



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC**  
**ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM**

**LUCIANO ALVIM BORGES**

**SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO DE REVESTIMENTO UTILIZANDO AÇO  
INOXIDÁVEL 316L EM FACE DE VEDAÇÃO DE FLANGE EM AÇO CARBONO  
ASTM A105**

Salvador,  
2015

**LUCIANO ALVIM BORGES**

**SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO DE REVESTIMENTO UTILIZANDO AÇO  
INOXIDÁVEL 316L EM FACE DE VEDAÇÃO DE FLANGE EM AÇO CARBONO  
ASTM A105**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientadora: Adriana de Almeida Halfeld Vieira, M.Sc.

Salvador,  
2015

Ficha catalográfica elaborada pela

Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec

B732s      Borges, Luciano Alvim

Soldagem de manutenção de revestimento utilizando aço inoxidável 316L em face de vedação de flange em aço carbono ASTM A105 / Luciano Alvim Borges. – Salvador, 2015.

49 f. : il. color.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> MSc. Adriana de Almeida Halfeld Vieira.

Especialização (Especialização em Engenharia de Soldagem) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2015.

Inclui referências.

1. Corrosão - Solda. 2. Carbonato de amônio. 3. Revestimento de soldagem. 4. Diluição - Soldagem. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Vieira, Adriana de Almeida Halfeld. III. Título.

**LUCIANO ALVIM BORGES**

**SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO DE REVESTIMENTO UTILIZANDO AÇO  
INOXIDÁVEL 316L EM FACE DE VEDAÇÃO DE FLANGE EM AÇO CARBONO  
ASTM A105**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem pela Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

Aprovado em: 29 Julho de 2015.

**Banca Examinadora**

---

Prof. Charles Chemale, D.Sc.Eng

---

Prof. Manoel Carreira Neto, D. Sc. Eng.

---

Prof. Carlos Augusto, D. Sc. Eng.

Dedico este trabalho a Sue e Gabriel.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todas as pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho, em especial:

- a Deus, pela saúde, discernimento e vontade para permanecer firme no curso e no trabalho;
- a minha esposa e ao meu filho, pelo companheirismo, apoio e compreensão durante todo o curso e a confecção deste trabalho;
- a Neilton, pelo incentivo de realizar a especialização pela PETROBRAS;
- a Erivelton, pela elaboração das figuras em Autocad.

“Sempre que houver alternativas, tenha cuidado. Não opte pelo conveniente, pelo confortável, pelo respeitável, pelo socialmente aceitável, pelo honroso. Opte pelo que faz o seu coração vibrar. Opte pelo que gostaria de fazer, apesar de todas as consequências.”

OSHO

## RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo descrever os principais procedimentos na execução de manutenção do revestimento da face de vedação de um flange do permutador de calor P-5202, localizado na planta de ureia da Petrobras/Fafen-BA. O flange forjado de aço médio carbono de especificação SA-105 revestido internamente de aço inoxidável AISI 316-L apresentou corrosão severa na presença de carbamato de amônio na face de vedação. Para simular este tipo de soldagem de revestimento foi utilizada uma chapa de aço baixo carbono de especificação SA-283 como substrato e realizadas três (3) camadas de soldas com o eletrodo de aço inoxidável 316-L. Em cada camada foram feitas a medição da espessura do depósito e a análise química. Estas duas variáveis serviram para determinar a quantidade de material da face original do flange que deve ser pré-usinado e, ao mesmo tempo, determinar a quantidade mínima de camadas de soldagem. Estes dados foram comparados com o depósito do revestimento do flange e foi constatado que para este tipo de diluição seria necessário aumentar o número de camadas de depósitos para se obter a composição química mais próxima do 316-L.

Palavras-chave: Ureia, carbamato de amônio, revestimento de soldagem, diluição, corrosão.



## **ABSTRACT**

The objective of this paper is to describe the main procedures in the execution of the maintenance of the flange sealing face lining of P-5202 heat exchanger located at Petrobras/Fafen-BA urea ground plan. The SA-105 medium-carbon steel forged flange internally lined with AISI 316-L stainless steel presented severe corrosion in the presence of ammonium carbamate in the sealing face. As substratum a SA-283 specification low-carbon steel sheet was used to simulate this type of coating welding, and also three welding layers with the 316-L stainless steel electrode. In each layer, the deposit thickness measurement and the chemical analysis were taken. These two variables determined the amount of material of the original face of the flange that should be machined beforehand, and at the same time, determine the minimum amount of welding layers. These data were compared to the flange coating deposit and it was found that for this type of dilution, it would be necessary to increase the number of deposit layers to obtain the closest chemical composition to the 316-L.

Keywords: Urea, ammonium carbamate, welding jacket, dilution, corrosion.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - REPRESENTAÇÃO DO NÚMERO DE CAMADAS E PROFUNDIDADE DO DESBASTE... 15	15
<b>FIGURA 2</b> - PROJETO DO BOCAL DO DESENHO DO EQUIPAMENTO P-5202. .... 16	16
<b>FIGURA 3</b> - FOTO DO BOCAL DANIFICADO ..... 17	17
<b>FIGURA 4</b> – MONTAGEM DE UM PAR DE FLANGE. .... 18	18
<b>FIGURA 5</b> – DIMENSIONAL DA ALTURA DA FACE DE VEDAÇÃO. .... 19	19
<b>FIGURA 6</b> - ESQUEMÁTICO DE SOLDAGEM POR EXPLOSÃO. .... 21	21
<b>FIGURA 7</b> - ILUSTRAÇÃO DO PRINCÍPIO DE JUNÇÃO POR COLAMINAÇÃO ..... 22	22
<b>FIGURA 8</b> - LUSTRAÇÃO DA CHAPA DE LINING..... 23	23
<b>FIGURA 9</b> – FOTO DE SOLDAGEM OVERLAY DE UM BOCAL ..... 24	24
<b>FIGURA 10</b> - ILUSTRAÇÃO DA SOBREPOSIÇÃO DOS PASSES. [7]..... 24	24
<b>FIGURA 11</b> – POTENCIAL DE PITE EM SOLUÇÃO 3,5% NaCl - PH NEUTRO ..... 27	27
<b>FIGURA 12</b> - FLUXOGRAMA DA SÍNTESE E DA PURIFICAÇÃO DE UREIA. .... 29	29
<b>FIGURA 13</b> – FORMAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DO CARBAMATO. .... 30	30
<b>FIGURA 14</b> – CORROSÃO MÁXIMA PERMITIDA ASTM A262C ..... 32	32
<b>FIGURA 15</b> - PITE EM TUBO AISI 316..... 35	35
<b>FIGURA 16</b> – TRINCA DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM 316 NA PRESENÇA DE CLORETO. .... 36	36
<b>FIGURA 17</b> – TRINCA INTERGRANULAR DEVIDO À CORROSÃO SOB TENSÃO EM INCONEL 500X ..... 37	37
<b>FIGURA 18</b> – MICROGRAFIA DE AÇO INOX NORMALIZADA E SENSITIZADA. .... 38	38
<b>FIGURA 19</b> – ILUSTRAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM CONTORNOS DE GRÃO..... 38	38
<b>FIGURA 20</b> – CÁLCULO DA DILUIÇÃO BOHLER WELDING GROUP. .... 40	40
<b>FIGURA 21</b> – DIAGRAMA DE SCHAEFFLER ..... 40	40
<b>FIGURA 22</b> – CAMPOS DE DEFEITOS POSSÍVEIS EM SOLDA DISSIMILAR. [22] ..... 42	42
<b>FIGURA 23</b> – PERFIL DA CORROSÃO ..... 45	45
<b>FIGURA 24</b> – ESQUEMA DAS CAMADAS NO CORPO DE PROVA. .... 47	47
<b>FIGURA 25</b> – PONTOS DE AMOSTRAGEM ..... 47	47
<b>FIGURA 26</b> – DEMARCAÇÃO DOS PONTOS NO DIAGRAMA DE SCHAEFFLER..... 51	51
<b>FIGURA 27</b> – ETAPAS DE FABRICAÇÃO E SOLDAGEM DO FLANGE ..... 54	54

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - DILUIÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	26
<b>TABELA 2</b> – EFEITO DO OXIGÊNIO NA CORROSÃO. [12] .....	32
<b>TABELA 3</b> – COMPOSIÇÃO QUÍMICA [13].....	32
<b>TABELA 4</b> – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DO FLANGE. ....	45
<b>TABELA 5</b> – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DO CONSUMÍVEL.....	46
<b>TABELA 6</b> – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DO SUBSTRATO. [28].....	46
<b>TABELA 7</b> – MEDIÇÃO DE ESPESSURA DAS CAMADAS .....	48
<b>TABELA 8</b> – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO SUBSTRATO .....	49
<b>TABELA 9</b> – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS PONTOS. ....	49
<b>TABELA 10</b> - CROMO E NÍQUEL EQUIVALENTES DAS MÉDIAS DAS CAMADAS. ....	50

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>EQUAÇÃO 1:</b> EQUAÇÃO 1 - CÁLCULO DE ESPESSURA SEGUNDO ASME VIII DIV.I.....	20
<b>EQUAÇÃO 2 - PREN</b> ( <i>PITTING RESISTANCE EQUIVALENT NUMBER</i> ).....	27
<b>EQUAÇÃO 3 – CROMO EQUIVALENTE</b> .....	41
<b>EQUAÇÃO 4 – NÍQUEL EQUIVALENTE</b> .....	41

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	16
2.2 REVESTIMENTOS METÁLICOS .....	19
<b>2.2.1 Cladeamento por explosão .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2 Cladeamento por laminação .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.3 Lining .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.4 Soldagem overlay.....</b>	<b>23</b>
2.3 MANUTENÇÃO COM ELETRODO REVESTIDO.....	25
2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS DA SÉRIE 300.....	26
2.5 PROCESSAMENTO DE UREIA .....	28
2.6 AÇOS INOXIDÁVEIS RESISTENTES À SOLUÇÃO DE UREIA .....	31
2.7 APLICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS NA PETROBRAS/FAFEN-BA.....	33
2.8 CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS .....	34
<b>2.8.1 Corrosão por pites .....</b>	<b>34</b>
<b>2.8.2 Corrosão sob tensão .....</b>	<b>35</b>
<b>2.8.3 Corrosão intergranular nos aços inoxidáveis .....</b>	<b>36</b>
<b>2.8.4 Corrosão uniforme .....</b>	<b>38</b>
<b>2.8.5 Corrosão localizada em frestas .....</b>	<b>39</b>
2.9 DILUIÇÃO.....	39
2.10 DIAGRAMA DE SCHAEFFLER .....	40
2.11 TIPOS DE DEFEITOS EM SOLDAS DISSIMILARES .....	42
<b>2.11.1 Trincas de solidificação (campo 1).....</b>	<b>42</b>
<b>2.11.2 Fragilização por formação de fases intermetálicas (campo 2) .....</b>	<b>43</b>
<b>2.11.3 Fragilização por crescimento de grãos (campo 3).....</b>	<b>43</b>
<b>2.11.4 Fragilização e fissuração por formação de martensita (campo 4)....</b>	<b>43</b>
2.12 CUIDADOS COM A SOLDA DISSIMILAR EM REVESTIMENTO. ....	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1 MEDIÇÃO DE ESPESSURA .....	48

4.2 ANÁLISE QUÍMICA .....	48
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem de manutenção é um meio ainda muito utilizado para prolongar a vida útil das peças de máquinas e equipamentos. A avaliação da possibilidade de recuperação por soldagem inclui diversos aspectos, tais como: custo e tempo de manutenção *versus* preço e tempo de aquisição de uma peça nova. Em alguns casos, a deterioração ocorre em um determinado componente ou parte localizada, não justificando a troca total do equipamento, mas, sim, uma manutenção. [29]

A soldagem de manutenção de revestimento metálico é mais complexa do que a soldagem de um vaso novo. Além das dificuldades já conhecidas das soldagens de juntas dissimilares, somam-se a estas a dificuldade de limpeza na interface entre o revestimento e o substrato, a geometria do defeito, a soldagem de campo e a degradação do material pelo tempo e fluido do processo.

Nos equipamentos de síntese de ureia é sempre esperada uma corrosão uniforme do revestimento metálico devido à agressividade do fluido de processo. A corrosão pode ser acelerada pelo descontrole operacional, como os limites de temperatura acima de projeto, o que ocasiona a corrosão localizada em certos componentes do equipamento.

