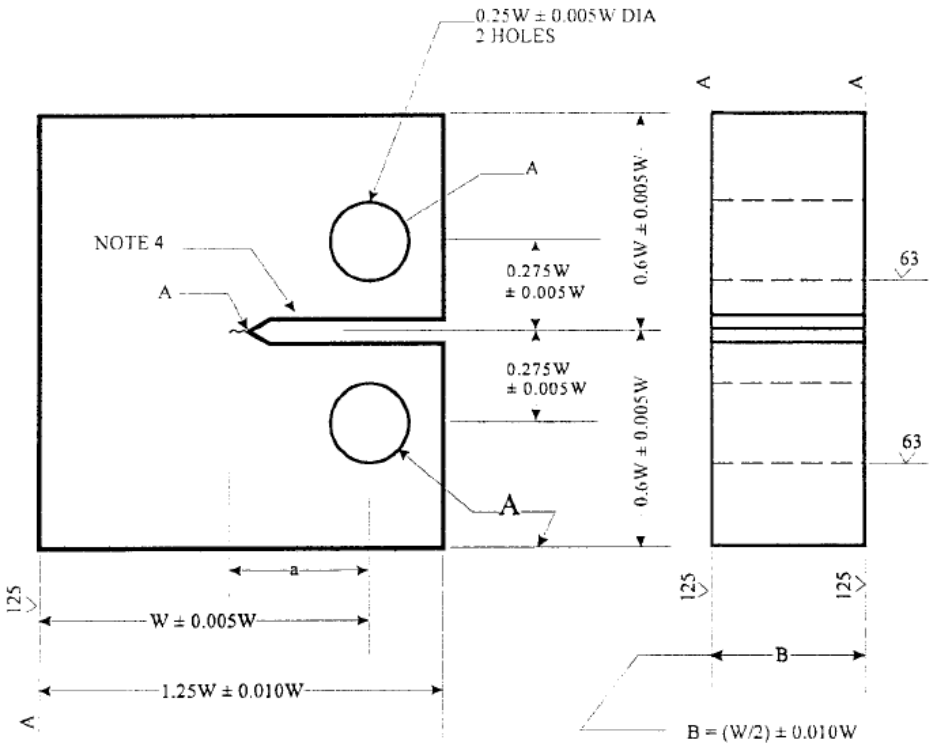


Figura 24: Geometria da amostra tipo compacta com entalhe reto (ASTM 1290)

A espessura (B) dos corpos de prova deve ser próxima àquela utilizada na aplicação estrutural de interesse. O valor de W/B é de 2, enquanto, o valor de H/W é de 0,6, onde H é a largura da amostra. A pré-trinca inicial, a_0, deve estar dentro dos limites de $0{,}45W \leq a_0 \leq 0{,}70W$. A profundidade do entalhe deve ser de, no máximo 0,45W, de tal modo que a trinca possa ser estendida por fadiga até aproximadamente 0,5W. Quando necessário, podem-se usinar as facas *portaclip* diretamente na amostra, de forma a melhorar a fixação do extensômetro, como mostrado na Figura 25.

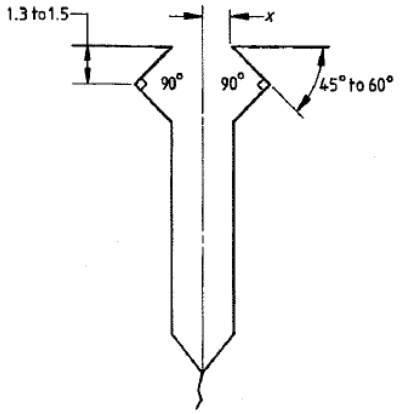


Figura 25: Detalhes do entalhe e das facas portaclip (BS 7448)

4.3.2.3.5. Pré-trincamento por fadiga

Segundo as normas de fratura, todas as amostras devem ser pré-trincadas por fadiga antes dos testes. Testes realizados em corpos de prova simplesmente entalhados não apresentam os valores de tenacidade mínima, que somente são avaliados a partir de corpos de prova com trincas de fadiga.

O pré-trincamento por fadiga consiste em aplicar um carregamento cíclico durante um número de ciclos, típicamente entre de 10^4 a 10^5, dependendo do material testado. O pré-trincamento deve ser feito a temperatura ambiente com o material já tratado e nas condições em que ele será testado. Os dispositivos utilizados durante o pré-trincamento devem estar bem alinhados, de forma tal que a distribuição de tensões seja uniforme por toda espessura da amostra, pois caso o contrário, a trinca não irá crescer uniformemente.

Para a amostra do tipo compacta (C(T)), a força máxima de pré-trincamento, F_f, é definida como:

$$F_f = \frac{0{,}2B(W-a)^2(\sigma_{YS}+\sigma_{TS})}{2W+a} \qquad Eq.\ 6$$

Onde a é o comprimento da pré-trinca inicial.

A relação do tamanho da pré-trinca e as dimensões da amostra devem seguir alguns critérios:

- $0{,}45 \leq \frac{a_0}{W} \leq 0{,}55$,
- A propagação de trinca por fadiga mínima deve ser maior que 1,3mm ou 2,5% da profundidade do amostra, W,
- A diferença entre duas medidas de comprimento da trinca na superfície da amostra não deve ser maior que 15% da média das duas medições,
- A ponta da trinca deve estar dentro de um limite como mostrado na Figura 26.

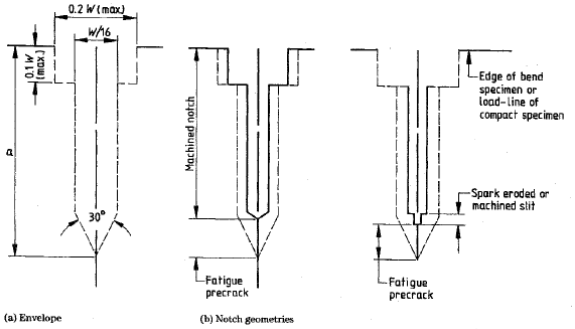


Figura 26: Detalhes do formato do entalhe e da pré-trinca (BS 7448)

4.3.2.3.6. Determinação do CTOD

Usando as dimensões B, W, (C-W) e z, a dimensão de a_0, a força F aplicada e seu correspondente valor de V_p, pode-se calcular δ. Para a geometria C(T) com entalhe reto o valor de CTOD é calculado a partir de:

$$\delta = \left(\frac{F}{BW^{0,5}} f'\left(\frac{a_0}{W}\right)\right)^2 \left(\frac{(1-\vartheta^2)}{2\sigma_Y E} + \frac{0,46(W-a_0)V_p}{0,46W+0,54a_0+(C-W)+z}\right) \qquad Eq.\ 7$$

Onde:

- F é a força máxima aplicada (vide Figura 27),
- ϑ é o coeficiente de Poisson;
- σ_Yé o limite de escoamento efetivo do material;
- z é a altura das facas portaclip até a borda da amostra;
- $f'\left(\frac{a_0}{W}\right)$ é função definida como:

$$f'\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{\left(2+\frac{a_0}{W}\right)(0,886+4,64\frac{a_0}{W}-13,32\left(\frac{a_0}{W}\right)^2+14,72\left(\frac{a_0}{W}\right)^3-5,6\left(\frac{a_0}{W}\right)^4}{\left(1-\frac{a_0}{W}\right)^{1,5}} \qquad Eq.\ 8$$

- Vp é a parcela plástica do deslocamento da abertura do entalhe, e pode ser obrtida a partir de um esquema representado pela figura abaixo:

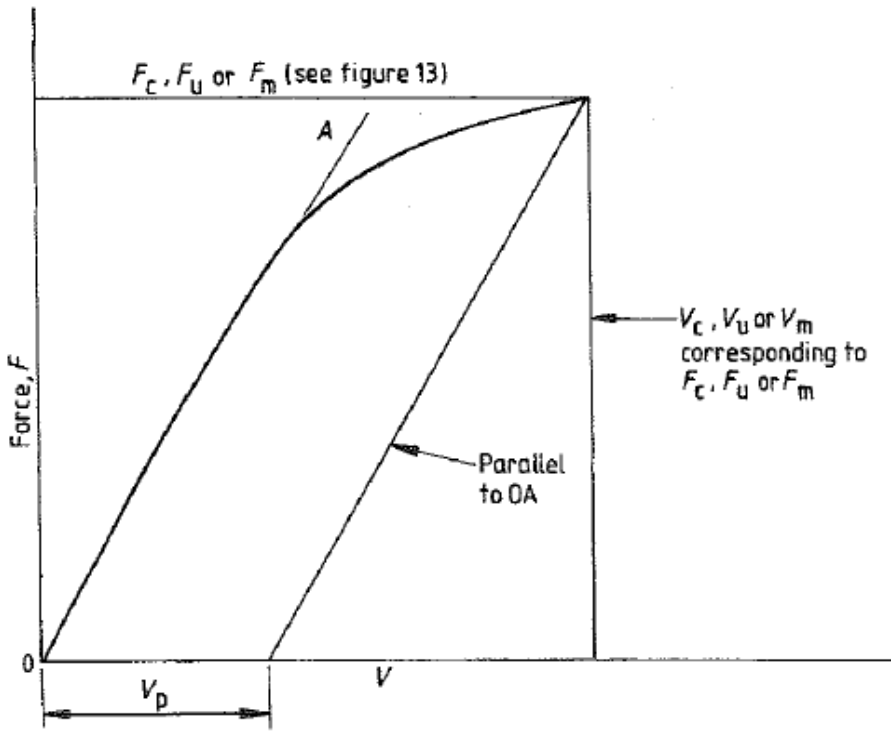


Figura 27: Método de obtenção do valor de Vp (BS 7448)

4.3.2.3.7. Validade do experimento

Os valores críticos de CTOD serão validados se atenderem às seguintes condições:

- Os valores de CTOD devem ser menores ou iguais a δ_m;
- As diferenças entre as medições centrais de pré-trinca de fadiga não devem exceder 0,5W;
- A diferença entre o máximo e o mínimo das nove medições da pré-trinca de fadiga não deve exceder 0,10W;
- A frente da pré-trinca de fadiga deve estar afastada do entalhe de pelo menos 0,025W ou 1,3mm, o que for menor;
- O plano da superfície da pré-trinca não deve exceder um ângulo de 10° do plano do entalhe e
- A frente da pré-trinca de fadiga não deve ser multiplanar nem ramificada.

