

Avaliação da Qualidade de uma Chapa de Aço Baixa Liga Revestida por Explosão

Carlos Antonio de Carvalho Ribeiro

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

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Rio de Janeiro

MARÇO/2013

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE UMA CHAPA DE AÇO BAIXA LIGA REVESTIDA
POR EXPLOSÃO.

Carlos Antonio de Carvalho Ribeiro

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

Examinada por:



Prof. João da Cruz Payão Filho, D.Ing. (Orientador)
PEMM/Escola Politécnica/UFRJ



Prof. Giselle de Mattos Araújo, M.Sc.
PEMM/Escola Politécnica/UFRJ



Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc.
IEN/CNEN

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2013

Ribeiro, Carlos Antonio de Carvalho

Avaliação da Qualidade de uma Chapa de Aço Baixa Liga Revestida por Explosão/ Carlos Antonio de Carvalho Ribeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

VII, 44 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Projeto de graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2013.

Referências Bibliográficas: pp 43-44

1. Aço Cr-Mo
2. Aço Inoxidável Austenítico
3. Soldagem por Explosão

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por ter me concedido a sabedoria e a determinação necessária para concluir o Curso de engenharia.

Aos meus pais Waldinéa e Antonio Carlos, a minha irmã Amanda, por terem me dado todo apoio e motivação nas horas mais difíceis da minha vida acadêmica.

Ao meu orientador de Projeto Final Prof. João Payão da Cruz Filho pelo apoio e pela oportunidade de aprendizado.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo trabalho e por toda dedicação prestada.

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela toda infraestrutura que me possibilitou a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos e familiares que contribuíram para minha formação como ser humano, em especial aos meus amigos Pedro Porto, Thiago Gonçalves, Bruno Raphael, Fernando Miranda, Carlos Louback, Gustavo, Alexandre, Pedro Ivo, Matheus, Hugo, e a minha avó e tias.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao DEMM/EP/UFRJ como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

Avaliação da Qualidade de uma Chapa de Aço Baixa Liga Revestida por Explosão

Carlos Antonio de Carvalho Ribeiro

Março/2013

Orientador: João da Cruz Payão Filho.

Os bi-materiais são uma boa escolha quanto aos custos na construção de equipamentos para a indústria petroquímica, como por exemplo, nos vasos de pressão. Nesses equipamentos, há a necessidade de boa resistência à corrosão e alta resistência a temperaturas elevadas. Neste estudo, foi analisada a qualidade de uma chapa de aço SA 387, grau 22, classe 2 revestida com aço inoxidável AISI 347 pelo processo de soldagem por explosão. A chapa recebida foi cortada com jato d'água e serra e usinada para confecção dos corpos de prova. Foram realizados uma caracterização do material através de análise química e metalográfica, ensaios mecânicos (microdureza, cisalhamento e dobramento) e ensaio de corrosão intergranular. A análise microestrutural do metal de base foi realizada com microscopia ótica e uma observação mais detalhada da zona de ligação foi obtida com microscopia eletrônica de varredura.

Palavras chave: Aço Cr-Mo Revestido com Aço Inoxidável, Avaliação da Qualidade.

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

Evaluation the Quality of a Low Alloy Steel Sheet Clad by Welding Explosion

Carlos Antonio de Carvalho Ribeiro

March/2013

Advisor: João da Cruz Payão Filho.

The bi-materials are a good choice as regards the construction costs of equipments for the petrochemical industry, such as in pressure vessels. In these equipments, there is a need for a good corrosion resistance and high strength at high temperatures in this study, we analyzed the quality of a SA 387, Grade 22 ,Class 2 steel plate clad with AISI 347 stainless steel by welding explosion. A material characterization by chemical analysis and metallographic analysis, mechanical tests (hardness, shear and bend) and intergranular corrosion tests were done. The plate was cut with water jet and saw and machined for preparation of the specimens. A material characterization was done by chemical analysis and metallographic, mechanical test (hardness tests, shear and bend) and intercrystalline corrosion. The microstructural analysis of the base material was performed with optical microscopy and a more detailed observation of the bonding zone was obtained with scanning electron microscopy.

Keywords: Cr-Mo Steel Clad with Stainless Steel, Evaluation of the Quality

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	2
2.1. Soldagem de Revestimento por Explosão	2
2.1.1. Etapas do Processo de Soldagem por Explosão	4
2.1.2. Vantagens e Desvantagens do Processo de Soldagem por Explosão	5
2.1.3. Metais Mais Utilizados e Aplicações.....	6
2.2. Aços Cr-Mo Resistentes ao Calor	7
2.2.1. Microestrutura dos Aços Cr-Mo	7
2.3. Aços Inoxidáveis Austeníticos	9
2.3.1. Microestrutura dos Aços Inoxidáveis Austeníticos	10
2.3.2. Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 347.....	11
2.4. Aços 2,25% Cr - 1% Mo Revestidos com Aço Inoxidável	11
3. Materiais e Métodos	13
3.1. Material como Recebido.....	13
3.2. Corte para a Confeção dos Corpos de Prova	13
3.3. Análise Química	14
3.4. Análise Metalográfica	14
3.5. Ensaio de Microdureza.....	15
3.6. Ensaio de Dobramento.....	15
3.7. Ensaio de Cisalhamento	16

3.8. Ensaio de Corrosão Intercristalina.....	18
4. Resultados e Discussão.....	19
4.1. Análise Química	19
4.2. Microscopia Ótica sem Ataque	22
4.3. Microscopia Ótica com Ataque	23
4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura	27
4.5. Ensaio de Microdureza	27
4.6. Ensaio de Cisalhamento	30
4.7. Ensaio de Dobramento	31
4.8. Ensaio de Corrosão Intercristalina	33
5. Conclusões	35
6. Referências Bibliográficas	36

1. INTRODUÇÃO

Equipamentos para a indústria petroquímica, siderúrgica e química exigem ligas resistentes à corrosão. O custo inicial de tais equipamentos é muito mais elevado do que daqueles fabricados de aço carbono, principalmente quando essas ligas são utilizadas em altas pressões e altas temperaturas, pois exigem uma maior espessura das chapas utilizadas para a fabricação desses equipamentos. O custo do equipamento pode ser reduzido significativamente com a substituição desses materiais por bi-metals com aços resistentes à fluência revestidos com aços inoxidáveis por cladeamento. O cladeamento por explosão apresenta vantagens em relação a outros processos de revestimento, tais como obtenções de maiores espessuras e a possibilidade de unir materiais dissimilares. As ligas geralmente utilizadas são aços inoxidáveis, ligas de níquel, ligas de cobre, titânio, zircônio e aços resistentes à fluência.

Os aços Cr-Mo possuem altas propriedades mecânicas e resistem ao ataque por hidrogênio em altas temperaturas. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem alta resistência à corrosão. Chapas de aço Cr-Mo revestidas com aço inoxidável são geralmente utilizadas nos vasos de pressão, que trabalham em altas temperaturas e alta pressão.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar uma chapa de aço SA 387, grau 22, classe 2 revestida com aço inoxidável AISI 347 pelo processo de soldagem por explosão, e avaliar, através de ensaios mecânicos e químicos, a aplicação da mesma na indústria petroquímica em vasos de pressão.

A caracterização do material foi feita através de análise química por espectroscopia de emissão ótica e pela análise da microestrutura do metal de base por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura.

Para avaliar se as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão se adaptam as especificações de uso foram realizados ensaios mecânicos, como ensaio de dobramento, cisalhamento e dureza, além do ensaio de corrosão intercrystalina para avaliar a susceptibilidade à corrosão do revestimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. *Soldagem de Revestimento por Explosão*

O processo de soldagem de revestimento por explosão foi descoberto no final dos anos 50. No final da década de 60, o processo passou a ser largamente utilizado industrialmente. Este tipo de revestimento de chapas, foi constantemente refinado. Hoje, podem ser produzidas chapas com espessuras muito maiores e com combinações de metais mais dissimilares, como o zircônio e aço inoxidável [2].

Este tipo de processo, é uma soldagem em estado sólido que produz uma junção entre dois componentes por alta velocidade de impacto conseguida pela detonação controlada de um explosivo. É uma excelente alternativa para a soldagem de materiais dissimilares. Os principais parâmetros do processo são: a velocidade de detonação e o ângulo de impacto [1].

Na prática, o revestimento e o metal de base são espaçados de uma pequena distância, e o explosivo é colocado sobre a superfície de cima do revestimento. Após a detonação dos explosivo, o revestimento é acelerado através da abertura entre as placas e colide com o material de base com um ângulo oblíquo. No ponto de impacto dos dois componentes, camadas superficiais finas são desprendidas e ejetadas da região na forma de um jato. Este jato de metais fundidos contém contaminantes superficiais que estavam originalmente presentes (normalmente óxidos), que dificultavam a ligação. Em consequência da colisão, as duas novas superfícies são mantidas em contato íntimo sob extrema pressão, permitindo que a ligação entre os dois metais seja formada. A **Figura 1** apresenta uma representação esquemática da operação de soldagem por explosão [2].

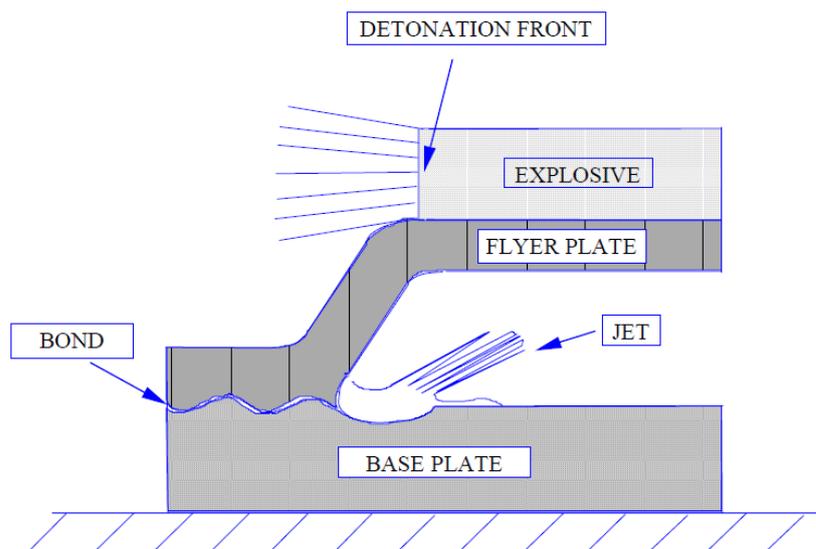


Figura 1 – Figura esquemática do processo de soldagem por explosão. Adaptado de [2].