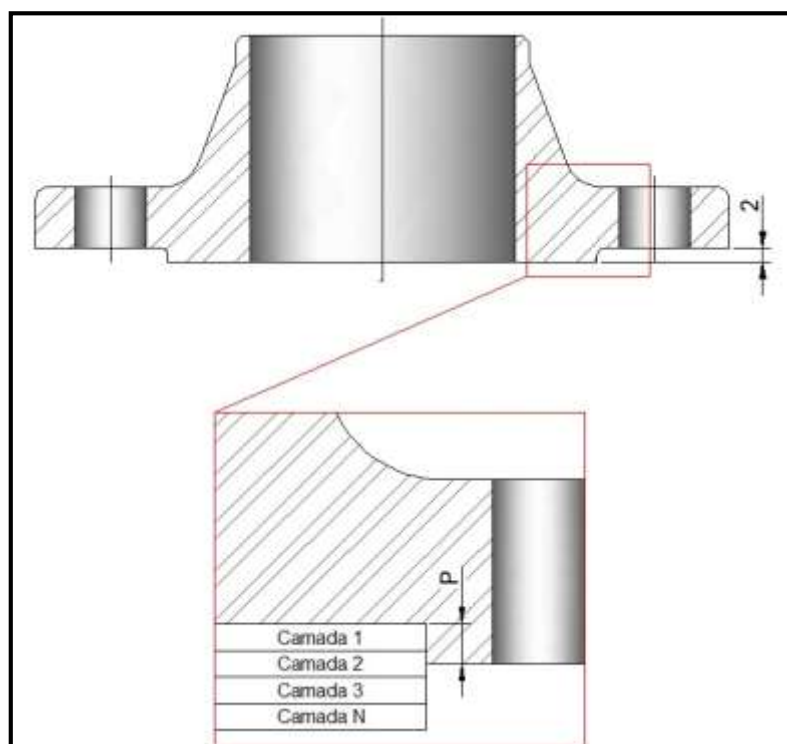
Em soldagem de revestimento metálico são necessários requisitos de projeto de manutenção, onde as propriedades de resistência mecânica e de corrosão sejam suficientes para atender ao tempo de campanha operacional do equipamento.

Por isso, tem-se como objetivo principal identificar a melhor forma de realizar a soldagem de manutenção na face de vedação do flange de saída do trocador de calor P-5202 na Fafen-BA, para que o mesmo possua, ao final da usinagem das ranhuras de vedação, respeitando o dimensional de projeto, a mesma composição química do aço inoxidável 316L.

Utilizando o processo de soldagem por eletrodo revestido com o consumível E316-L de 2,5mm de diâmetro, deve-se:

- determinar o número mínimo de camadas de soldagem para atender os requisitos de composição química do aço inoxidável 316-L, representada como “Camada N” na figura 1;
- determinar a profundidade da face de vedação do flange em aço carbono, que deve ser removida por usinagem para ser preenchida com soldagem *overlay* e posterior usinagem das ranhuras, representado como “P” na figura 1

**Figura 1** - Representação do número de camadas e profundidade do desbaste.



**Fonte:** Próprio autor



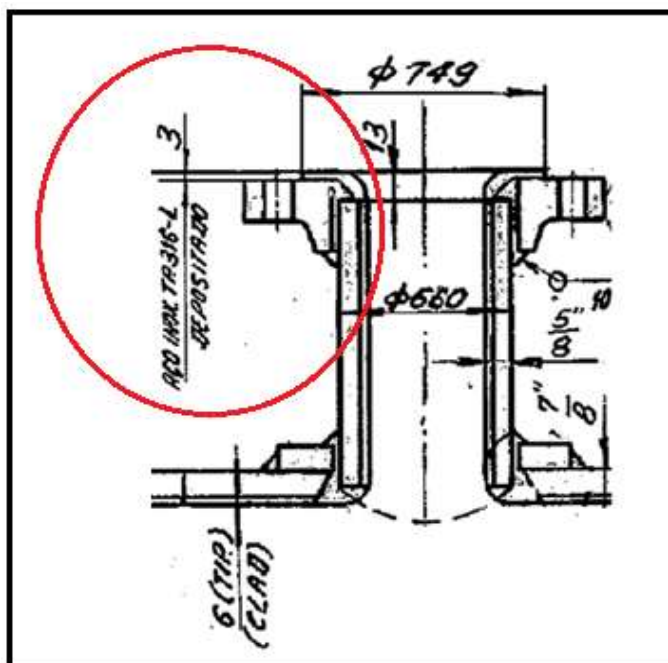
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O P-5202 é um trocador de calor utilizado na planta de ureia como um aquecedor de carga de uma torre de purificação. O desenho de fabricação do bocal de saída para a torre (figura 2) especifica que a camada de aço inoxidável 316-L sobre o substrato em aço carbono ASME SA-105 deve ser de 3mm.

O projeto do bocal de saída de produto do equipamento é composto de uma chapa cladeada mais soldagem *overlay* na face de vedação. Este bocal apresentou três falhas em dois anos na face de vedação do flange (figura 2), ocasionando paradas de plantas não programadas para sua manutenção

**Figura 2** - Projeto do bocal do desenho do equipamento P-5202.



**Fonte:** desenho do próprio equipamento adaptado pelo autor

**Figura 3** - Foto do bocal danificado

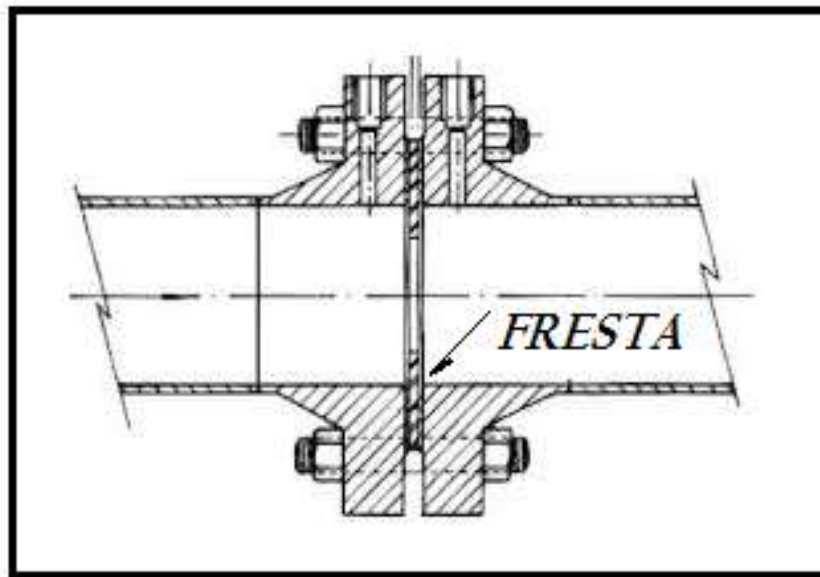
**Fonte:** Próprio autor

Verificou-se que a face de vedação do flange corroeu de forma acelerada em comparação às demais partes do equipamento. Após análise da composição química da face do flange, observou-se que a mesma estava adequada com exceção do molibdênio (MO) que foi de 1,93%, mas muito próximo do valor de 2,0% da norma.

A análise química da região danificada apresentou composição semelhante à realizada na segunda camada do corpo de prova deste trabalho. Esta análise foi feita durante a parada de emergência da unidade com um analisador de ligas portáteis, que identifica o percentual do elemento químico carbono.

*Na face de vedação, a montagem de conjunto dos flanges forma uma fresta – espaço entre a face e a junta de vedação conforme seta na figura 3. Na fresta, a circulação do produto que contém oxigênio para passivação é baixa e combinada com a composição química inadequada do revestimento da face do flange, o que intensifica a corrosão.*

**Figura 4** – Montagem de um par de flange.



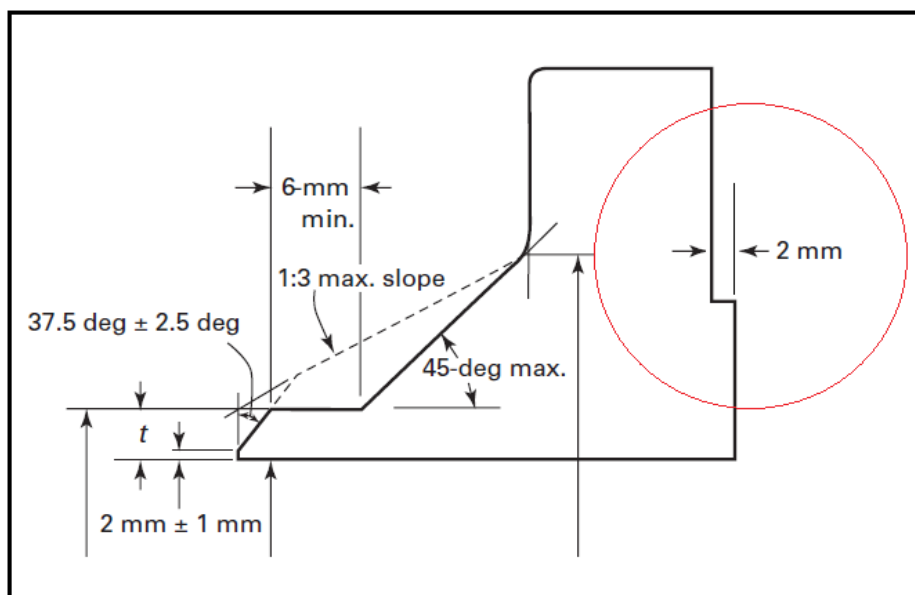
**Fonte:** [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

Devido à falta do material de adição E309LMo, optou-se também por não utilizar um primeiro passe com o E309L. Utilizando o diagrama de *Schaeffler*, estas seriam as melhores opções de consumíveis para a primeira camada de solda dissimilar, evitando o defeito de trinca de solidificação e fragilização por formação de martensita, comuns para este tipo de soldagem.

Soldar diretamente com o 316L para esta configuração de defeito minimiza a diluição do molibdênio, componente que aumenta a resistência à corrosão por pit. O molibdênio melhora a resistência ao *pitting* e à corrosão por frestas dos aços austeníticos, além de melhorar a resistência mecânica a quente do aço inoxidável 304. Em contrapartida, é recomendável o ensaio por Líquido Penetrante (LP) na primeira camada.

Um flange padronizado pela norma de fabricação ASME estabelece que o dimensional de um flange de 24 polegadas de diâmetro e classe de pressão de 300 libras, deve ter a altura da face de vedação de 2,0mm circulada em vermelho no desenho da. [30]

**Figura 5**– Dimensional da altura da face de vedação.



**Fonte:** ASME B 16.5 adaptado pelo autor

Uma alteração significativa desse dimensional tem influência sobre outras variáveis como: torque aplicado, dimensional dos parafusos e juntas. A deposição na face de vedação do flange requer primeiro uma usinagem da área a ser preenchida. A profundidade da remoção dependerá do tipo de revestimento, assim como o processo de fabricação do mesmo.

## 2.2 REVESTIMENTOS METÁLICOS

Existem dois tipos de revestimentos metálicos: *clad* e *overlay*. O revestimento tipo clad pode ser obtido pelo processo de explosão, laminação ou enchimento com solda. [1] Porém, quando o processo de união de chapas é feito por soldagem de fusão, este é denominado soldagem *overlay*.

No processo de cladeamento de chapas, a espessura da chapa do revestimento deve ser sempre superior a 2mm. [2] A espessura da chapa de um equipamento é determinada basicamente por pressão interna, diâmetro do vaso e tensão admissível do material aplicado. Para o costado cilíndrico, por exemplo, a espessura mínima “t” é determinada pela equação 1: [3]

**Equação 1:** Equação 1 - Cálculo de espessura segundo ASME VIII Div.I

$$t = PR/(SE-0,6P)$$

onde:

t = espessura mínima requerida do costado;

P = pressão interna de projeto;

R = raio interno do costado;

S = tensão admissível do material;

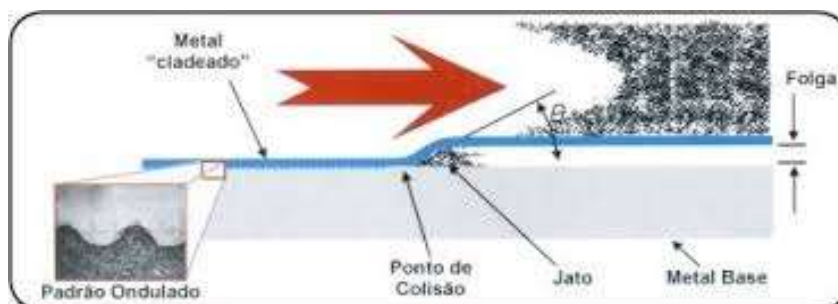
E = coeficiente de junta.

Normalmente a espessura do revestimento não entra no cálculo do projeto da parede do vaso. [4; 5] Vale ressaltar que o código ASME VIII UCL-1 permite que a espessura da camada de revestimento possa ser utilizada em conjunto com a espessura do material de base para compor a resistência estrutural. [3]

### **2.2.1 Cladeamento por explosão**

A soldagem por explosão é um processo que ocorre em estado sólido, ou seja, não há fusão. Devido à ausência de aquecimento, a microestrutura, as propriedades mecânicas e as propriedades de corrosão dos metais originais se mantêm quase que inalteradas por este processo. Metalurgicamente, a linha de ligação é muito similar aos contornos de grãos de alta energia. A figura 6 ilustra o processo de soldagem à explosão, assim como a interface entre as duas chapas após a junção.