5. Metalografia

As técnicas de metalografia permitem observar a microestrutura dos metais e outros materiais. Para iniciar a análise, é necessário preparar as amostras de forma que suas características sejam evidenciadas durante a observação. A preparação consiste em lixar, polir e atacar com reagente químico a superfície da amostra.

Quanto ao tipo de observação, esta está subdivida, basicamente, em duas classes:

- A macrografia: onde se examina a amostra a olho nu, ou a até 50 vezes de ampliação. Permite ter uma ideia de conjunto da homogeneidade do material, da distribuição de defeitos, da qualidade de solda, etc.; e
- A micrografia: onde a observação é feita em microscópico de alta ampliação. Mediante essa técnica pode se observar de forma mais detalhada as características da amostra, como as fases presentes, o tamanho do grão, o teor aproximado de carbono e etc. (JÚNIOR, 2009). A micrografia pode ser realizada mediante microscopia óptica ou eletrônica.

Preparação das amostras

Primeiramente, deve-se separar uma amostra do corpo de prova do material requerido para posterior análise metalográfica. Dependendo do plano de corte haverá diferentes tipos de planos de observação e, consequentemente, diferentes análises. Por isso, deve-se ter bastante atenção no momento do corte.

No caso de peças pequenas de difícil manuseio, deve-se embutir a amostra em um material base de forma que o tamanho desta não interfira na posterior análise.

Apesar do corte correto proporcionar uma superfície de baixa rugosidade, ela ainda não se adéqua aos requisitos da observação, portanto, é importante que a superfície esteja ainda mais lisa e polida para a análise, e, devido a esse fator, deve-se usar procedimentos como lixamento e polimento.

O lixamento tem como objetivo a eliminação de riscos e marcas mais profundas da superfície, dando um acabamento a essa superfície, que será, posteriormente, polida. Deve-se, para atingir esse objetivo, lixar a superfície da amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção de lixamento em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. Geralmente a lixa utilizada para trabalhos metalográficos é a lixa com grão abrasivo de óxido de

alumínio, porém, em casos especiais, pode-se utilizar lixas de diamante e carbeto de boro.

O polimento consiste em um procedimento pós-lixamento e limpeza, que visa um acabamento superficial polido isento de marcas. Para tal fim, são utilizados abrasivos como pasta de diamante ou alumina.

Por fim, a amostra é atacada quimicamente com um reagente ácido por certo tempo, de forma que este reagente cause corrosão da superfície, mais especificamente, a corrosão de alguns grãos e fases, e assim, cada grão e fase refletem a luz de maneira diferente de seus vizinhos, realçando os contornos de grão, além de dar tonalidades diferentes às fases, permitindo a visualização das mesmas em microscópios. Antes de a amostra ser atacada, a mesma deve estar perfeitamente limpa e seca, por isso, utilizam-se líquidos de baixo ponto de ebulição como o álcool, éter e etc., os quais são posteriormente secados rapidamente através de um jato de ar quente fornecido por uma ventoinha elétrica ou secador.

No caso que irá ser desenvolvido, teremos um material de aço, o X-52, soldado a uma liga de Níquel, o Inconel 625, e por isso, o ataque químico seria um pouco mais suficiente para corroer as fases do Inconel, e ao fato de o ácido que corrói as fases do Inconel ser forte o suficiente para destruir a amostra de aço. Dessa forma, faz-se o ataque em duas etapas, onde, primeiramente o aço é atacado quimicamente com um ácido específico, e depois se ataca o Inconel com um eletrólito.

Abaixo, pode-se observar uma tabela com alguns tipos de ataques que podem ser usados no aço. No caso do Inconel, o ataque mais efetivo é o ataque eletrolítico.

Tabela 7: Lista de Reagentes para ataque químico no aço (ROHDE, 2010)

Reagentes	**Composição**
Nital 2%	2ml de HNO_3 em 98ml de álcool etílico (95%)
Vilella	5ml de HCl, 1g e ácido pícrico em 100ml de álcool etílico (95%)
Behara	3g de $K_2S_2O_5$, 10g $Na_2S_2O_3.5H_2O$ em 100ml de água destilada
Le Pera	Solução aquosa de 1% de $Na_2S_2O_5$ misturada com uma solução de Picral 4% na proporção 1:1
$Na_2S_2O_5$ 1%	1g de $Na_2S_2O_5$ em 100ml de água destilada

6. Teste de Microdureza Vickers

A dureza de um material pode ser definida como a resistência à penetração da sua superfície por outro corpo mais duro. O teste de microdureza usualmente se refere a indentações estáticas provocadas por cargas menores que 1 kgf. O indentador, no caso da dureza Vickers, é uma pirâmide de diamante industrial.

A superfície a ser testada geralmente requer um acabamento metalográfico. Quanto menor a carga de teste, maior o grau de acabamento necessário.

Microscópios são usados para medir as dimensões das indentações, com aumentos de 500 vezes e precisão de ± 0,5 mícrons. Diferenças de até ±0,2 mícrons podem ser observadas se o operador tiver cuidado e experiência.

O endentador Vickers tem a forma de uma pirâmide quadrada com 136° entre as faces (vide Figura 28). Para calcular o valor da dureza de pirâmide de diamante Vickers, ambas as diagonais da endentação são medidas, e a média destes valores é usada na fórmula para a determinação do valor de dureza Vickers (HV).

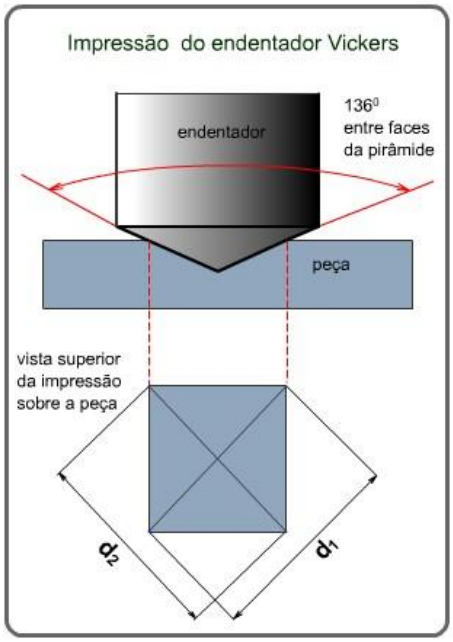


Figura 28: Pirâmide de diamante (Adaptado CIMM)

O valor HV obtêm-se da carga aplicada (kgf) dividida pela área da superfície de endentação (mm²). A equação que relaciona esses parâmetros é:

$$HV = \frac{2Fsen\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \cong 1{,}854\frac{F}{d^2} \qquad \textit{Eq. 9}$$

Onde F é a carga em kgf e d é a média aritmética das duas diagonais, d1 e d2 em mm.

Materiais e Métodos

1. Testes de Fratura

Os testes de fratura foram realizados em seis corpos de prova, todos oriundo de um tubo de aço API X-52 cladeado com Inconel 625. O material foi fornecido pela PROTUBO. Uma imagem do tubo cladeado pode ser vista na Figura 29. O cladeamento por soldagem, nesse caso, foi feito pelo processo TIG.

Figura 29: Tubo de aço API X-52 e amostra retirada para a confecção de CPs C(T)

As propriedades mecânicas relevantes para os cálculos de CTOD foram agrupados na tabela 8. Estas propriedades são do aço API X-52, uma vez que dos dois materiais (aço API X-52 e Inconel 625) é o aço aquele que tem menor resistência mecânica.

Tabela 8: Propriedades mecânicas usadas nos cálculos de CTOD

Propriedade	Valor
Tensão de escoamento	341,68 Mpa
Tensão de ruptura	511,69 Mpa
Coeficiente de Poisson	0,33
Módulo de Elasticidade	206 Gpa

A partir da amostra retirada do tubo cladeado (vide Figura 29) foram usinados os corpos de prova C(T). Essa usinagem foi feita usando a técnica de eletro-erosão a fio. Uma imagem dos corpos de prova pode ser vista na Figura 30:

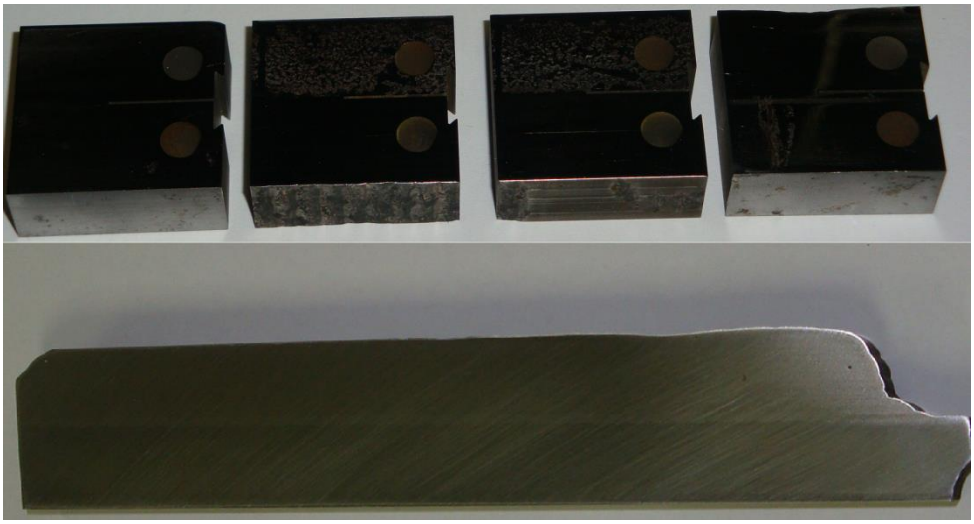


Figura 30: Corpos de prova C(T) usinados por eletroerosão a partir da amostra inferior.

