

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**PROPRIEDADES ELETROQUÍMICAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS 316L E 321  
GOIVADOS COM ELETRODO DE GRAFITA E SOLDADOS POR ARCO  
SUBMERSO**

Gabriel Roberto Campesan

Orientador: Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

São Carlos-SP

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**PROPRIEDADES ELETROQUÍMICAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS 316L E 321  
GOIVADOS COM ELETRODO DE GRAFITA E SOLDADOS POR ARCO  
SUBMERSO**

Gabriel Roberto Campesan

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia  
de Materiais como requisito parcial à  
obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIA  
E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

São Carlos-SP  
2022

## **DEDICATÓRIA**

Dedico a minha esposa Patrícia que me apoiou e incentivou. Nada disso teria sentido se você não estivesse existido em minha vida.

## **VITAE**

Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos  
(2018).



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gabriel Roberto Campesan, realizada em 20/12/2022.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga (UFSCar)

Prof. Dr. Guilherme Zapon (UFSCar)

Prof. Dr. Carlos Alberto Caldas de Sousa (UFBA)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecer a Deus.

Agradeço ao meu orientador por aceitar conduzir essa pesquisa, pela paciência e por não desistir de mim.

Agradecer também ao meu coorientador que foi mais que isso, teve paciência, me ajudou nos momentos mais difíceis até aqui, me apoiou e não desistiu, buscando sempre me manter motivado.

Aos meus pais, pelo apoio e amor, que me apoiaram ao longo de minha trajetória, por me manter motivado.

A minha esposa, pela paciência, dedicação, amparo nos momentos mais difíceis durante a pesquisa, buscando sempre me manter motivado.

Aos meus filhos Maria Luiza e Bernardo pela paciência e amor.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro para realização desse trabalho com bolsa de estudos, processo 134272/2019-6.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e todo seu corpo docente, por tanta partilha de conhecimento.

Por fim agradeço a Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade de aprender, e pelo comprometimento e qualidade de ensino.

## RESUMO

Nas práticas de manutenção e de fabricação de equipamentos da indústria petroquímica, o procedimento de goivagem a arco elétrico com eletrodo de grafita é utilizado na preparação de juntas em aço carbono a serem reparadas ou unidas pelo processo de soldagem. Nota-se, no entanto, que não há na literatura muitas informações acerca da magnitude da contaminação por carbono em aços inoxidáveis goivados a arco elétrico por eletrodo de grafita e de seu efeito nas propriedades eletroquímicas das juntas soldadas. As normas de soldagem, dentre elas a N-133, Rev N da Petrobras, não permitem o uso dessa técnica de preparação superficial de aços inoxidáveis, sendo aceita a hipótese que a contaminação por carbono seria acima do permissível, comprometendo sua resistência a corrosão. O presente projeto visa, dessa forma, avaliar o emprego deste processo (goivagem seguido de soldagem por arco submerso) em dois tipos de aços inoxidáveis austeníticos, o AISI 316L e AISI 321, verificando seus efeitos nas propriedades eletroquímicas resultantes: grau de sensitização e susceptibilidade à corrosão intergranular. As juntas reparadas/soldadas serão estudadas em três situações diferentes quanto ao tratamento de preparação da junta após a goivagem, a saber: i) sem qualquer tipo de limpeza, ii) escovamento e iii) usinagem. Dois tipos de juntas serão utilizadas, em X e em V, para simular preparação de passe de raiz e reparo de defeitos, respectivamente. O grau de sensitização da junta soldada foi avaliada através da técnica de reativação potenciocinética em duplo loop (DL-EPR) segundo a ISO 12732 *Corrosion of metals and alloys — Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Cihal's method)*, e a susceptibilidade à corrosão intergranular de acordo com a norma ASTM A262-15 *Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels*, Prática A. Os resultados mostraram que o procedimento de goivagem não afeta a resistência a corrosão dos aços estudados. A utilização do processo de goivagem apresenta maior rendimento de retirada de material exigindo menor esforço do operador, baixo custo, e facilidade de uso em campo.

**Palavras-Chave:** Aço inoxidável; goivagem; soldagem; sensitização; corrosão; propriedade mecânica.

**ABSTRACT**

**ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEELS 316L AND  
321 GOUGED WITH GRAPHITE ELECTRODE AND WELDED BY  
SUBMERSED ARC WELDING**

In the maintenance and manufacturing practices of equipment in the petrochemical industry, the electric arc gouging procedure with graphite electrode is used in the preparation of carbon steel joints to be repaired or joined by the welding process. It is noted, however, that there is not much information in the literature about the magnitude of carbon contamination in stainless steels gouged with an electric arc by graphite electrode, and the consequences on the electrochemical properties. Welding standards, including N-133, Rev N from Petrobras, do not allow the use of this preparation technique for stainless steel, accepting the hypothesis that carbon contamination would be above the permissible, and it would compromise the mechanical properties and the corrosion resistance. Therefore, this project aims to evaluate the use of this process (gouging followed by welding) considering two types of austenitic stainless steels, AISI 316L and AISI 321, verifying the resulting gouging effect followed by welding on the electrochemical properties. The repaired/welded joints were studied in three different situations regarding the treatment of joint preparation after gouging, namely: i) without any type of cleaning, ii) brushing and iii) machining. Two types of joints were investigated, X and V, to simulate root pass preparation and defect repair, respectively. The degree of sensitization of the welded joint was evaluated using the double loop potentiokinetic reactivation technique (DL-EPR) according to ISO 12732 Corrosion of metals and alloys — Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Cihal's method), and the susceptibility to intergranular corrosion according to ASTM A262-15 Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels, Practice A. The results showed that the air carbon arc gouging has no effect on the corrosion resistance of the studied alloys

**Keywords:** Stainless steel; arc gouging; welding; sensitization; corrosion; mechanical properties.

## ÍNDICE DE ASSUNTOS

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE DE ASSUNTOS .....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Aços inoxidáveis .....	4
3.1.1 Diagrama de Schaeffer.....	5
3.1.2 Fases secundárias e deletérias .....	6
3.2 Soldagem por Arco Submerso (SAW - <i>Submerged Arc Welding</i> ).....	8
3.2.1 Goivagem a arco ao ar com eletrodo de grafita.....	8
3.2.2 Efeitos metalúrgicos .....	9
3.3 Corrosão dos aços inoxidáveis .....	10
3.4 Reativação eletroquímica por potenciocinética em duplo loop (DL-EPR) .....	13
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
4.1 Caracterização das chapas.....	19
4.2 Goivagem inicial.....	19
4.3 Condições da superfície da goiva .....	22
4.4 Avaliação da contaminação por Carbono.....	24
4.4.1 Preparação dos Corpos de Prova.....	24
4.4.3 Ensaio eletroquímico .....	28
4.4.4 Análise química. ....	30
4.4.5 Análise por microscopia.....	30
4.5 Forma de análise de resultados .....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
6 CONCLUSÕES.....	64
7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	65

8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	69
---	--	----

## 1 INTRODUÇÃO

Soldagem tem como definição clássica um processo de união, entretanto, tal termo também abrange numerosos e diferentes processos utilizados na fabricação e manutenção de peças, equipamentos e estruturas [1]. A indústria petroquímica tem uma demanda muito alta de processos de soldagem, desde a fabricação de uma plataforma até a manutenção de tubos de prospecção e extração de petróleo que se encontram submersos. Para a realização de tais processos, são necessários certos tipos de preparo, como, por exemplo, a retirada de descontinuidades físicas do cordão de solda ou a realização de chanfros em juntas para posterior soldagem. A remoção de metal pode ser realizada por usinagem, retificação ou corte térmico, dependendo da dureza e do material [2].

Dentre os três processos citados acima, a goivagem por arco voltaico com eletrodo de grafita apresenta maior rendimento de retirada de material exigindo menor esforço do operador [3], baixo custo, e facilidade de uso em campo [4]. Por estes motivos, a goivagem por arco elétrico com eletrodo de grafita é muito utilizada. Entretanto, devido à possibilidade de contaminação por carbono no material, durante a execução da goivagem em si, seu uso em aços inoxidáveis tem sido restrito, tanto que, a goivagem por arco voltaico com eletrodo de grafita é proibida pela norma Petrobrás N-133-REV.N3/17 [4].

A literatura a respeito da magnitude da contaminação por carbono em aços inoxidáveis goivados a arco elétrico por eletrodo de grafita e do dano gerado nas propriedades mecânicas e eletroquímicas do material é escassa. Portanto, o presente projeto pretende avaliar o emprego deste processo de maneira sistemática em dois tipos de aços inoxidáveis, o AISI 316L e 321, da série austenítica. Os resultados podem balizar condições de realização desse procedimento, e se viável, levar no futuro a mudanças nas normas vigentes que venham a facilitar e reduzir os custos do processamento das instalações produzidas em aços inoxidáveis.

O processo de soldagem utilizado neste estudo será a soldagem por arco submerso (*SAW - submerged arc welding*). O principal defeito que pode

ocorrer pela contaminação por carbono nos aços inoxidáveis do presente estudo, segundo a norma API 571 [5], é a formação de carbonetos que causam a sensitização, com risco iminente de corrosão intergranular. Dessa forma, as superfícies goivadas e as juntas soldadas serão examinadas por técnica eletroquímica, tal como a técnica de reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop (DL-EPR, do inglês *Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation*), visando avaliar o grau de sensitização. Adicionalmente, a susceptibilidade à corrosão intergranular da junta soldada será avaliada por ataque eletrolítico em ácido oxálico, segundo a ASTM A262, prática A.

## **2 OBJETIVO**

Este projeto de pesquisa visa estudar o efeito do processo de goivagem por arco voltaico com eletrodo de grafita seguido por soldagem a arco submerso em aços inoxidáveis austeníticos, AISI 316L e AISI 321, no que se refere à sensitização e susceptibilidade à corrosão intergranular.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são um grande grupo de ligas especiais desenvolvidas principalmente para resistir à corrosão [6]. As principais classes de aços inoxidáveis, classificados segundo a sua microestrutura, são: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação.

A microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos é composta exclusivamente por grãos equiaxiais de austenita, podendo haver maclas. Usualmente são recozidos em altas temperaturas para produzir recristalização e dissolução de carbonetos. Quando o processamento dos aços inoxidáveis austeníticos é adequado, eles são monofásicos, isentos de carbonetos, ferrita ou outras fases, com todos os elementos de liga em solução sólida, o que garante máxima resistência à corrosão [6].

Segundo o AISI (*American Iron and Steel Institute*) os aços inoxidáveis austeníticos são classificados e agrupados em séries 300 e 200. A série 300, que é a empregada neste estudo, engloba os aços com 16 a 25 %p de cromo e 8 a 22 %p de níquel, tendo, ainda, outros elementos de liga em pequena quantidade. Na série 200, os aços têm substituição parcial do níquel pelo manganês, com teores variando de 4 a 15 %p manganês, 7 %p níquel (máximo) e 0,02-0,05 %p nitrogênio.

O aço AISI 316L contém molibdênio para melhorar a resistência à corrosão, e teor de carbono inferior à 0,03 %p, para reduzir o risco de sensitização quando exposto em temperaturas elevadas. Portanto, este tipo de aço inoxidável tem sido amplamente adotado para uso em ambientes severamente corrosivos, especialmente em aplicações marítimas que requerem alta resistência à corrosão. Já o aço inoxidável AISI 321 contém titânio, o qual possui maior afinidade com o carbono do que o cromo, reduzindo o risco de sensitização [7].

### 3.1.1 Diagrama de Schaeffer

Quando se utiliza processos térmicos, tal como a soldagem, é possível haver alteração microestrutural. Para a situação específica da soldagem, existe um instrumento de previsão de fases presentes no metal da solda, o Diagrama de Schaeffer. No eixo X representa-se o teor de cromo equivalente e no eixo Y o teor de níquel equivalente, ver Figura 3.1. Tipicamente, aços austeníticos, ao serem soldados, permanecem com microestruturas austeníticas sendo o maior risco, como mencionado, a formação de precipitados ricos em Cr que causam regiões empobrecidas deste elemento, portanto, mais susceptíveis a se corroerem.

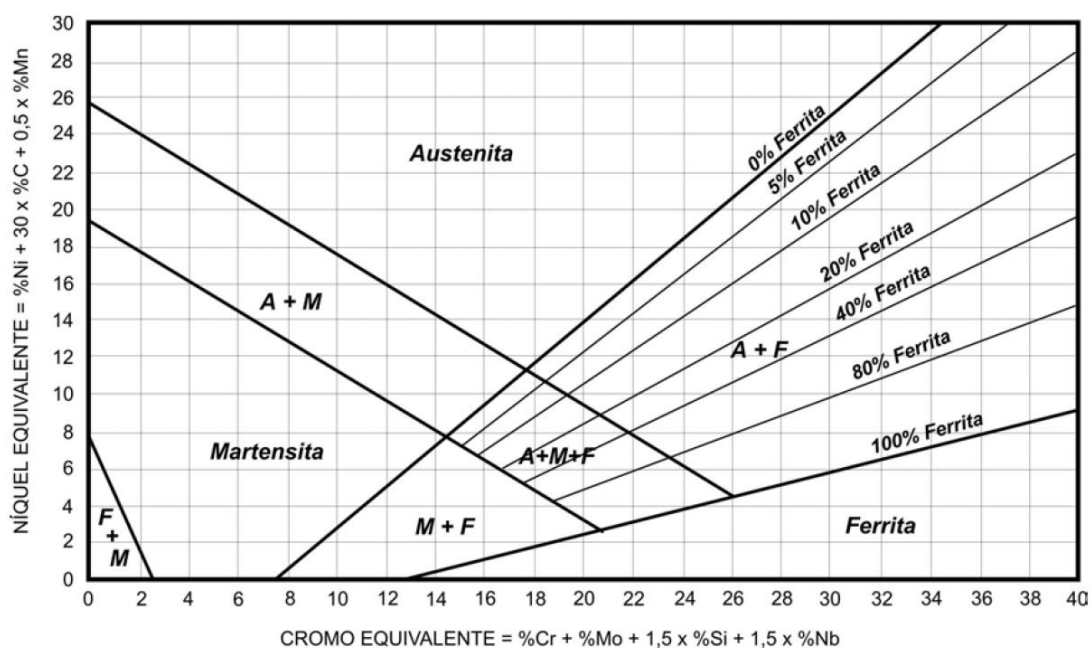


Figura 3.1 - Diagrama de Schaeffer [8]. A+M campo bifásico composto de Austenita e Martensita; A+F campo bifásico composto de Austenita e Ferrita; A+M+F campo trifásico composto de Austenita, Martensita e Ferrita; M+F campo bifásico composto de Martensita e Ferrita.

### 3.1.2 Fases secundárias e deletérias

As propriedades dos aços inoxidáveis podem ser afetadas por fases deletérias formadas por precipitação, tais como os nitretos de cromo ( $\text{Cr}_x\text{N}$ ), fase sigma ( $\sigma$ ), fase chi ( $\chi$ ), fase Laves ( $\text{Fe}_2\text{Mo}$ ), e de carbonetos ( $\text{M}_x\text{C}_y$ ) [9]. A precipitação de fases deletérias é influenciada pelo aumento dos teores de certos elementos de liga (como o carbono) e pela exposição à altas temperaturas, como as que ocorrem durante a soldagem [10].