**Figura 6** - Esquemático de soldagem por explosão.



Fonte: [www.cecal.com.br](http://www.cecal.com.br)

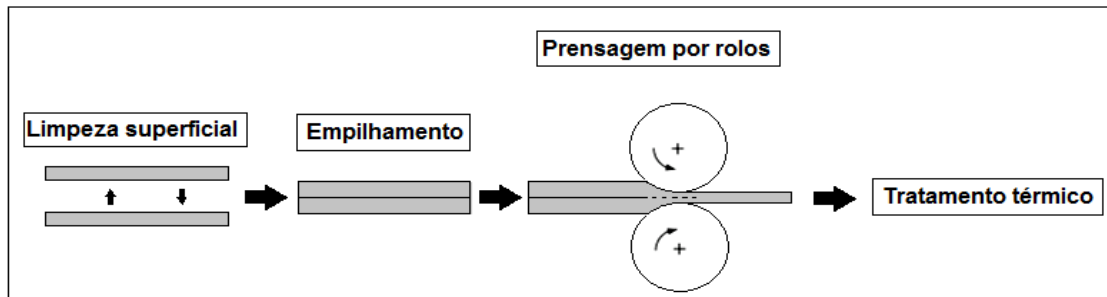
### 2.2.2 Cladeamento por laminação

O cladeamento por laminação ou colaminação é um processo realizado no estado sólido e produz a união de peças por aquecimento e deformação superficial pela aplicação de pressão através de rolos laminadores. Este processo pode ser visualizado conforme a figura 6. Para que o processo ocorra, é necessário que as chapas tenham propriedades de plasticidade semelhantes. [2]

Os principais parâmetros que afetam a força de adesão no cladeamento por laminação são: [6]

- a preparação das superfícies;
- a temperatura de laminação;
- a pressão exercida pelos rolos laminadores;
- a espessura das peças a serem juntadas.

**Figura 7-** Ilustração do princípio de junção por colaminação



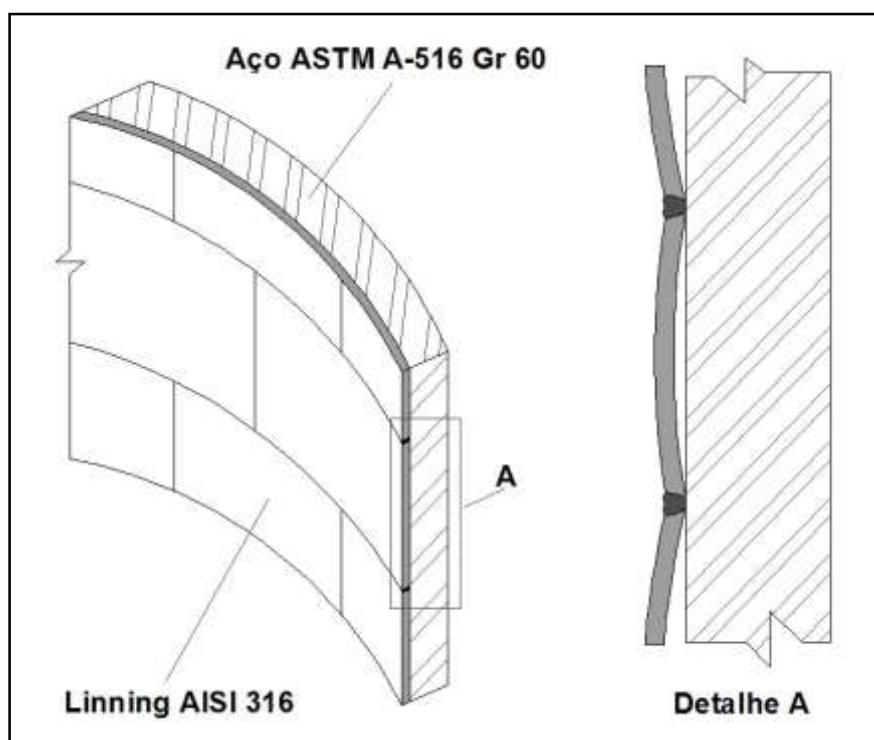
Fonte: GUIMARÃES, 2013.

A figura 7 ilustra as principais etapas de colaminação que consistem em: preparação da superfície das chapas, junção, prensagem e tratamento térmico, quando requerido. O tempo entre as etapas de limpeza e prensagem deve ser monitorado devido à oxidação.

### 2.2.3 Lining

O revestimento tipo *lining* é obtido através da sobreposição de uma chapa, geralmente resistente à corrosão, como um aço inoxidável, sobre uma chapa de aço carbono. Diferente do cladeamento e do *overlay*, há um espaço vazio entre as duas chapas. Cada chapa de revestimento deve ser testada pneumaticamente para garantir a qualidade final do revestimento. [2] A figura 7 ilustra a aplicação do revestimento.

**Figura 8-** Ilustração da chapa de *lining*.



Fonte: [www.labsolda.ufsc.br](http://www.labsolda.ufsc.br)

#### 2.2.4 Soldagem *overlay*

O processo de soldagem *overlay* consiste no depósito de um consumível, como por exemplo, um aço inoxidável resistente à corrosão, sobre um substrato em aço carbono. A interface é constituída de um material diferente do ponto de vista de propriedades, tanto do material de revestimento quanto do material base. A composição química da soldagem resultante dependerá da mistura entre os materiais e será mais próxima do material de adição quanto menor for a diluição. A fusão dos materiais cria uma difusão através do substrato até certa profundidade, ocasionando uma zona de diluição e a Zona Termicamente Afetada (ZTA), típica do processo de soldagem por fusão. [6] A figura 9 mostra a deposição de consumível resistente à corrosão em um bocal de vaso de pressão.



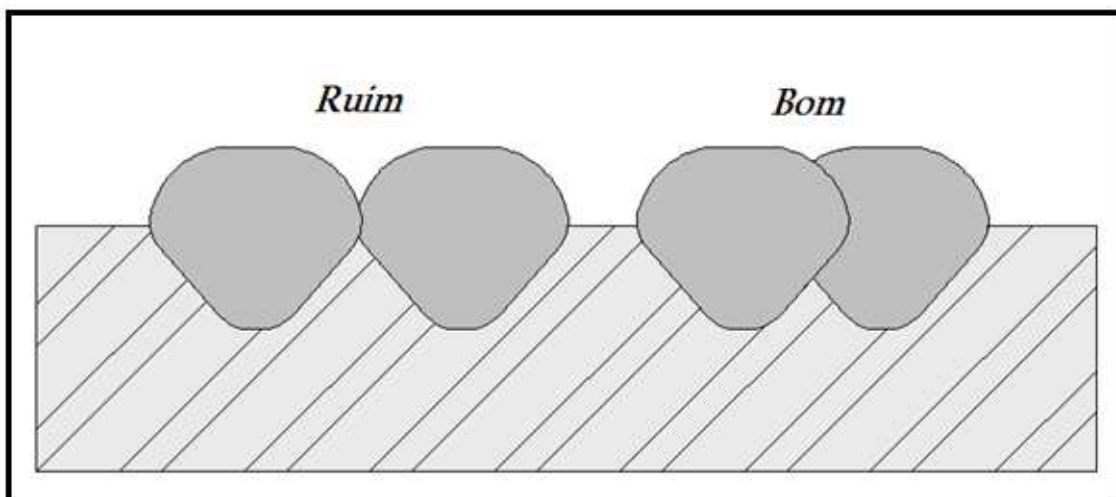
**Figura 9** – Foto de soldagem *overlay* de um bocal



**Fonte:** [www.multialloy.com.br](http://www.multialloy.com.br)

Para depositar uma solda de enchimento, a superfície deve estar completamente limpa e os passes devem ser os mais adjacentes possíveis. A Figura 10 demonstra o melhor tipo de adjacência para este tipo de soldagem. Antes da deposição do próximo cordão ou da próxima camada, os cordões já depositados devem estar completamente livres de escória. [7]

**Figura 10-** Ilustração da sobreposição dos passes. [7]



**Fonte:** GET-SOLDA

A soldagem de enchimento também é usada na recomposição de peças quebradas ou desgastadas, no reparo de defeitos de usinagem ou para fazer protuberâncias localizadas numa peça e para enchimento de grandes cavidades.

### 2.3 MANUTENÇÃO COM ELETRODO REVESTIDO

As principais vantagens para o uso do processo de eletrodo revestido em soldagem de manutenção são: [8]

- equipamentos simples e portáteis, de baixo custo, que facilitam a soldagem em campo;
- pouca sensibilidade à presença de correntes de ar que poderiam dissipar os gases de proteção, adequando-se ao trabalho em campo;
- possibilidade de ser soldado em todas as posições;
- facilidade para atingir áreas de difícil acesso;
- possibilidade da escória absorver melhor as impurezas da peça a ser soldada se comparada com os processos que utilizam gás inerte como proteção.

A principal desvantagem deste processo em soldagem de manutenção é a alta diluição, quando comparada com outros processos utilizados para manutenção de revestimento resistente à corrosão.

Na **Tabela 1**, observa-se que o processo de eletrodo revestido possui diluição maior quando comparado com o processo TIG (Tungstênio Inerte gás). Neste caso, os principais determinantes para a escolha do processo por eletrodo revestido foram a dificuldade de limpeza e geometria do defeito.

**Tabela 1** - Diluição dos processos de soldagem

<b>Processo</b>	<b>Diluição (%)</b>
<b>Eletrodo Revestido (SMAW)</b>	<b>25 - 35</b>
<b>TIG (GTAW)</b>	<b>5 - 15</b>
<b>MIG/MAG (GMAW)</b>	<b>15 - 30</b>
<b>Arame Tubular (FCAW)</b>	<b>25 - 40</b>

**Fonte:** BohlerWeldinggroup

## 2.4 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS DA SÉRIE 300

A austenita é uma solução sólida de carbono no ferro gama que se cristaliza no sistema cúbico de faces centradas, sendo um aço não magnético. Devido à retenção de uma forma metaestável da austenita à temperatura ambiente, os aços desse grupo são denominados austeníticos. Estes aços apresentam excelente soldabilidade e maior resistência à corrosão em relação aos aços dos demais grupos. [10]

O principal elemento químico estabilizador da austenita depois do carbono é o níquel, na faixa de 8% em peso da liga. Outros elementos como o carbono, o nitrogênio e o cobre também estabilizam a austenita.

Entre os aços inoxidáveis austeníticos, o 304 (18%Cr-8%Ni) é o mais popular. Possui níveis de excelência em resistência à corrosão, ductilidade e soldabilidade, se comparado aos aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos. Por sua vez, dependendo do meio corrosivo, o 304 não é o austenítico mais utilizado. O principal problema enfrentado pelo aço 304 é o da ação corrosiva provocada pelo ânion cloreto (Cl(-)).

A adição de molibdênio, 2%, aproximadamente, transforma o 304 no aço inoxidável 316, um material muito mais resistente à corrosão por pites, corrosão por frestas e corrosão sob tensão, enquanto o aço 304 pode ser utilizado na temperatura ambiente em meio aquoso com no máximo 200 ppm de cloreto. O aço 316, nas mesmas condições, pode chegar até 800 ppm de cloreto. Se a

quantidade de cloreto é mais alta, adições maiores de molibdênio são necessárias, como é o caso do aço 317 que possui faixa de molibdênio entre 3 e 4%. [10]

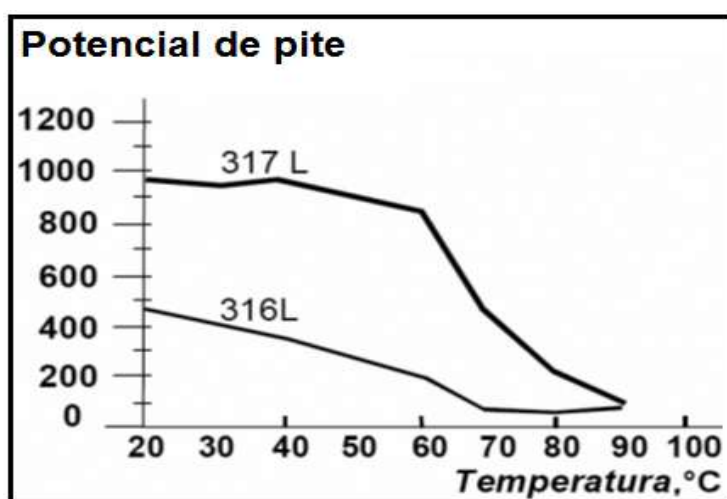
O PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) é um número que correlaciona a composição química do aço inoxidável com o potencial de pite medido em solução contendo cloretos. Este número é baseado em uma equação matemática empírica, conforme a equação 2 abaixo:

**EQUAÇÃO 2 - PREN (PITTING RESISTANCE EQUIVALENT NUMBER)**

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3\%Mo + 30\%N.$$

Quanto maior o valor do PREN, maior a resistência em meios contendo cloretos. A Figura 11 ilustra uma comparação da resistência de dois aços inoxidáveis ao pite. [9].