O entalhe nos corpos de prova foi posicionado o mais próximo possível da interface metal-clad e no mesmo plano, com o intuito da trinca a se propagar pela interface.

As superfícies externas dos diferentes corpos de prova foram lixadas e foi marcado um risco perpendicular à interface a uma distância d = 12,5 mm, como apresentado na Figura 31.

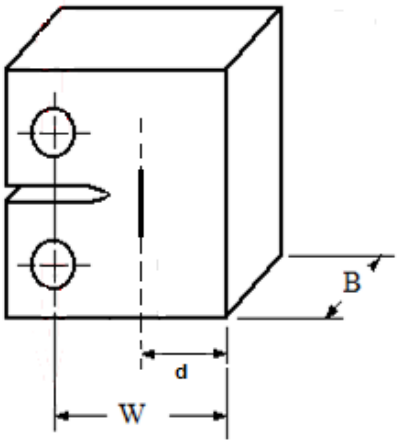


Figura 31: Marcação para o pré-trincamento por fadiga

Após essa marcação, a amostra foi submetida a um carregamento cíclico de forma a propagar uma pré-trinca por fadiga da ponta do entalhe até a marcação. Esse processo foi realizado em uma máquina servo-hidráulica Instron 1332 com célula de carga de 50 kN, à temperatura ambiente. A carga limite durante o pré-trincamento foi calculada pela Equação X. A força máxima calculada a partir das dimensões e propriedades mecânicas do material foi $F_{máx} = F_f$ = 6,855kN, sendo a $F_{mín}$ 10% desse valor. Após aproximadamente 50.000 ciclos foi obtida uma pré-trinca com comprimento aproximado a_0 = 12,5mm, como mostrado esquematicamente na Figura 32.

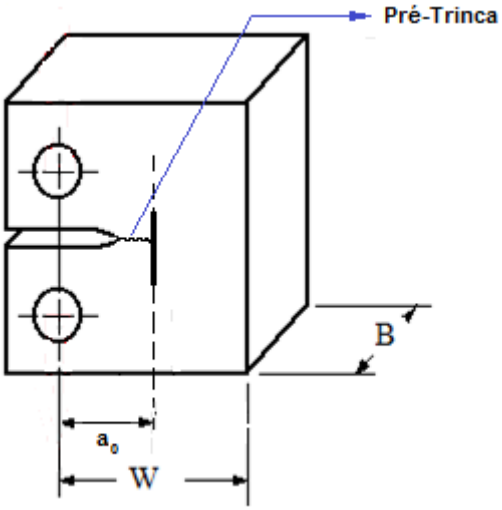


Figura 32: Corpo de prova com pré-trinca de fadiga

Os testes de fratura monotônica foram feitos na mesma máquina em que foi realizado o pré-trincamento, sob controle de deslocamento a uma velocidade do travessão de 1 mm/min. Uma imagem de um corpo de prova instrumentado e montado, pronto para ser testado, pode ser visualizada na Figura 33.

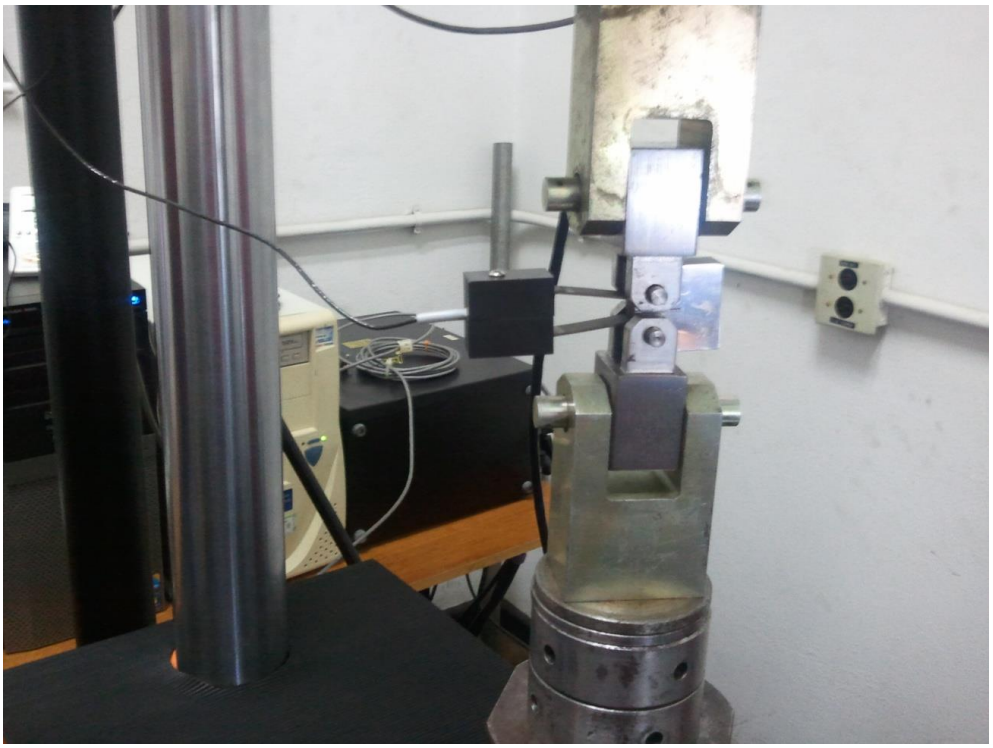


Figura 33: Aparato para ensaio de fratura

De posse desse valor de V_p, e do valor de carga máxima F, calculamos o valor de CTOD a partir das equações 7 e 8.

2. Medição do comprimento inicial da trinca

Após todo o processo, é necessário romper as amostras, tentando seguir o mesmo plano da trinca formada anteriormente, para facilitar a visualização e medição do comprimento das faces da trinca. Essas superfícies podem ser separadas de duas maneiras: por resfriamento por nitrogênio líquido, seguido de ruptura frágil do material, ou por um processo de pós-trincamento por fadiga.

O caso do nitrogênio líquido, os corpos de prova são levados a uma temperatura crítica, e depois rompidos na própria máquina de ensaio de fratura. Desta vez não foi feito nenhum controle de velocidade ou carga, já que estes parâmetros não são muito relevantes quando se trata de abrir o material tentando seguir o plano da interface para ver de fato o comprimento da trinca, assim como a textura do material.

O caso do pós-trincamento por fadiga consiste em aplicar a carga de pré-trincamento achada anteriormente, novamente, ao corpo de prova, e esperar a amostra romper, por propagação dessa pós-trinca. A superfície que irá aparecer por causa dessa pós-

trinca, será diferente da superfície da trinca formada durante o ensaio de fratura, devido a diferença de tipo carregamento aplicado ao corpo de prova: enquanto no ensaio de fratura, o carregamento é monotônico e crescente, no pós-trincamento, e também, pré-trincamento, o carregamento é basicamente cíclico e de amplitude e média constantes.

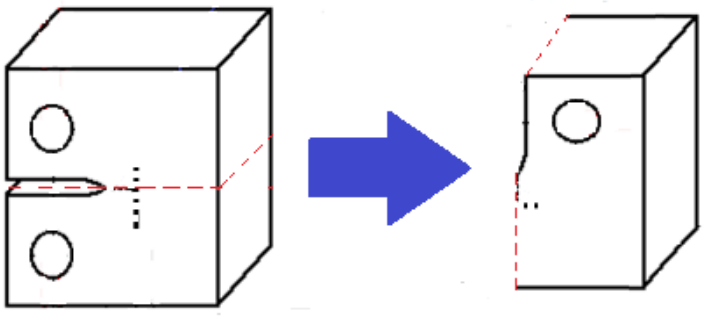


Figura 34 :Esquema de corte

3. Preparação da amostra para metalografia e medição da microdureza

A análise microestrutural e as medidas de microdureza foram realizadas na amostra apresentada na figura 36. Essa amostra foi cortada do bloco de material apresentado na figura 29 por eletroerosão.

Figura 35: Amostra cladeada de Aço API 5L X52 com Inconel 625

Foram utilizados os seguintes passos para preparar a amostra de forma que a visualização de sua microestrutura seja mais eficiente:

3.1. Lixamento

Foram usadas cinco lixas de granulometrias P100, P220, P320, P400, P600 e P2500 nessa ordem, lembrando sempre de rotacionar a amostra num ângulo de 90° toda vez que a lixa foi mudada de forma a apagar os riscos criados pela lixa anterior e mais abrasiva. Durante o processo de lixamento, sempre deve-se manter a superfície da lixa úmida com água de forma a minimizar um possível aquecimento devido ao alto grau de atrito.

3.2. Polimento

Após a etapa de lixamento da amostra, esta foi submetida a um processo de polimento com pasta de diamante de granulometrias de 6 μm, 3 μm e 1 μm, nessa ordem, de forma a deixar a superfície da amostra o mais lisa possível, chegando a ser espelhada. Para esse polimento, foi utilizado álcool etílico, sempre umedecendo a pasta, e limpando a amostra entre consecutivas trocas de pastas. Ao fim do processo, a amostra foi seca com o auxílio de uma fonte de vento quente, de forma a não deixar marcas da passagem de álcool na amostra.