A fase sigma ( $\sigma$ ) tem sua formação facilitada pela presença de Cr e Mo em altas concentrações, sendo estes os principais constituintes da fase. Consequentemente, aços duplex (e, particularmente, os superduplex) apresentam alta propensão à precipitação de fase sigma. Sua nucleação ocorre preferencialmente em junções triplas, onde dois grãos austeníticos encontram um grão ferrítico, através de uma reação eutetóide [11]. A fase sigma é apresentada na Figura 3.2 e 3.3.

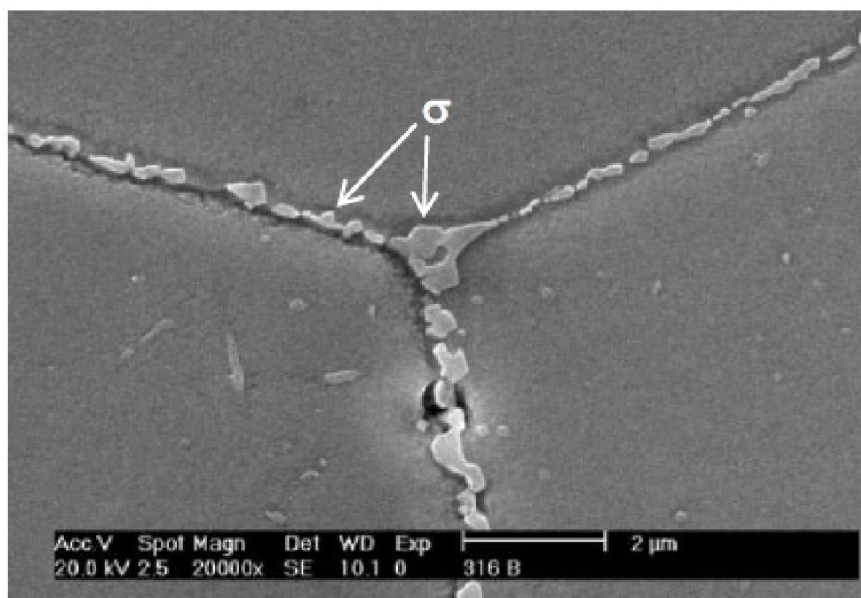


Figura 3.2 - Identificação da fase sigma nos contornos de grãos e nos pontos tripos dos grãos [12].

A formação desta fase tem efeitos negativos nas propriedades mecânicas, como perda de ductilidade, pois a fase sigma é frágil, e a perda de

resistência à corrosão, devido ao empobrecimento de cromo nas interfaces entre fases.

A fase intermetálica chi ( $\chi$ ) nucleia preferencialmente nos contornos de grão austenita/ferrita, também ocorrendo em contornos ferrita/ferrita, e pode tanto preceder quanto suceder a da fase sigma, dependendo de parâmetros como temperatura e composição química da liga. Sua precipitação ocorre em menor proporção, comparada com a fase sigma. A quantificação do efeito da fase chi ( $\chi$ ) nas propriedades do material é difícil, já que geralmente coexiste com a fase sigma. Sua presença está ligada ao nitrogênio; aumentando-se seu teor, aumenta-se a quantidade de fase chi [13]. A fase chi é apresentada na Figura 3.3.

Formados principalmente nos contornos de grão, os carbonetos de cromo ( $M_{23}C_6$ ) costumam precipitar antes das demais fases devido à alta mobilidade do carbono, causando empobrecimento de cromo na região adjacente ao contorno de grão (sensitização). O uso de quantidades cada vez menores de carbono nas ligas tem garantido pouca ou, eventualmente, nenhuma precipitação [14]. Outro tipo de precipitado que ocorre em aços inoxidáveis austeníticos é o nitreto de cromo, que assim como o carboneto de cromo, se forma preferencialmente nos contornos de grãos, causando empobrecimento de cromo na região adjacente no contorno de grão [13]; a fase  $Cr_2N$  é apresentada na Figura 3.3.

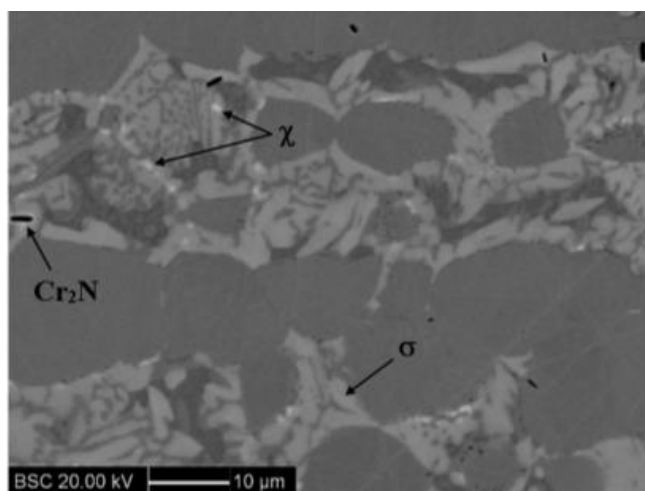


Figura 3.3 - Microestrutura aço inoxidável superduplex envelhecido a 850°C por 1 hora [15].

### 3.2 Soldagem por Arco Submerso (SAW - *Submerged Arc Welding*)

O método de soldagem que consiste de um arame (eletrodo) nu que continuamente alimentado gera um arco elétrico com a peça, com isto formando uma poça de fusão, sendo tanto o eletrodo e a poça de fusão recobertos de um material granular fusível chamado de "fluxo", é denominado arco submerso. O "fluxo" protege o metal de contaminação atmosférica e possui outras funções metalúrgicas, Figura 3.4 [16].

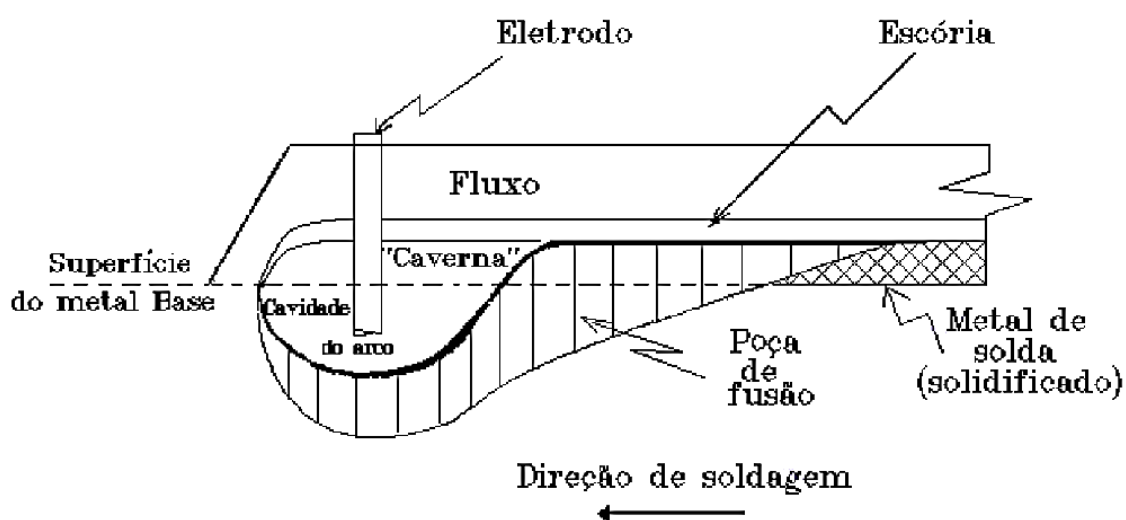


Figura 3.4 - Seção Longitudinal da Poça de fusão no Arco Submerso [17].

#### 3.2.1 Goivagem a arco ao ar com eletrodo de grafita

A goivagem a arco ao ar com eletrodo de grafita é uma forma de corte muito usada para remover defeitos de solda por ser um processo rápido, flexível e barato [18].

A goivagem ao arco com eletrodo de grafita é um processo semelhante ao processo de soldagem manual com eletrodo revestido, figura 3.5. Uma modificação no alicate porta-eletrodo é realizada, com a inserção de um orifício que direciona um jato de ar comprimido com suficiente volume e velocidade

para a expulsão, por arraste, do metal que sofreu fusão proveniente da poça formada pelo arco elétrico [19].

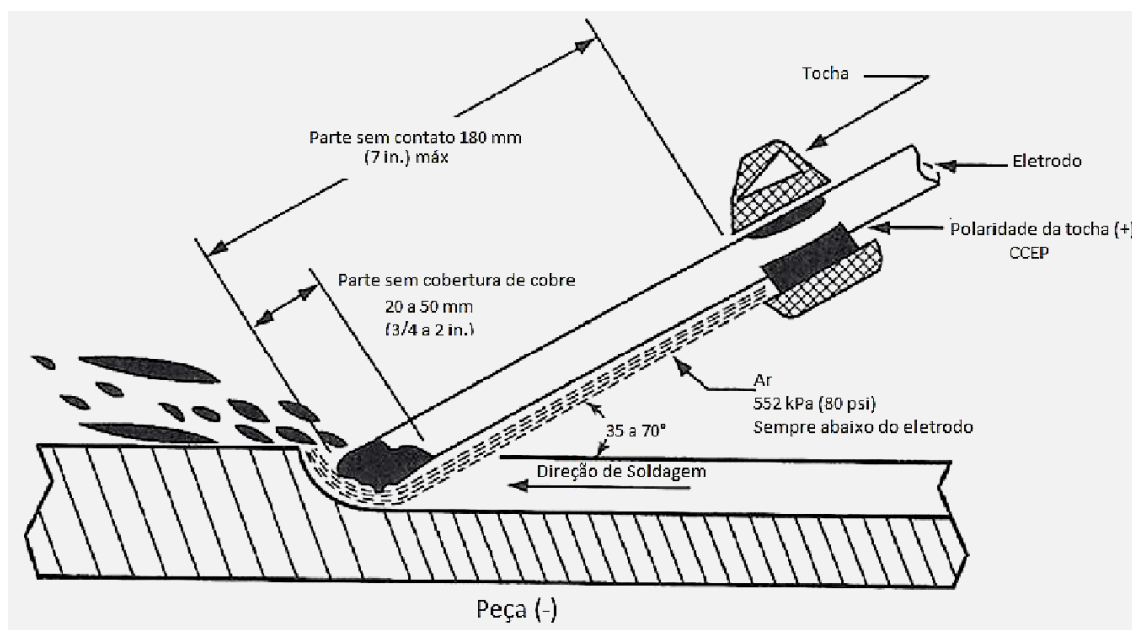


Figura 3.5 - Esquema do processo de goivagem a arco ao ar com eletrodo de carbono, adaptado [18].

O processo de goivagem a arco com eletrodo de grafita ao ar pode ser usado para cortar, chanfrar e para abertura de sulcos na maioria dos metais, incluindo aço carbono, aços baixos liga, aço inoxidável, ferro fundido, e ligas de alumínio, magnésio, cobre e níquel [20].

A sequência pode ser repetida até que o chanfro ou corte requerido seja obtido; o metal pode ser removido aproximadamente cinco vezes mais rápido com esta técnica comparado com desbaste por esmerilhamento [19].

### 3.2.2 Efeitos metalúrgicos

Como visto na Figura 3.3, o eletrodo de grafita é o polo positivo, portanto o fluxo de corrente transporta átomos de carbono ionizados do eletrodo para a metal base. Os átomos de carbono ionizados são rapidamente solubilizados pelo metal base derretido; essa absorção não pode ser evitada, de forma que é

importante que todo o metal fundido contaminado com carbono seja removido do corte, preferencialmente pelo jato de ar [20].

A aplicação de maneira inadequada desta técnica pode levar a alguns problemas como formação de poças de metal rico em carbono no fundo da ranhura produzida pela goivagem e irregularidade na morfologia da ranhura, que podem contribuir para reter metal fundido carburizado que deveria ser ejetado, e acúmulo de gotículas de escória ao longo da borda da ranhura [2,20]. Este resíduo que deve ser ejetado pelo jato de ar é chamado de escória, sua cor é cinza escuro, em contraste com o azul brilhante do sulco (se feito corretamente), portanto notável visualmente [2,20].

### **3.3 Corrosão dos aços inoxidáveis**

Aços inoxidáveis são conhecidos pela sua resistência à corrosão. Tal resistência está relacionada com a formação da camada passiva, que se trata da formação de um filme protetor manométrico de compostos de Cr ricos em oxigênio. A formação deste filme quando é rápida na presença de oxigênio dissolvido no eletrólito. No caso da má formação ou ruptura do mesmo, não havendo condições para repassivação, caracteriza a corrosão ativa.

A susceptibilidade à corrosão depende da estabilidade do filme passivo que é influenciado pela composição, microestrutura e características do ambiente tais como pH, temperatura, e agentes agressivos presentes. O fenômeno da quebra da camada passiva depende da presença de MnS, interface de fases diferentes, concentração de cloretos (e outros tipos de ânions como os de flúor, bromo e iodo) e efeitos físicos com ranhuras [21].

Outro mecanismo que deixa os aços inoxidáveis austeníticos mais susceptível à corrosão é a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, tornando as regiões próximas aos contornos pobres em elementos de liga responsáveis pela passivação, como o cromo; este mecanismo recebe o nome de sensitização e está apresentado na Figura 3.6.

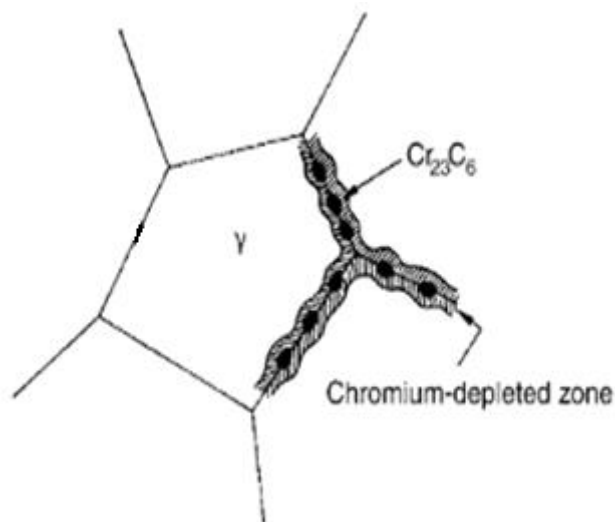


Figura 3.6 – Depleção de cromo na austenita perto dos limites dos grãos devido à precipitação de carbeto de cromo [22].

A precipitação de carbonetos de cromo depende do teor de carbono presente no aço e ocorre durante a exposição a altas temperaturas, em operação de tratamento térmico ou de soldagem [15]. Na Figura 3.7 é apresentado o tempo e a temperatura de precipitação de  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  em função concentração em %p de carbono.