**Figura 11** – Potencial de pite em solução 3,5% NaCl - pH *neutro*



Fonte: [www.aperam.com.br](http://www.aperam.com.br)

A quantidade máxima de carbono nos aços 304, 316 e 317 é de 0,08%. Quando estes materiais são submetidos a temperaturas entre 425°C e 850°C, o carbono e o cromo se combinam e se precipitam como carboneto de cromo ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ). Esta precipitação ocorre preferencialmente nos contornos de grão do material, o que provoca um empobrecimento de cromo nas regiões adjacentes dos mesmos. O fenômeno é conhecido como sensitização.

Como o cromo precipita como carboneto, uma solução óbvia é reduzir a quantidade de carbono nestes materiais. Os aços inoxidáveis 304L, 316L e 317L com carbono máximo de 0,03% são as versões de baixo carbono para os aços 304, 316 e 317. São também utilizados na fabricação de equipamentos que trabalham com meios capazes de provocar corrosão em materiais sensitizados.

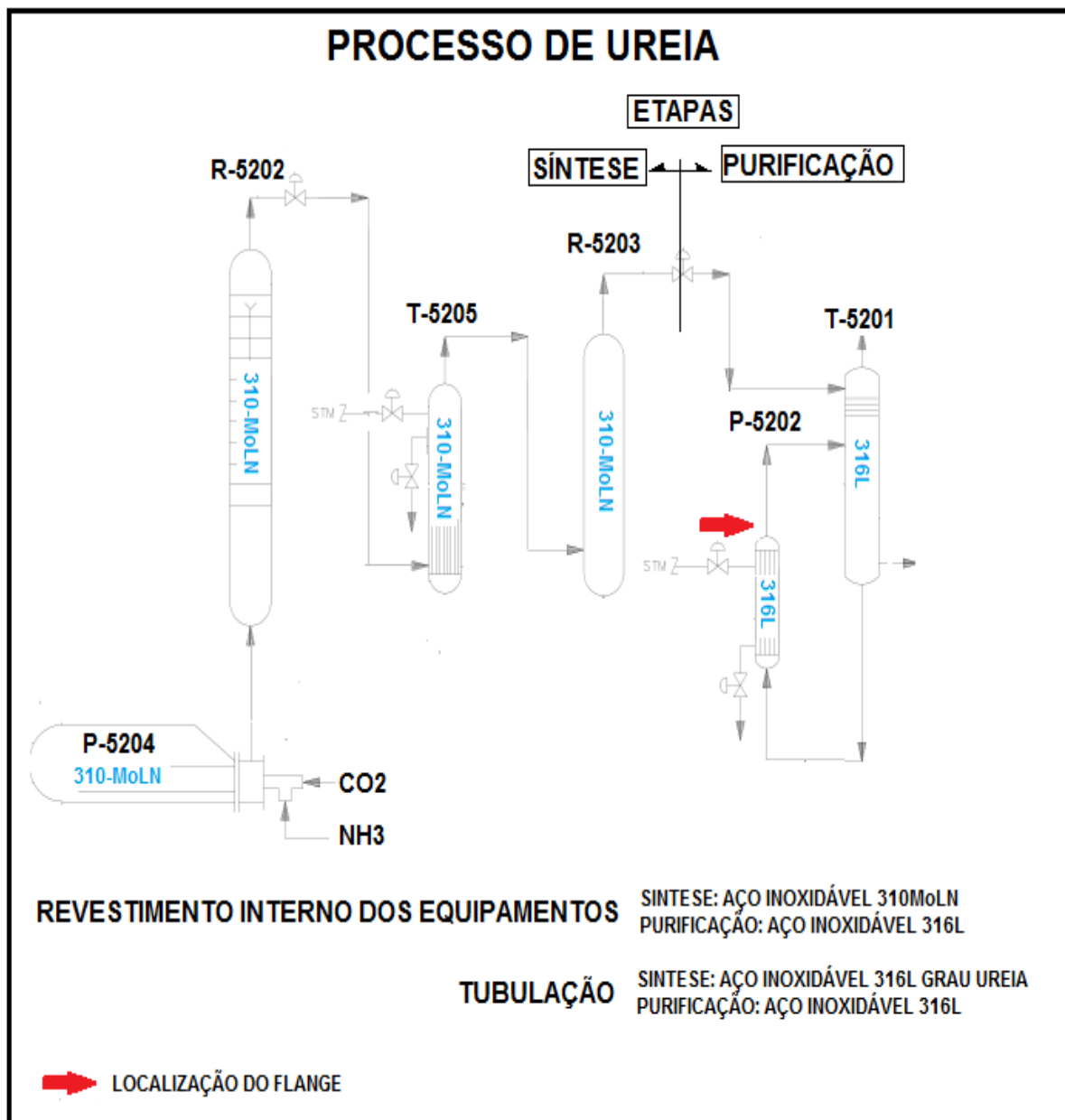
Aumentando o teor de cromo e de níquel para a faixa de 25%Cr-20%Ni, temos o aço 310 que possui considerável resistência à oxidação em altas temperaturas. Enquanto o aço 304 pode trabalhar em serviço contínuo a 925°C, o aço 310 pode resistir à temperatura de até 1150°C nas mesmas condições.  
[10]

## 2.5 PROCESSAMENTO DE UREIA

O processamento de ureia na Fafen-Ba possui basicamente as etapas de síntese, purificação, concentração, perolação e recuperação de gases. Destas etapas, as mais críticas em relação à corrosão são as de síntese e purificação.

A Figura 12 é um trecho do fluxograma simplificado que contém o início do processamento da ureia. Neste fluxograma, temos os equipamentos da síntese, que são P-5204, R-5202, T-5205 e R-5203 e os equipamentos da purificação representados somente pela T-5201 e seu refeedor que é o P-5202. O bocal de saída do P-5202, demarcado pela seta vermelha, é o objeto de estudo deste trabalho. As letras P, R e T que se referem aos equipamentos são as abreviações de Permutador, Reator e Torre.

Figura 12 - Fluxograma da síntese e da purificação de Ureia.



Fonte: Próprio autor

O P-5204 faz parte da seção de síntese e realiza a reação entre a amônia e o dióxido de carbono para formar o carbamato de amônio. Esta reação é fortemente exotérmica e parte do calor de reação é usado pelo equipamento para produzir vapor de 5,7 kgf/cm<sup>2</sup>g. Desempenha, portanto, o papel de um reator.

O R-5202 faz parte da seção de síntese e realiza, principalmente, a reação de desidratação do carbamato de amônio (formado no P-5204) para produzir ureia. Desempenha o papel de um reator.

A T-5205 faz parte da seção de síntese e tem por objetivos iniciar a purificação da corrente de ureia produzida pelo R-5202 e fornecer parte das matérias-primas do R-5203. Desempenha o papel de uma desabsorvedora.

O R-5203 faz parte da seção de síntese e tem como finalidade permitir um aumento da conversão, em ureia, do dióxido de carbono que é alimentado à planta ou que circula nesta na forma de carbamato. Desempenha o papel de um reator.

O P-5202 faz parte da seção de decomposição e fornece a carga térmica necessária para a operação da T-5201. Desempenha o papel de refeedor desta última.

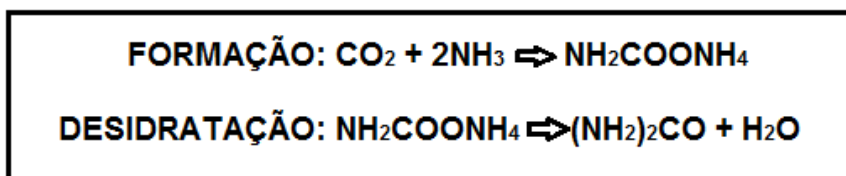
A T-5201 faz parte da seção de decomposição e tem como finalidade aumentar substancialmente a pureza das correntes de ureia produzidas na seção de síntese. Desempenha o papel de uma desabsorvedora.

A seção de síntese do P-5204 até o R-5203 é a que produz ureia através da reação química proveniente da mistura entre  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$ . A reação da amônia líquida com o dióxido de carbono produz um produto intermediário altamente corrosivo conhecido como carbamato de amônio.

A corrosividade do carbamato em aço inox está associada com o grau de passivação do cromo pelo oxigênio que deve ser injetado no processo. É esperada uma taxa de corrosão de 0,1mm/ano para o material passivado e 100mm/ano para o material ativo em meio contendo carbamato. A **Tabela 2** mostra o efeito do oxigênio na taxa de corrosão em solução de ácido nítrico. [12]

As equações de formação e decomposição do carbamato podem ser visualizadas na Figura 13. A decomposição resulta em ureia e água. A pressão e a temperatura para sua decomposição estão na faixa de 140 a 200kgf/cm<sup>2</sup> e de 190 a 200°C. [11]

**Figura 13** – Formação e decomposição do carbamato.



**Fonte:** Próprio autor

Na purificação, a ureia produzida na síntese apresenta-se em fase líquida misturada com amônia, água e carbamato de amônio. Os componentes citados são todos mais voláteis que a ureia, de modo que vaporizam a medida que a solução vai passando pelas torres de purificação. Dessa forma, a fase líquida vai ficando cada vez mais enriquecida de ureia e os outros compostos vão sendo encaminhados, no estado gasoso, para a seção de recuperação de gases.

## 2.6 AÇOS INOXIDÁVEIS RESISTENTES À SOLUÇÃO DE UREIA

Na planta de síntese de ureia da Fafen-Ba, a corrosão dos aços AISI-310MoLN (UNS S 31050), AISI-316LN-UG (UNS S31653) Grau Ureia e AISI-316L (UNS S 31603) pelo carbamato de amônio é o principal problema enfrentado pelas equipes de inspeção e manutenção de equipamentos estáticos. As composições químicas desses aços estão na **Tabela 3**.

O 316LN-UG (Ureia Grade) é também conhecido como 316L modificado. Possui basicamente a mesma composição química que um aço inoxidável 316L, diferenciando na restrição de impurezas e na combinação de alto molibdênio e nitrogênio limitando o nível de ferrita em 0,6%. Essas modificações aumentam a resistência à corrosão quando sujeitas a soluções de carbamato.

O 310MoLN é um aço inoxidável totalmente austenítico sem fases intermetálicas, sem precipitação de carbonetos intergranulares e com tamanhos de grão entre 3 e 6. Sua composição química é projetada especificamente para plantas de ureia. Enquanto o molibdênio reduz a possibilidade de corrosão por pitting, o nitrogênio age como elemento estabilizador da fase austenítica.



A corrosão desses aços depende do teor de oxigênio dissolvido na solução de ureia para a passivação do cromo. Na **Tabela 2**, é possível verificar que 5 ppm de oxigênio são suficientes para a passivação dos aços 310MoLN e 316L. Vale salientar que o controle de ar deve ser rigoroso devido à combustão. [12]

**Tabela 2** – Efeito do Oxigênio na corrosão. [12]

Taxa de corrosão mm/ano		
O <sub>2</sub> , ppm	UNS No 31603	UNS No 31050
0,5	30 - 40 Ativo	10 ativo
1	30 - 40 Ativo	10 ativo
3	30 - 40 Ativo	0,03 passivo
5	0,12 passivo	0,03 passivo
7,3	0,12 passivo	0,03 passivo
Aço no estado de corrosão ativo ou passivo		

Fonte: BROUWER, 2009

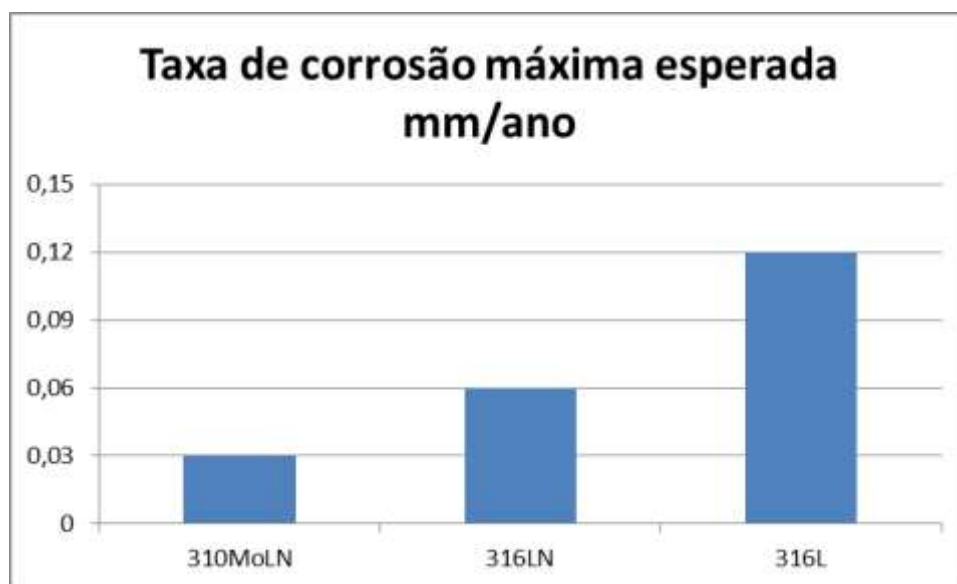
A **Tabela 3** mostra a composição química dos aços mais utilizados em plantas de ureia; já a **Figura 14** mostra a corrosão máxima permitida pela ASTM A 262 C para corrosão intergranular.