Apesar da detonação do explosivo gerar uma considerável energia em forma de calor, a rápida escala de tempo resulta num mínimo de aumento na temperatura global dos metais. A soldagem por explosão é um processo que ocorre em estado sólido, ou seja não há fusão. Devido a ausência de aquecimento, a microestrutura, as propriedades mecânicas e as propriedades de corrosão dos metais originais se manterão quase que inalteradas pelo processo de soldagem por explosão [2].

A interface é caracterizada por ondas. Parâmetros de ligação corretos controlam a morfologia dessas ondas para evitar ou minimizar qualquer camada contínua de fusão ou intermetálicos. Esta zona de ligação, não apresentará muitas das características metalúrgicas dos processos de soldagem por fusão. As interfaces de soldagem, a princípio não revelarão zonas afetadas pelo calor e não apresentarão bandas de fusão com mistura de composição química dos materiais [1,2,6]. Não há difusão como resultado das baixas temperaturas da ligação. Metalurgicamente, a linha de ligação é muito similar aos contornos de grãos de alta energia. Devido a deformação a frio, ocorre um aumento ligeiro da dureza na zona de ligação [2].

A resistência mecânica da interface é geralmente maior que a resistência mecânica do componente metálico de menor resistência mecânica. Ensaio de cisalhamento e ensaios de dobramento são normalmente utilizados como medidas da resistência mecânica da zona de ligação. Por exemplo, ensaios de cisalhamento com revestimento de aço inoxidável apresenta resultados em torno de 520 MPa para a tensão de rompimento.

A **Figura 2** a seguir mostra uma interface característica da soldagem por explosão [1,2].

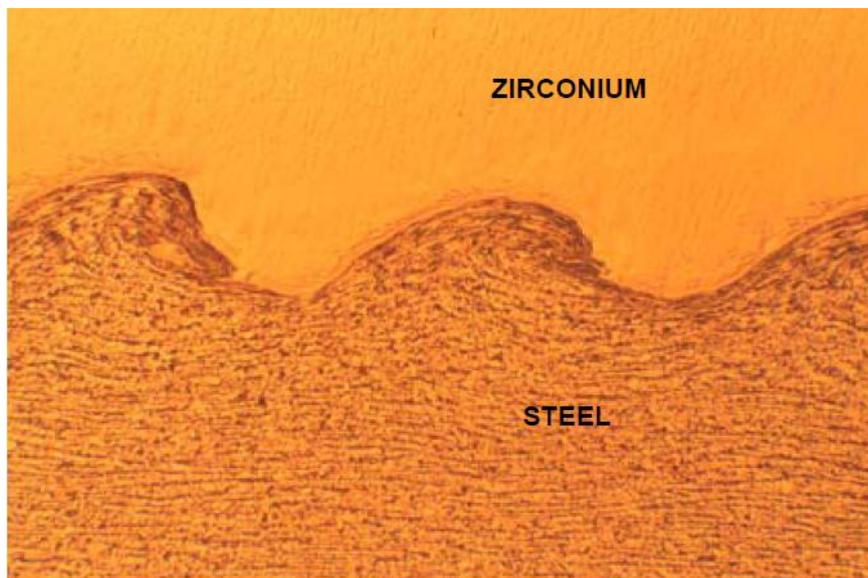


Figura 2 – Interface característica do processo de soldagem por explosão entre um aço e uma liga de zircônio. Adaptado de [2].

2.1.1. Etapas do Processo de Soldagem por Explosão

Na etapa de preparação, as superfícies de união do revestimento e do metal de base são lixadas e polidas para a obtenção de uma superfície uniforme. Uma quantidade de explosivo é colocado na superfície superior do revestimento.

O revestimento é posicionado paralelamente ao metal de base com uma pequena distância, já predeterminada pela combinação dos metais para colidir com uma determinada velocidade de impacto e ângulo de impacto.

Na etapa de detonação, a ignição se inicia de um determinado ponto da peça. A detonação viaja do ponto de ignição e por toda a superfície da chapa com uma determinada taxa de detonação. O revestimento colide com o metal de base com um determinado ângulo e uma velocidade de impacto. Uma fina camada dos metais fundidos é formada, e é expelida através de um jato, devido a progressão da detonação. Esse jato retira os óxidos metálicos e contaminantes superficiais, limpando assim a superfície interna. Essa combinação de superfície limpa e a colisão com uma pressão extremamente elevada possibilita a ligação.

Esse tipo de processo possibilita a criação de uma ligação metalúrgica com alta resistência mecânica e alta ductilidade.

A última etapa, consiste de inspeções não destrutivas, caracterização da ligação, ensaios mecânicos, análise física e certificação.

A **Figura 3** apresenta todas as etapas do cladeamento por explosão.

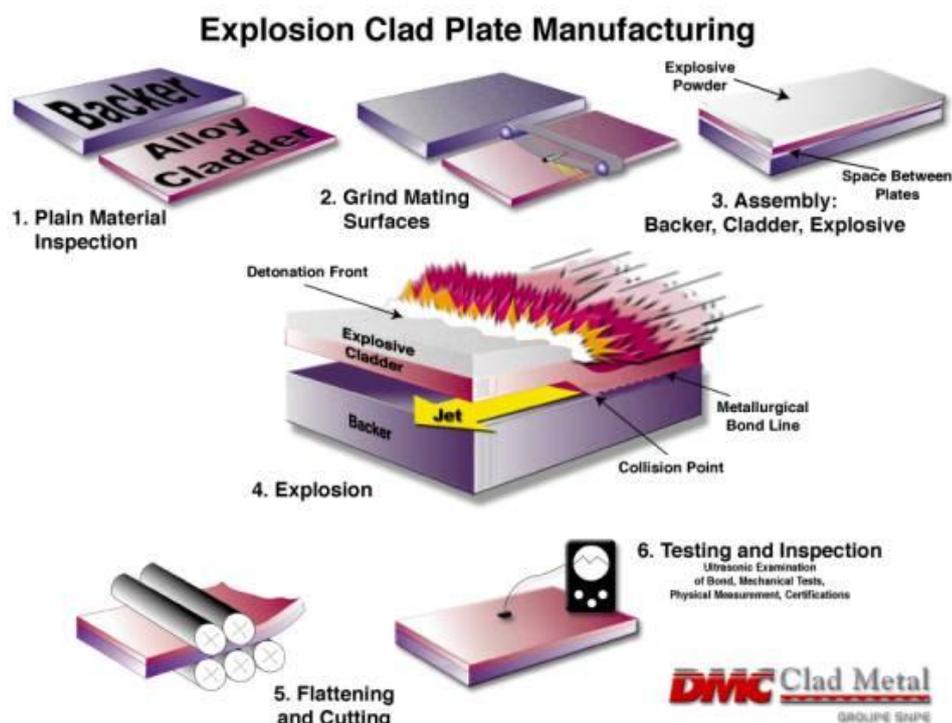


Figura 3 – Representação esquemática do processo de soldagem por explosão. Adaptado de [3].

2.1.2. Vantagens e Desvantagens do Processo de Soldagem por Explosão

As principais vantagens do cladeamento por explosão são: a junção de materiais dissimilares, como já explicitado anteriormente, a simplicidade do processo, a possibilidade de soldagem de chapas com espessuras muito grandes, e a pequena quantidade de explosivos utilizada [5].

As principais desvantagens são: o material deve ter alta resitência ao impacto e alta ductilidade, o barulho e a detonação exigem proteção ao operador e câmaras de vácuo (em alguns casos), e as restrições das geometrias soldadas que devem ser simples (plana, cilíndrica, ou cônica) [5].

2.1.3. Metais Mais Utilizados e Aplicações

A soldagem por explosão é um método efetivo na junção de virtualmente qualquer tipo de combinação de metais. A única limitação metalúrgica é que os materiais apresentem ductilidade e resistência ao impacto suficiente para a deformação rápida do processo sem que ocorra a fratura [3].

Os revestimentos mais empregados no cladeamento por explosão são: aços inoxidáveis austeníticos, ligas de cobre, alumínio, ligas de níquel, titânio, zircônio e tântalo [2].

Os metais de base mais utilizados são: aços ao carbono, aços inoxidáveis, cobre e alumínio [2].

As principais aplicações desses tipos de material são na fabricação de equipamentos utilizados na indústria naval, petroquímica e siderúrgica. São utilizados em equipamentos como vasos de pressão, trocadores de calor, tanques e tubulações para líquidos corrosivos, entre muitas outras aplicações. Mas, a maior utilização desses bi-metais são nos trocadores de calor e vasos de pressão.

Devido ao alto custo desses equipamentos, este tipo de processo se mostrou extremamente vantajoso, pois estes bi-materiais reduzem os custos de fabricação desses equipamentos, e se adaptam as exigências dos projetos.

A **Figura 4** mostra um trocador de calor feito com bi-metais. O material de base é um aço carbono e o revestimento é um aço inoxidável super duplex.



Figura 4 – Trocador de calor construído com aço ao carbono revestido com aço inoxidável super duplex. Adaptado de [19].

2.2. Aços Cr-Mo Resistentes ao Calor

Os aços Cr-Mo resistentes ao calor contêm de 0,5 a 9% de Cr e 0,5 a 1% de Mo. O teor de carbono é normalmente abaixo de 0,2%. O cromo aumenta a resistência à oxidação, e o molibdênio aumenta a resistência a temperaturas elevadas.

Esses aços são muito usados nas indústrias de óleo e gás, na indústria petroquímica e na indústria de energia nuclear [7].

A resistência à fluência vem principalmente de duas fontes: Endurecimento por solução sólida da matriz ferrítica pelo carbono, molibdênio e cromo; e endurecimento por precipitação de carbonetos. A resistência à fluência, quase sempre, aumenta com maiores quantidades de molibdênio e cromo.