A sensitização provoca uma corrosão intergranular, que corresponde à corrosão gerada pela precipitação de  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  no contorno de grão com consequentemente exaustão de cromo das regiões adjacentes ao contorno. A precipitação também pode ocorrer no interior do grão que leva à formação de pites [21]. Aços inoxidáveis suscetíveis são aqueles com teores de carbono > 0,04%p sem elementos estabilizadores de carbonetos (titânio e/ou nióbio) [23].

De acordo com a norma ASTM A262, apenas quando se tem precipitação e ataque no contorno completo de pelo menos um grão é que se pode considerar a microestrutura como do tipo vala, que caracterizaria a ocorrência de sensitização [24], apresentada na Figura 3.8.

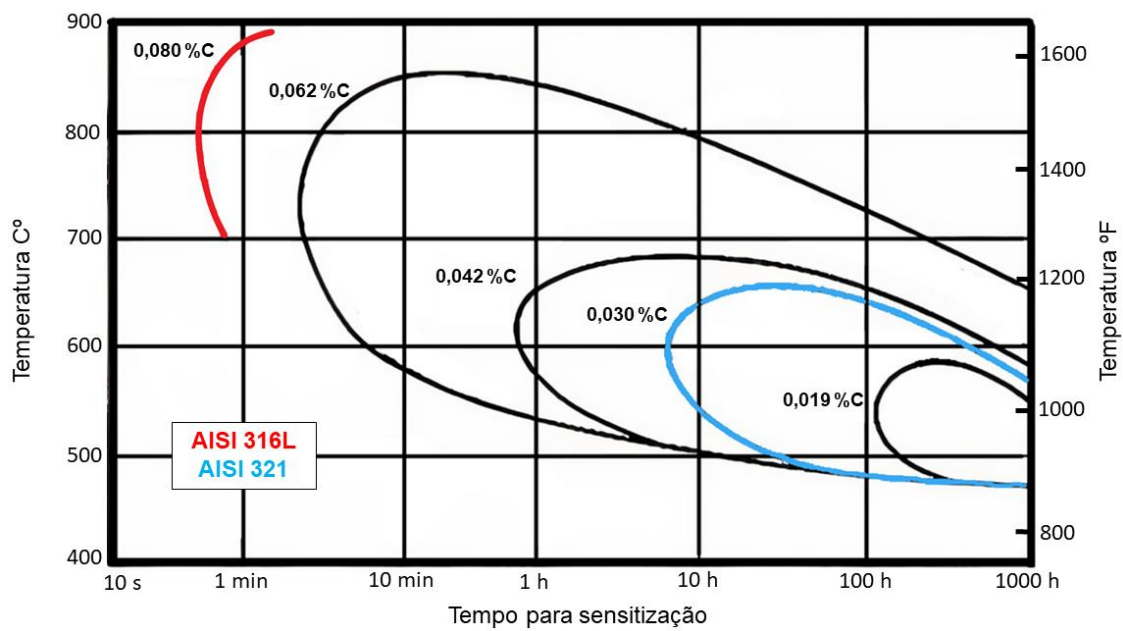


Figura 3.7 – Taxas de precipitação de  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  em função do teor de carbono [22].

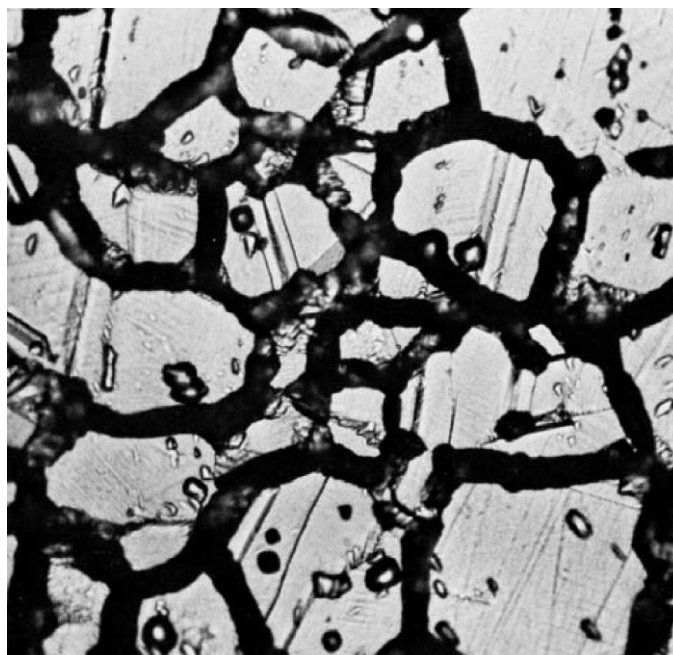


Figura 3.8 - Estrutura da vala de um aço inoxidável austenítico (um ou mais grãos completamente cercados por valas) [24].

### **3.4 Reativação eletroquímica por potenciocinética em duplo loop (DL-EPR)**

A soldagem é um processo não somente empregado em espaço fechado na indústria, mas também empregada em ambientes externos e muitas vezes o operador tem equipamento limitados. Uma soldagem realizada com aporte térmico inapropriado ou um tratamento térmico pós-soldagem mal controlado podem vir a causar precipitação de fases indesejadas e determinar o colapso de uma estrutura. Por isso, é muito grande o interesse no desenvolvimento de técnicas que permitam a detecção destas fases deletérias. Além do mais, é preciso que estas técnicas sejam de fácil execução e interpretação, rápidas e baratas, sendo que dificilmente se consegue a totalidade destas características em uma só técnica.

Uma destas é a reativação eletroquímica potenciocinética em duplo-loop (DL-EPR), uma técnica eletroquímica que, para detectar a presença destas fases, ativa as regiões de má formação da camada passiva existentes nos contornos entre fase deletéria e matriz.

A técnica de reativação eletroquímica potenciocinética foi primeiramente desenvolvida para avaliar o grau de sensibilização de juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos, tendo ganhado atenção por ser não-destrutiva, rápida e de fácil interpretação. Para interpretar os resultados, é preciso, primeiro, aprofundar o entendimento de materiais que se passivam. Retoma-se, por enquanto, a análise da curva de polarização destes materiais (Figura 3.9). O formato da curva apresentado é fruto de polarizações anódicas, sendo o eletrodo retirado do seu potencial de corrosão e submetido a polarização positiva.

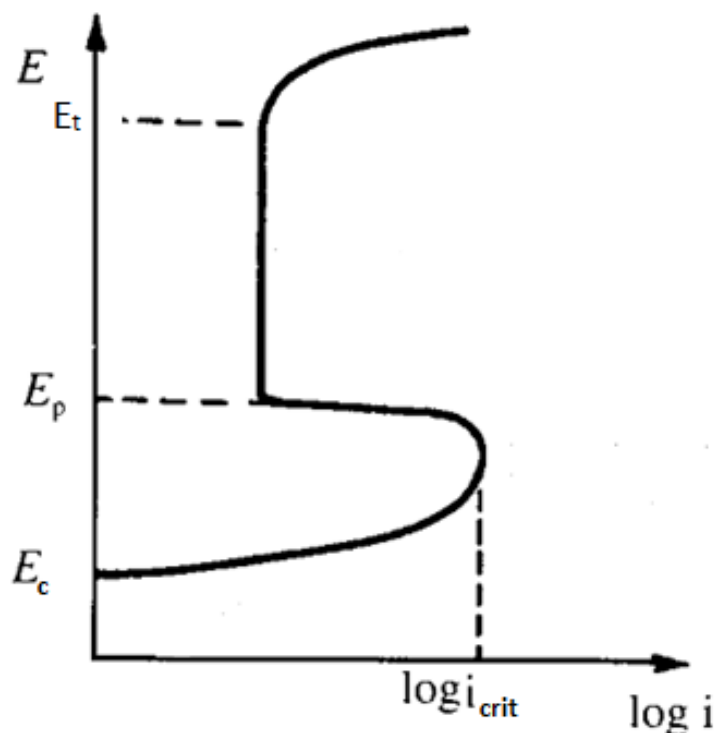


Figura 3.9 - Curva de polarização anódica de um material capaz de se passivar [25].  $E_c$ , o potencial de corrosão,  $i_{crit}$ , a densidade de corrente crítica que precede a formação do filme passivo;  $E_p$ , o potencial de passivação, a partir do qual a densidade de corrente se mantém próxima de densidade de corrente de passivação e  $E_t$  (potencial a partir do qual se observa novo aumento de corrente com aumento de potencial).

Quando se despolariza um material que se encontra na região passiva em um meio no qual ele não se passiva espontaneamente (pela imposição gradual de potenciais inferiores), ele será retirado das condições eletroquímicas que propiciam a estabilidade do filme passivo. Observa-se a formação de um novo pico de corrente neste caminho inverso ao de polarização anódica, e o valor de máximo dependerá da capacidade do filme em se manter íntegro. Caso não haja falhas localizadas, sua degradação ocorrerá lentamente e se observará um máximo de magnitude bem inferior à daquele máximo observado na polarização anódica, pois, mesmo em processo de degradação, a camada passiva ainda exerce efeito protetor. Por outro lado, caso o filme passivo apresente regiões instáveis, sua desestabilização será

facilitada e, durante a redução de potencial, um pico semelhante ao da situação anterior será observado, mas com um valor máximo superior, dado o menor poder protetor de uma camada menos protetora. A diferença entre o valor de corrente destes picos será tão maior quanto mais fragilizado estiver o filme protetor. À etapa de imposição de potenciais anódicos ao material, denominada de varredura anódica e, à etapa inversa, de varredura de reativação [26].

Foi com base nestes fenômenos que foi desenvolvida a técnica de reativação eletroquímica potenciocinética, primeiramente apresentada por Číhal [27]. O interesse na técnica foi fortalecido pela constatação de que a fragilização do filme passivo de materiais como aços inoxidáveis austeníticos e ligas de Ni seria resultado da presença de fases deletérias. Reativação eletroquímica potenciocinética em loop duplo (DL-EPR) é normalizado pela ISO 12732:2006(E) [26]. A técnica consiste na imposição de uma varredura anódica, a partir do potencial de corrosão, até um potencial em que o material esteja passivado, seguindo-se com um retorno ao potencial inicial por meio de uma varredura de reativação. A taxa de variação de potencial se encontra, normalmente, na faixa entre 2000 e 15000 mV/hora. A análise dos resultados pode ser feita através da análise da relação entre corrente de pico de reativação e anódica ( $i_r/i_a$ ) ou pela relação entre as respectivas cargas envolvidas ( $Q_r/Q_a$ ), e valores acima de 0,01 são indicativos da presença de fases deletérias. A curva esquemática do ensaio é apresentada a seguir (Figura 3.10) [28].

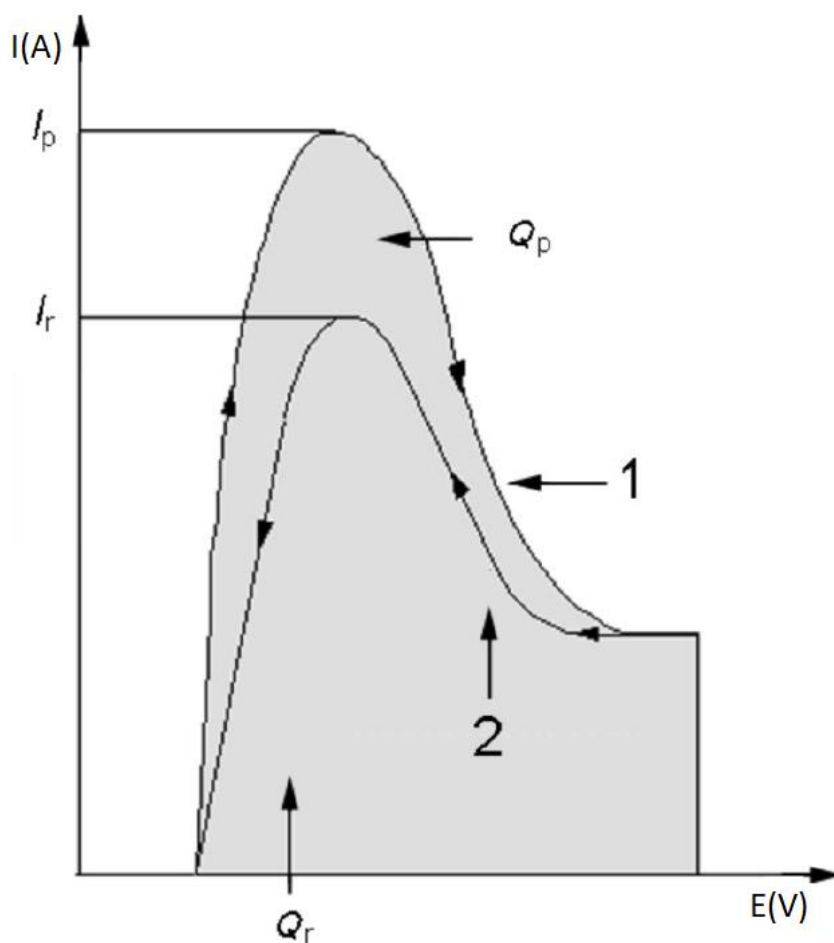


Figura 3.10 - Representação esquemática do ensaio de reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop. Adaptado de [26].

Em termos práticos, a técnica de DL-EPR permite uma preparação de superfície mais rápida e, conseqüentemente, é preferida para realização de ensaios em campo [16]. Além disso, seus resultados são apresentados na forma de razão de corrente ou de carga, dispensando a necessidade de se medir a área das amostras ensaiadas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será apresentado na Figura 4.1 o fluxograma de planejamento da execução do presente estudo sintetizando a metodologia aplicada.