**Tabela 3** – Composição Química [13]

UNS	Tipo	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
S31050	310MoLN	0,02	2	0,03	0,01	0,5	24,0 - 26,0	20,5 - 23,5	1,6-2,6	0,09 - 0,15
S31603	316L	0,03	2	0,045	0,03	0,75	16,0 - 18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0	0,1
S31653	316LN	0,03	2	0,045	0,03	0,75	16,0 - 18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0	0,1 - 0,16

Fonte: ASMEII, 2010

**Figura 14** – Corrosão máxima permitida ASTM A262C



**Fonte:** próprio autor

## 2.7 APLICAÇÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS NA PETROBRAS/FAFEN-BA

O tipo de aço inox mais resistente ao carbamato aplicado na Fafen-BA e, por sua vez, mais nobre, é o AISI-310MoLN. Este aço é utilizado na Fafen-BA/Petrobras apenas na forma de *lining*. O AISI-316LN UG, segundo mais resistente, é utilizado na forma de tubulação, e o AISI-316L é utilizado tanto na forma de tubulação como na forma de revestimento interno de vasos.

Para estes aços inoxidáveis é sempre esperado corrosão uniforme pelo ataque do carbamato. As taxas de corrosão e, conseqüentemente, de aplicação dependerão da concentração do carbamato de amônio, da faixa de temperatura do processo e do grau de passividade do aço pela injeção de oxigênio.

Na Figura 12 podemos observar os materiais de revestimento de cada equipamento, assim como os materiais de fabricação das linhas. O P-5204, equipamento onde ocorre a mistura do dióxido de carbono com a amônia, opera a 250 bar de pressão e 200°C de temperatura. O fluido possui 17,7% de carbamato. Do P-5204 até a saída do R-5203, reator secundário, os níveis de pressão e temperatura continuam altos assim como o teor de carbamato. Para

essas concentração e temperatura utilizamos os internos dos equipamentos em 310MoLN e as linhas em 316LN UG.

Na primeira torre de purificação, a T-5201, e seu refeedor, o P-5202, as condições operacionais permitem o emprego do 316L para os internos dos equipamentos e suas linhas. A concentração de carbamato é de 4,56% e a temperatura é de 124°C.

## 2.8 CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis da série 300 utilizados em plantas de ureia possuem boa resistência à corrosão ao carbamato. Entretanto, é importante destacar que isso não significa dizer que estes materiais estão imunes a qualquer tipo de processo corrosivo. Se a película de óxido for rompida e não for regenerada, inicia-se um processo corrosivo. Este tipo de degradação ocorre em condições de corrosão localizada por pites, por corrosão sob tensão e de forma intergranular.

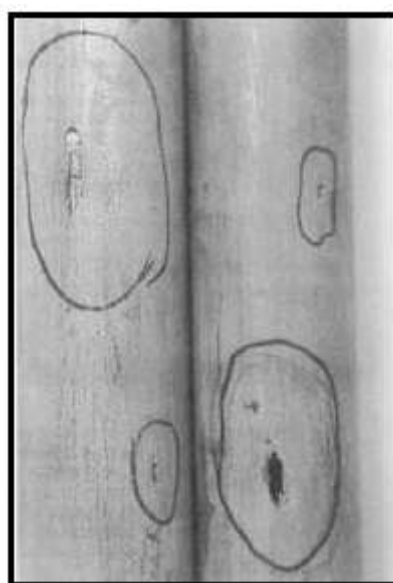
### 2.8.1 Corrosão por pites

A corrosão por pites ou puntiforme é uma forma de corrosão localizada que consiste na formação de cavidades de pequena extensão e razoável profundidade, geralmente de fundo anguloso e profundidade maior do que seu diâmetro. Ocorre em determinados pontos da superfície, enquanto o restante pode permanecer praticamente sem ataque. É um tipo de corrosão muito característica dos materiais metálicos formadores de películas protetoras (passiváveis) e resulta, de modo geral, da atuação da ilha ativa-passiva nos pontos nos quais a camada passiva é rompida. [14]

O pite ocorre em dois estágios: iniciação e crescimento. Este é um processo autossustentável, isto é, cresce continuamente independente da necessidade de novos ataques agressivos. Embora a perda de massa possa ser

insignificante, é uma forma de corrosão muito grave, já que muitas vezes um pite é suficiente para paralisar todo o processo, principalmente quando for em revestimento, pois o mesmo pode penetrar totalmente até o substrato que não possui resistência à corrosão. A versão extra baixo carbono da série 300 ligada ao molibdênio tem ampla utilização na indústria de fertilizantes. A Figura 15 é uma foto de tubos com pites.

**Figura 15** - Pite em tubo AISI 316



**Fonte:** ASM

### **2.8.2 Corrosão sob tensão**

A corrosão sob tensão é um tipo de falha mecânica que ocorre quando um componente de um material susceptível é solicitado em tração ou possui tensões residuais em um meio agressivo. As trincas podem ser intergranulares ou transgranulares, ramificadas ou não. No caso dos aços inoxidáveis austeníticos, soluções contendo cloretos são, particularmente, agressivas, principalmente em temperaturas acima de 60°C.

Este tipo de corrosão não é específico das juntas soldadas, mas a soldagem pode contribuir indiretamente pelas tensões residuais de tração,

resultantes dos diferentes ciclos térmicos e dos diferentes pontos de uma junta soldada. Estas tensões são suficientes para provocar o fenômeno, uma vez que são da ordem do limite de escoamento do material.

A redução do nível de tensões através de um tratamento térmico entre 900 e 1000°C [15] para os aços inoxidáveis austeníticos, assim como o controle de cloretos, diminuem a susceptibilidade do material à corrosão sob tensão. A Figura 16 é uma foto de trinca de corrosão sob tensão em aço inoxidável tipo 316.

**Figura 16** – Trinca de corrosão sob tensão em 316 na presença de cloreto.



### 2.8.3 Corrosão intergranular nos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis podem sofrer corrosão intergranular devido à formação de uma zona empobrecida em cromo ao longo dos contornos de grão. Os átomos de cromo que se encontravam em solução sólida, difundem-se para os contornos de grão formando carbonetos ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) que diminuem a resistência à corrosão. Na Figura 17 é possível visualizar a trinca entre os contornos de grão.

A formação desta zona empobrecida em cromo chama-se sensibilização, pois torna o material sensível à corrosão intergranular. A sensibilização depende

do teor de carbono do aço inoxidável e do tempo em certa temperatura. Os aços austeníticos sofrem sensitização quando são expostos na faixa de 400 a 950°C.

Existem diversos testes para se verificar a susceptibilidade à corrosão intergranular, sendo que os mais comuns se encontram descritos no ASTM A 262. A prevenção da corrosão intergranular é feita empregando-se aços inoxidáveis austeníticos com teor de carbono inferior a 0,03% ou aços contendo elementos como nióbio ou titânio, que fixam o carbono, e o impedem de formar precipitados com o cromo. Outra técnica de prevenção é a solubilização, que consiste no reaquecimento de um aço inoxidável sensitizado acima de 1050°C, seguido de um resfriamento muito rápido. [16]

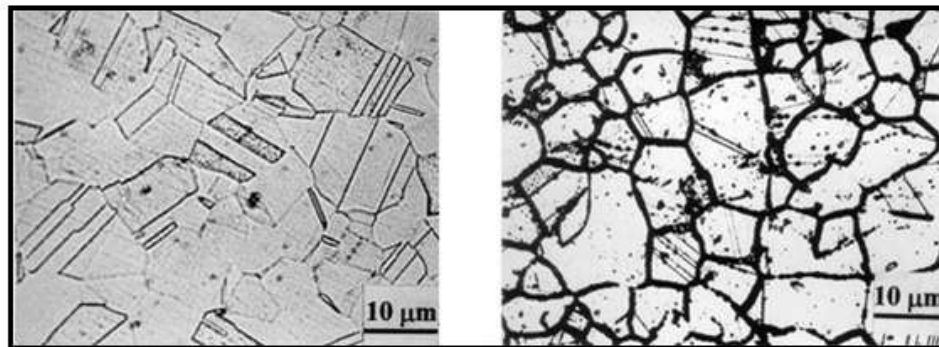
**Figura 17** – Trinca intergranular devido à corrosão sob tensão em inconel 500X



**Fonte:** MTi

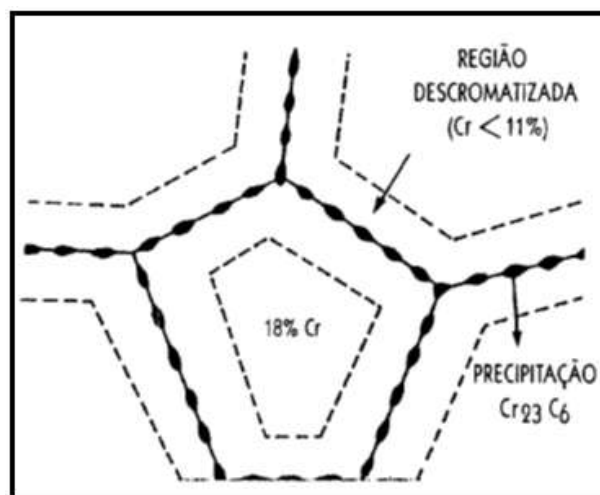
Os aços inoxidáveis austeníticos quando submetidos a operações a elevadas temperaturas podem sofrer o fenômeno da sensitização. A Figura 18 ilustra um aço inoxidável antes e depois da sensitização. Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 19. Ele consiste basicamente na precipitação de carbonetos ricos em cromo ( $M_{23}C_6$ ) nos contornos de grão, enquanto as regiões adjacentes se tornam empobrecidas de cromo. O aço quando sensitizado fica com a resistência à corrosão diminuída, deixando-o suscetível à corrosão intergranular caracterizada pelo aparecimento de trincas nos contornos de grão. [17]

**Figura 18** – Micrografia de aço inox normalizada e sensibilizada.



Fonte: ASTM 262

**Figura 19** – Ilustração da precipitação em contornos de grão.



Fonte: [www.monografias.poli.ufrj.br](http://www.monografias.poli.ufrj.br)

#### 2.8.4 Corrosão uniforme

Como visto, a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis está relacionada com a formação de uma película apassivadora na superfície do material. Entende-se como corrosão uniforme quando o ataque do meio ao aço acontece de forma homogênea em toda a superfície interna do vaso, ou seja, não pode haver variação da taxa de corrosão ao longo do equipamento ou peça.

### 2.8.5 Corrosão localizada em frestas

A corrosão por frestas pode ser considerada como uma corrosão superficial por pites. O aspecto da corrosão por frestas é frequentemente semelhante ao da corrosão por pites e seu crescimento verifica-se também por um processo autossustentável. No entanto, a existência de uma fresta é necessária para a ocorrência do fenômeno, não havendo a mesma necessidade na corrosão por pites. Os mesmos meios agressivos capazes de provocar a corrosão por pites promovem a corrosão por frestas nos aços inoxidáveis.

Este tipo de corrosão está associado a pequenos volumes de soluções agressivas estagnadas em poros, superfícies de vedação, juntas superpostas, frestas associadas a parafusos e à cabeça de rebites. A falta de oxigênio e a acumulação de agentes agressores são as causas fundamentais deste tipo de corrosão.

A corrosão por frestas é uma forma de corrosão localizada que acontece em regiões onde o acesso do eletrólito é dificultado. O interstício onde ocorre a corrosão em frestas pode ser provocado por depósitos e incrustações que ocorrem na superfície ou pelo próprio projeto do equipamento. Dentro deste interstício ocorre uma modificação no meio corrosivo (modificação localizada do ambiente) provocando a corrosão em frestas. Nesta região de fresta, que é caracterizada anódica, ocorre uma dissolução lenta do filme passivo produzindo cátions metálicos que, por sua vez, atraem os íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{H}^+$ . [18]

## 2.9 DILUIÇÃO

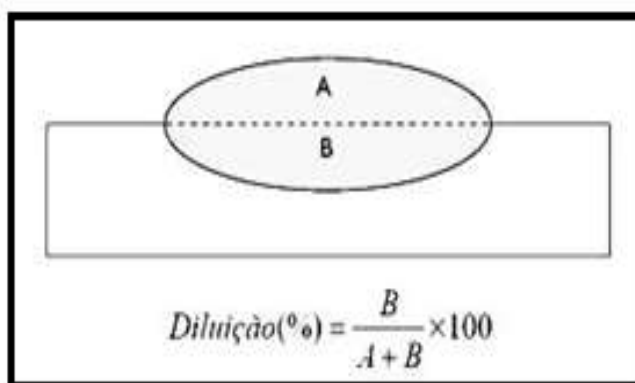
A fabricação de um equipamento com revestimento interno em aço inoxidável, seja na forma de *lining*, *clad* ou *overlay* sempre demandará soldagem dissimilar. A solda dissimilar refere-se à união por fusão de aços de composição química diferentes. [19]



No caso de soldagem *overlay*, a principal variável que deve ser monitorada é a diluição. Para soldagem onde é requerida que a última camada possua a mesma composição química do metal de adição, a diluição deve ser utilizada para estimar a quantidade de camadas necessárias atentando para não modificar o dimensional da peça.