A característica microestrutural terá sua importância no que diz respeito à fluência. Uma microestrutura bainítica tem maior resistência à fluência sob elevadas tensões aplicadas num curto tempo, mas ela degrada mais rapidamente a altas temperaturas em relação a uma estrutura perlítica. Ambos os mecanismos de endurecimento tornam-se instáveis em temperaturas elevadas. No endurecimento por solução sólida, um incremento de temperatura aumenta a taxa de difusão dos átomos do soluto no ambiente das discordâncias, tornando o movimento de discordâncias mais fácil. No endurecimento por precipitação, aquecer a liga a uma temperatura excessivamente alta pode causar solubilização dos precipitados. Em temperaturas intermediárias, os precipitados podem coalescer, provocando o superenvelhecimento, e tornarem-se menos efetivos em impedir o movimento de discordâncias [8].

2.2.1. Microestrutura dos Aços Cr-Mo

As microestruturas dos aços Cr-Mo são funções tanto da composição química como do histórico de tratamentos termomecânicos aos quais foram submetidos. Ou seja, dependendo do nível de solubilização do projeto o tratamento térmico é selecionado. Tipicamente baixas taxas de resfriamento implicam na formação de ferrita e perlita, enquanto que bainita e martensita exigem maiores taxas de resfriamento. A temperatura de austenitização desses aços está na faixa de 954 a 1016°C. Os tratamentos térmicos empregados nesses aços são:

- Recozimento: a peça é submetida a austenitização, seguida de resfriamento ao forno. A microestrutura final é perlítica e ferrítica.
- Normalização e revenimento: primeiro, realiza-se a austenitização da peça, seguido de resfriamento ao ar. O revenimento é realizado aquecendo-se o

material entre 580 a 720° C. A microestrutura final ferrita e bainita ou somente bainita.

- Têmpera e revenimento: austenitiza-se o material, resfria-se com óleo e depois realiza-se o revenimento entre 570 a 705 C. A microestrutura final consiste em martensita e bainita.

A **Figura 5** e a **Figura 6** mostram as micrografias para o estado recozido e para o estado normalizado e revenido e o diagrama de resfriamento contínuo do aço Cr-Mo.

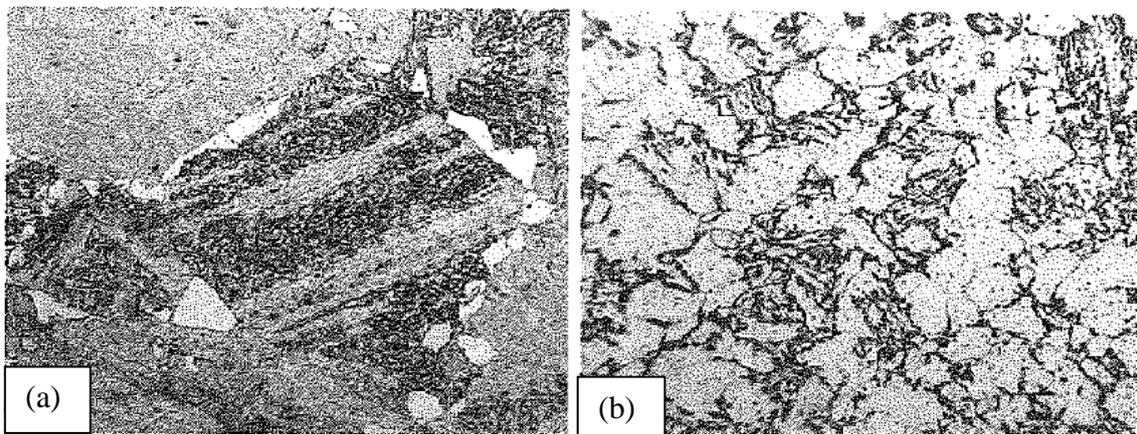


Figura 5 – Microestrutura do aço Cr-Mo: (a) normalizado e revenido ; (b) recozimento. Adaptado de [9].

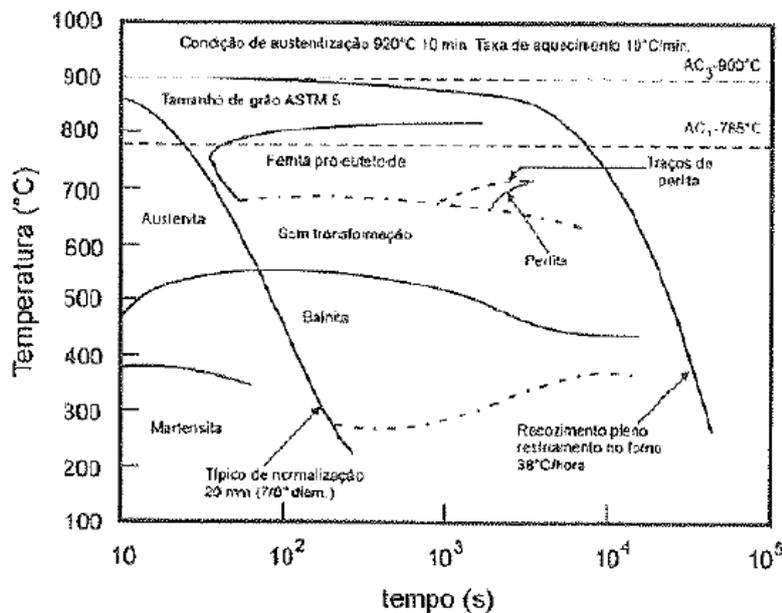


Figura 6 – Diagrama de resfriamento contínuo do aço Cr-Mo. Adaptado de [9].

2.3. Aços Inoxidáveis Austeníticos

A estrutura cúbica de face centrada (CFC) do ferro é denominada austenita. É a forma estável do ferro puro entre 910 e 1400°C.

Os chamados aços inoxidáveis austeníticos fazem parte de um grupo de ligas a base de ferro com composição básica de 16 a 25% de Cr, até 20% de Ni e em alguns casos, pode ser adicionado Mn. Devido a esta constituição, os aços inoxidáveis não são magnéticos, apresentam boa soldabilidade e não podem ser endurecíveis por tratamento térmico, mas podem ter a resistência mecânica aumentada por deformação a frio [11].

Esse tipo de aço é bastante utilizado nas indústrias químicas, farmacêuticas e petroquímica, devido, principalmente, à sua alta resistência à corrosão em meios altamente severos e por terem boas propriedades mecânicas em altas temperaturas. Entre todos esses aços, o mais popular é o do tipo 304, que contém basicamente 18% Cr, 8% de Ni teor de carbono limitado a 0,08%. Entretanto, a composição química pode variar de acordo com as condições de uso, dessa forma, por exemplo, o molibdênio pode ser introduzido com a finalidade de diminuir a susceptibilidade de corrosão por pites e frestas [11].

Estes aços, entretanto, quando submetidos por algum tempo à temperatura , geralmente em torno, entre 450° e 850° C, ficam sujeitos à precipitação de carbeto de cromo em seus contornos de grão, o que os torna sensibilizados. A sensibilização é o estado resultante do material quando uma precipitação abundante de carbeto de cromo reduz o teor de cromo em regiões vizinhas aos contornos, ficando as mesmas com sua resistência à corrosão drasticamente comprometida, tornando o material suscetível à corrosão intergranular em certos meios. As zonas termicamente afetadas (ZTA) por operações de soldagem destes aços são particularmente sensíveis a esta forma de corrosão, já que durante o ciclo de soldagem parte do material é mantida nesta faixa de temperatura. A **Figura 7** abaixo representa o contorno de grão de um aço sensibilizado [13].

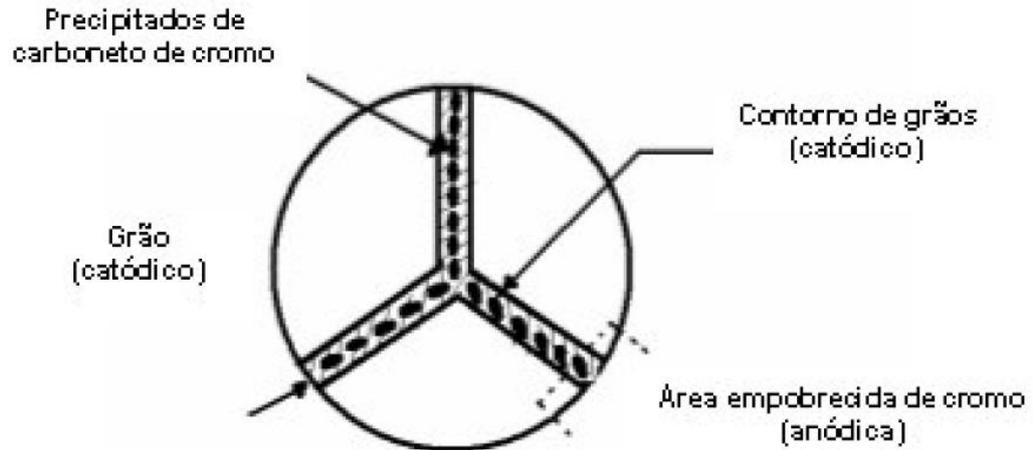


Figura 7 – Representação esquemática do contorno de grão de um aço sensibilizado.

Adaptado de [13]

A utilização de elementos de liga estabilizadores, como o titânio e o nióbio nos aços inoxidáveis austeníticos, tem como finalidade evitar a sensibilização dos mesmos. Outra maneira de evitar esse problema, consiste em submeter esse aço a um tratamento térmico de solubilização, ou seja, manter o aço a uma temperatura acima da temperatura de dissolução dos precipitados de cromo, ocorrendo completa ou parcial dissolução destes, sendo seguido de um resfriamento rápido que evitará a reprecipitação.

2.3.1. Microestrutura dos Aços Inoxidáveis Austeníticos:

Para descrever a microestrutura nos aços inoxidáveis foi introduzido o conceito de cromo equivalente (Cr_{eq}) e níquel equivalente (Ni_{eq}). Esta é uma forma conveniente de apresentar o efeito dos diversos elementos na evolução microestrutural, relativo ao efeito do cromo e do níquel.

O diagrama de Schaeffler, apresentado na **Figura 8** é muito utilizado para ilustrar o potencial ferritizante e austenitizante, e determinar a estrutura de certas composições químicas [18].

Portanto, a microestrutura de um aço inoxidável austenítico depende do balanço da composição química entre os elementos austenitizantes e ferritizantes.