3.3. Ataque do Inconel

A parte da amostra de Inconel 625 foi submetida ao ataque eletrolítico de uma solução de ácido oxálico ($C_2H_2O_4.2H_2O$) a 10% em solução aquosa. A essa solução, foram inseridos os terminais para aplicação de tensão, com corrente contínua. A tensão utilizada foi de 3V para acelerar, desse modo a reação. O tempo de ação do reagente sobre a peça a atacar foi de 30 segundos.

3.4. Ataque do aço API X-52

A parte da amostra de aço API 5L X-52 foi atacada com uma solução de Nital 2%. O tempo de imersão também foi de 30 segundos.

3.5. Medição da Microdureza

A análise de microdureza foi feita após o lixamento, polimento, ataque químico e análise microestrutural da amostra. Foi utilizada o microdurômetro do laboratório de Propriedades Mecânicas da COPPE, para endentar pontos que alcançassem as

regiões de interesse da amostra, e assim, medir as dimensões dos pontos no corpo e poder inferir a microdureza relacionada a essas regiões.

Para a análise de microdureza Vickers, foi feito um corpo de prova com aproximadamente de 30 mm de largura e 12,5mm de comprimento conforme a figura abaixo. Esse ensaio está de acordo com a norma ASTM E-92-82.

Para a amostra usada, foram feitas sete endentações em uma linha, sendo que cada ponto está distante de 0,5 mm de seu vizinho colinear. O ponto x=0 se refere à interface. O esquema pode ser mais bem especificado abaixo, através da ilustração:

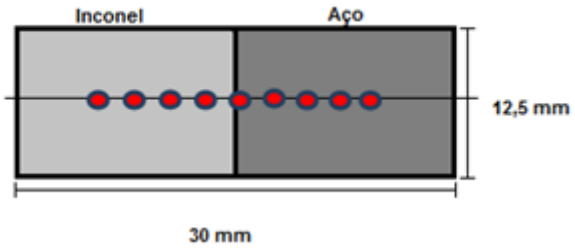


Figura 36: Pontos de análise da microdureza

Resultados e Discussão

1. Metalografia

1.1. Aço:

Micrografias do aço API X-52, nas ampliações de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes, são apresentadas na Figura 37.

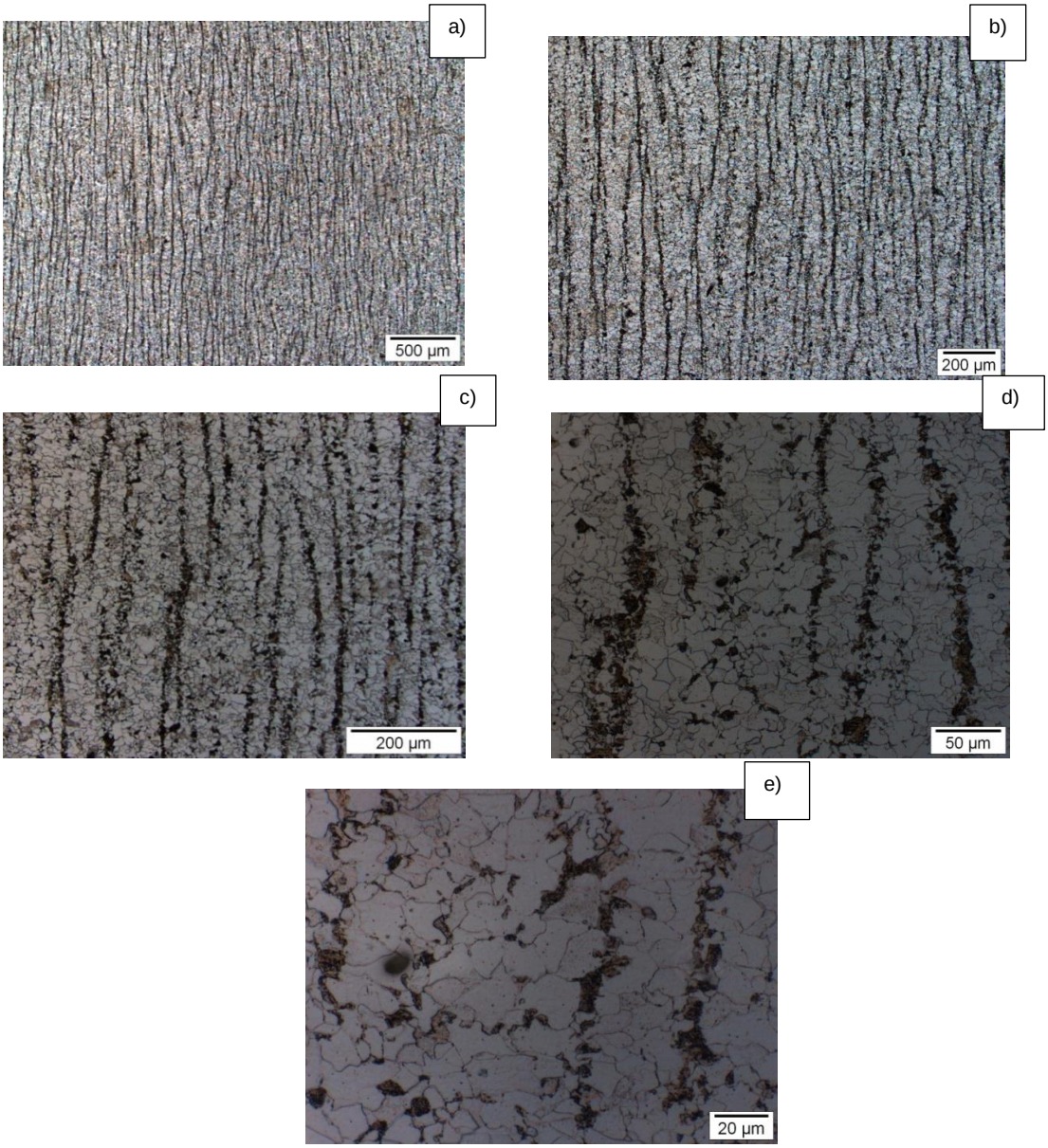


Figura 37: Aço X52 com ampliação de: a)50 vezes, b)100 vezes, c)200 vezes , d)500 vezes e e)1000 vezes

A partir das imagens pode ser observado que a microestrutura do aço é ferrítica-perlítica, com bandeamento ao longo da direção da laminação do aço do qual foi fabricado o tubo. Na Figura 37e podem ser claramente observadas a fase ferrítica (grãos brancos) e a perlita (regiões escuras). A baixa concentração de perlita na estrutura é condizente com o baixo teor de carbono do aço.

1.2. Inconel

Micrografias do Inconel 625, nas ampliações de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes, são apresentadas na Figura 38.

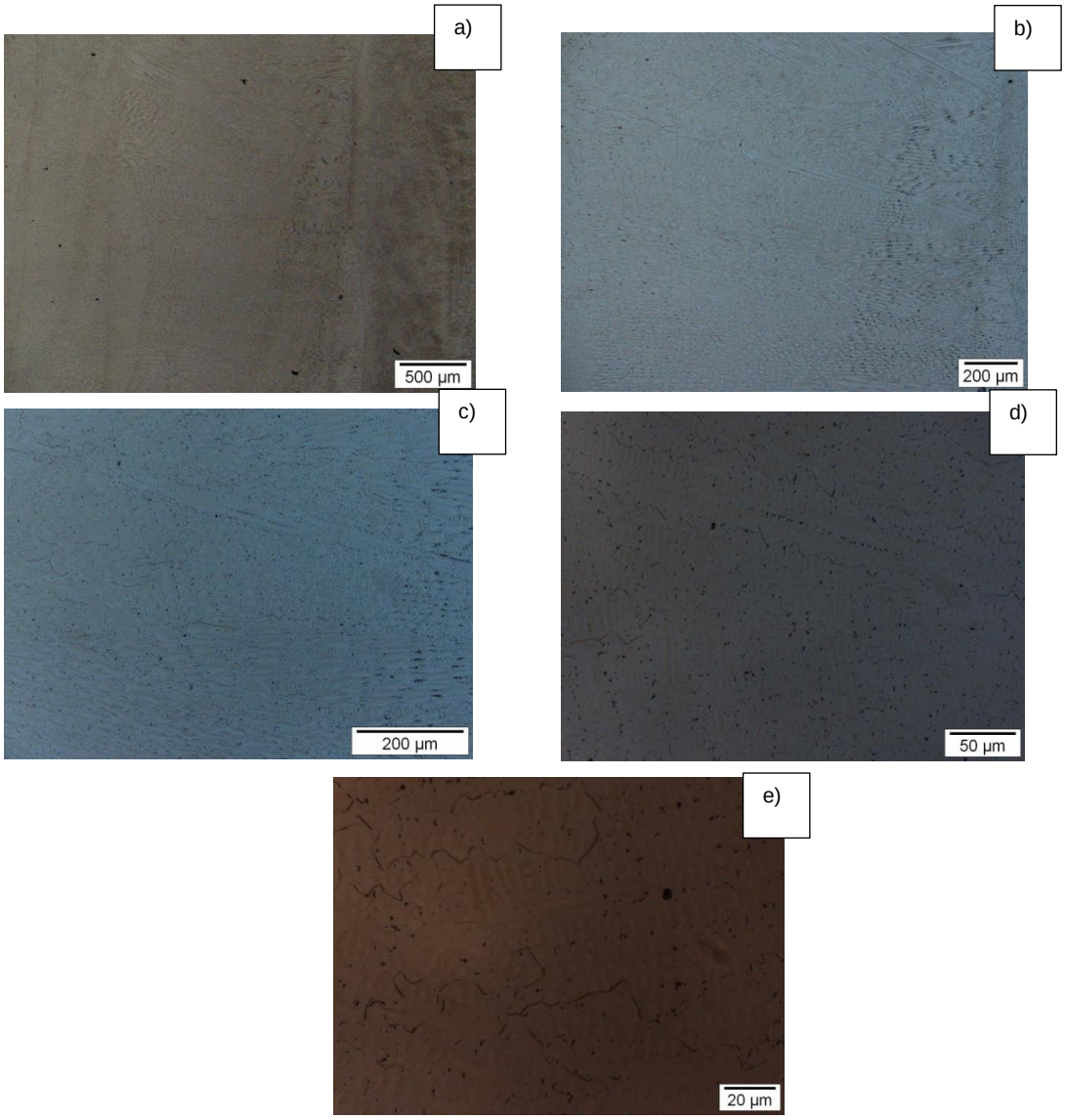


Figura 38: Inconel 625 com ampliação de: a) 50 vezes, b) 100 vezes, c) 200 vezes, d) 500 vezes e e) 1000 vezes.