Chama-se diluição da solda a quantidade do metal de base que se funde e participa da formação do metal da solda. Este conceito é utilizado para a soldagem dissimilar quando ocorre a mistura entre o eletrodo e o metal de base. Utilizando os processos convencionais, a diluição tem seu valor na faixa de 20 a 40% e depende do tipo de junta, tipo de processo e parâmetros utilizados. [20] A Figura 20 demonstra a fórmula de diluição para soldagem de revestimento.

**Figura 20** – Cálculo da diluição Bohler Welding group.

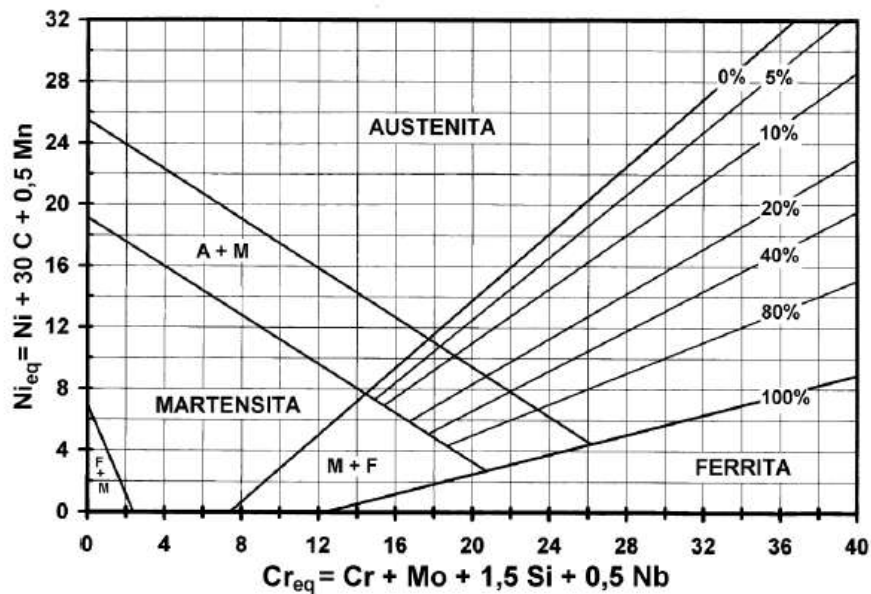


Fonte: [www.bohlerwelding.com](http://www.bohlerwelding.com)

## 2.10 DIAGRAMA DE SCHAEFFLER

O diagrama de *Schaeffler* (Figura 21) permite prever a microestrutura da zona fundida de aços com composições químicas diferentes. Para utilizá-lo, os equivalentes de cromo e níquel devem ser calculados pela composição química da solda e a microestrutura é determinada pela leitura direta no diagrama do campo em que o ponto Creq, Nieq se localiza. [21]

**Figura 21**– Diagrama de Schaeffler



Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)

O cromo equivalente de uma liga é a soma do percentual do elemento químico cromo mais elementos químicos alfacênicos, ou seja, elementos que assim como o cromo estabilizam a ferrita. O silício, o molibdênio e o nióbio são alfacênicos.

A equação 3, cromo equivalente é:

**Equação 3 – Cromo equivalente**

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb.$$

Analogamente o níquel equivalente será a soma ponderada dos elementos químicos níquel, carbono e manganês. O carbono e o manganês são gamagênicos, ou seja, estabilizadores da austenita.

A equação 4, níquel equivalente é:

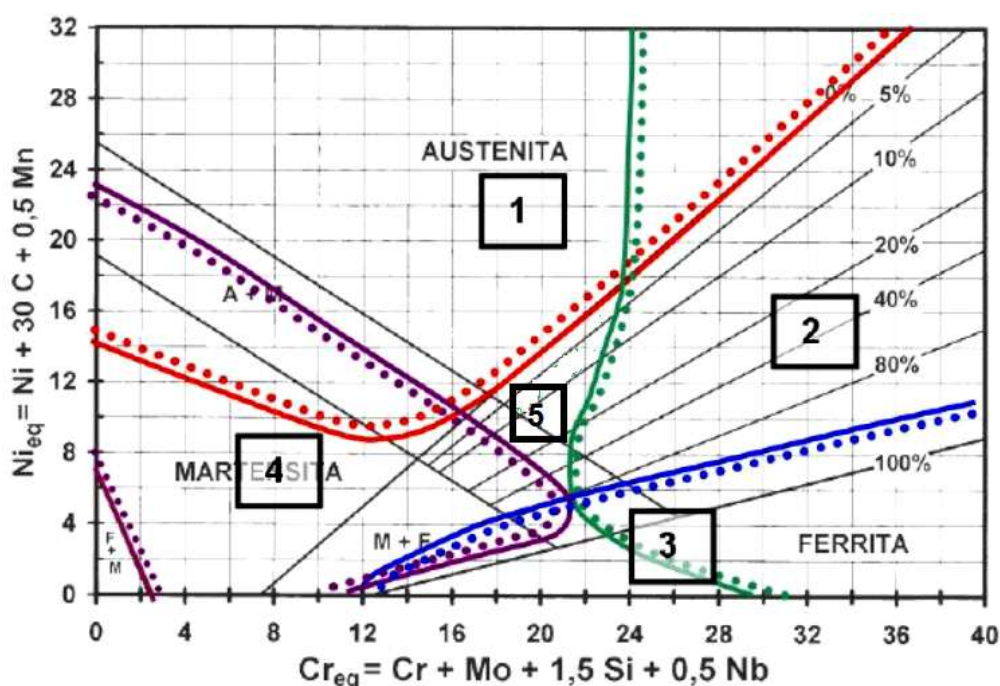
**Equação 4 – Níquel equivalente**

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn.$$

## 2.11 TIPOS DE DEFEITOS EM SOLDAS DISSIMILARES

A Figura 22 apresenta os campos de defeitos mais comuns em solda dissimilar. Quando a composição química resultante da soldagem dissimilar se encontrar no campo central do diagrama, campo 5, significa que a mesma estará livre de defeitos. [22]

**Figura 22**– Campos de defeitos possíveis em solda dissimilar. [22]



Fonte: Modenesi, 2011

### 2.11.1 Trincas de solidificação (campo 1)

A trinca de solidificação ou trinca a quente ocorre devido à segregação de elementos como Fósforo, Enxofre e Silício, formando compostos de baixo ponto de fusão no metal de solda que, em combinação com as tensões de contração durante a soldagem, levam ao trincamento. Na soldagem destes aços, o controle da composição do metal de base e do metal de adição, de forma a resultar em *Ferrite Number* (FN) 3 a 20 na solda, é extremamente benéfico para evitar que haja uma trinca de solidificação. [23]

O FN corresponde à porcentagem de ferrita na solda e a variação desta na soldagem está melhor explicitada no item 2.12.

### **2.11.2 Fragilização por formação de fases intermetálicas (campo 2)**

Dentre as fases intermetálicas precipitadas, as quais citam-se sigma, nitretos de cromo, R, Chi e carbonetos de cromo, a fase sigma é a mais importante devido a sua maior fração volumétrica na soldagem e a sua influência nas resistências mecânica e à corrosão. A presença de 1% da fase sigma precipitada diminui a tenacidade do aço em 50%. Os elementos cromo e molibdênio que estabilizam a ferrita delta favorecem a formação da fase sigma. [24]

### **2.11.3 Fragilização por crescimento de grãos (campo 3)**

O crescimento de grão é o principal mecanismo de fragilização dos aços ferríticos nos processos de soldagem. O crescimento irreversível e exagerado dos grãos ocorre na zona afetada pelo calor e na zona fundida durante a soldagem em temperaturas acima de 1100°C.

O principal efeito do crescimento de grão é aumentar a temperatura de transição dúctil-frágil e, quando sob o efeito de tensões residuais ou de trabalho, favorecer a trinca na região soldada. [23]

### **2.11.4 Fragilização e fissuração por formação de martensita (campo 4)**

A martensita é uma estrutura dura e frágil proveniente da austenita. Ocorre devido à alta temperabilidade da liga formada na solda dissimilar. Já a

trinca acontece através da combinação de baixa tenacidade da martensita aliada a esforços de tensões residuais na presença ou não do hidrogênio.

## 2.12 CUIDADOS COM A SOLDA DISSIMILAR EM REVESTIMENTO.

A norma Petrobras N-1707 estabelece alguns cuidados para a soldagem de revestimento interno de vasos de pressão para corrosão:

- para o aço inoxidável austenítico, o teor de ferrita delta no metal depositado deve ficar entre 3 FN e 8 FN. Pequenas quantidades de ferrita delta podem diminuir a susceptibilidade de trincas de solidificação em aços inoxidáveis austeníticos. Porém, em quantidades elevadas, a ferrita pode levar à fragilização devido à formação de fases intermetálicas quando submetida a temperatura de serviço elevada. Por esta razão, deve-se manter a quantidade de ferrita em torno de 5%; [21]
- o procedimento de soldagem deve incluir teste de corrosão intergranular conforme o ASTM A 262 Prática A. Para o ASME IX QW 404.5, ao se utilizar o processo de eletrodo revestido, deve ser feita análise química para a verificação da composição química do revestimento; [25]
- para vasos com chapas cladeadas, a recomposição do cladeamento nas juntas soldadas do metal base deve ser feita com no mínimo dois passes, sendo a solda do metal base totalmente recoberta pelo primeiro passe. É permitido remover até 1,0mm de metal base, desde que a espessura do metal base não fique inferior à mínima requerida. Estes cuidados também são recomendados no ASME IX QW 462.5. Vale ressaltar que esta norma se aplica à fabricação de vasos novos e que na manutenção de soldagem deve-se levar em consideração alguns pontos importantes como a degradação do material, o processo de soldagem utilizado e a diluição para o estabelecimento da espessura do revestimento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A deposição dos revestimentos utilizando o consumível AWS E316L-17 de 2,5mm de diâmetro em substrato de aço ASTM A283 Gr A com espessura de 12,7mm foi realizada através do processo de soldagem por eletrodo revestido. Esta chapa foi escolhida para simular o material do flange ASME-SA105. Os valores que não possuem faixa são considerados como máximos. [26; 27]

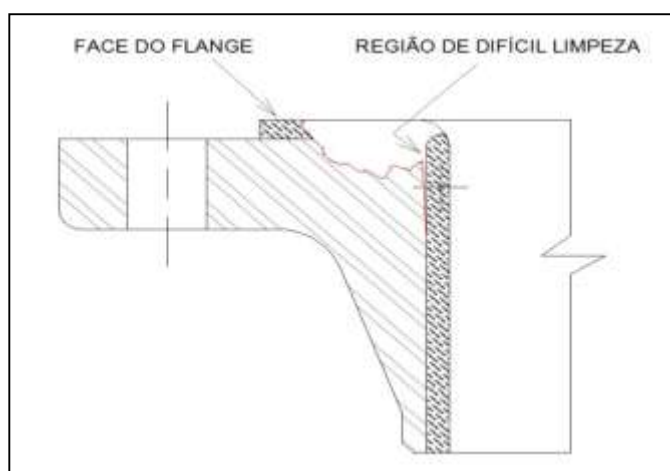
**Tabela 4** – Composição química nominal do flange.

ASME SA105								
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
0,35	0,6 - 1,05	0,035	0,04	0,1 - 0,35	0,3	0,4	0,12	0,4

**Fonte:** ASME II SA-105

A solução de carbamato corrói e impregna a interface entre o *clad* e o aço carbono. Esta região é de difícil limpeza, pois esta interface é também uma fresta contaminada que, quando fundida durante a soldagem, libera os contaminantes para a solda. Esta configuração pode ser melhor visualizada na Figura 23. O processo de soldagem SMAW foi escolhido pela dificuldade de acesso e limpeza da peça corroída.

**Figura 23** – Perfil da corrosão



**Fonte:** Próprio autor

As faixas permitidas de variação da composição química do consumível estão estabelecidas na **Tabela 5**. Os valores que não possuem faixa são considerados como máximos.