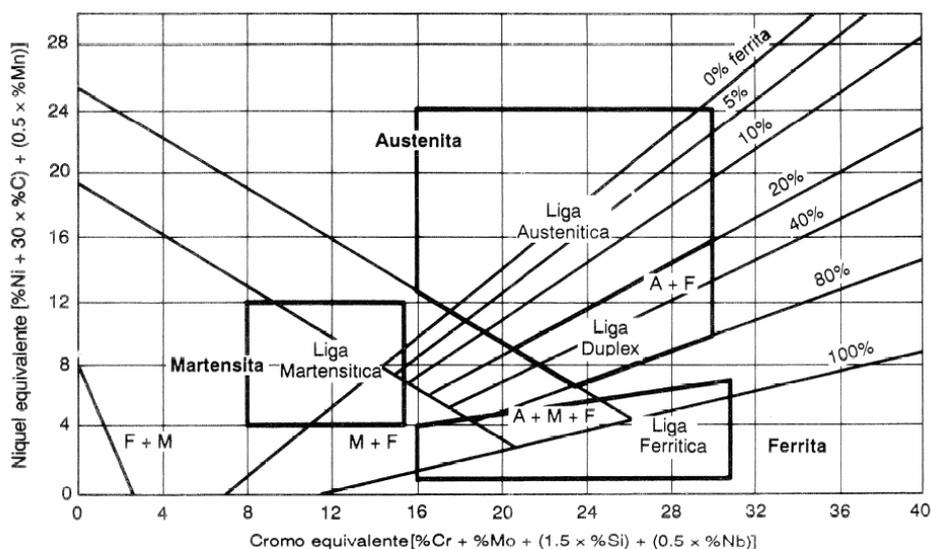


Figura 7 – Representação esquemática do contorno de grão de um aço sensitizado. Adaptado de [18].

2.3.2. Aço Inoxidável Austenítico AISI 347

O aço inoxidável AISI 347 é o típico aço inoxidável austenítico estabilizado ao nióbio. A adição de nióbio, em cerca de 10 vezes o teor de carbono em peso, tem como função provocar a precipitação de carbeto de nióbio NbC que evitam a sensitização e aumentar a resistência à fluência.

Este aço estabilizado pode ser utilizado em temperaturas na faixa de 500° a 850° C, mas para isso devem passar por um tratamento térmico de estabilização. A estabilização deve provocar a precipitação de carbeto de nióbio, retirando todo o carbono em solução sólida [10].

2.4. Aços 2,25% Cr – 1% Mo Revestidos com Aço Inoxidáveis

Vasos de pressão são usados em altas temperaturas e alta pressão de hidrogênio em serviço. Na construção destes vasos são utilizados aços Cr-Mo internamente revestidos com aços inoxidáveis.

O aço Cr-Mo fornece propriedades mecânicas superiores e resistência ao ataque por hidrogênio em altas temperaturas. O revestimento com aço inoxidável fornece resistência à corrosão.

Quando selecionados corretamente, cada componente do bi-material atende os respectivos requisitos de desempenho e efetivamente resiste ao hidrogênio. No

entanto, a interface entre o revestimento e o metal de base pode ser susceptível ao descolamento em certas condições de hidrogênio em altas temperaturas [4].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Material como recebido

O material estudado no presente trabalho foi uma chapa de aço baixa liga com 2,25% Cr – 1% Mo (SA 387, grau 22, classe 2) que se encontrava no estado normalizado e revenido. Esse aço foi revestido pela empresa Multiclad com aço inoxidável AISI 347, no estado solubilizado, pelo processo de soldagem por explosão ao ar.

O metal de base em questão, ou seja, o aço Cr-Mo, possuía dimensões de 500mm x 500mm e 50,8mm de espessura. Enquanto, o revestimento, no caso o aço inoxidável possuía as seguintes dimensões: 500mm x 500mm e 4,8mm de espessura. A **Figura 9** a seguir mostra a chapa de aço recebida.

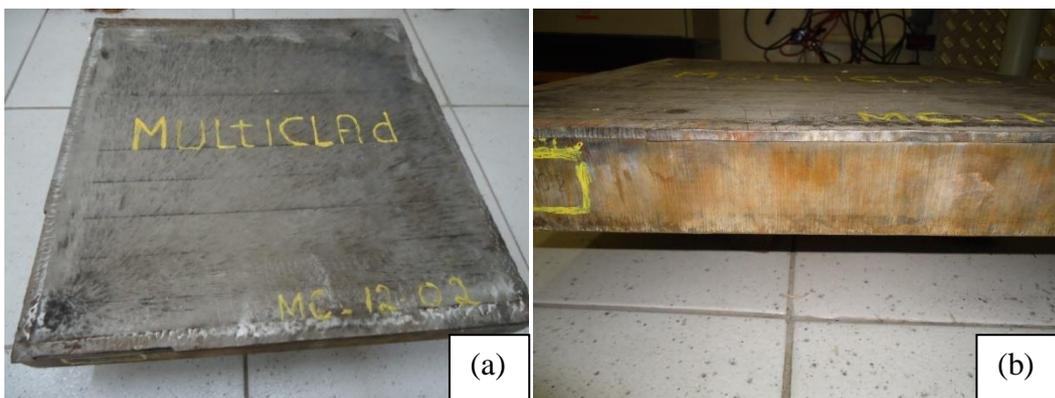


Figura 9 – Material recebido: (a) vista superior da chapa; (b) vista lateral da chapa

3.2. Corte para Confeção dos Corpos de Prova

A chapa foi cortada a frio com jato d'água e com serra, pois esses dois tipos de corte não possuem zona afetada pelo calor. Assim, evita-se que os corpos de prova sejam termicamente afetados.

Após o corte, as peças cortadas são usinadas para a confecção das amostras utilizadas nos diversos ensaios realizados, com a finalidade de avaliar a qualidade da chapa de aço recebida, através das normas específicas para cada um dos ensaios. Foram feitos ensaios mecânicos, caracterização do material recebido e ensaio de corrosão intergranular. A **Figura 10** mostra a chapa sendo cortada por jato d'água.



Figura 10 – Corte com jato d'água: (a) máquina de corte; (b) máquina de corte mais detalhada

3.3. Análise Química:

A análise química tem como objetivo determinar a composição química do aço baixa liga (material de base) e do aço inoxidável (revestimento).

Assim, foram realizadas duas análises químicas no material base e uma análise química no revestimento com um espectrômetro de emissão ótica da marca Spectro modelo não especificado.

A **Figura 11** apresenta a amostra utilizada na análise química do metal de base.

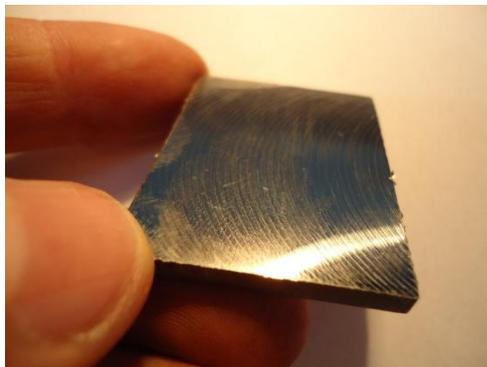


Figura 11 – Amostra para análise química do metal de base

3.4. Análise Metalográfica:

A análise metalográfica foi realizada para caracterizar a chapa recebida e é descrita a seguir.

As amostras, que foram cortadas anteriormente, foram lixadas com granulometria de 220 a 1000. Em seguida, foi realizado o polimento das mesmas com pasta de diamante de 5 μ m, 3 μ m e 1 μ m.

Primeiramente, as amostras foram observadas sem ataque químico com um microscópio ótico da marca Olympus, modelo GX71, para visualização das inclusões não metálicas presentes no metal de base e no revestimento.

Após a observação sem o ataque químico, a caracterização seguiu o procedimento padrão, sendo as amostras atacadas com reagentes químicos para a avaliação microestrutural do metal de base (aço baixa liga). Foi realizado um ataque químico com nital 2%.

Para a avaliação microestrutural foi utilizado o mesmo microscópio ótico Olympus e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca JEOL modelo JSM 6460LV com EDS acoplado Thermo/Noran SIX- Model 200.

3.5. Ensaio de Microdureza Vickers

A dureza é uma medida de resistência a penetração de uma superfície. Foi realizado uma medição de microdureza Vickers para analisar a interface entre a zona de ligação, o revestimento, o metal de base e as zonas afetadas pelo calor encontradas na microscopia com nital 2%. A microdureza realizada foi a HV 0,1 fazendo 10° com a zona de ligação. Utiliza-se a zona de ligação como origem e realiza-se medidas a cada 0,1mm em direção ao material de base e em direção ao revestimento.

3.6. Ensaio de Dobramento:

O ensaio de dobramento foi utilizado para analisar, através de deformação plástica, a qualidade do metal de base, do revestimento e da interface metal de base-revestimento. O ensaio de dobramento apresenta uma análise qualitativa da ductilidade do material.

Assim, foram realizados três tipos de ensaio de dobramento: o dobramento lateral, o dobramento de face, com o aço inoxidável sob tração, e o dobramento de raiz, com o aço baixa liga sob tração.

Todo o procedimento do ensaio de dobramento, como a usinagem dos corpos de prova, condições de ensaio e a discussão dos resultados dos ensaios, foi baseado nas normas: ISO 5173-2000, ASTM A20/20M e ASTM A264-03.

Para cada tipo de dobramento, foram utilizados três corpos de prova, que foram usinados com as seguintes dimensões: 167mm de comprimento, 38 mm de largura e 10mm de espessura. Esses corpos de prova foram retirados de locais da chapa observando sua direção de laminação, pois a mesma é fundamental na ductilidade deste ensaio [14,16,17]. A **Figura 12** a seguir mostra os corpos de prova do ensaio de dobramento.

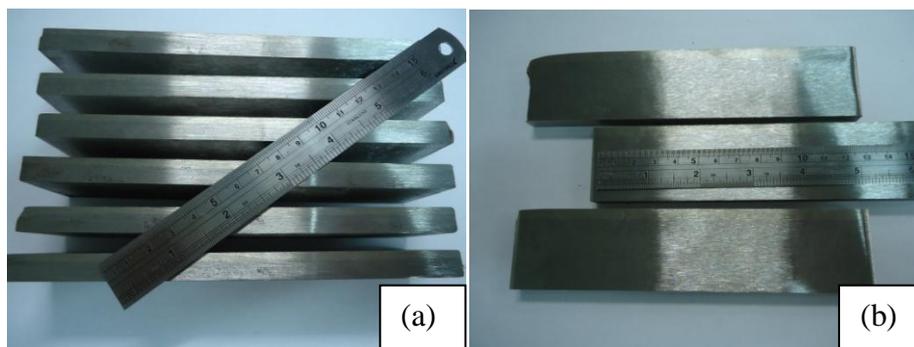


Figura 12 – (a) Corpos de prova para o dobramento de fase e de raiz; (b) Corpos de prova para o dobramento lateral

As amostras foram usinadas, porém de forma a serem tomadas algumas precauções, como evitar encruamento superficial ou aquecimento excessivo. A superfície dos corpos de prova deve estar livre de arranhões e ranhuras.