A partir das micrografias da Figura 38 pode-se perceber a presença de pontos escuros distribuídos na matriz. É altamente provável que esses pontos sejam carbetos de Ti e Nb. Esses precipitados são ricos em Nb e Ti, e podem ser simples carbetos de estrutura MC, NbC ou (NbTi)C, ou precipitados complexos, onde o Ti configura um núcleo, enquanto o Nb fica ao redor daquele, dependendo da taxa de resfriamento que foi aplicada (SONG, 2009). Os traços escurecidos são apenas efeitos de ótica devido a, provavelmente, iluminação polarizada. Por esse motivo não foram levados em consideração na análise.

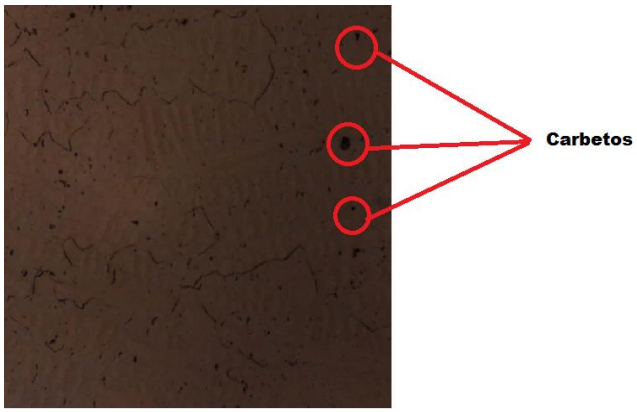
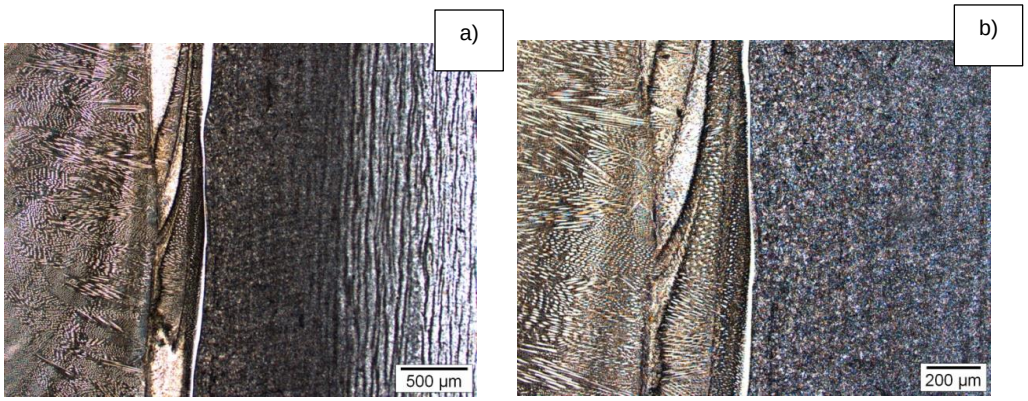


Figura 39: Carbetos no Inconel

1.3. Interface

Micrografias da região da interface metal-clad, nas ampliações de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes, são apresentadas na Figura 40.



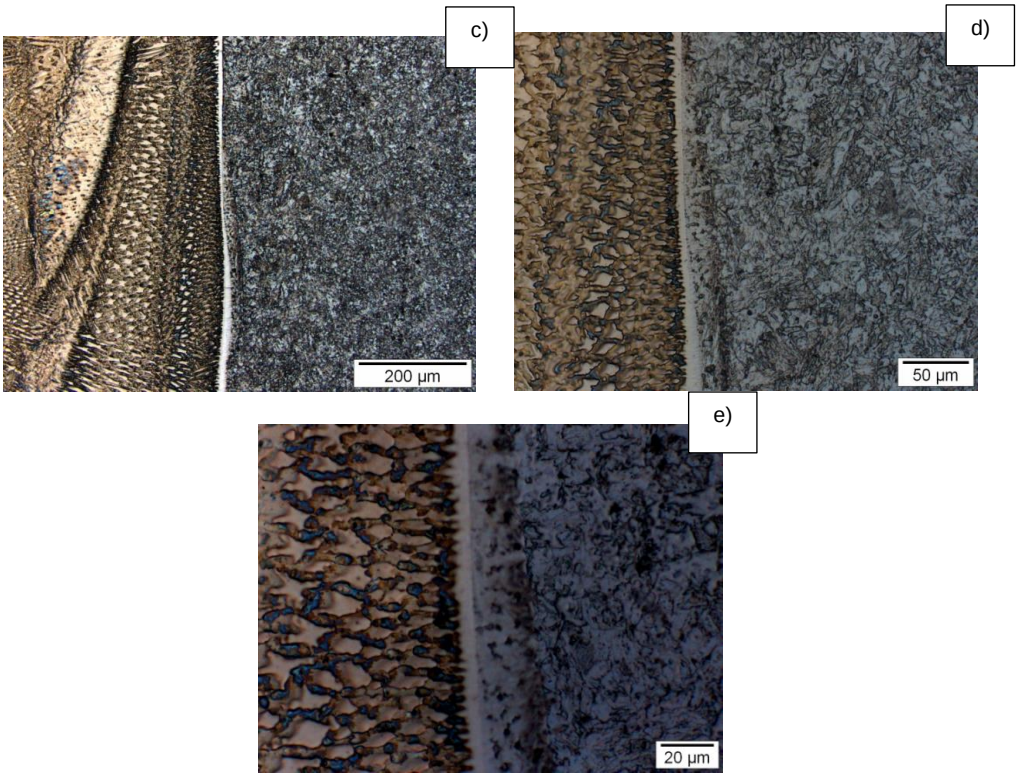


Figura 40: Interface com ampliação de: a) 50 vezes, b) 100 vezes, c) 200 vezes, d) 500 vezes e e) 1000 vezes.

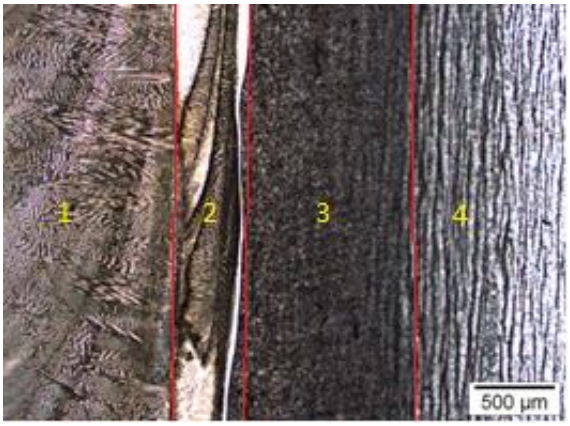


Figura 41: Estruturas nas proximidades da interface na ampliação de 50 vezes

A partir da Figura 41 (com ampliação de 50 vezes), podemos ver diferentes estruturas na região da da interface:

1. Inconel: apresenta uma estrutura características de fusão, devida à soldagem deste, como esperado.
2. Interface: apresenta uma mistura de características, grãos e formato diferentes, devido ao fato de ser uma zona de transição;

3. Zona fundida + ZTA: nessa ampliação não é possível notar a diferença entre essas regiões, mas é clara a presença da ZTA.
4. Metal base: após da ZTA o metal apresenta sua microestrutura original

Na Figura 42 é apresentada uma imagem em detalhe da região da interface, com aumento de 500 vezes, que permite visualizar as fases com mais clareza.

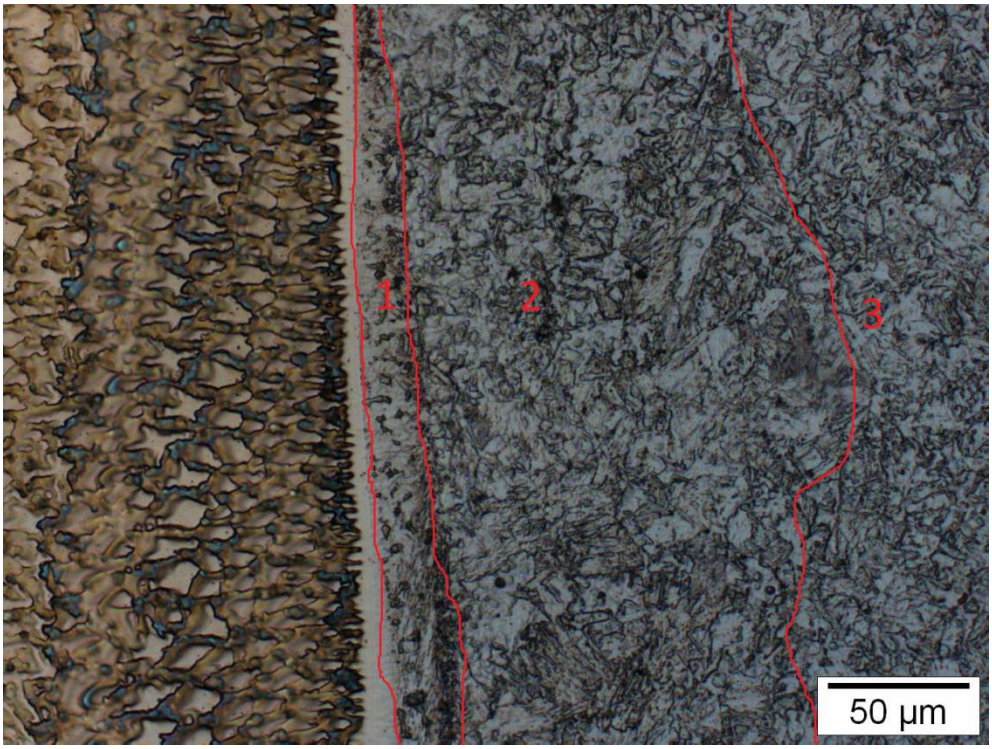


Figura 42: Estruturas com ampliação de 500 vezes: 1. Zona Fundida. 2. ZTA. 3. Zona de aço base

A partir da figura pode ser visto que houve alteração do formato dos grãos na parte do aço que evidencia mudanças de fase. A primeira região no lado do aço é a do aço fundido, que esteve em contato com o Inconel fundido, tendo sua temperatura aumentada de tal forma, que o aço também se fundiu. Essa região, se comparada com a microestrutura do aço após laminação, apresenta grãos grosseiros.