**Tabela 5** – Composição química nominal do consumível.

AWS E 316L								
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
0,04	0,5 - 2,5	0,04	0,03	1	17,0 - 20,0	11,0 - 14,0	2,0 - 3,0	0,75

**Fonte:** ASME II part. C E-316L

A composição química da chapa de aço utilizada está descrita conforme a especificação A 283 Gr A do ASME II na Tabela 6.

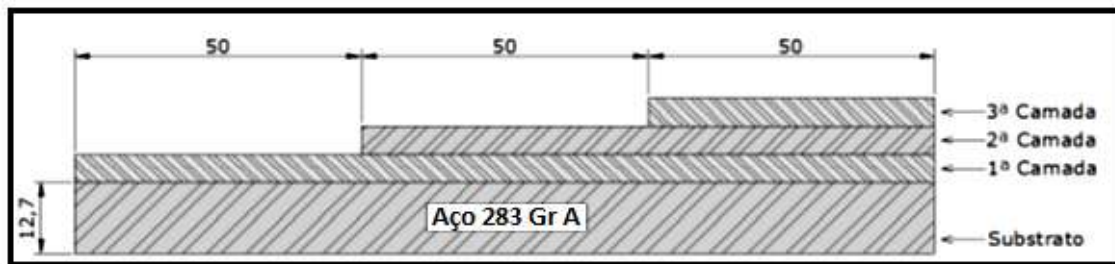
**Tabela 6** – Composição química nominal do substrato. [28]

Elements	Grade A
Carbon, max	0.14
Manganese, max	0.90
Phosphorus, max	0.035
Sulfur, max	0.04
Silicon	
Plates 1½ in. [40 mm] and under, max	0.40
Plates over 1½ in. [40 mm]	0.15–0.40
Copper, min % when copper is specified	0.20

**Fonte:** ASME II part. A SA-283 Gr-C

A soldagem foi realizada na oficina de manutenção da Fafen-Ba/Petrobras. Foi solicitado ao soldador que em uma chapa de aço carbono com dimensional de 150x150x12,7mm fossem realizadas três camadas de depósito, sendo a primeira com 150mm de largura, a segunda com largura de 100mm e a terceira com 50mm. A **Figura 24** ilustra como foram realizadas as camadas de soldagem.

**Figura 24** – Esquema das camadas no corpo de prova.

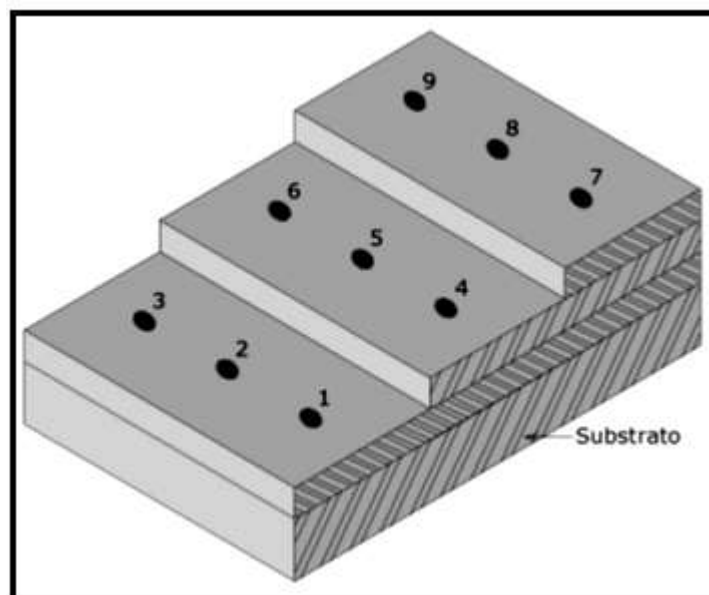


**Fonte:** Próprio autor

A máquina utilizada foi a de modelo ESAB LHJ 750 440V. Todos os passes foram realizados com a corrente de 90 A.

Após o revestimento, foram realizadas medições de espessura com paquímetro e análise química das camadas com o espectrômetro Foundry-Master no Laboratório de Metalografia do SENAI-Cimatec, conforme desenho esquemático dos pontos de amostragem na **Figura 25**.

**Figura 25** – Pontos de amostragem



**Fonte:** Próprio autor



## 4 RESULTADOS

### 4.1 MEDIÇÃO DE ESPESSURA

A medição de espessura ao longo da peça teve dois objetivos. Primeiro, por se tratar de um processo manual de soldagem, a variação de velocidade de deposição influencia geometricamente tanto na largura quanto na altura do cordão. Do mesmo modo, a velocidade de soldagem influencia na energia de soldagem que, por sua vez, tem influência sobre a diluição. E o segundo motivo é determinar a espessura das camadas que, por sua vez, determinará a espessura de remoção de material da face do flange.

Conhecendo a espessura da chapa de aço carbono que é de 12,7mm, a espessura total da peça para as camadas está disposta na Tabela 7.

**Tabela 7** – Medição de espessura das camadas

Ponto	Primeira	Ponto	Segunda	Ponto	Terceira
1	14,2	4	15,5	7	17,8
2	14,2	5	16	8	17,9
3	14,5	6	16	9	18
Média	14,3	Média	15,8	Média	17,9
Depósito	1,6	Depósito	3,1	Depósito	5,2

**Fonte:** Próprio autor

### 4.2 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química do substrato está descrita na Tabela 8e estão de acordo com o especificado na norma.

**Tabela 8** – Composição química do substrato

ASME A 283 Gr A								
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
0,14	0,57	0,0156	0,0125	0,244	0,018	0,0159	0,0019	0,01

Fonte: Próprio autor

O cromo e o níquel equivalentes do substrato são respectivamente 0,39 e 4,5. Os resultados encontrados das camadas estão descritos na **Tabela 9**.

**Tabela 9** – Composição química dos pontos.

Primeira camada										
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Nb
<b>1</b>	0,0664	13,6	9,01	1,71	0,739	0,562	0,0108	0,0106	0,0247	0,0129
<b>2</b>	0,0708	13,4	9,12	1,68	0,712	0,541	0,0128	0,0148	0,0246	0,0152
<b>3</b>	0,0729	12,9	9,23	2,06	0,659	0,543	0,0155	0,0153	0,0268	0,0157
<b>Média</b>	<b>0,07</b>	<b>13,3</b>	<b>9,12</b>	<b>1,82</b>	<b>0,703</b>	<b>0,549</b>	<b>0,013</b>	<b>0,0136</b>	<b>0,0253</b>	<b>0,0157</b>
Segunda camada										
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Nb
<b>4</b>	0,0734	16,6	11,6	2,47	0,75	0,783	0,0178	0,011	0,021	0,0076
<b>5</b>	0,0749	17	12,3	2,29	0,803	0,746	0,0187	0,0119	0,0202	0,0071
<b>6</b>	0,0604	16,8	11,8	2,49	0,777	0,768	0,0183	0,0115	0,0228	0,0065
<b>Média</b>	<b>0,069</b>	<b>16,8</b>	<b>11,9</b>	<b>2,42</b>	<b>0,777</b>	<b>0,766</b>	<b>0,0183</b>	<b>0,0114</b>	<b>0,0213</b>	<b>0,007</b>
Terceira camada										
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Nb
<b>7</b>	0,0505	17	12,5	2,52	0,736	0,78	0,0196	0,0113	0,0222	0,01
<b>8</b>	0,0321	17,1	12,3	2,4	0,759	0,753	0,0223	0,0078	0,0226	0,0105
<b>9</b>	0,0287	17,4	12,5	2,41	0,765	0,722	0,0214	0,009	0,0231	0,0051
<b>Média</b>	<b>0,0371</b>	<b>17,2</b>	<b>12,4</b>	<b>2,44</b>	<b>0,754</b>	<b>0,752</b>	<b>0,0211</b>	<b>0,0094</b>	<b>0,0227</b>	<b>0,0086</b>

Fonte: Próprio autor

Comparando a variação da composição ao longo de cada camada com as faixas permitidas pela AWS [26], pode-se verificar que não ocorre variação significativa da composição química ao longo de cada camada, apesar de ser um processo manual de soldagem. A norma permite que o cromo do metal de adição varie de 17 a 20%, conforme a Tabela 3. Isto significa uma variação de

aproximadamente 17%. Dessa mesma forma, o níquel pode variar 27% e o molibdênio, 50%.

A variação ao longo da primeira camada depositada para o cromo foi de 12,9 a 13,6%. O níquel variou de 9,01 a 9,23% e o molibdênio variou de 1,71 a 2,06%. Isto representa uma variação de aproximadamente 5% para o cromo, 2% para o níquel e 20% para o molibdênio.

O mesmo comportamento foi verificado nas segunda e terceira camadas, caracterizando uma continuidade química do cordão ao longo do corpo de prova. Pode-se, assim, utilizar os valores da média de cada camada para os cálculos do cromo e do níquel equivalentes. Os valores estão na Tabela 10.

**Tabela 10** - Cromo e níquel equivalentes das médias das camadas.

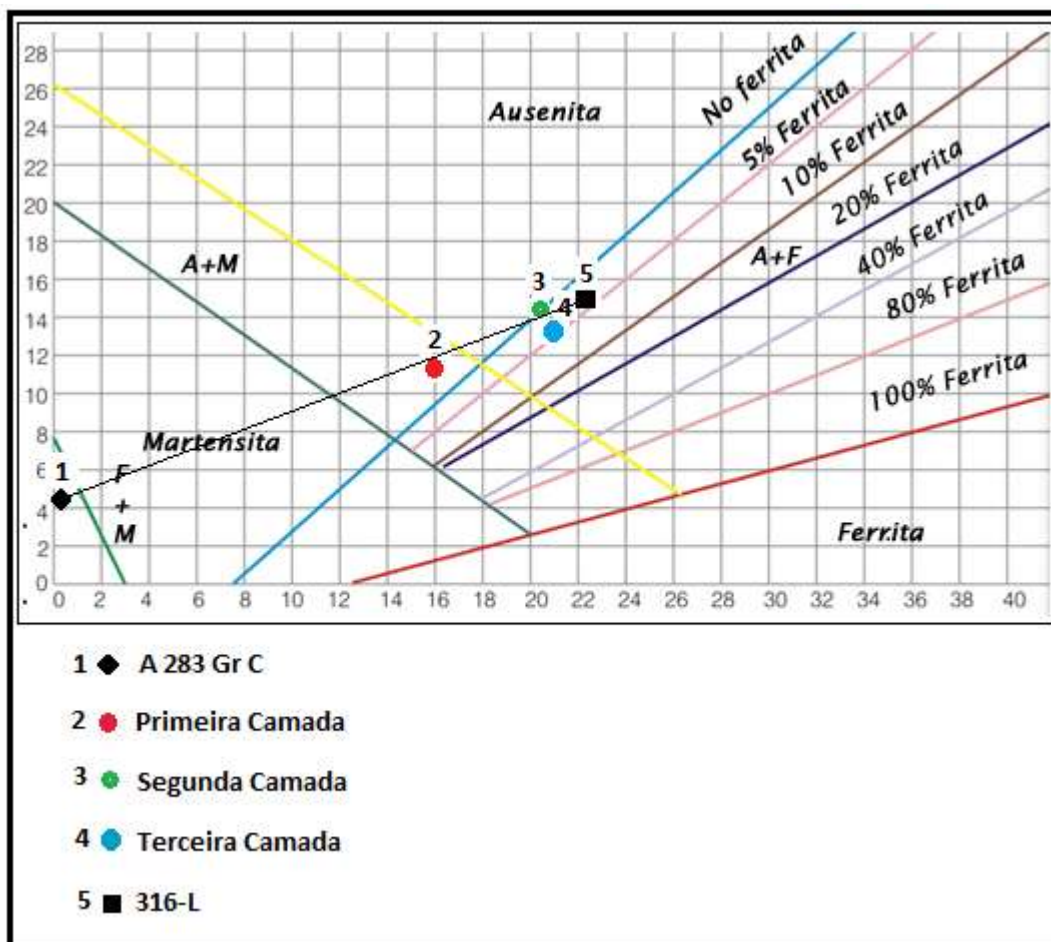
Primeira Camada			Segunda Camada			Terceira Camada		
Pontos	Cr eq	Ni eq	Pontos	Cr eq	Ni eq	Pontos	Cr eq	Ni eq
1	16,16	11,37	4	20,25	14,18	7	20,70	14,38
2	15,90	11,60	5	20,41	14,95	8	20,63	13,64
3	15,78	11,75	6	20,45	14,00	9	20,90	13,74
<b>Média</b>	<b>15,95</b>	<b>11,57</b>	<b>Média</b>	<b>20,37</b>	<b>14,36</b>	<b>Média</b>	<b>20,77</b>	<b>13,89</b>

**Fonte:** Próprio autor

No diagrama de Schaeffler da Figura 26 estão plotados os pares de cromo e níquel equivalentes dos materiais. O ponto 1 corresponde ao substrato que é o aço A 283 Gr; o ponto 2 corresponde à primeira camada de depósito; o ponto 3, à segunda camada; o ponto 4, à terceira camada; e por fim, o ponto 5 corresponde ao consumível de soldagem 316-L.