O ensaio se constitui em colocar a amostra entre dois suportes paralelos, constituídos de dois rolos. O corpo de prova é dobrado pelo carregamento contínuo e gradual com uma força perpendicular a superfície da amostra até um ângulo de dobramento de 180°.

3.7. Ensaio de Cisalhamento:

A realização do ensaio de cisalhamento teve como função avaliar a resistência mecânica da ligação entre o aço inoxidável e o aço baixa liga.

Todo o procedimento desse ensaio, como o dimensionamento dos corpos de prova, condições de ensaio e avaliação dos resultados, foi baseado na norma ASTM A264-03.

Os corpos de prova de cisalhamento também foram retirados observando a direção de laminação da chapa recebida, pois a mesma afeta a tensão de cisalhamento no ensaio. Assim, foram realizados ensaios em dois tipos de corpo de prova, o primeiro paralelo a direção de laminação, e o segundo perpendicular a direção de laminação.

O dimensionamento dos corpos de prova seguiu a norma ASTM A264-03, como dito anteriormente. O corpo de prova foi usinado da seguinte maneira: foi retirado todo o revestimento de aço inoxidável. Deixa-se apenas um pedaço do revestimento com uma espessura de 3mm e largura de 4,5mm. O corpo de prova apresenta uma largura de 25mm, a qual será utilizada no cálculo da tensão de cisalhamento. A **Figura 13** mostra como foi dimensionado o corpo de prova de cisalhamento pela norma.

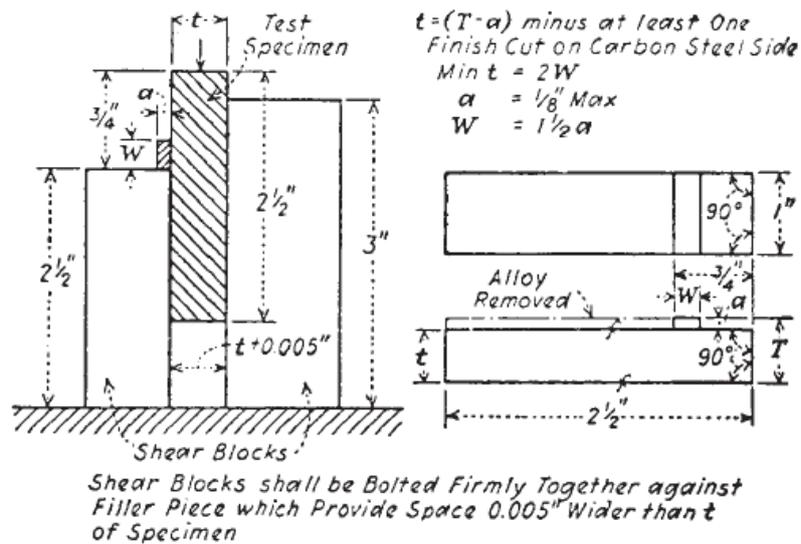


Figura 13– Dimensionamento dos corpos de prova de cisalhamento. Adaptado de [16].

A **Figura 14** mostra os corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento.

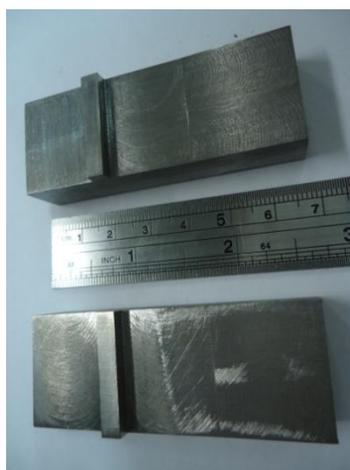


Figura 14 – Corpos de prova do ensaio de cisalhamento

3.8. Ensaio de Corrosão Intercristalina:

Este ensaio tem como objetivo avaliar a susceptibilidade a corrosão intergranular do revestimento, no caso o aço inoxidável AISI 347.

O dimensionamento dos corpos de prova, as condições de ensaio e os resultados obtidos foram baseados na norma ASTM A262-02a, prática E.

Para a confecção dos corpos de prova, foi feita a usinagem dos pedaços já cortados da chapa em questão. O metal de base, o aço baixa liga, foi totalmente retirado por operação de fresamento. Nessa etapa, foi retirado também 1mm do aço inoxidável para garantir que não houvesse nenhum metal de base nas amostras em questão.

Os corpos de prova possuem as seguintes dimensões: 75mm de comprimento, 25mm de largura e 3,8mm de espessura. **A Figura 15** mostra os corpos de prova do ensaio de corrosão intergranular.

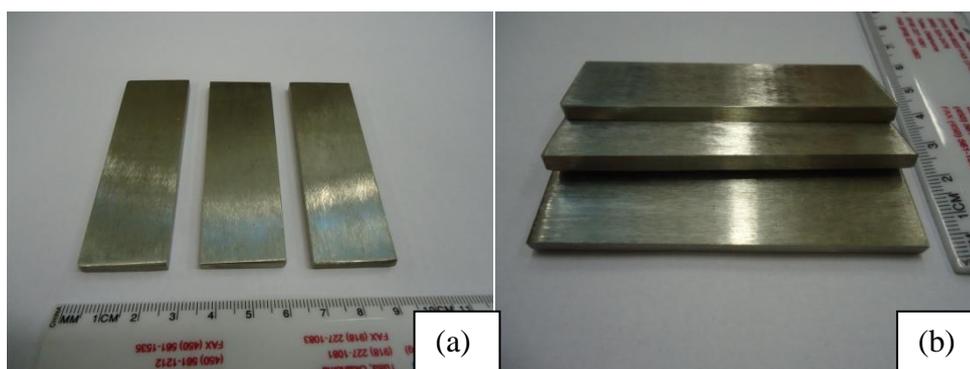


Figura 15 – (a) Corpos de prova de corrosão intercrystalina vista superior; (b) Corpos de prova de corrosão intercrystalina vista lateral

No ensaio, foi utilizado apenas um corpo de prova. Antes do ensaio, este corpo de prova foi submetido a um tratamento térmico de sensibilização, com uma temperatura de 675°C por um tempo de 1 hora, pois nessa temperatura ocorre a máxima precipitação dos carbeto de cromo [15].

O ensaio consiste em expor a amostra a uma solução de sulfato de cobre acidificado em ebulição durante 15 horas, e posteriormente fazer um ensaio de dobramento na amostra, verificando assim, a existência de susceptibilidade a corrosão intercrystalina pela ocorrência de trincas na amostra [15].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Química

Foram realizadas, como já especificado anteriormente, duas análises químicas no aço baixa liga (metal de base) e posteriormente calculada uma média para os resultados obtidos nos dois ensaios.

A **Tabela 1** apresenta a composição química do SA 387, classe 22, grau 2 esperada.

Tabela 1- Composição química do aço SA387. Adaptado de [7].

Composição Química	C	Mn	P	S	Si (Max)	Cr	Mo
% em peso	0,05- 0,15	0,30- 0,60	0,035	0,035	0,50	2,00- 2,50	0,9- 1,10

Os resultados dos dois ensaios e a média dos mesmos serão mostrados a seguir em formato na **Tabela 2**.

Tabela 2- Composição química do aço 2,25% Cr – 1% Mo recebido.

Elemento Químico	% em peso Análise 1	% em peso Análise 2	Média
C	0,1720	0,168	0,1700
Mn	0,5300	0,5300	0,5300
P	0,0130	0,0110	0,0120
S	0,0160	0,0140	0,0150
Si	0,2140	0,2150	0,2145
Cu	0,1780	0,1750	0,1765
Ni	0,1400	0,1370	0,1385
Cr	2,1800	2,1900	2,1850
Mo	0,8300	0,8300	0,8300
Nb	0,0300	0,0300	0,0030
V	0,0110	0,0110	0,0110
Ti	0,0010	0,0010	0,0010
B	0,0009	0,0010	0,0010
Sn	0,0100	0,0098	0,0099
Ca	0,0007	0,0007	0,0007
Al	0,0250	0,0250	0,0250
Pb	0,0030	0,0030	0,0030
W	0,0015	0,0150	0,0150
Zn	0,0020	0,0020	0,0020
As	0,0052	0,0051	0,0052

A análise química realizada foi comparada com a da norma apresentada na **Tabela 2**. O teor de carbono na amostra analisada foi maior do que o especificado. Essa presença maior de carbono favorece uma maior formação de carbeto, contribuindo para um aumento na resistência mecânica. O teor de Mo se apresentou um pouco abaixo do mínimo. Todos os outros elementos estiveram dentro do teor esperado.

A **Tabela 3** apresenta a composição química esperada para o aço inoxidável AISI 347.

Tabela 3- Composição química do aço AISI 347. Adaptado de [7].

Composição Química	C (Max)	Mn (Max)	Cr	Ni	Si (Max)	P (Max)	S (Max)	N (Max)	Nb
%	0,08	2,0	17-19	9-13	0,75	0,045	0,03	0,02	10x %C

A análise da composição química do aço inoxidável (revestimento) foi feita somente com uma análise química. A **Tabela 4** abaixo apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4- Composição química do aço AISI 347.

Elemento Químico	Análise %
C	0,057
Si	0,49
Mn	1,66
P	0,03
S	0,005
Cr	17,00
Ni	9,66
Mo	0,58
Al	0,005
Cu	0,17
Co	0,006
Ti	0,011
Nb	0,54
V	0,061
W	0,021
Pb	0,007
B	0,002
Sn	0,008
As	0,012
Bi	<0,002
Ca	0
Fe	69,7

Os resultados apresentados na análise química do revestimento foram comparados com **Tabela 4**. A porcentagem em peso de todos os elementos estava dentro das especificações.