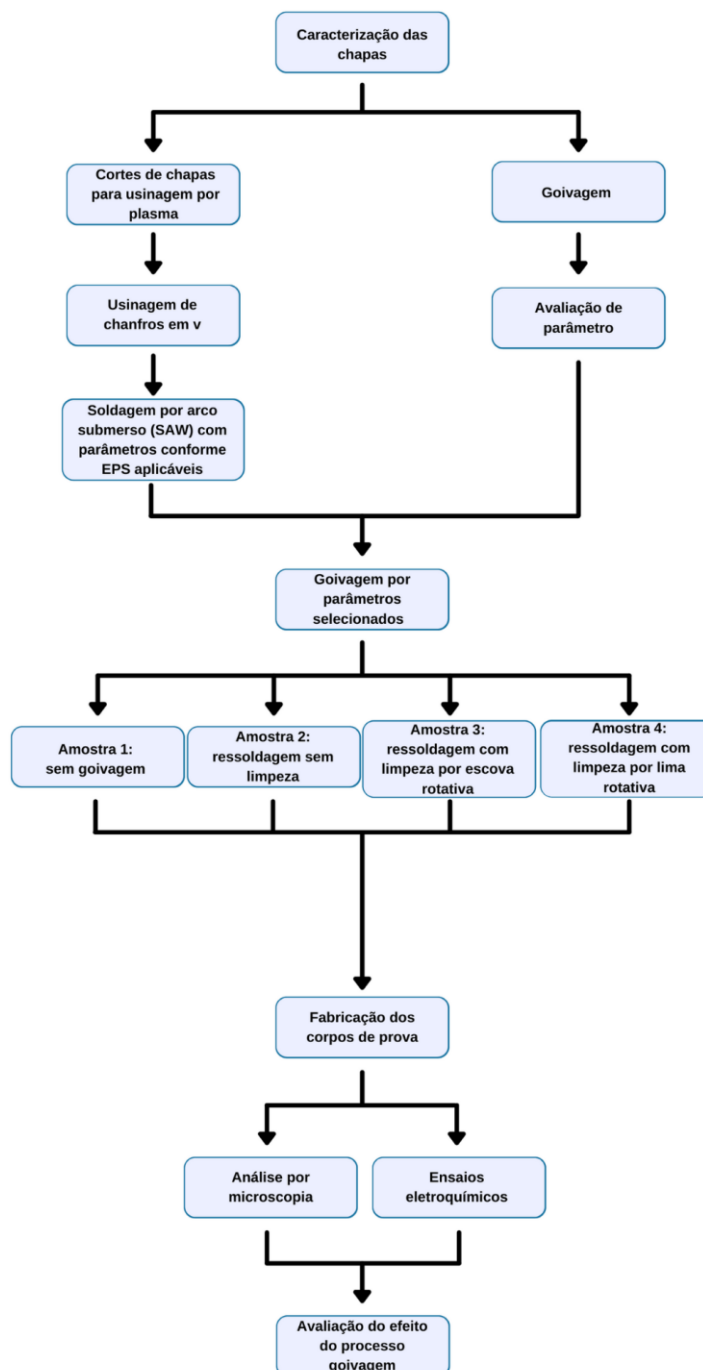


Figura 4.1 Fluxograma de planejamento para avaliação do efeito do processo de goivagem por arco voltaico com eletrodo de grafita seguido por soldagem por arco submerso em aços inoxidáveis austeníticos, AISI 316L e AISI 321.

Foram escolhidos dois tipos de aços inoxidáveis austeníticos, o AISI 316L e o AISI 321, para o estudo ter um alcance maior na indústria, ambos apresentam composição que não favorece a formação de fase deletérias, no AISI 316L a baixa concentração de carbono e no AISI 321 a presença do titânio, já que o carbeto de titânio tem formação favorecida em comparação a carbeto de cromo.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as composições químicas e as propriedades mecânicas das ligas que foram utilizadas neste projeto de pesquisa de acordo com a especificação da norma ASTM A240/240M - *Standard Specification for chromium and chromium- Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and strip for Pressure Vessels and for General Applications* [32].

Tabela 4.1 Requisitos de composição química, (%massa) – conforme ASTM A240/240M [32].

UNS Desig. (E527)	Tipo AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Outros elementos
S31603	316L	0.03	2.00	0.045	0.030	0.75	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	0.10	...	...
S32100	321	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	17.0-19.0	9.0-12.0	...	0.10	...	Ti 5x(C+N) min.

Tabela 4.2 Requisitos de propriedades mecânicas – conforme ASTM A240/240M [32].

Designação UNS	Tipo AISI	Limite de resistência, mín.		Limite de escoamento, mín.		Alongamen to a 50 mm, mín (%)	Dureza, máx		Dobramen to a frio	Grupo metal base
		ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell. HBW	Rockwell		
S31603	316L	70	485	25	170	40	217	95 HRBW	Não requerido	A
S32100	321	75	515	30	205	40	217	95 HRBW	Não requerido	B

#### 4.1 Caracterização das chapas

Para caracterização das chapas dos aços AISI 316 e AISI 321 foi realizada análise química para checar a composição das mesmas, sendo que neste processo foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica por centelha da marca Spectromaxx.

A avaliação das microestruturas foi realizada por meio de ensaios normatizados, para determinar o tamanho de grão médio, que envolve a comparação da estrutura de grãos observada no microscópio óptico com uma série de imagens graduadas, seguindo a ASTM E112-13 (*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*) [33], para verificar a presença e classificar inclusões, que envolve a comparação da microestrutura observada no microscópio óptico com uma série de imagens graduadas, seguindo ASTM E45-18a (*Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*) [34] e ASTM E407-07(2015) e1 (*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*) [35].

#### 4.2 Goivagem inicial

Com o intuito de se determinar o impacto da escolha dos parâmetros de goivagem (amperagem e diâmetro de eletrodo de carbono) na qualidade das goivas, tiras de 150 x 1000 mm foram retiradas das chapas dos materiais selecionados no projeto e estas foram goivadas com dois tipos de eletrodos, variando apenas a corrente empregada. Foram utilizados dois diâmetros de eletrodo de carbono (1/4" e 3/8") e as goivagens foram realizadas alterando-se a corrente empregada em duas faixas de corrente (alta e baixa), para que se analisasse a qualidade das mesmas com os parâmetros escolhidos. Alguns parâmetros foram repetidos para que se pudesse avaliar a repetibilidade.

Essas tiras foram goivadas com os parâmetros descritos na Tabela 4.3, e as goivas das chapas AISI 316L podem ser visualizadas nas Figuras de 4.2 e 4.4, e das chapas de AISI 321 podem ser visualizadas nas Figuras de 4.3 e

4.5. Os eletrodos de grafite utilizados no teste de parâmetros de goivagem das chapas estão apresentados na Figura 4.6.

Tabela 4.3 Parâmetros de goivagem utilizados nas chapas de aço AISI 316L e AISI 321.

Parâmetros de goivagem		
Amostra	Corrente (A)	Diâmetro eletrodo, in [mm]
1	Baixa	150
2		150
3	Alta	350
4		350
5	Baixa	1/4 (6,35)
6		
7	Alta	300
8		

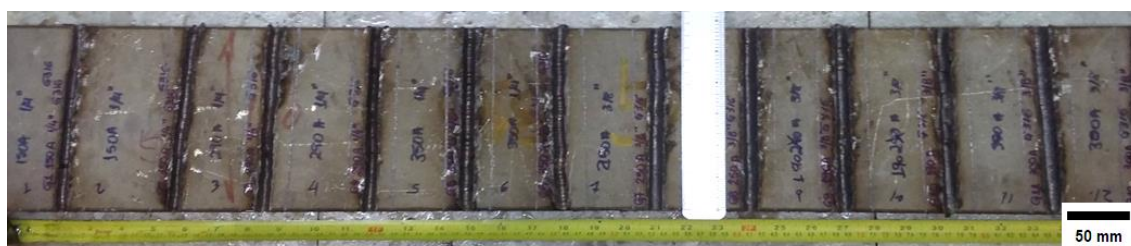


Figura 4.2 Chapa de aço inoxidável AISI 316L de dimensões 150 x 1000 mm goivada para teste de parâmetros de goivagem.

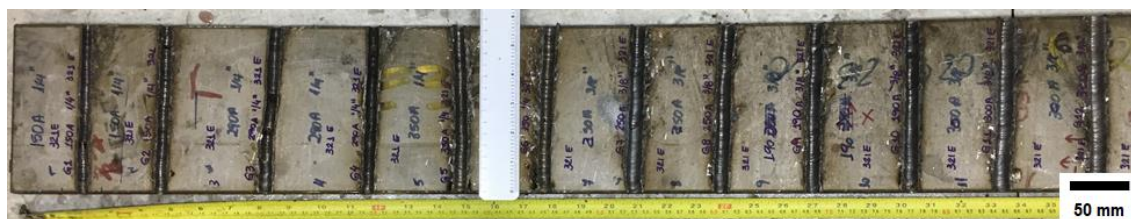


Figura 4.3 Chapa de aço inoxidável AISI 321 de dimensões 150 x 1000 mm goivada para teste de parâmetros de goivagem.

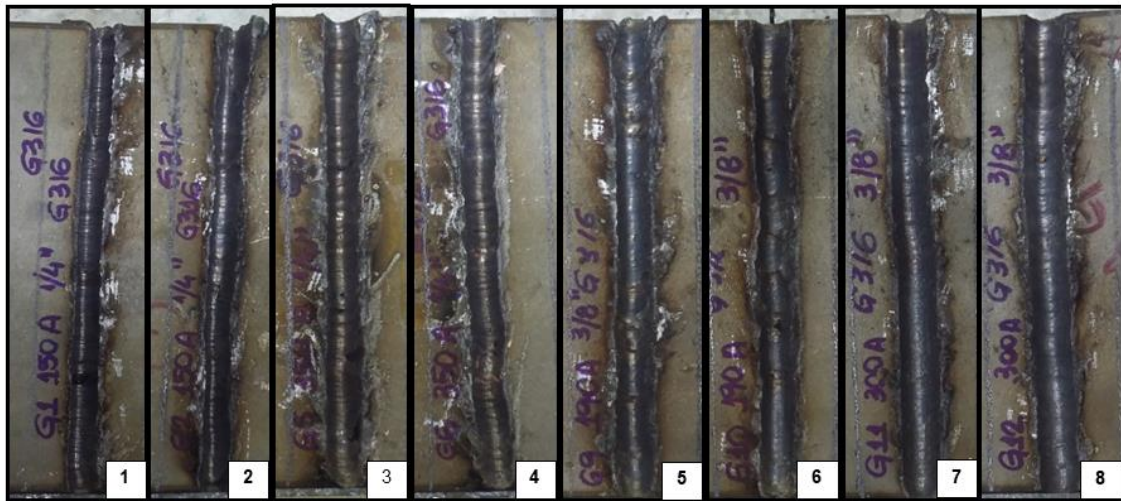


Figura 4.4 Superfícies goivadas de aço inoxidável AISI 316L goivadas com parâmetros da Tabela 4.3.



Figura 4.5 Superfícies goivadas de aço inoxidável AISI 321 goivadas com parâmetros da Tabela 4.3.

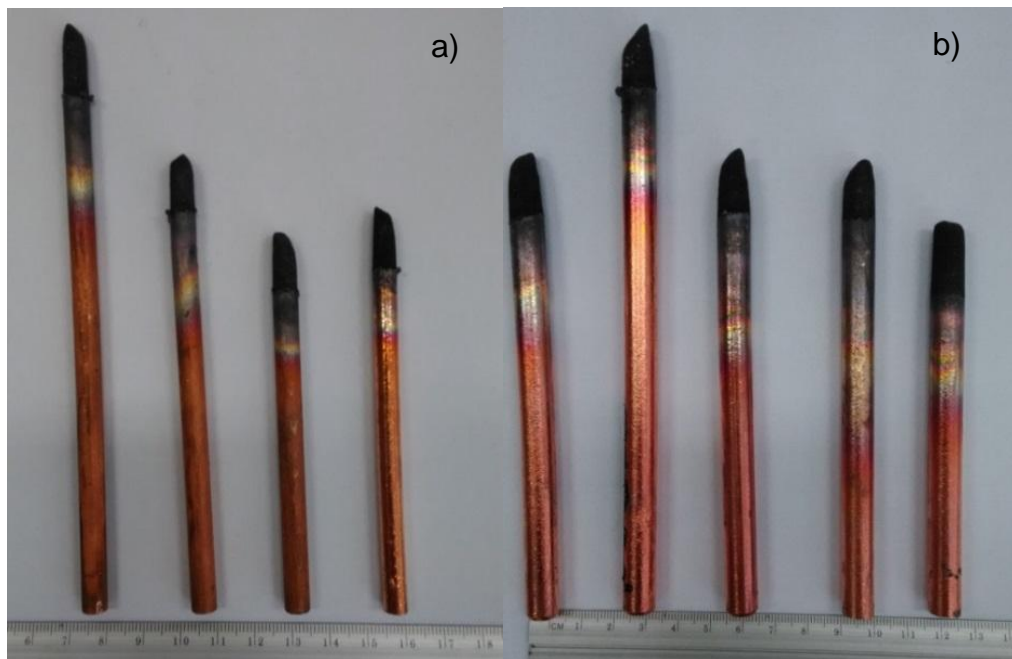


Figura 4.6 Eletrodos de grafite utilizados no teste de parâmetros de goivagem das chapas AISI 304L e 410 a)  $\varnothing 1/4''$  e b)  $\varnothing 3/8''$ .

### 4.3 Condições da superfície da goiva

Para avaliar a interferência da escoria na contaminação por carbono, empregou-se três processos de acabamento: sem limpeza, escovado e usinado.

O acabamento escovado foi realizado por escovas rotativas de cerdas metálicas, que podem ser vistas na Figura 4.7.



Figura 4.7 Escova rotativa em aço inoxidável.

Para as amostras que foram usinadas após goivagem, utilizou-se limas rotativas de metal duro, que podem ser vistas na Figura 4.8.

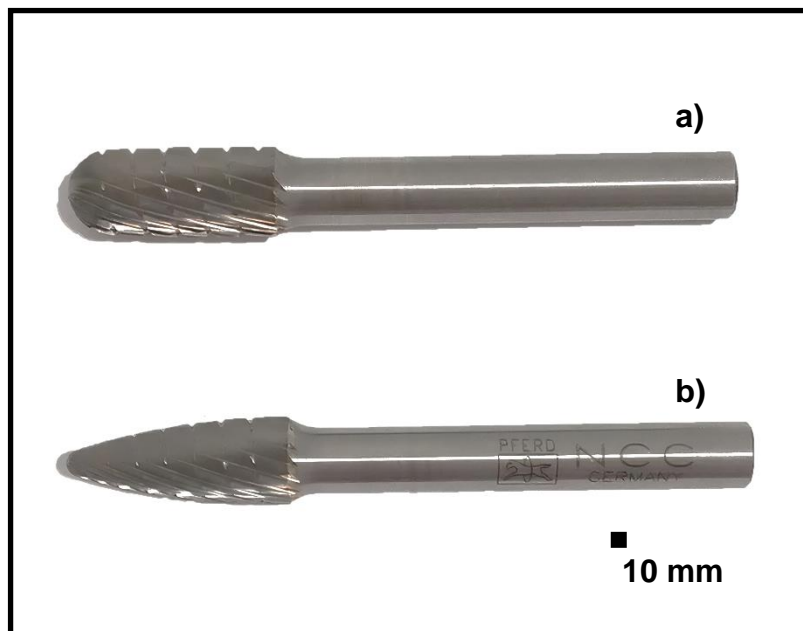


Figura 4.8 Limas rotativas de metal duro em forma a) de árvore com raio final RBF e forma cilíndrica redonda WRC.

Para ambos os processos de retirada de escória do sulco, usou-se como limite de remoção de material a mudança de aspecto, especificamente, quando a região da goiva perdia a aparência escura e sem brilho para uma aparência cinza e brilhosa.

A figura 4.9 apresenta a representação dos processos aplicados na região da goiva para simular situações de trabalho no campo.