O ponto 5, referente ao eletrodo E-316L-17, foi obtido utilizando-se os valores médios das faixas permitidas pela norma AWS. Como exemplo, a faixa de cromo permitida para este consumível é de 17 a 20% e o valor utilizado na fórmula de cromo equivalente foi de 18,5%. Os demais pontos foram obtidos através do equipamento de análise química.

**Figura 26** – Demarcação dos pontos no diagrama de Schaeffler.



Fonte: [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br) adaptado pelo autor

No ponto 2, a diluição da soldagem na primeira camada pode ser medida dividindo o comprimento da reta do ponto 2 a 5 sobre o comprimento da reta do ponto 1 ao 5 e que corresponde a 35%.

No ponto 3, a diluição da soldagem na segunda camada pode ser medida dividindo o comprimento da reta do ponto 3 até o 5 sobre o comprimento da reta do ponto 2 ao 5 e que corresponde a 26,5%.

No ponto 4, a diluição não pode ser determinada graficamente por dois motivos que podem ser verificados na figura 26. O primeiro é que este ponto ficou abaixo da reta 3 até 5; e segundo, o ponto 4 ficou mais próximo do ponto 3 do que do ponto 5. Este fato sugere graficamente uma diluição do consumível

bem maior do que a faixa de 25 a 35% esperada para o processo de eletrodo revestido.

Alguns fatores contribuíram para esta distorção no gráfico. O primeiro é que o diagrama prevê a microestrutura de soldas dissimilares e, neste caso, a deposição da terceira camada pode ser considerada uma solda homogênea. Com exceção do carbono que variou de 0,069 para 0,0371 da média, os outros elementos químicos não tiveram variações significativas.

O segundo fator é uma consequência do próprio elemento carbono. Seu peso na fórmula do níquel equivalente é elevado; logo, a diluição deste elemento diminuiu o valor do níquel equivalente da terceira camada da composição química por apresentar valor de níquel maior do que a segunda camada. Na segunda camada, o peso em níquel é de 11,9%, mas o níquel equivalente é de 14,36; na terceira camada, o peso em níquel é de 12,4% e o níquel equivalente é de 13,89.

O terceiro fator poderia ter sido eliminado com a análise química do consumível. O ponto 5 foi plotado utilizando a média da faixa permitida pela norma. Como pode ser observado na tabela 9, é mais provável que a composição química do eletrodo esteja mais próxima dos valores da terceira camada do que a média utilizada da faixa permitida pela norma.

## 5 DISCUSSÃO

Para a soldagem de manutenção de revestimento contra a corrosão, utilizando o aço inoxidável 316-L sobre o aço carbono A-283-GrA é necessário que o procedimento de soldagem considere no mínimo 3 camadas de revestimento.

O número mínimo de camadas deve ser melhor analisado para o caso do aço A-105. É importante conhecer o comportamento da diluição do elemento carbono em materiais com teores diferentes. O teor máximo de carbono do aço A-105 é de 0,35%, enquanto o do aço A-283-GrA é de 0,14%.

Analisando somente o carbono, foi verificado que após 3 camadas de 316-L sobre um substrato que inicialmente era de 0,14%, a liga final, terceira camada, atingiu 0,0371% dentro do limite máximo aceitável pela norma que é de 0,04%. Outro fator importante constatado foi que não houve variação significativa do mesmo comparando a primeira e a segunda camada. Como foi visto no item 2.3, a utilização dos aços inoxidáveis de baixo carbono é sempre a melhor alternativa contra a sensibilização e, por sua vez, contra a corrosão.

Em relação ao dimensional da peça após a usinagem final das ranhuras do flange, devem-se tomar alguns cuidados. Observando a figura 1, o desenho do fabricante requer uma camada de depósito de 3mm. Por sua vez, foi verificado que para este experimento, a altura final depois das 3 camadas, foi de 5,2mm conforme a Tabela 7.

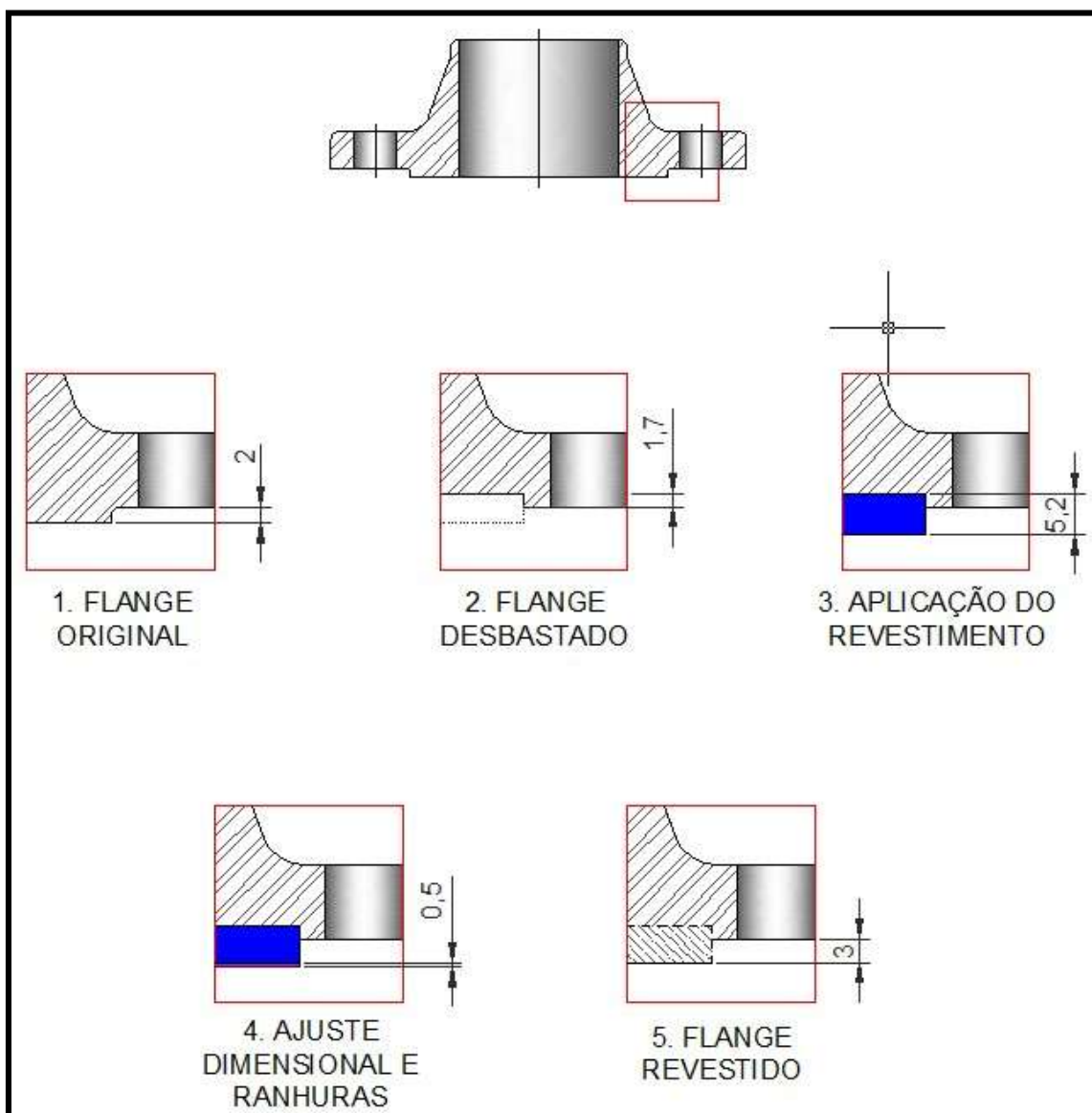
Verificou-se também que, devido ao processo ser manual, houve variação nas espessuras das deposições em até 0,5mm ao longo das camadas. Esta variação depende da habilidade do soldador.

Avaliando estes dois fatores, a espessura mínima requerida de cada depósito para atender a composição química e sua respectiva variação de espessura devido ao processo manual, deve-se fazer um desbaste da face do flange removendo material até a profundidade de 1,7mm.

Desta forma, o acréscimo de 5,2mm de revestimento em 3 camadas resultará em um ressalto de 3,5mm, ou seja, a usinagem da ranhura da face do flange poderá ter remoção de material de no máximo 0,5mm.

As etapas de fabricação e soldagem estão na figura 27. A altura da face do ressalto aumentou de 2 para 3mm conforme figura 2, projeto do bocal do P-5202.

**Figura 27** – Etapas de fabricação e soldagem do flange



**Fonte:** Próprio autor

## 6 CONCLUSÃO

A soldagem de manutenção de revestimento em aço inoxidável 316-L sobre substrato em aço carbono deve ser feita com no mínimo três camadas de soldagem quando o consumível utilizado for de 2,5mm de diâmetro e os parâmetros de soldagem estiverem na faixa permitida pelo fabricante do consumível.

O desbaste inicial, quando for requerido para compensar o depósito de material de revestimento, deve ser estimado em 1,75mm por camada quando o eletrodo utilizado for de 2,5mm de diâmetro.



## REFERÊNCIAS

- [1] DAVIS, Joseph R. ASM. **Specialty Handbook: Stainless Steels**. ASM International. 1994. Série ASM Specialty Handbook.
- [2] TELLES, P. C. S. **Materiais para Equipamentos de Processo**. 6. Ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2003, 207 pág.
- [3] ASME. **I Boiler: Pressure Vessel Code**. 2010. VIII Div.
- [4] TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [5] PETROBRAS N -1707. **Projeto de vaso de pressão com revestimento**. Rio de Janeiro: PETRÓLEO BRASILEIRO, revisão D, 2014.
- [6] GUIMARÃES, Mariana da Silva; ETOM, Marie Caroline Kama. **Tenacidade à fratura e dureza na região da interface de aços cladeados por soldagem**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.
- [7] GET-SOLDA. **Grupo de Estudos em Tecnologia de Soldagem**. Universidade Federal do Pará. Apostila Processo De Soldagem Eletrodo Revestido.
- [8] MODENESI, P. J. MARQUES, P. V., **Introdução aos Processos de Soldagem**. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais. 2000. Apostila.
- [9] Catalogo AISI 317-L. Disponível em: [www.aperam.com](http://www.aperam.com). Catálogo.
- [10] LIPPOLD. Jonh C, **Welding Metallurgy and soldability of stainless steel**. Wiley, 2005.
- [11] Heubner, Ulrich. **Nickel alloy and high alloy special stainless steel**. VDM,1987.
- [12] BROUWER, M. **stainless Stells and other Alloys in Urea Plants**. Disponível em: [www.ureaknowhow.com](http://www.ureaknowhow.com), 2009.

[13] ASMEII. **Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**. 2010. Part A.

[14] SILVA, M. J.G Da .**Estudo da Temperatura de Solubilização de Aços Inoxidáveis Austeníticos ASTM A312 TP321 para Operação em Indústria Petroquímica**,Fortaleza , 2001.

[15] PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C., **Aços inoxidáveis auteníticos**. Hemus, 1994.

[16] HIGA, Silvia Midori. **Avaliação da corrosão intergranular de aços inoxidáveis por meio de normas e de ensaios eletroquímicos em altos potenciais**. São Carlos : UFSCar, 2011.

[17] SHREIR,L.L. **Corrosion**. Vol 1. Stainless Steels. 3. ed. Butterworth,Oxford, 1995.

[18] BRAGA, T. M. T. **Efeito de entalhe e de meios cloretados na corrosão sob tensão de um aço inoxidável ABNT 304**. 2011. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

[19] ZEEMAN, A. Diluição. Infosolda. 20?.

[20] RYUICHI, H.; HIROSHIGE, I. Effects of base material dilution on the corrosion resistance of the weld joint of super GAMMA system stainless steel. **Current Advances in Materials and Processes**, v. 18, n. 2, p. 604, 2005.

[21]LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. **John Wiley and Sons**, 2005.

[22] MODENESI, P. J. **Soldagem de Ligas Metálicas**. UFMG, Belo Horizonte, 2011. Apostila.

[23] BARBOSA, R.P. **Metalurgia da Soldagem e Soldabilidade do Materiais.**, 2007. Apostila

[24] GIRALDO, Claudia Patricia Serna. **Precipitação de fases intermetálicas na zactb de soldagens multipasse de aços inoxidáveis duplex**. BP. MS, São Paulo, 2011.

[25] ASME IX. **Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures.** Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators, 2007.

[26] ASME II, Part C, SFA-5.4/SFA-5.4M **Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.** 2010.

[27] ASME II, Part A, SA-105/SA-105M **Carbon Steel Forgings for Piping Applications,** 2010.

[28] ASME II, Part A, SA-283/SA-283M **Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates,** 2010.

[29] VEIGA, E. **Soldagem de Manutenção,** ed 1. 2011.

[30] ASME B16.5, **Pipe Flanges and Flanged Fittings.** 2009.