4.2. Microscopia Ótica Sem Ataque Químico

A primeira observação no microscópio ótico foi realizada sem ataque químico. A **Figura 16** mostra as imagens obtidas com diversos aumentos.

Pode-se observar que as ondas típicas da soldagem por explosão, processo empregado para o revestimento da chapa de aço Cr-Mo. A morfologia das ondas, bem como o comprimento das mesmas, depende dos parâmetros de soldagem, como a velocidade de detonação.

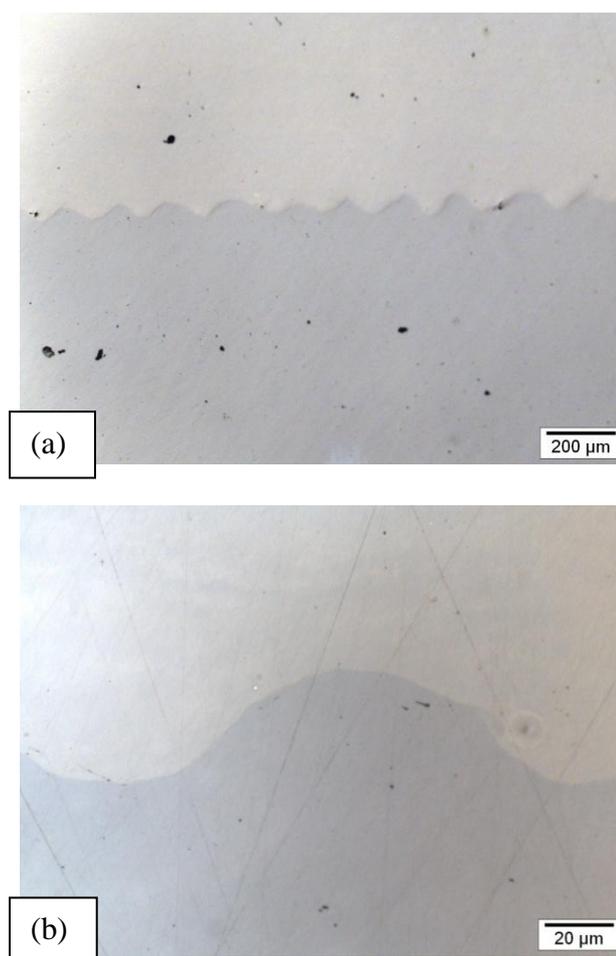


Figura 16 – Micrográfia sem ataque: (a) aumento de 100x; (b) aumento de 1000x

A **Figura 17** mostra uma observação mais detalhada das inclusões não metálicas encontradas no metal de base. Este alongamento das inclusões possibilita a

obtenção da direção de laminação da chapa. A determinação da direção de laminação da chapa foi de fundamental importância na confecção dos corpos de prova dos ensaios de dobramento e cisalhamento.

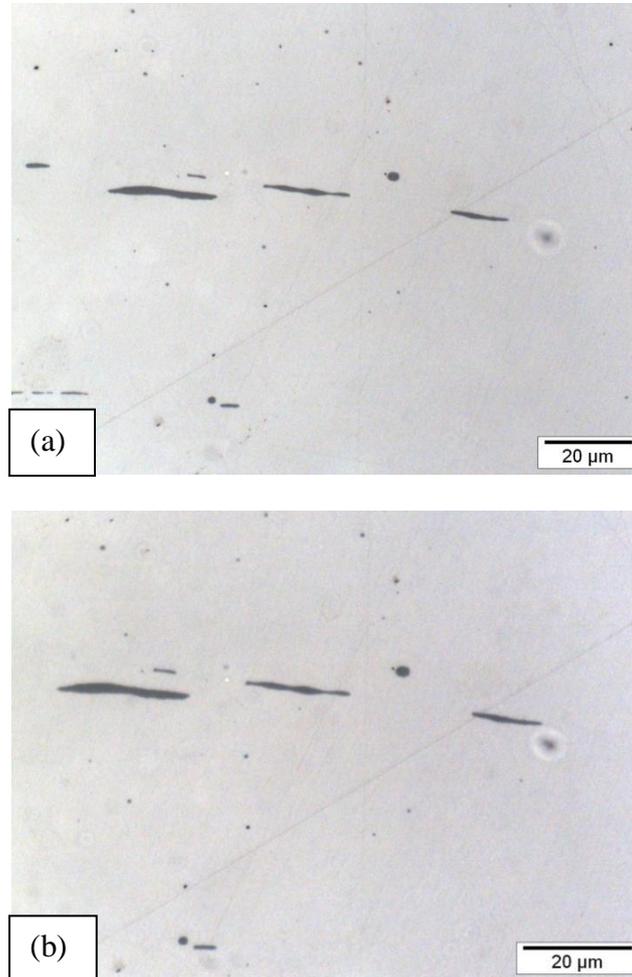


Figura 17 – Micrografia mostrando as inclusões : (a) aumento de 1200x; (b) aumento de 1500x

4.3. Microscopia Ótica com Ataque Químico

A **Figura 18** mostra o metal de base bem distante da zona de ligação entre o metal de base e o revestimento. Essa microestrutura obtida está de acordo com o esperado para um aço Cr-Mo no estado normalizado e revenido. A microestrutura é constituída de bainita e ferrita com precipitação de carbeto de cromo e molibdênio, que não podem ser identificados por microscopia ótica.

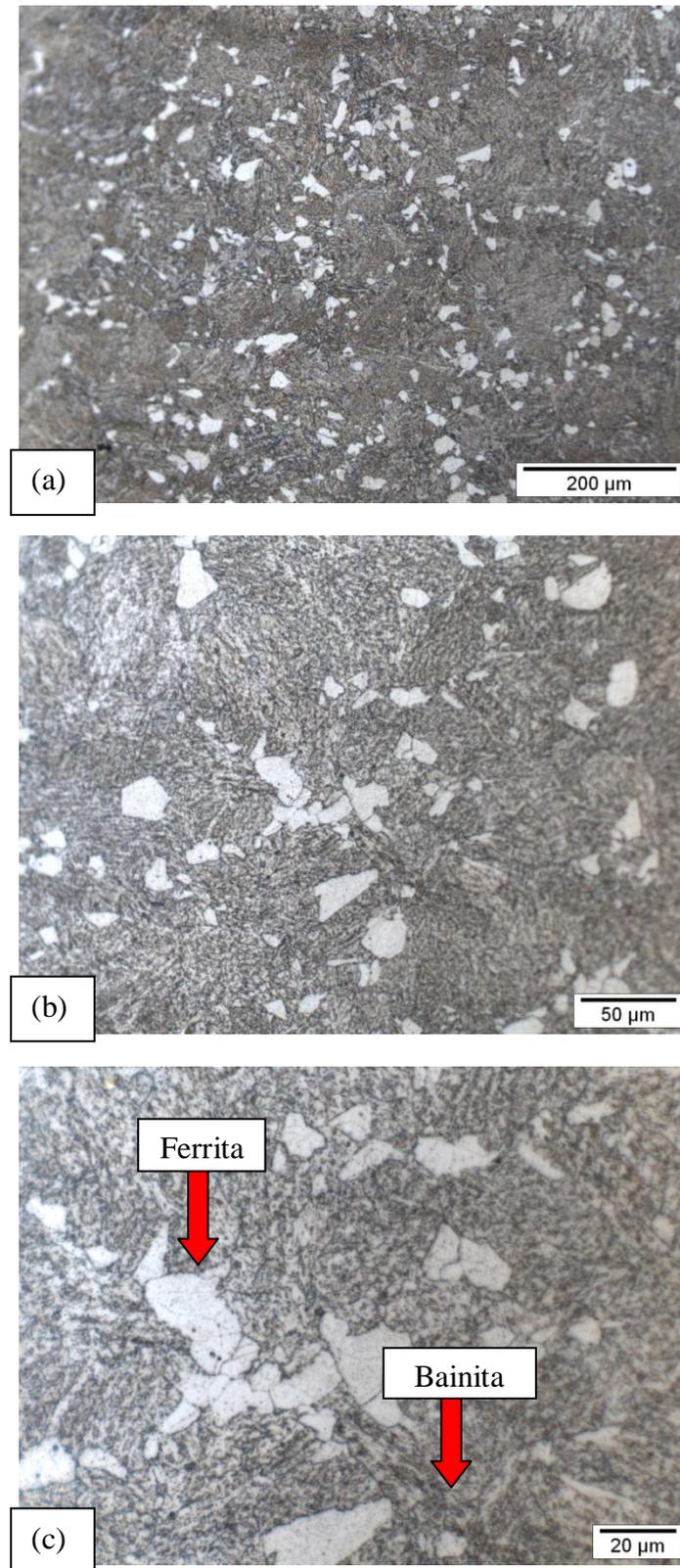


Figura 18 – Micrografia do metal de base : (a) aumento de 200x; (b) aumento de 500x; (c) aumento de 1000x

Quando aproximou da zona de ligação entre o metal de base e o revestimento, observou duas zonas distintas: a zona termomecanicamente afetada e a termicamente afetada. Essa zona termicamente afetada tem uma espessura aproximada de 0,7mm, que é considerada muito estreita. Essa zona foi formada pelo calor produzido por aquecimento adiabático durante a deformação. Apesar de a literatura afirmar que o aquecimento global não ocorre, teve um aquecimento local produzido pela alta taxa de deformação. A **Figura 19** mostra a zona termicamente afetada e termomecanicamente afetada.

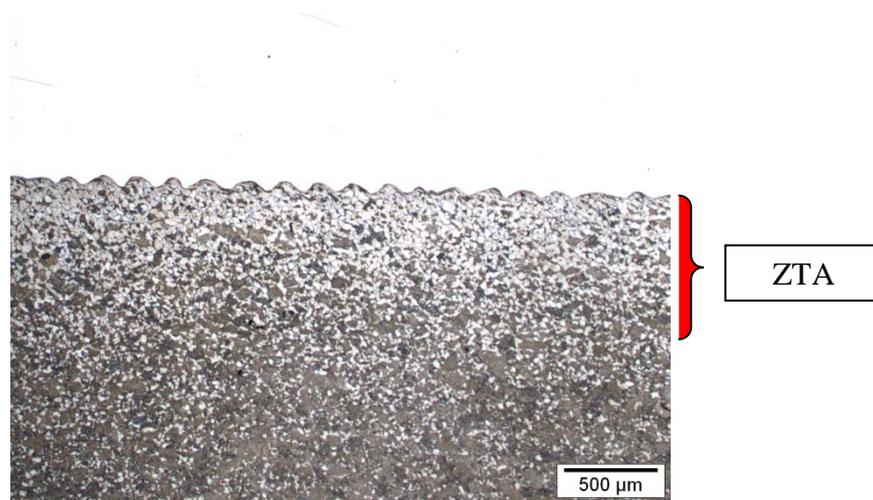


Figura 19 – Micrografia mostrando a extensão da zonas afetadas pelo calor e termomecanicamente afetadas.