A segunda fase é a ZTA, se caracterizando como uma fase onde os grãos, ainda em transição, começam a ter uma geometria mais definida e grãos mais refinados com o aumento da distância da zona fundida. Com o aumento da distância, o pico de temperatura é menor, por isso, uma parte da ferrita se austeniza e outra parte sofre

tratamento térmico de recozimento. Ao se distanciar mais ainda da zona fundida, a ferrita somente sofrerá o tratamento térmico de recozimento.

A terceira fase é a zona de aço base. Na Figura 42, apenas pode-se observar as estruturas mais próximas à interface, porém, pode-se perceber que o tamanho de grão do aço nessa região é maior devido ao crescimento dos grãos de acordo com o aumento da temperatura durante o período de soldagem. O tamanho de grão do aço diminui nas regiões afastadas da linha de soldagem.

A Figura 43 apresenta a região da interface ainda em maior detalhe (ampliação de 1.000 vezes.

Figura 43: Estrutura de Dendritos na ampliação de 1000 vezes

Na medida em que o Inconel solidifica um pequeno grupo de átomos começa a se arranjar numa estrutura cristalina. Os pequenos cristais vão se agrupando e formando estruturas dendríticas, ou estruturas em forma de árvore, e durante a solidificação a solubilidade das estruturas dendríticas vai se alterando. Por esse motivo alguns solutos, tais como o Mo e o Nb, vão sofrendo microssegregação, ou seja, sendo expulsos da estrutura dendrítica e supersaturando o, então, líquido. Essa situação favorece a criação de fases secundárias, como a fase de Laves (ANDRADE, 2006).

No nosso estudo, pudemos ver a formação de estruturas dendríticas na superfície do Inconel, de acordo com a Figura 43. Dentro dessa estrutura pode-se ter fase de Laves e MC, ou metal carbono, mas a existência dessas fases não pode ser corroborada a partir de observacoes com microscopia óptica. Para isso seria necessário usar o Microscópio Eletrônico de Varredura, em ampliação de, no mínimo, 10000 vezes.

Poder-se-ia analisar o perfil de composição química da região interdendrítica de forma a quantificar os teores de Mo e Nb. Esses teores, se estiverem muito elevados, podem indicar a formação de fases secundárias, especialmente, a fase de Laves. Esperar-se-ia que, como se trata de um Inconel 625, com adição de Nb, a segregação desses solutos fosse de tal grandeza que houvesse a formação dessa fase.

A fase de Laves é uma fase rica em Nb, típica de superligas de Níquel, que aparece quando a adição de elementos de liga não é bem controlada. Essa fase traz problemas sérios de fragilidade ao material como um todo, pois a sua forma contribui para a propagação de trincas e é formada, principalmente, pela adição incorreta de elementos do tipo refratários, que se precipitam em forma de plaquetas, diminuindo a resistência à tração da estrutura e podendo levar a tenacidade do material a quase nula. A figura abaixo ilustra a estrutura da fase Laves (XU, 2013):

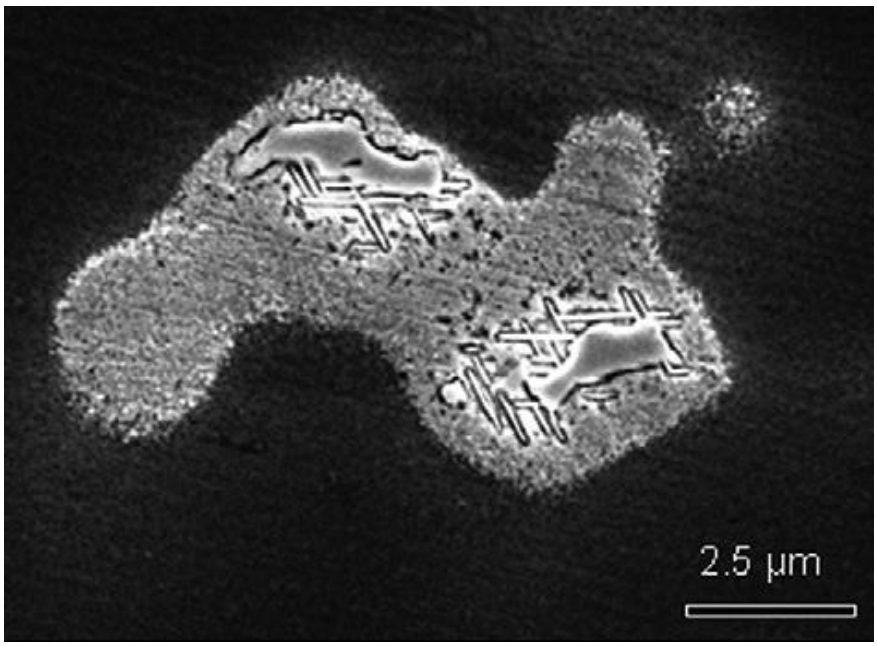


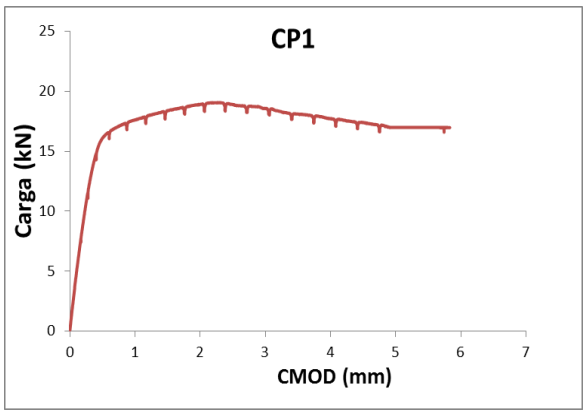
Figura 44: Fase Laves dentro de uma região interdendrítica (XU, 2013)

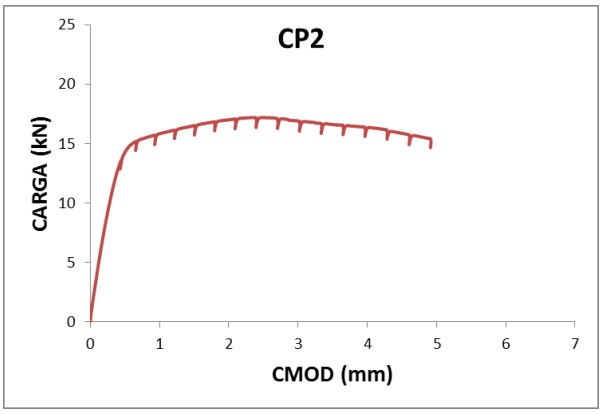
2. Resultados dos testes de fratura

Na Figura 45 é apresentada uma imagem dos CP5 e CP6 depois do teste de fratura, antes de serem separados para análise fractográfica. Como pode ser visto, todo o ligamento remanescente está deformado plasticamente.

Figura 45: Corpos de Prova 5 e 6 já testados

Na Figura 46 são apresentados os registros Carga vs. CMOD obtidos para os seis corpos de prova testados.