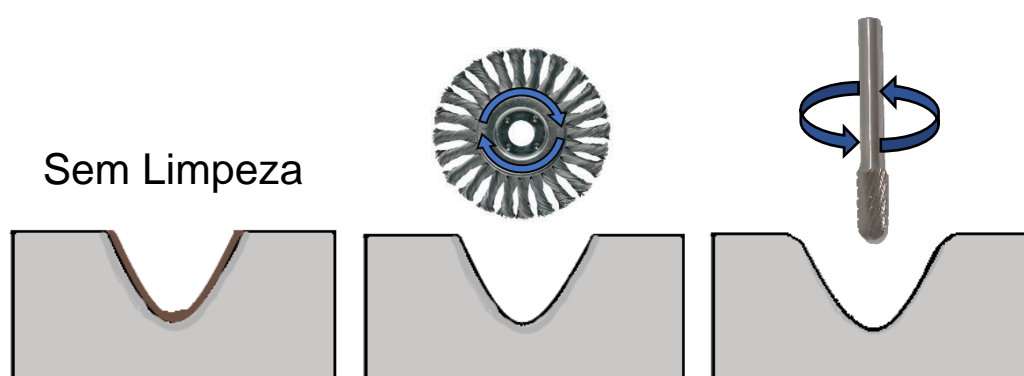


Figura 4.9 Representação dos processos de retirada de escoria possivelmente aderida na superfície do sulco da goiva.

#### 4.4 Avaliação da contaminação por Carbono.

##### 4.4.1 Preparação dos Corpos de Prova

Para os ensaios realizados nesta etapa foram produzidos corpos de prova a partir das chapas que forma goivadas, os corpos de provas foram produzidos excluindo uma distância de aproximadamente 25 milímetros da extremidade de início e final da goiva. A Figura 4.10 apresenta o esboço da localização das amostras na chapa goivada.

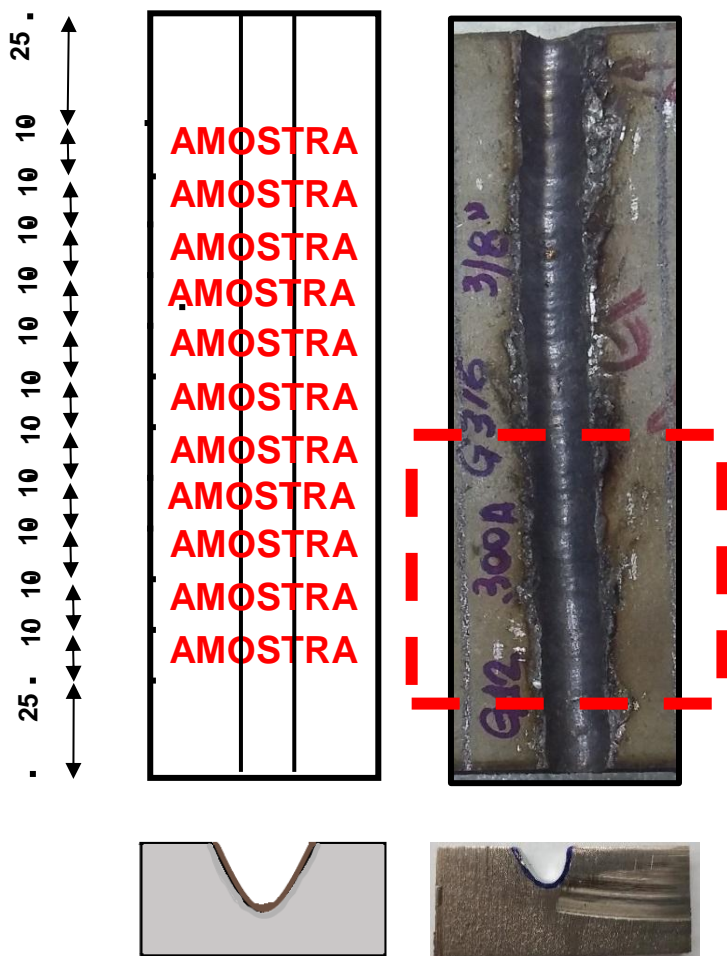


Figura 4.10 Esboço da disposição das amostras na chapa goivada.

O esquema das chapas unidas para fabricação das amostras em diferentes condições de goivagem e soldagem, locais de retirada de corpos de prova para as diferentes análises e ensaios para os aços AISI 316L e AISI 321 podem ser vistos na Figura 4.11, a qual apresenta imagem das chapas já soldadas e local da retirada da amostra. O cordão de solda é mostrado, ressaltando-se que uma parte não foi soldada, para que ficasse evidente a região goivada previamente à realização da soldagem. Todos os corpos de prova foram retirados ao longo do cordão em sua seção transversal, sendo excluído das análises 25 milímetros das extremidades do cordão.

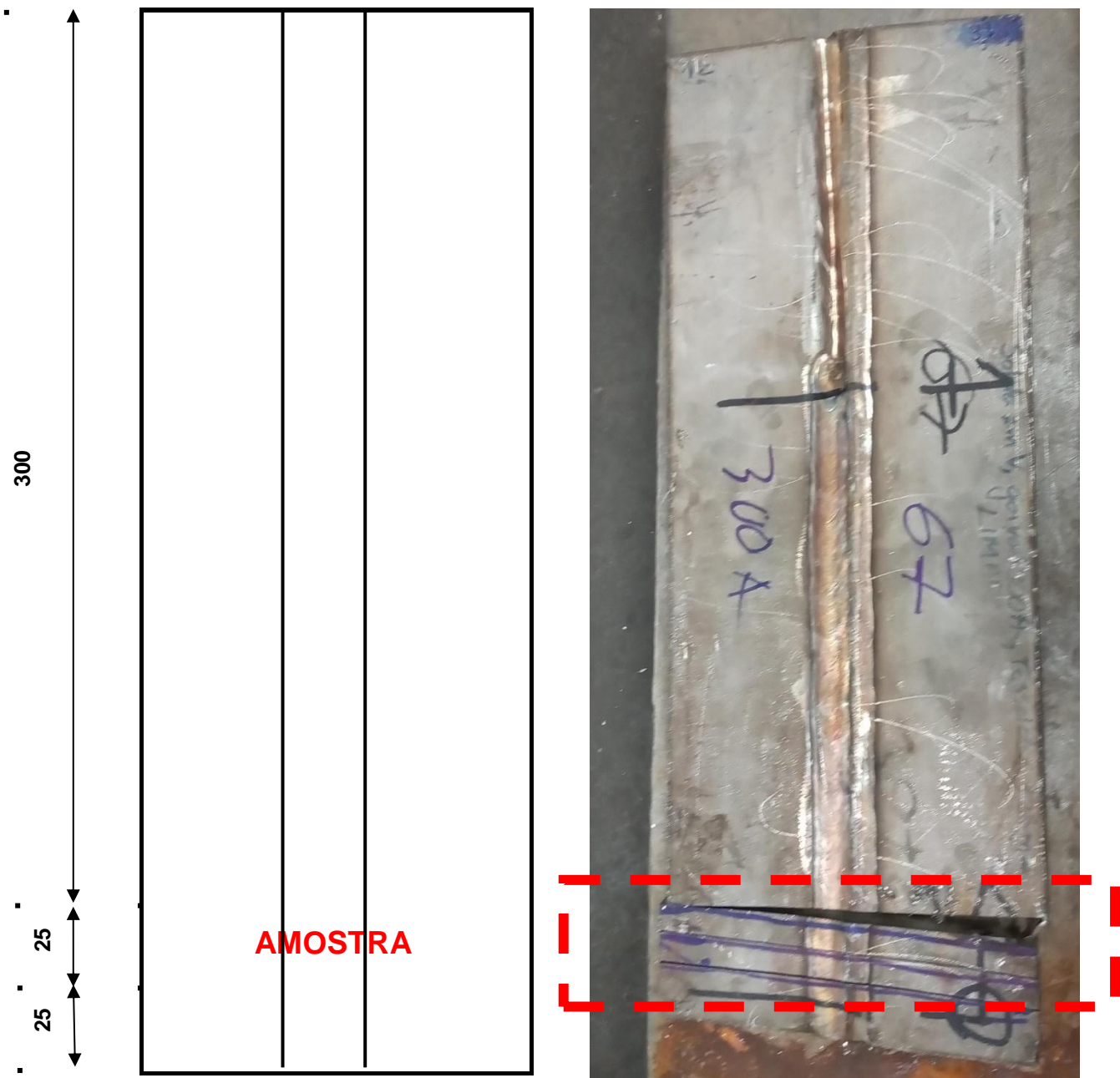


Figura 4.11 Esquema de locais retiradas de corpos de prova para ensaios de

Figura 4.11- Local de retirada das amostras para ensaios de corrosão e análise metalográfica para os aços AISI 316L e 321

Com o intuito de avaliar o comportamento mecânico nas regiões adjacentes à superfície goivada, um estudo prévio do comportamento da propriedade mecânica de dureza foi iniciado. Baseando-se nas práticas descritas na N-133-REV.N3/17, alguns perfis de dureza foram estudados. Inicialmente vários testes de carga de indentação, tamanho de indentador, distância entre pontos de medição e tamanho total de trilha medida foram realizados.

A metodologia resultante possui as seguintes características e pode ser mais bem visualizada na Figura 4.12:

- A distância entre os pontos de indentação foi fixada em 0,25 mm para atender à distância mínima entre indentações;
- Foram feitas 20 indentações por trilha e 02 trilhas foram definidas para serem realizadas ao longo de cada goiva;
- Foi utilizada carga de 100 g, tempo de indentação de 15 segundos e aumento de 400x para realizar as medições de tamanho de indentação.
- As trilhas foram localizadas a 1,5 mm acima da raiz da goiva,

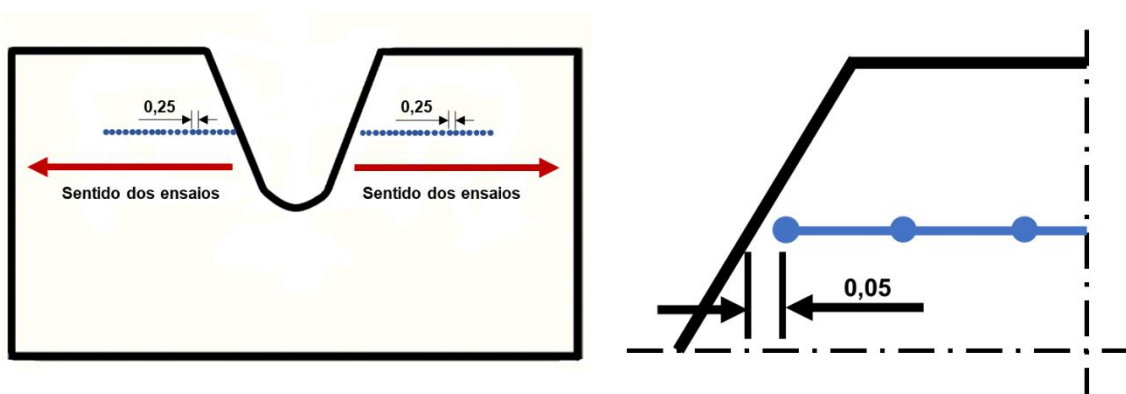


Figura 4.12 Esquema de localização das trilhas de medição de microdureza Vickers realizadas ao longo da seção transversal das goivas.

### 4.4.3 Ensaio eletroquímico

#### 4.4.3.1 Corrosão intragranular

A prática A da norma ASTM A262-15 [30] permite a classificação das estruturas de aços inoxidáveis austeníticos atacadas eletroliticamente em ácido oxálico. A região atacada é então comparada com a microestrutura de referência para determinar se a amostra é aceitável ou suspeita. Materiais suspeitos são submetidos à ensaios de imersão em ácido quente. Este ensaio é importante para verificar se o material está sensibilizado.

O ensaio será realizado em corpos de provas retirados da chapa como recebida, nas chapas goivadas na seção transversal à goiva e junta ressolda em regiões ilustradas na Figura 4.11.

#### 4.4.3.2 Reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop (DL-EPR).

Os resultados serão analisados de forma a correlacionar o efeito da goivagem utilizando eletrodo de grafite no aço AISI 316L e AISI 321, antes e após limpeza, com sua sensibilização. A análise dos resultados será feita através da análise da relação entre corrente de pico de reativação e ativação ( $i_r/i_a$ ) ou pela relação entre as respectivas cargas envolvidas ( $Q_r/Q_a$ ). Valores acima de 0,01 são indicativos da presença de fases deletérias. Os valores dos parâmetros de interesse, ( $i_r/i_a$ ) e ( $Q_r/Q_a$ ), serão apresentados na forma de média e desvio padrão de três resultados obtidos a partir de três ensaios diferentes. Uma representação esquemática da curva de polarização resultante é mostrada na Figura 4.12. Usando as imagens de microscopia ótica antes dos ensaios de corrosão e após os ensaios espera-se identificar quais são as regiões mais susceptíveis de serem corroídas.

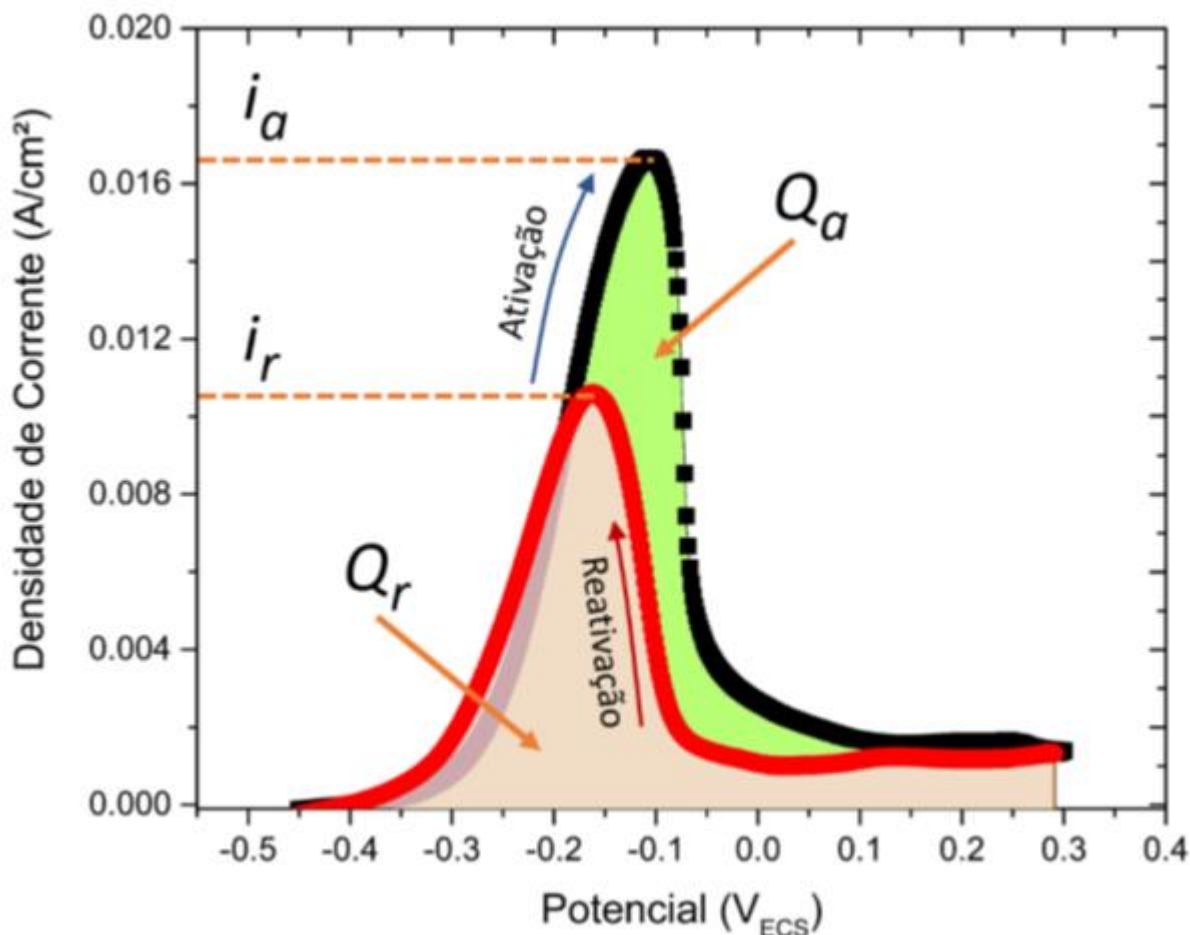


Figura 4.13 - Representação esquemática do ensaio de reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop (DL-EPR). Fonte: Próprio autor

O equipamento utilizado para os ensaios foi um potenciostato Gamry 600+, empregando uma solução 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 0,01 M KSCN (tiocianato de potássio) para os aços austeníticos. Considerou-se uma célula eletroquímica de três eletrodos, sendo o eletrodo de trabalho a chapa goivada nas três condições mencionadas anteriormente, o eletrodo de referência de calomelano saturado (ECS), e o contra eletrodo uma folha de platina. O ensaio consistiu na realização de uma varredura anódica partindo do potencial de circuito aberto (medido após os 15 minutos) em direção a um potencial de +300 mV em relação ao potencial do ECS. Em seguida, as amostras foram polarizadas em direção ao potencial de circuito aberto novamente. A taxa de varredura nas duas direções foi de 1,67 mV/s.