A microestrutura da zona afetada pelo calor mais próxima do metal de base apresenta grãos de ferrita mais grossos com maior precipitação de carbeto em seu interior em relação ao metal de base. À medida que se aproxima da zona de ligação estes grãos de ferrita ficam cada vez mais grossos com maior precipitação de carbeto. A transformação da bainita para ferrita ocorre devido a uma espécie de revenimento nessa região mais próxima a interface, devido ao calor produzido pela deformação.

A zona termomecanicamente afetada é a região mais próxima da interface entre o aço Cr-Mo e o aço inoxidável. Nesta região os grãos apresentam deformação na direção de propagação da detonação. Nesta região, os grãos de ferrita aparecem mais grossos ainda e com mais carbeto dispersos em seu interior. A presença de grãos deformados indica que não ocorreu austenitização, pois se isso ocorresse os grãos estariam equiaxiais e não alongados. A **Figura 20** apresenta a evolução dos tamanhos de ferrita na zona afetada pelo calor e na zona termomecanicamente afetada.

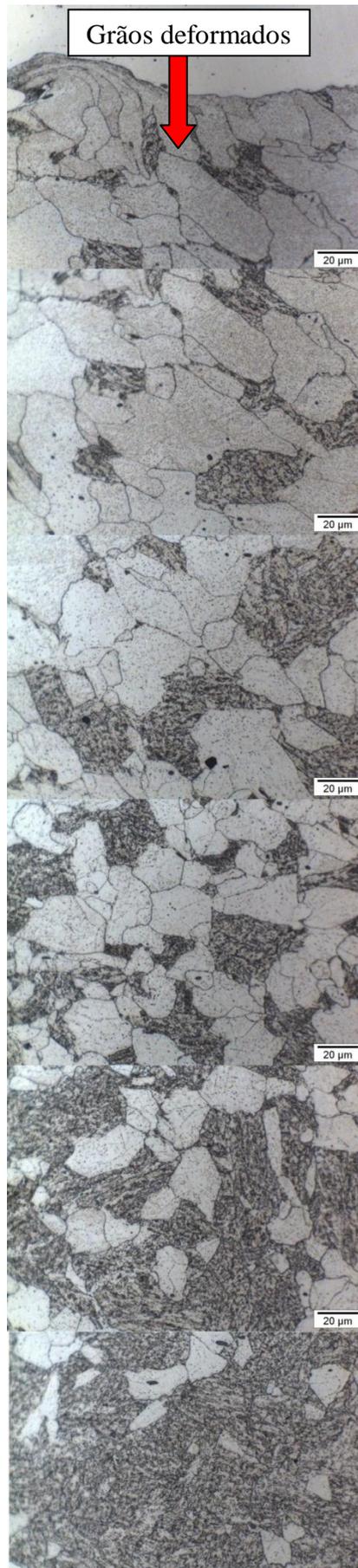


Figura 20 – Evolução do grãos ferríticos.

4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura:

A **Figura 21** mostra a observação da zona de ligação com microscópio eletrônico de varredura. Pode-se visualizar as chamadas ilhas de fusão, que são pequenas regiões em que apareceram resíduos da fusão da fina camada superficial que foi ejetada no processo de soldagem por explosão. A análise semiquantitativa realizada com EDS mostrada na **Tabela 5** mostra que as ilhas de fusão são uma mistura do material de base e do revestimento.

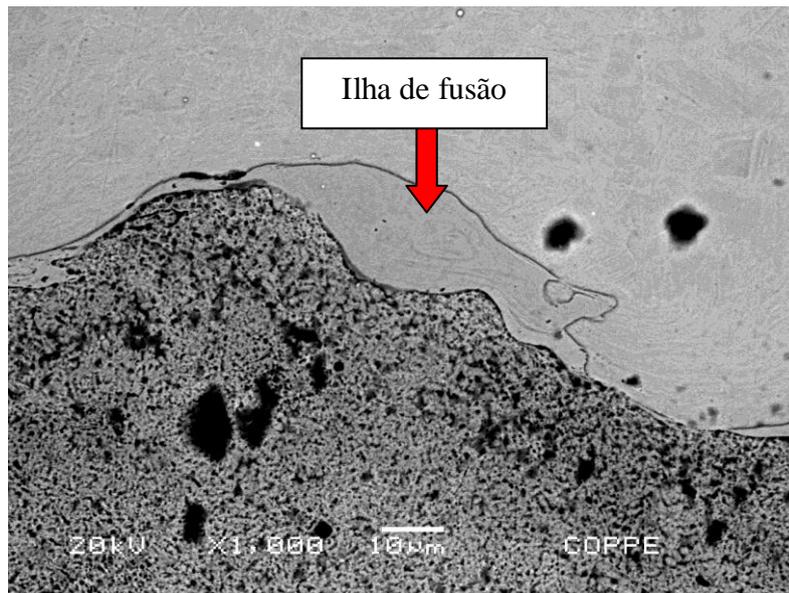


Figura 21 – Microscopia eletrônica mostrando as ilhas de fusão

Tabela 5- Composição química em diferentes regiões.

Região	C	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
Metal de base	11,65	3,09	-	84,61	-	0,64
Revestimento	12,35	14,69	2,13	63,6	7,63	-
Ilha de fusão	12,75	8,56	1,39	73,4	3,89	-

4.5. Ensaio de Microdureza Vickers

A **Tabela 6** a seguir apresenta os resultados obtidos com a microdureza Vickers HV0,1 ao longo da linha fazendo um ângulo de 10° com a linha de ligação do revestimento com o material de base.

Tabela 6- Microdureza Vickers do material.

Microdureza Vickers (HV0,1) medidas ao longo da linha fazendo cerca 10° com a linha de ligação (LL) do revestimento (R) com o substrato (S)								
N° da microdureza	Microdureza	Local de medida	N° da microdureza	Microdureza	Local de medida	N° da microdureza	Microdureza	Local de medida
1	213	S	22	200	S	43	364	R
2	206	S	23	195	S	44	392	R
3	209	S	24	213	S	45	389	R
4	216	S	25	219	S	46	375	R
5	209	S	26	206	S	47	386	R
6	210	S	27	268	S	48	384	R
7	219	S	28	247	S	49	373	R
8	208	S	29	236	S	50	389	R
9	240	S	30	237	S	51	388	R
10	202	S	31	355	LL	52	359	R
11	211	S	32	445	R	53	382	R
12	205	S	33	367	R	54	383	R
13	183	S	34	443	R	55	387	R
14	189	S	35	436	R	56	382	R
15	215	S	36	421	R	57	373	R
16	205	S	37	415	R	58	361	R
17	203	S	38	379	R	59	373	R
18	178	S	39	407	R	60	385	R
19	203	S	40	421	R	61	354	R
20	199	S	41	385	R			
21	202	S	42	374	R			

A **Figura 22** mostra o perfil de dureza desse material. Esse perfil mostra que a dureza se manteve constante até 0,4mm da zona de ligação. Essa região é mostrada na **Figura 23**. Pode-se observar nessa região um grande aumento na fração de ferrita + carbeto. Na linha de ligação, como foi observado na **Figura 24**, a microdureza foi feita sobre os dois materiais, o que explica esse valor intermediário entre a dureza do aço Cr-Mo e do aço inoxidável AISI 347.

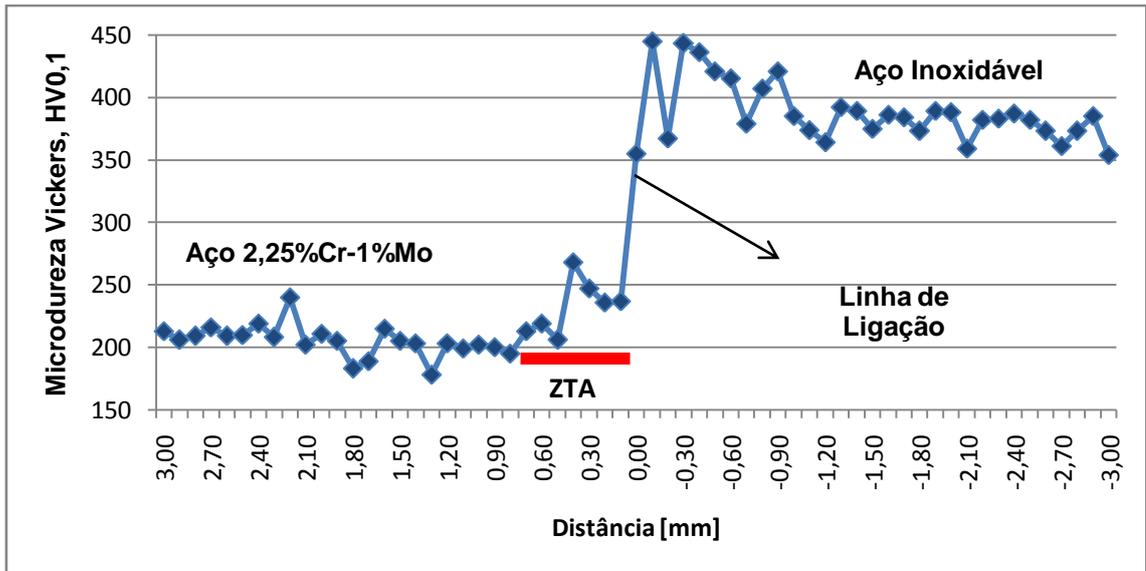


Figura 22 – Perfil de microdureza Vickers a partir da zona de ligação.



Figura 23 – Região onde ocorre um aumento na quantidade de ferrita.