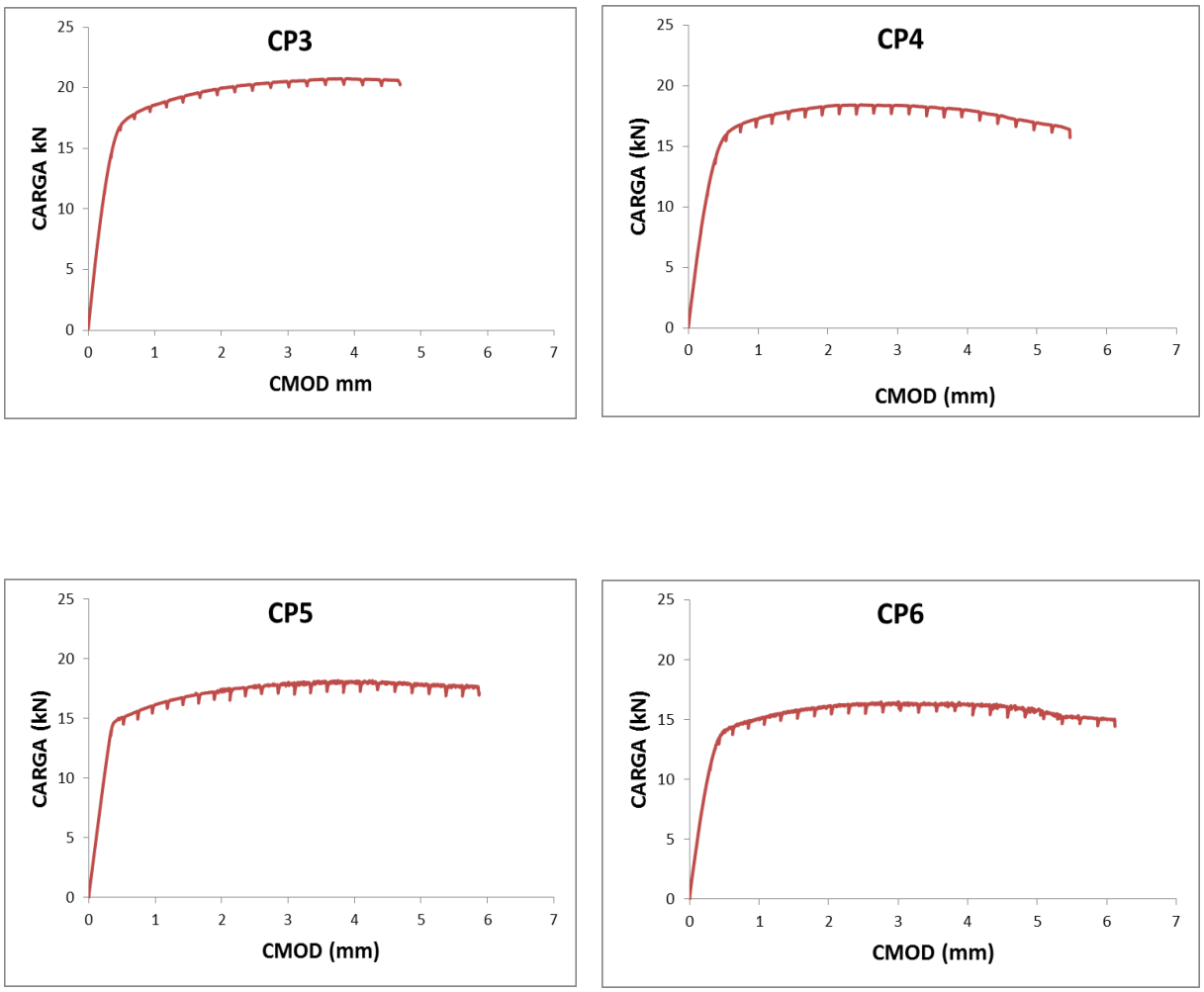


Figura 46: Gráficos de Carga versus CMOD para todos os CP

Como pode ser visto, não houve qualquer instabilidade nos registros durante os testes. O material apresentou um comportamento claramente elasto-plástico, típico de materiais com alta tenacidade. Os registros apresentam pequenas descargas parciais que são o inicio de descargas um pouco maiores, pois a partir desses testes foram também avaliadas curvas de resistência ao crescimento de trincas pelo método das descargas parciais. A análise desses resultados está fora do escopo do trabalho e essas curvas não serão apresentadas nem discutidas no trabalho, que tem como objetivo o cálculo do CTOD de carga máxima.

2.1. Medições do comprimento inicial da trinca

A seguir são apresentadas imagens da superfície de fratura do CP2, expostas como resultado da quebra do material resfriado. Nas superfícies de fratura apresentadas

pode-se visualizar claramente diferentes regiões de crescimento de trinca. A região mais clara na imagem, após a linha que define o fim do entalhe, corresponde à região do crescimento da pré-trinca por fadiga. As medidas do comprimento inicial da trinca, necessárias para o cálculo do CTOD, devem ser feitas nessa região.

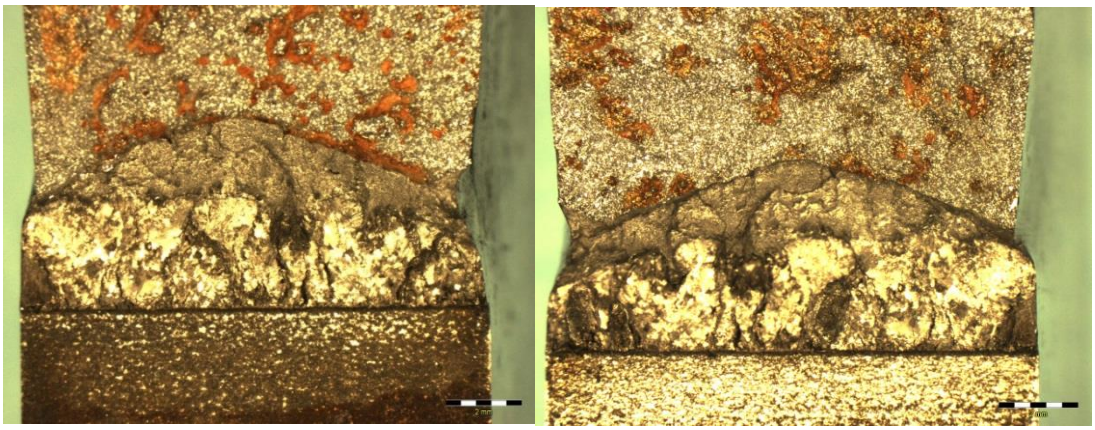


Figura 47: Superfícies de fratura do CP2 (à esquerda lado do aço, à direita lado do Inconel)

A Figura 51 exemplifica como foi feita a medição do comprimento inicial da trinca. Essa medição foi realizada a partir de imagens das superfícies de fratura dos corpos de prova obtidas por microscópio estereoscópio e processada em um software adequado. Na figura fica evidente como se realizam as nove medidas ao longo da espessura do CP.

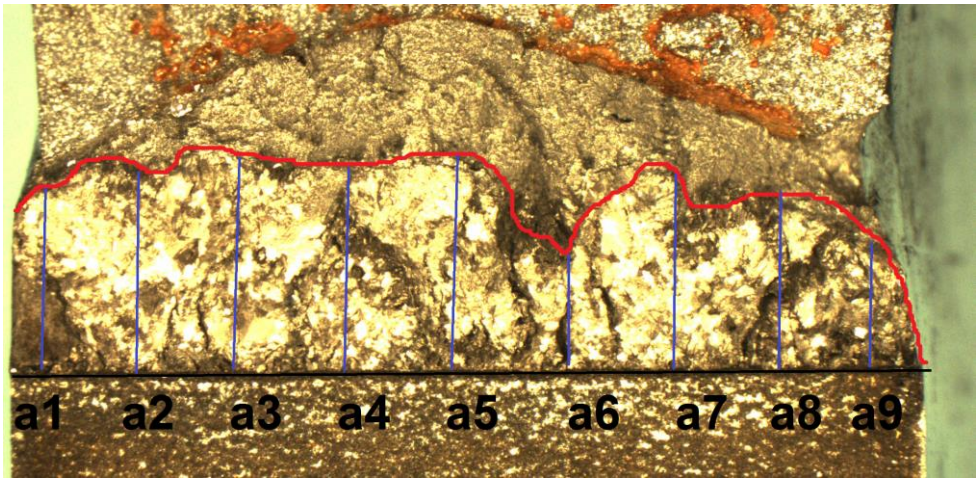


Figura 48: Superfície de fratura do CP2 mostrando as linhas igualmente espaçadas, usadas para a medição de a_0

O comprimento inicial da trinca é calculado como:

$$a_0 = \frac{1}{8}\left(\frac{a_1+a_9}{2} + \sum_{i=2}^{8} a_i\right) \qquad Eq.\ 10$$

onde a_i são as nove medidas individuais realizadas de acordo com o esquema da Figura 49.

O tamanho inicial da trinca pode ser medido somente nos CPs 1 e 2. Os outros CP apresentaram superfícies que não permitiram a medição do comprimento da pré-trinca, por isso, o comprimento inicial da trinca nesses casos foi estimado (valor nominal de 12,5 mm).

A Tabela 9 apresenta os valores de carga máxima, componente plástica do CMOD (Vp) e o CTOD para os seis corpos de prova.

Tabela 9: Resultados dos testes de CTOD

CP	Carga máxima (kN)	Vp(mm)	CTOD(mm)
1	19,08	1,920	0,389
2	17,19	1,879	0,390
3	20,76	3,496	0,820
4	18,43	2,069	0,486
5	18,15	3,333	0,782
6	16,47	2,605	0,611

Como pode ser visto, os CTOD calculados variam de 0,38mm a 0,83mm. Esses valores indicam que a tenacidade à fratura na região da interface é elevada, fato condizente com a forma dos registros Carga-CMOD que, como dito, não apresentaram instabilidades. Assim, nos diferentes CP testados não foram detectadas regiões da interface com comportamento frágil.

3. Resultados das medições de microdureza

Os resultados da varredura de microdureza perpendicular à interface são apresentados na Tabela 10. Os pontos negativos correspondem à microdureza no Inconel, e os positivos à do aço. O ponto indicado como 0 é o valor obtido na interface.