#### **4.4.4 Análise química.**

Foi realizada análise da composição química da escória que não foi ejetada durante a goivagem, para determinar a concentração de carbono difundido no metal fundido, por absorção de radiação no infravermelho, usando equipamento LECO ONH-836.

Com o intuito de avaliar a composição química do depósito formado, e metal base de maneira qualitativa, uma varredura por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), foi empregado também para determinar o perfil de composição em uma direção perpendicular a goiva e mapeamento da composição química.

#### **4.4.5 Análise por microscopia**

##### **4.4.5.1 Microscopia óptica**

Foi empregada neste estudo para caracterização das chapas recebidas, chapas goivadas e juntas ressoldadas. Foram aplicados métodos para determinar inclusões em conforme com a norma ASTM E45 – 18a [34], que consiste na comparação da microestrutura observada no microscópio óptico com uma série de imagens graduadas e tamanho médio de grãos segundo [34] ASTM E112 – 13 [33], que envolve a comparação da estrutura de grãos observada no microscópio óptico com uma série de imagens graduadas.

Para caracterização macroscópica da microestrutura goivada e ressolda utilizou-se a norma ASTM E407 - 07 (2015) e1 [35], que indica método e soluções químicas para ataques químicos para inspeção metalográfica, para caracterização microscópica utilizou ataque químico e comparação visual da microestrutura observada no microscópio óptico com uma série de imagens da literatura específica para análise microestrutural [39].

#### **4.4.5.2 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)**

Tem o mesmo objetivo da microscopia óptica, mas como maior capacidade de aumento, microscopia de varredura eletrônica proporciona uma avaliação mais ampla.

A Microscopia de varredura eletrônica foi empregada nas chapas goivadas e juntas ressoldadas, como objetivo para determinar alteração microestrutural na região da goiva, determinação do tamanho da camada de escoria residual na goiva, precipitação de fases deletérias.

#### **4.5 Forma de análise de resultados**

Para verificar o efeito do processo de goivagem a arco com eletrodo de grafita em aços inoxidáveis avaliaremos seus desempenhos nos ensaios supracitados neste capítulo, se faz saber que, o desempenho de um material depende de suas propriedades, as quais, por sua vez, são uma função da(s) estrutura(s).

Os resultados dos ensaios eletroquímicos determinaram se ocorreu mudança nas propriedades de resistência à corrosão. Outra maneira de verificar se ocorreu mudança de propriedades mecânicas e resistência à corrosão é fazendo o estudo das características microestruturais através de microscopia óptica e eletrônica.

O ensaio de reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop, assim como o ensaio de corrosão intragranular evidenciara se o material está sensibilizado, ainda podendo usar a microscopia eletrônica para verificar se ocorre a precipitação de carbeto de cromo no contorno de grão, portanto, a validação do resultado será alta, pois, utilizará três técnicas diferentes. Desta mesma maneira, valida-se os resultados obtidos com ensaios mecânicos e microscopia.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização inicial das chapas

A Figura 5.1 apresenta a microestrutura dos aços inoxidáveis 316L e 321 na condição como recebida. Tanto o aço 316L (Figuras 5.1 a,b) e 321 (Figuras 5.1d,e) apresentam grãos equiaxiais, os classificando como tamanho médio 4 e 6 , respectivamente, segundo a ASTM E112-13 *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size* [33]. Ferrita delta foi observada nos aços 316, Figura 5.1c, e 321, Figura 5.1f.

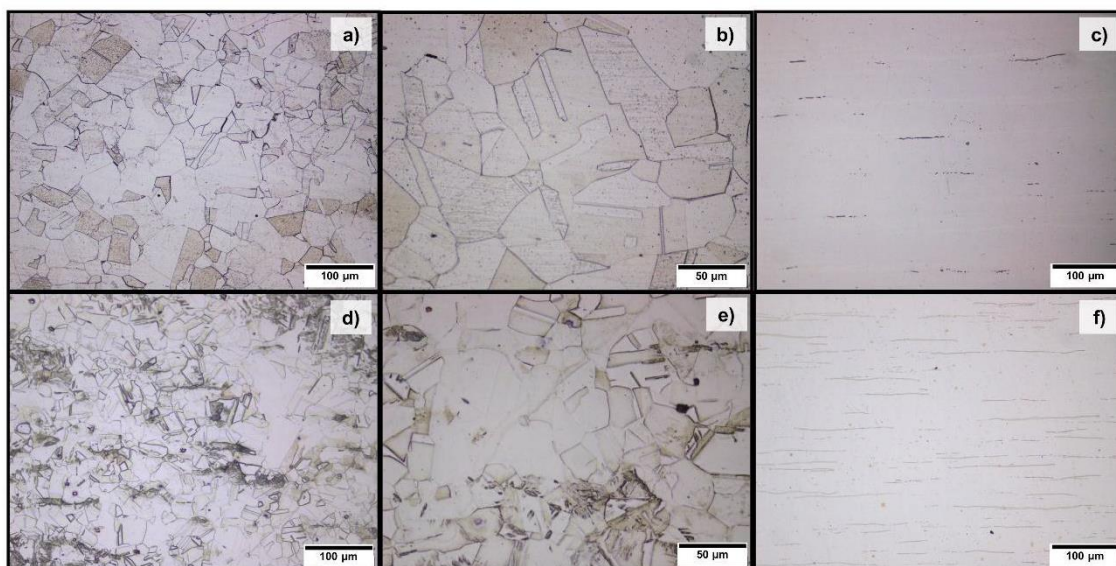


Figura 5.1. Ataque com reagente água régia na seção transversal para revelar tamanho de grão em a) e b) para AISI 316L e d) e e) para AISI 321, ataque eletrolítico KOH 10% na seção longitudinal para revelar a presença de ferrita delta em c) para AISI 316L e f) para AISI 321.

A presença de carbonetos de cromo foi indiretamente avaliada por DL-EPR. Ensaios em triplicata apresentaram ausência de corrente de reativação para o aço 316L, Figura 5.2, e corrente de reativação desprezível para o aço 321, Figura 5.2, sendo  $I_r/I_a$  inferior a 1%. Portanto, ambos os aços inoxidáveis na condição como recebido apresentaram microestrutura equiaxial com pequena presença de ferrita delta sendo não sensibilizado.

Tabela 5.1 Classificação microestrutural das chapas de aço AISI 316L e AISI 321.

MICROESTRUTURA			
	316L	321	Norma
<b>Inclusões</b>	Óxido - 3/2 fino Óxido - 1 fino	Óxido - 3/2 fino	ASTM E45
<b>Tamanho de Grão</b>	4	6	ASTM E112 (Plate IB) *grãos maclados
<b>Ferrita delta</b>	Presente	Presente	-

Tabela 5.2 Composição química das ligas recebidas, (%massa) obtidas por meio de espectrometria de emissão óptica comparadas ao certificado do fabricante e especificação da liga segundo ASTM A240/240M.

UNS Desig. (E527)	Tipo AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Outros elementos
S31603 (A240)		0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	0.10	...	...
Certificado fabricante	316L	0.024	1.33	0.031	0.0005	0.420	16.58	10.01	2.007	228 PPM	0.1960	
AQ - Chapa		0.027	1.35	0.031	0.0086	0.464	16.53	10.16	2.03		0.201	
S32100 (A240)		0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	17.0-19.0	9.0-12.0	...	0.10	...	Ti 5×(C+N) min.
Certificado fabricante	321	0.009	0.98	0.026	0.0006	0.58	17.08	9.11	0.045	67 PPM	0.0734	Ti 0.1257
AQ - Chapa		0.012	0.92	0.028	0.0083	0.62	17.34	9.04	0.109		0.161	Ti 0.1080

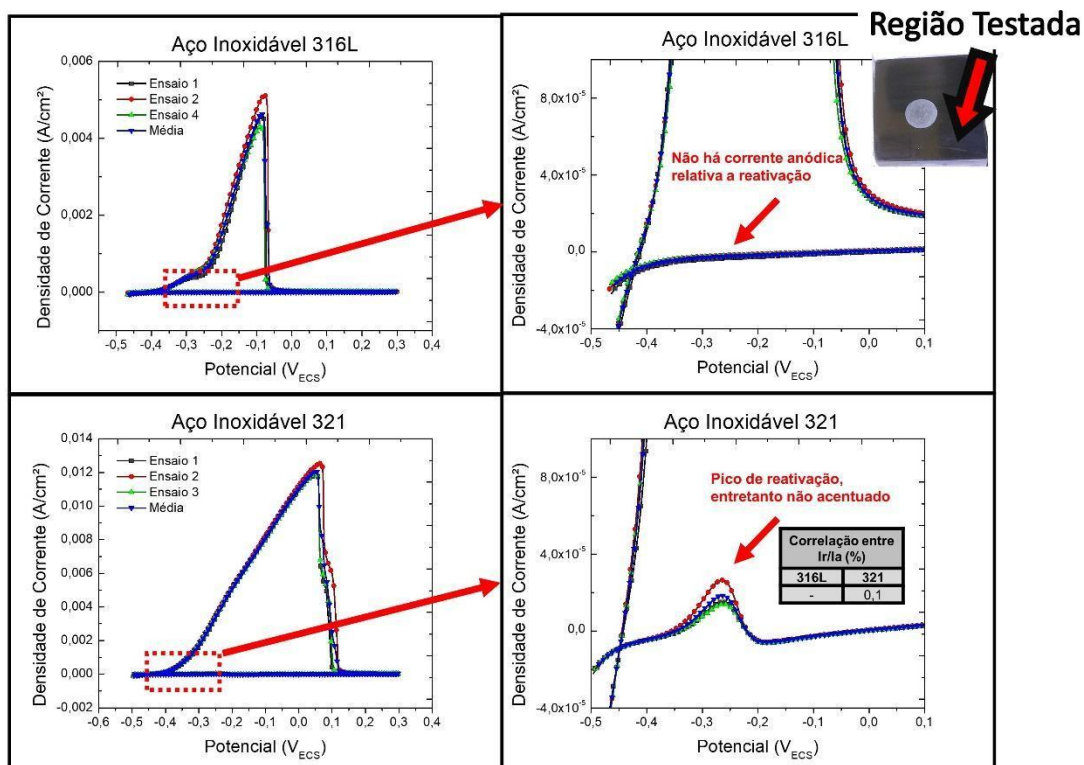


Figura 5.2. DL-EPR em AISI 316 e AISI 321 como recebido, a seta vermelha indica a ocorrência do pico de reativação no AISI 321 e não ocorrência do mesmo no AISI 316L.

## 5.2. Efeito da goivagem e da limpeza superficial: Microestrutura e Sensitização

A Figura 5.3 ilustra o processo de goivagem a arco ao ar com eletrodo de carbono nas chapas AISI 316L e AISI 321 na condição como recebida. Nas Figuras 5a,b observamos como o metal fundido é ejetado e as Figuras 5c,d ilustram a seção transversal das chapas pós goivagem, e defeitos inerente ao processo de goivagem.

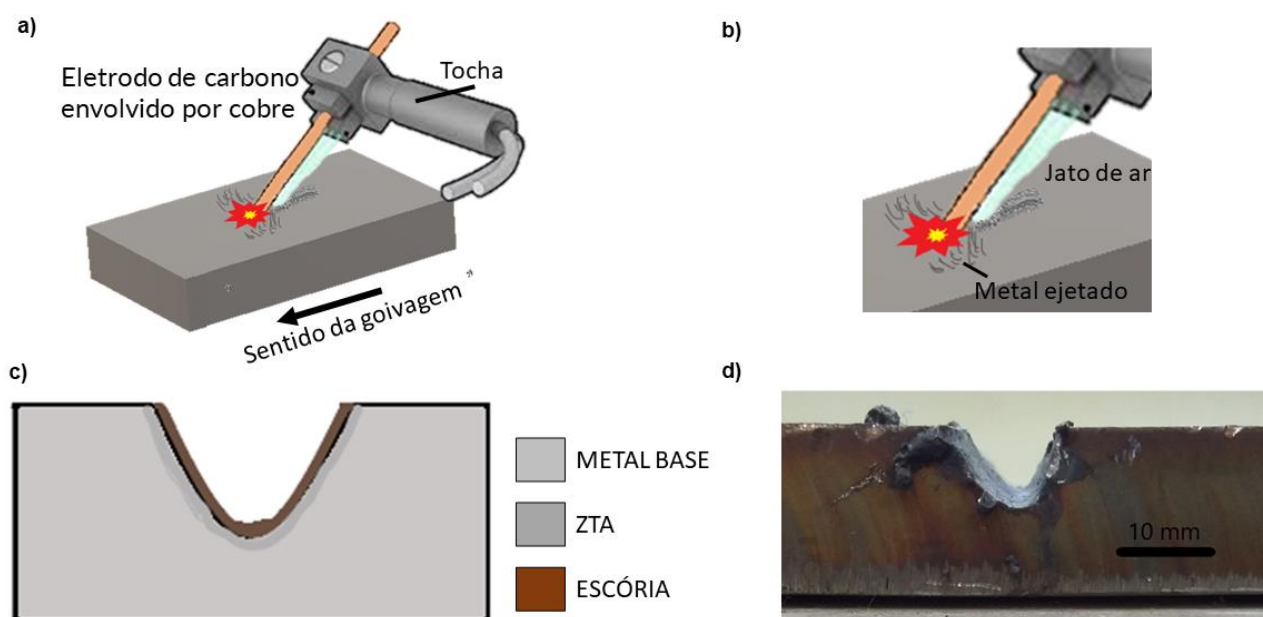


Fig. 5.3. Representação da goivagem por arco elétrico com eletrodo de grafita em a) e b), representação e imagem da seção transversal da chapa pós goivagem em c) e d), respectivamente.