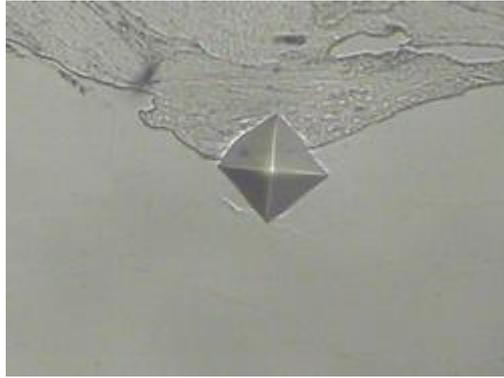


Figura 24 – Microdureza realizada na zona de ligação

4.6. Ensaio de Cisalhamento:

O ensaio de cisalhamento foi realizado com dois corpos de prova, como especificado anteriormente. O primeiro na direção paralela à direção de laminação e o segundo perpendicular à direção de laminação. Os resultados dos dois procedimentos é especificado na **Tabela 7**.

Tabela 7- Resultados do ensaio de cisalhamento.

Corpo de Prova	Dimensões (mm)	Secção (mm²)	Limite de Cisalhamento (MPa)
Paralelo a DL	25,00 x 4,5	112,5	440
Perpendicular a DL	24,95 x 4,35	108,53	502

O ensaio de cisalhamento tanto na direção de laminação quanto na direção perpendicular a direção de laminação apresentou um limite de cisalhamento maior que 140 MPa, que é a tensão mínima exigida pela norma ASTM A264-03.

A **Figura 25** mostra o corpo de prova após o ensaio de cisalhamento. Pode-se observar também as superfícies após o rompimento.

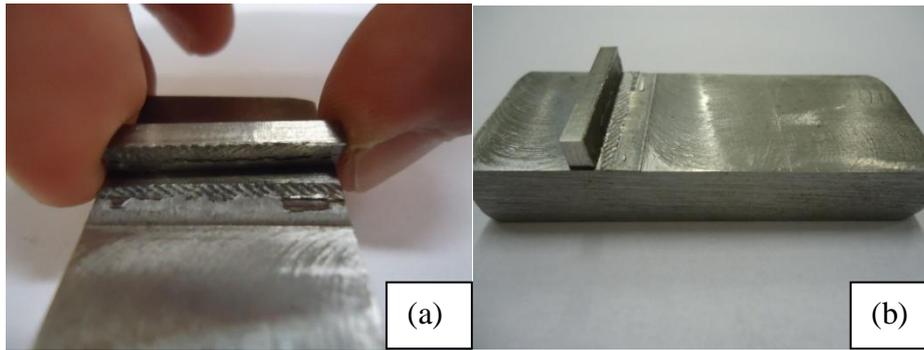


Figura 25 – Corpo de prova do ensaio de cisalhamento após o ensaio: (a) vista frontal; (b) vista lateral

4.7. Ensaio de Dobramento:

Como já explicitado anteriormente, foram realizados ensaios de dobramento de três tipos, segundo as três normas. A **Figura 26** mostra os corpos de prova dobrados e os resultados dos ensaios são apresentados na **Tabela 8**.



Figura 26 – Corpos de prova dobrados até 180°

Tabela 8- Resultados do ensaio de dobramento.

Corpo de prova	Dimensões (mm)	Cutelo (com raio em mm)	Distância entre roletes (mm)	Ângulo	Resultados Obtidos
Metal de Base 1	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Não apresentou fissuras
Metal de Base 2	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Apresentou fissuras <1/8"
Metal de Base 3	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Apresentou fissuras <1/8"
Revestimento 1	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Não apresentou fissuras
Revestimento 2	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Não apresentou fissuras
Revestimento 3	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Não apresentou fissuras
Lateral 1	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Apresentou fissuras <1/8" na interface
Lateral 2	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Apresentou fissuras <1/8" na interface
Lateral 3	38,10 x 10,00	28,5	50,7	180°	Apresentou fissuras <1/8" na interface

Na norma ISO 5173-2000, a avaliação dos resultados após o dobramento tanto a superfície externa quanto os lados da amostra devem ser observadas visualmente. As imperfeições menores que 3mm, aproximadamente 1/8 de polegada não serão consideradas falhas do teste.

Portanto, pela norma ISO 5173-2000, todos os corpos de prova foram aprovados.

4.8. Ensaio de Corrosão Intercristalina:

O ensaio de corrosão intercrystalina foi realizado baseado na norma ASTM A262-02a, Prática E.

Esse ensaio avalia a susceptibilidade a corrosão intergranular associado com a precipitação dos carbetois. Não detecta a susceptibilidade associada à fase sigma.

O corpo de prova depois de passar pelo ensaio de dobramento, com ângulo de dobramento 180° é observado com um aumento baixo de 5 a 20x.

A **Figura 27 mostra** o corpo de prova de corrosão intercrystalina e a **Figura 28** mostra a superfície do corpo de prova ampliada. A superfície do corpo de prova não apresentou trincas. Assim, pode-se afirmar que o revestimento de aço inoxidável austenítico, não apresentou susceptibilidade a corrosão intercrystalina.



Figura 27 – Corpo de prova de corrosão intergranular após o dobramento

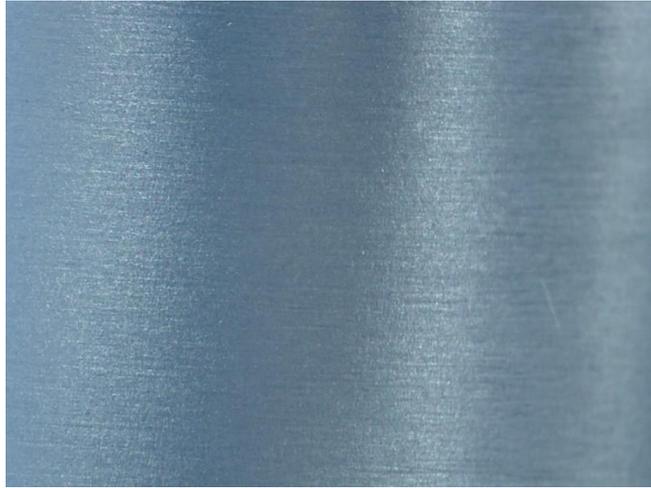


Figura 28 – Superfície do corpo de prova de corrosão intercristalina com aumento baixo, mostrando uma superfície livre de trincas

5. CONCLUSÕES

Do trabalho realizado durante esta pesquisa pode-se concluir que:

- A análise química realizada no metal de base e no revestimento apresentou pequenos desvios nos teores de alguns elementos.
- O ensaio de cisalhamento tanto dos corpos de prova cortados na direção de laminação quanto na direção perpendicular apresentaram uma tensão de rompimento maior do que a exigida pela norma ASTM 264-03.
- O revestimento não apresentou susceptibilidade à corrosão intergranular segundo a norma ASTM 262-02a.
- Todos os corpos de prova de dobramento não apresentaram trincas maiores que 3mm, sendo assim, aprovados pela norma ISO 5173-2000.
- A microscopia ótica revelou uma zona termicamente e termomecanicamente afetada com aproximadamente 0,7mm. Ocorreu um aumento da fração de ferrita com crescimento e precipitação de carbeto quando aproxima-se da zona de ligação.
- A microscopia eletrônica revelou ilhas de fusão na interface entre o metal de base e o revestimento.
- A dureza foi aumentada na região onde ocorre um grande aumento da fração de ferrita+precipitados.
- O material pode ser utilizado para construção de vasos de pressão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RAGHU, N.; SANJAY, K.RAI.; ANISHKUMAR, T.; JAYAKUMAR, K.V.; KASIVIWANATHAN, **Characterization of explosive weld interfaces**, International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering, December, 2004
- [2] BANKER, J., **Recent developments in characterization in zirconium-steel explosion clad**, Published in Proceedings 1999 Reactive Metals in Corrosive Applications Conference , pp 83-88 1999.
- [3] VIGUERAS, D. J., **Explosive Welding and the cladding of amorphous 2826 MB ribbon to mild steel substrates**, Academic Thesis, N.M.I.M.T, 1886
- [4] BANKER, J.; CAYARD, M.S., **Evaluation of stainless steel explosion clad for high temperature, high pressure hydrogen service** , Presented at hydrogen in metals conference, 1994.
- [5] AMIT, J., **Introduction to explosive welding**, Dept. of metallurgical engineering and material science, 2000.
- [6] MERRIMAN, C., **The fundamental of explosion welding**, Welding Journal, 2006
- [7] ASM HANDBOOK VOL 1, **Properties and selection irons, steels, and high-performance alloy**, 2005 .
- [8] SIQUARA, P.C., **Influência da microestrutura nas propriedades físicas e mecânicas de aços 2,25Cr-1Mo usados em ambientes ricos em hidrogênio**, Tese de Pós Graduação-UFRJ, 2006.
- [9] TORRES, L. F. L, **Influência da microestrutura na interação do hidrogênio com aço 2,25Cr-1Mo envelhecido**, Tese de Doutorado., 2011.

- [10] TAVARES, S. S. M.; SOUZA, V.M.; SOUZA, J.A.; YAEKINA, A., **Influência dos tratamentos térmicos de estabilização e solubilização na resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável AISI 347 fundido**, Congresso Anual da ABM, 2007.
- [11] GONZALEZ, C. S., **Efeitos do hidrogênio nas propriedades mecânicas e microestruturais de aços inoxidáveis austeníticos utilizados na indústria petrolífera**, Tese de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, UFRJ, 2006.
- [12] CUNHA, G.S., **Influência da composição química na microestrutura e nas propriedades de aços inoxidáveis austeníticos**, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica-IST, 2009.
- [13] SILVA, E. S., **Efeitos do tratamento térmico de solubilização sobre o crescimento de grão e o grau de sensitização dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 321 e AISI 347**, Tese de Mestrado em Física, Universidade do Maranhão, 2007.
- [14] ASTM A20/20M, **Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels** , ASTM International.
- [15] ASTM A262-02a, **Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels**, ASTM International, 2008.
- [16] ASTM A264-03, **Standard Specification for Stainless Chromium-Nickel Steel-Clad Plate**, ASTM International.
- [17] ISO 5173-2000, **Destructive tests on welds in metallic materials — Bend tests**, 2000.
- [18] ISHIDA, M. A., **Avaliação corporativa de barras laminadas do aço AISI 316L com e sem tratamento térmico de solubilização**, Tese de mestrado, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2009.
- [19] BUIJS, N.W., **Explosive welding of metals in vacuum environment**, Published in Stainless Steel World, March, 2010.