Tabela 10: Valores de microdureza do material

Distância da interface (mm)	**-2,0**	**-1,5**	**-1,0**	**-0,5**	**0,0**	**0,5**	**1,0**	**1,5**	**2,0**
Microdureza (HV)	272	272	233	279	290	264	272	245	198

Os resultados da avaliação da microdureza foram plotados em função da distância à interface. O resultado está apresentado na Figura 50:

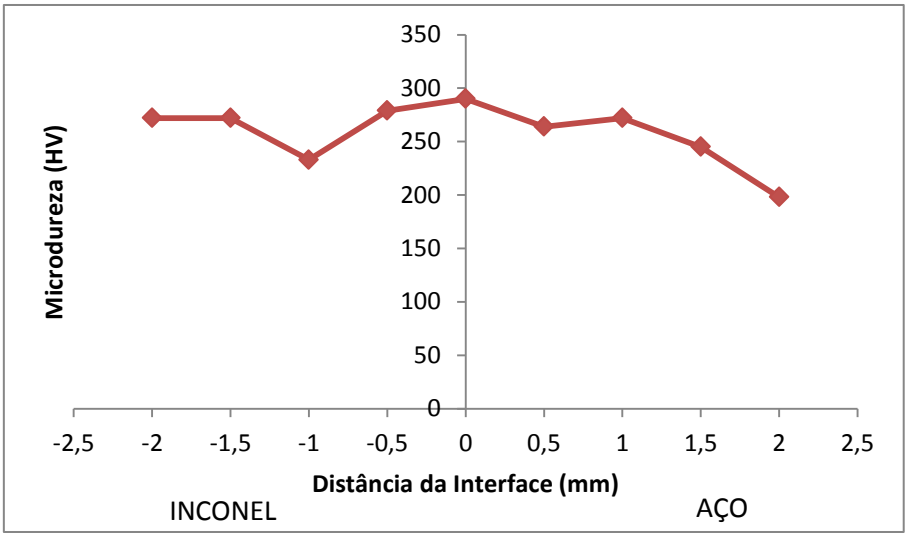


Figura 49: Perfil de microdureza do material na região da interface

Analisando a dureza do metal de base e do recobrimento, como era de se esperar, a dureza do Inconel 625 está um pouco acima da do aço API X-52. À medida que se aproxima da interface percebe-se que a dureza aumenta levemente, tanto do lado do aço quanto do Inconel. A máxima dureza na amostra se encontra justamente na

interface do material, que é zona de junção do Inconel 625 com aço API X-52 pela soldagem TIG. O valor máximo de microdureza é 290 HV (interface) enquanto que a microdureza média do Inconel (média da dureza dos três pontos mais afastados da interface) é de aproximadamente 259 HV e a do aço API X-52, no mesmo caso, de aproximadamente 238 HV.

Embora a interface apresente uma dureza um pouco maior, o aumento da dureza nessa região é 11,9% maior do que a dureza média do Inconel. Já comparada com a dureza média do aço o aumento é de aproximadamente 21,8%.

Conclusões

A análise microestutural revelou microestruturas típicas do processo de cladeamento por soldagem. A microestrutura na região do Inconel é típica do processo de solidificação após soldagem. A microestrutura original do aço, ferrítica-perlítica, apresentou bandeamento na direção de laminação. Na região da interface, o aço apresentou uma região estreita com microestrutura de solidificação e grãos grandes e uma ZTA estreita, com uma transição suave no que diz ao tamanho de grão. Do ponto de vista microestrutural nada anormal foi detectado no material.

Os registros Carga-CMOD de todos os CPs analisados apresentaram comportamento típico de um material elasto-plástico. Assim sendo, a avaliação da tenacidade à fratura da regiao da interface metal-clad deve ser feita mediante metodologias elasto-plásticas.

Não foram observadas instabilidades de qualquer tipo nos registros Carga-CMOD. A ausência de instabilidades indica que não foram detectadas regiões frágeis na interface metal-recobrimento. Em todos os casos o CTOD calculado correspondeu ao CTOD de carga máxima.

As medições de microdureza deram como resultado um maior nível de dureza na região da interface. Esse aumento da dureza, entretanto, não foi tão significativo, sendo aproximadamente 12% maior que a dureza média avaliada no Inconel e aproximadamente 22% maior que a dureza média avaliada no aço.

Os valores de CTOD avaliados em temperatura ambiente a partir de corpos de prova C(T) com trincas na região da interface estão no intervalo de 0,38mm a 0,83mm. Esses valores de tenacidade são considerados médios a altos, indicando que a região da interface possui boa tenacidade. Esse resultado deve ser corroborado mediante mais testes de fratura da região, pois no trabalho foram realizados somente 6 testes desse tipo.

Referências Bibliográficas

ALCÂNTARA, F. L., “Comportamento do crescimento de trinca por fadiga de um aço do tipo USI-SAC-50 laminado a quente em diferentes espessuras.” 2003

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Specification for line pipe. ANSI/API spefication 5L. 44.ed. Chicago, 2007

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook. Welding, brazing and soldering. 9 ed. Vol 6. OHIO, USA, Metals Park, 1983.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness ASTM E1820

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness ASTM E1290

ANDERSON, T. L., *“Fracture Mechanics: Fundamentals and Application”.* 2nd Edition

ANDRADE, T. F., “Precipitação de fases de Laves no aço inoxidável superferrítico 28%Cr-4%Ni-2%Mo-Nb.” São Paulo, 2006

AWS WHB-2 90” Explosion welding” AWS, USA.

BARBOSA, C. *Metais e ligas: Handbook*. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=13&cod_assunto=73.handbook infomet>. Acesso em: 30 mar. 2013.

BORTECH BOREWELDER [S1]: Disponível em: <http://www.bortech.com/hepv..asp>

BRASTUBO, “*Tubos Petrolíferos”* .In: Catálogo Técnico

BRITISH STANDARDS, Fracture mechanics toughness tests - Method for determination of KIc, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials BS 7448

CHUNG-YOUB, K., JAE-MAN, C., JI-HO S., *”Fatigue crack growth and closure behavior under random loadings in 7475-T7351 aluminum alloy”,* International Journal of Fatigue, Volume 47, February 2013, Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112312002654>

DEPARTMENT OF DEFENSE MANUFACTURING PROCESS STANDARD, “*Material Deposition, Cold Spray”.* USA, 2008. Disponível em

<http://www.arl.army.mil/www/pages/375/MIL-STD-3021.pdf> , Acessado em 24 de março de 2013.

DONATO, G. H. B., Magnabosco, R.; Ruggieri, C*., "Effects of Weld Strength Mismatch on J and CTOD Estimation Procedure for SE(B) Specimens",* International Journal of Fractures, v. 159, pp. 1-20, Aug. 2009

FORTES, C. *"Mecânica da Fratura*". 2003. Disponível em: http://www.FORTES, 2003.com.br/por/Instrucao/biblioteca/upload/ApostilaMecanicaFratura.pdf

FORTES, C. "*Metalurgia da Soldagem.".* 2004*.* Disponível em: <http://www.FORTES, 2003.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901102rev0_ApostilaMetalurgiaSoldagem.pdf>.

JOSEPH R DAVIS, *Handbook of Thermal Spray Technology*. 4 ed. OHIO, USA, Metals Park, 2004.

JÚNIOR, S. V. "*Técnicas metalográficas para caracterização microestrutural dos aços*". Disponível em: <http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/anais/artigos/eng_mecanica/29%20TECNICAS%20METALOGRAFICAS%20PARA%20CARACTERIZ%20MICROESTRU%20DOS%20ACOS.pdf>. Acessado em 20 de Março 2013.

HIPPERT, E., "Avaliação de defeitos planares em dutos através de metodologia micromecânica.", Boletim técnico Petrobras, 2003.

HERTZBERG, R. W. "Deformation and Fracture of Engineering materials and Structures" 4a. ed., John Wiley & Sons, 1996.

MACHADO, Ivan. Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. 1ed, Porto Alegre, Editado pelo autor, 1996.

MULTICLAD IND. "*Exemplos de Aplicação de Cladeamento na indústria."* Disponível em: <http://www.multiclad.com.br/3138.html>. Acessado em 11 de abril de 2013.

MARSHALL H., Estates Gazette Law Reports, LONDON, UK, 2007

NOBILI A., "*Explosion Bonding process*", Nobel Clad Technical Bulletin NT 200, pp. 1-6, Disponível em: <http://nobelclad.com/jdownloads/White%20Papers/nt_200_cladding_process_rev.pdf > Acessado em 23 de fevereiro de 2013

RHODE, R. A., "*Metalografia e Preparação de Amostras*". Disponível em: < http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>. Acessado em 20 de março de 2013.

SANFORD, R.J., "*Principles of fracture mechanics*", 2003, Prentice Hall.

SAXENA, A., "*Nonlinear fracture mechanics for engineers",* 1998

SERRA, F. A. S., "*Uso de Aço Inoxidável na Área Offshore."* Disponível em: < http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/apresentacoes/oleo-e-gas/flavio-augusto-uso-do-nox-na-area-offshore-novembro-20 >

SONG, K.H., NAKATA, K., "Effect of precipitation on post-heat-treated Inconel 625 alloy after friction stir welding", Materials & Design, Volume 31, Issue 6, June 2010, Pages 2942-2947, Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909007109

SHON, C., Mecânica da Fratura, anotações de aula, Disponível em: < http://moodle.stoa.usp.br/file.php/433/2010/PMT2200aula4em2009-Mec-da-fratura.pdf>. Acessado em 5 de abril de 2013.

SIEURIN, H., SANDSTRÖM, R., "*Fracture toughness of a welded duplex stainless steel*", Engineering Fracture Mechanics, March 2006, Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794405000925>

SILVA, C. C., AFONSO, C. R. M., RAMIREZ, A. J., MOTTA, M. F., MIRANDA, H. C., FARIAS, J.P.. *"Aspectos Metalúrgicos de Revestimentos Dissimilares com Superliga à Base de Níquel Inconel 625."* São Paulo, 2012.

TEIXEIRA, M. C. "Análise elastoplástica da propagação de trincas pelo método dos elementos de contorno." Disponível em: < http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/PASA-7RQHZY>

TENARISCONFAB. Tubos Para Condução (Lines Pipes).In: Catálogo Técnico, versão 03. 2004.

VALENCIA, J.J., MCCABE, T., HENS, K., HANSEN, J. O., BOSC, A., "*Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 625 and 718 Alloys Processed by Powder Injection Molding."* 1994. Disponível em: <http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1994/Superalloys_1994_935_945.pdf>

VARGAS-ARISTA, B., HALLEN, J.M., ALBITER, A., "Effect of artificial aging on the microstructure of weldment on API 5L X-52 steel pipe" 2006

XU, F., LV, Y., LIU, Y., SHU, F., HE, P., XU, B., Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process, Journal of Materials Science & Technology, Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030213000388>

WRIGHT P. K., Snow D. A., Tay C. K., *Interfacial Conditions and Bond Strenght in Cold Pressure Weldind by Rolling*. Vol 5. LONDON, UK, Metals Technology, 1978.