A Figura 5.4 apresenta as goivas na chapa, respeitando um espaçamento entre goivas de 80 mm. As goivas em questão estão em parâmetros diferentes, que são: diâmetro de eletrodo e corrente aplicada, para verificar o impacto destes parâmetros de goivagem. Observa-se os seguintes aspectos: diferença de morfologia da goiva, variados entre formado em “U” e formato em “V”, e na aparência da goiva, apresentando ou não pontos de interrupção do arco elétrico, cor da superfície goivada, presença de rebarbas e rugosidade da superfície goivada.



Figura 5.4. Imagem da chapa pós goivagem referente ao estudo de parâmetros de diâmetro de eletrodo e corrente de goivagem.

As goivas realizadas nas chapas do aço AISI 316L são apresentadas na Figura 5.5 junto com as condições de fabricação de cada uma delas, (Figuras 5.5: 1,2) eletrodo de 1/4" e corrente 150 A, (Figuras 5.5: 3,4) eletrodo de 1/4" e corrente 350 A, (Figuras 5.5: 5,6) eletrodo de 3/8" e corrente 150 A e (Figuras 5.5: 7,8) eletrodo de 3/8" e corrente 300 A. Nota-se que, com a combinação dos parâmetros eletrodo de 3/8" e corrente 300, (Figuras 5.5: 7,8), as goivas apresentam um aspecto melhor: maior limpeza, regularidade, sem interrupção, menor rugosidade.

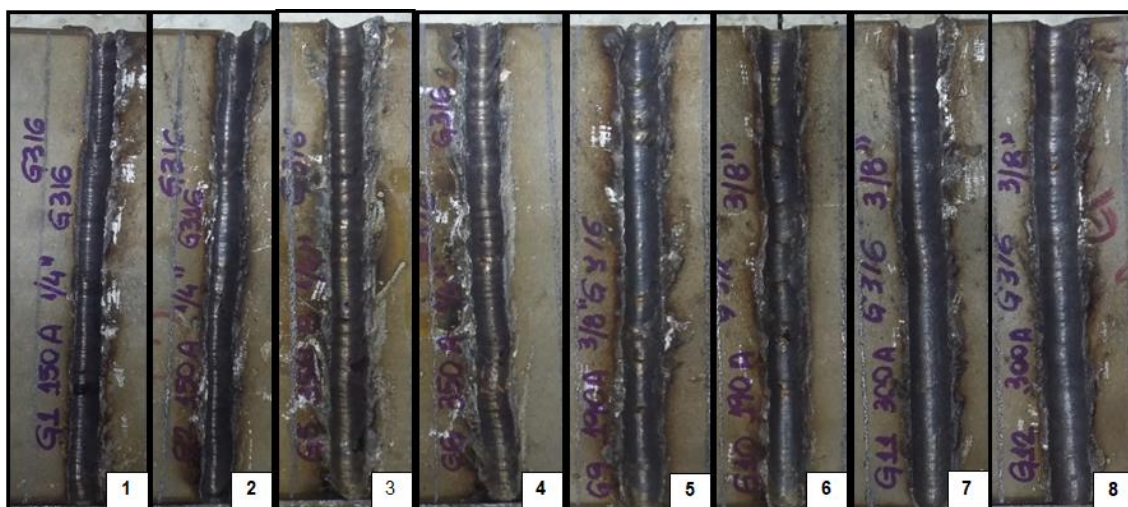


Figura 5.5 Imagem de goivas na chapa AISI 316L em diferentes parâmetros, que são o diâmetro do eletrodo (eletrodo 1/4" e eletrodo 3/8") e a corrente aplicada para goivagem (corrente entre 150A e 350 A).

A Tabela 5.3 apresenta os impactos constatados nas goivas (Figura 5.5). Para eletrodo de 1/4" e corrente 150 A (Figuras 5.5 1,2) ocorre pontos de interrupção no arco elétrico que gera imperfeições na superfícies da goiva, alinhamento irregular que é ruim no que toca o preparo do chanfro, baixa quantidade de rebarbas, coloração cinza escuro que remete a maior quantidade de carbono aderido na superfície da goiva em comparação com cor clara, superfície rugosa, formado em "U" e formato em "V"; com o eletrodo de 1/4" e corrente 350 A (Figuras 5.5 3,4) os impactos se mantêm em alguns aspectos e menores em outros, para eletrodo de 3/8" e corrente 190 A (Figuras 5.5 5,6) ocorre pontos de interrupção no arco elétrico, regularidade baixa, presença de rebarbas, coloração cinza escuro e cinza claro, superfície composta por regiões lisas e rugosas, formado em "U". Finalmente, com relação ao eletrodo de 3/8" e corrente 300 A (Figuras 5.5 7,8) não há ocorrência de pontos de interrupção no arco elétrico, poucas rebarbas, e com superfície com formato em "U", regular, lisa e de cor cinza claro.

Resumo de características superficiais observadas nas goivas do aço AISI 316L.

	Corrente (A)	Eletrodo (in)	Pontos de curtos	Alinhamento	Rebarbas	Cor	Rugosidade superficial	Obs.
Goiva 1	150	1/4"	2	Irregular	Pouca	Cinza escuro	Rugoso	Carbono aderido/Formato U
Goiva 2	150		3	Irregular	Pouca	Cinza escuro	Rugoso	Formato U e V
Goiva 3	350		1	Irregular	Sim	Cinza claro/regiões cinza escuro	Rugoso/regiões lisas	Carbono aderido/Formato U
Goiva 4	350		Nenhum	Irregular	Sim	Cinza claro/regiões cinza escuro	Rugoso/regiões lisas	Formato U
Goiva 6	190	3/8"	Nenhum	Baixa regularidade	Sim	Cinza claro/regiões cinza escuro	Liso/regiões rugosas	Formato U
Goiva 6	190		1	Baixa regularidade	Sim	Cinza claro/regiões cinza escuro	Liso/regiões rugosas	Formato U
Goiva 7	300		Nenhum	Regular	Pouca	Cinza claro	Liso	Formato U
Goiva 8	300		Nenhum	Regular	Sim	Cinza claro	Liso	Formato U

As goivas realizadas nas chapas do aço AISI 321 são apresentadas na Figura 5.6 junto com as condições de fabricação de cada uma delas, (Figuras 5.6 1,2) eletrodo de 1/4" e corrente 150 A, (Figuras 5.6 3,4) eletrodo de 1/4" e corrente 350 A, (Figuras 5.6 5,6) eletrodo de 3/8" e corrente 190 A e (Figuras 5.6 7,8) eletrodo de 3/8" e corrente 300 A. Nota-se que, com a combinação dos parâmetros eletrodo de 3/8" e corrente 300, (Figuras 5.6 7,8), ocorre menor impacto.



Figura 5.6. Imagem de goivas na chapa AISI 321 em diferentes parâmetros, que são o diâmetro do eletrodo (eletrodo 1/4" e eletrodo 3/8") e a corrente aplicada para goivagem (corrente entre 150 A e 350 A).

A Tabela 5.4 apresenta os impactos constatados nas goivas (Figura 5.6), para eletrodo de 1/4" e corrente 150 A (Figuras 5.6 1,2) ocorre pontos de interrupção no arco elétrico que gera imperfeições na superfícies da goiva, alinhamento de baixa regularidade que é ruim no que toca o preparo do chanfro, presença de rebarbas, coloração cinza escuro que remete a maior quantidade de carbono aderido na superfície da goiva e comparação com cor clara, superfície rugosa, formado em "U", com o eletrodo de 1/4" e corrente 350 A (Figuras 5.6 3,4) os impactos sem mantém em alguns aspecto e menores em outros, para eletrodo de 3/8" e corrente 190 A (Figuras 5.6 5,6) ocorre ponto de interrupção no arco elétrico, regular/regularidade baixa, presença de rebarbas, coloração cinza escuro e cinza claro, superfície composta por regiões lisas e rugosas , formado em "U" e com relação eletrodo de 3/8" e corrente 300 A (Figuras 5.6 7,8) não há ocorrência de pontos de interrupção no arco elétrico, poucas rebarbas, e com superfície com formato em "U" ,regular, lisa e de cor cinza claro

Resumo de características superficiais observadas nas goivas do aço AISI 321.

	Corrente (A)	Eletrodo (in)	Pontos de curtos	Alinhamento	Rebarbas	Cor	Rugosidade superficial	Obs.
Goiva 1	150	1/4"	2	Irregular	Sim	Cinza escuro	Rugoso	Formato U
Goiva 2	150		1	Baixa regularidade	Sim	Cinza escuro	Rugoso	Formato U
Goiva 3	350		1	Baixa regularidade	Bastante	Cinza claro/regiões escuras	Rugoso	Formato U
Goiva 4	350		Nenhum	Irregular	Bastante	Cinza claro/regiões escuras	Rugoso	Formato U
Goiva 5	190	3/8"	Nenhum	Baixa regularidade	Sim	Cinza claro/regiões escuras	Liso/regiões rugosas	Formato U
Goiva 6	190		1	Regular	Sim	Cinza claro/regiões escuras	Liso/regiões rugosas	Formato U
Goiva 7	300		Nenhum	Baixa regularidade	Sim	Cinza claro	Liso	Formato U
Goiva 8	300		Nenhum	Regular	Sim	Cinza claro	Liso	Formato U

A partir da avaliação do aspecto das superfícies goivadas, tanto para o AISI 316L E AISI 321, os parâmetros de corrente alta e eletrodo de diâmetro 3/8" foram selecionados para que as juntas soldadas sejam preparadas, pois teriam condições de melhor acabamento superficial (sem pontos de interrupção do arco elétrico, superfície com menor rugosidade possível, uniformidade da morfologia do sulco da goiva). As micrografias dos parâmetros estudados acima são apresentadas e discutidas a seguir.

A Figura 5.7 apresenta a microestrutura do aço inoxidável 316L goivado com eletrodo de 1/4" e baixa corrente (Figuras 5.7 a,b,c) e eletrodo de 1/4" e alta corrente (Figuras 5.7 d,e,f); todos os casos apresentam grãos equiaxiais, observa-se ainda (Figuras 5.7 a,b,d,e,f) que há presença de material depositado na superfície da goiva e uma fusão preferencial (Figuras 5.7 c,e) de Ferrita delta.

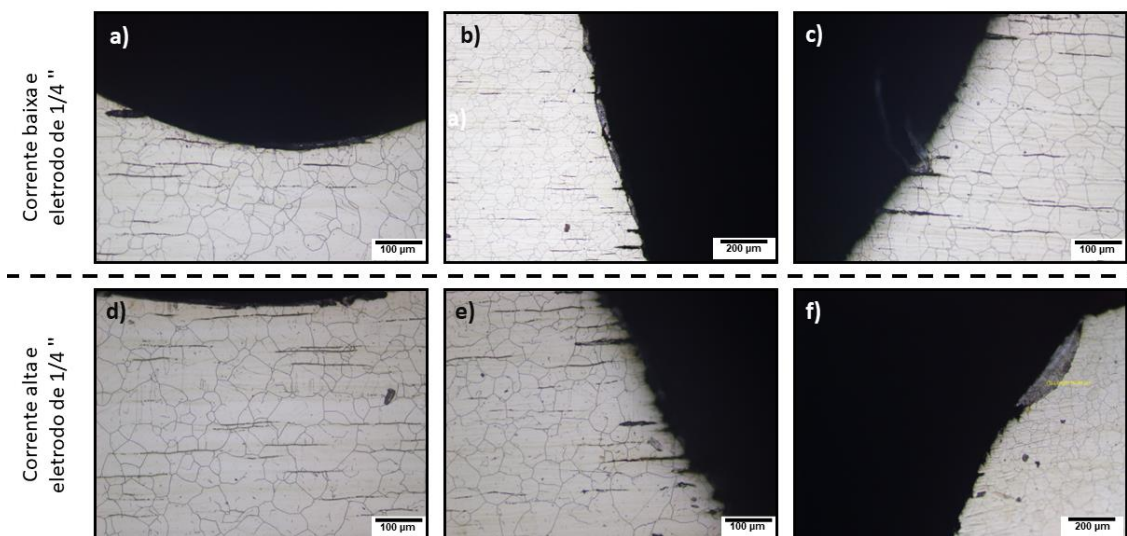


Figura 5.7. AISI 316L, ataque eletrolítico com  $\text{HNO}_3$  (puro) na seção transversal junto a superfície da goiva para revelar microestrutura, os parâmetros em a) , b) e c) são corrente baixa e eletrodo de 1/4 " e são corrente baixa e eletrodo de 1/4 " para d), e) e f).

A Figura 5.8 apresenta a microestrutura do aço inoxidável 316L goivado com eletrodo de 3/8" e baixa corrente (Figuras 5.8.a,b,c) e eletrodo de 3/8" e alta corrente (Figuras 5.8.d,e,f); todos os casos apresentam grãos equiaxiais,

observa-se ainda (Figuras 5.8.a,b,c,d,e) que há presença de material depositado na superfície da goiva e uma fusão preferencial (Figuras 5.8.b,c,e,f) de ferrita delta.

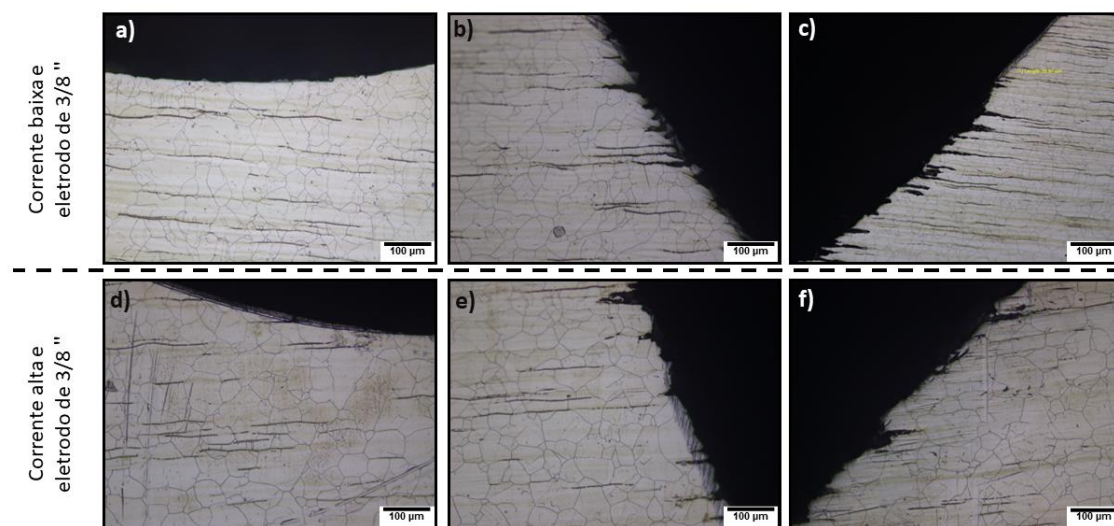


Fig. 5.8. AISI 316L, ataque eletrolítico com  $\text{HNO}_3$  (puro) na seção transversal junto a superfície da goiva para revelar microestrutura, os parâmetros em a) , b) e c) são corrente baixa e eletrodo de 3/8 " e são corrente baixa e eletrodo de 3/8 " para d), e) e f).

A Figura 5.9 apresenta a microestrutura do aço inoxidável 321 goivado com eletrodo de 1/4" e baixa corrente (Figuras 5.9.a,b,c) e eletrodo de 1/4" e alta corrente (Figuras 5.9.d,e,f); todos os casos apresentam grãos equiaxiais, observa-se (Figuras 5.9.a,b,c,e,f) que há presença de material depositado na superfície da goiva e uma fusão preferencial (Figuras 5.9.a,b,c) de ferrita delta.

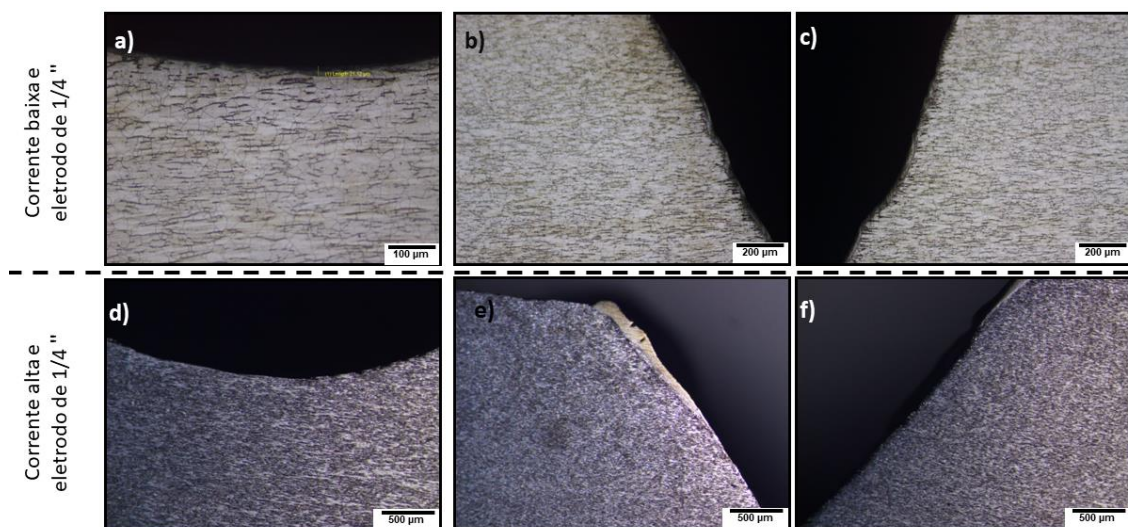


Figura 5.9. AISI 321, ataque eletrolítico com  $\text{HNO}_3$  (puro) na seção transversal junto a superfície da goiva para revelar microestrutura, os parâmetros em a), b) e c) são correntes baixa e eletrodo de 1/4 " e são corrente baixa e eletrodo de 1/4 " para d), e) e f).

A Figura 5.10 apresenta a microestrutura dos aço inoxidável 321 goivados com eletrodo de 3/8" e baixa corrente (Figuras 5.10.a,b,c) e eletrodo de 3/8" e alta corrente (Figuras 5.10.d,e,f); todos os casos apresentam grãos equiaxiais, observa-se ainda (Figuras 5.10.a,b,c,e,f) que há presença de material depositado na superfície da goiva, especificamente (Figuras 5.10.b,c) apresentam uma quantidade acentuada, e uma fusão preferencial (Figuras 5.10.a,b,c) de Ferrita delta.

Figura 5.10. AISI 321, ataque eletrolítico com  $\text{HNO}_3$  (puro) na seção transversal junto a superfície da goiva para revelar microestrutura, os parâmetros em a), b) e c) são corrente baixa e eletrodo de 3/8 " e são corrente baixa e eletrodo de 1/4 " para d), e) e f).

Constata-se pelas Figura 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 que o diâmetro de eletrodo e a corrente aplicada não influenciam de maneira diferente a microestrutura, sendo assim, para comparar a espessura da camada aderida, usou-se os parâmetros que influenciam o aspecto da goiva.

A Figura 5.11 apresenta a micrografias do aço inoxidável 316L goivado, (a) eletrodo de 1/4" de diâmetro, corrente de 150 A e (b) eletrodo de 3/8" de diâmetro, corrente de 300 A. A camada aderida é maior, com a espessura de 34  $\mu\text{m}$ , para diâmetro eletrodo e corrente menores, comparadas com a espessura de 16  $\mu\text{m}$  para diâmetro eletrodo e corrente maiores.

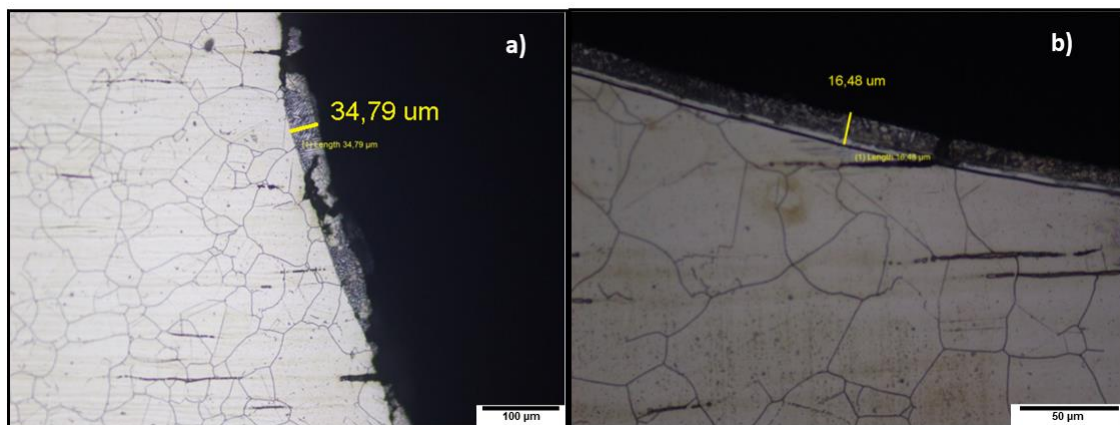


Figura 5.11. Micrografias aço AISI 316L, (a) eletrodo de 1/4" de diâmetro, corrente de 150 A e (b) eletrodo de 3/8" de diâmetro, corrente de 300 A

A Figura 5.12 apresenta a micrografias do aço inoxidável 321 goivado, (a) eletrodo de 1/4" de diâmetro, corrente de 150 A e (b) eletrodo de 3/8" de diâmetro, corrente de 300 A. A camada aderida é maior, com a espessura de 35,64  $\mu\text{m}$ , para diâmetro eletrodo e corrente menores, comparadas com a espessura de 28,16  $\mu\text{m}$  para diâmetro eletrodo e corrente maiores.

Figura 5.12. Micrografias aço AISI 321, (a) eletrodo de 1/4" de diâmetro, corrente de 150 A e (b) eletrodo de 3/8" de diâmetro, corrente de 300 A.

A evolução da dureza em função da distância da extremidade da goiva, para os aços inoxidáveis 316L e 321, é apresentada na Figura 5.13. Os dados plotados mostram que não há uma mudança significativa na dureza.

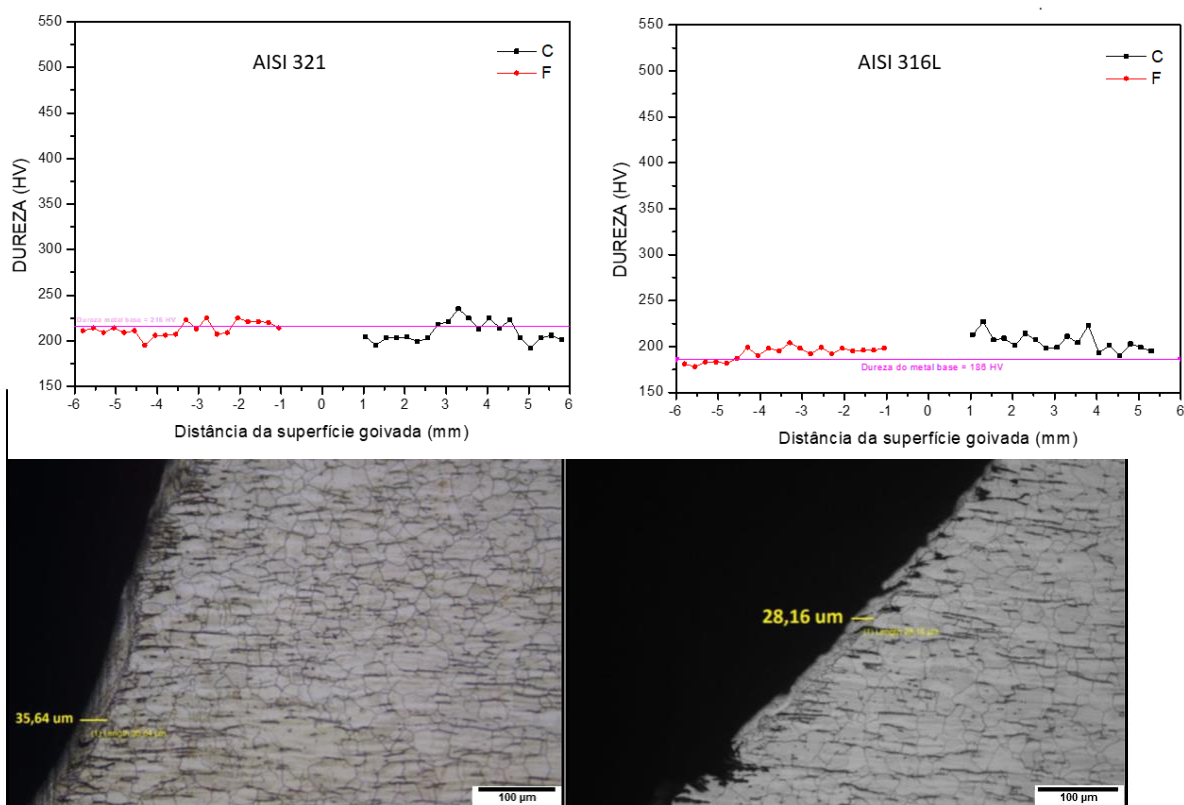


Figura 5.13. Evolução da dureza em função da distância da extremidade da goiva

A Figura 5.14 apresenta a Microscopia eletrônica de varredura da goiva do aço AISI 321, nas condições “como goivada” (Figuras 5.14.a,b,c), escovada (Figuras 5.14.d,e,f) e retificada (Figuras 5.14.g,h,i). As setas

verdes nas (Figuras 5.14.a,d) evidenciam a presença de camada aderida e em (Figuras 5.14.g) indicam que não há evidência de camada aderida.

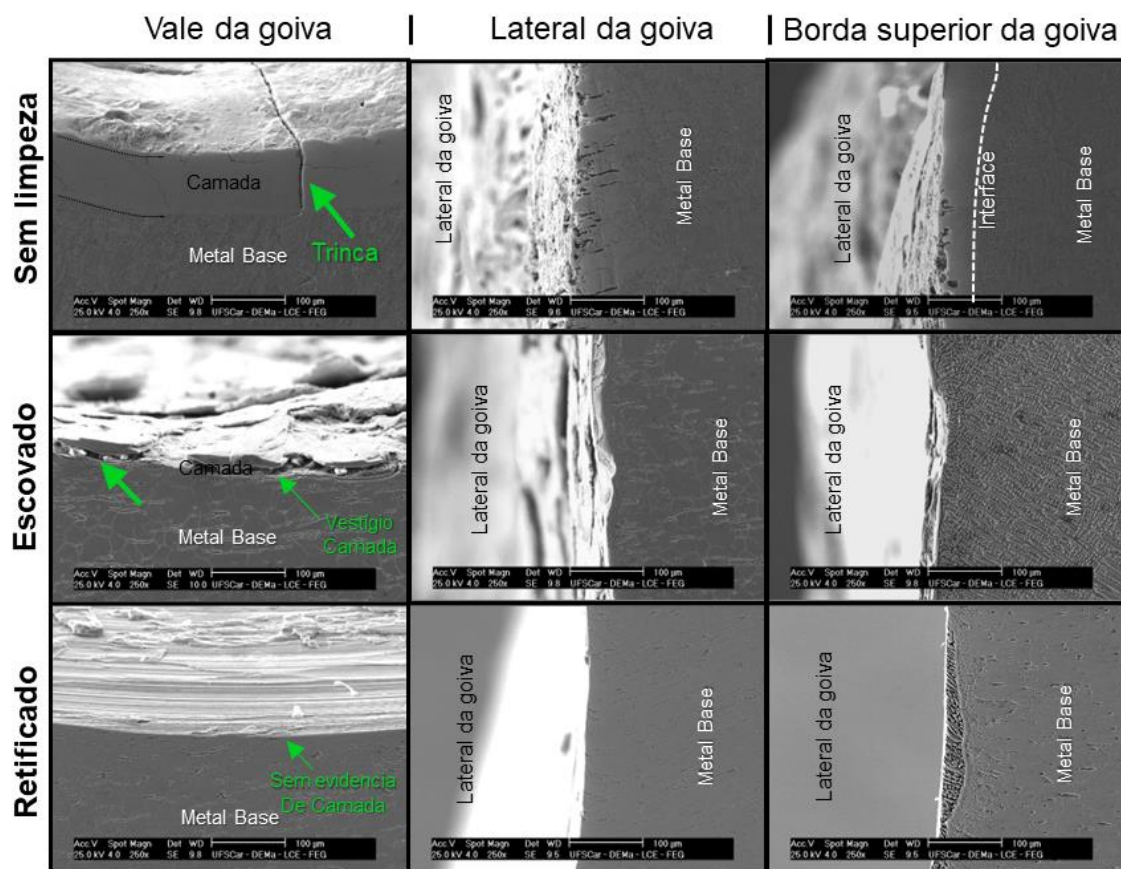


Fig. 5.14. Microscopia por varredura eletrônica da goiva do aço AISI 321, nas condições “como goivada”, escovada e retificada. A seta indica características da goiva para diferentes condições de superfície.

A interferência da camada aderida foi indiretamente avaliada por DL-EPR, vide esquema na Figura 5.15. Ensaios foram realizados em três condições de limpeza, sem limpeza (curva verde), escovado (curva preta) e retificado (curva vermelha), para ambos os aços deste estudo. Os parâmetros de goivagem, corrente baixa e eletrodo de 1/4”, corrente alta e eletrodo de 3/8”, também foram analisados. Em todas as situações de parâmetros apresentados na Figura 5.16 observa-se corrente de reativação. Entretanto, para o caso corrente alta, eletrodo de 3/8” e retificado para os aços 316L e 321, Figura 5.16.c,d, a relação  $I_r/I_a$  é inferior a 3%. Portanto, classificados como parcialmente sensibilizados, segundo NBR 12732.

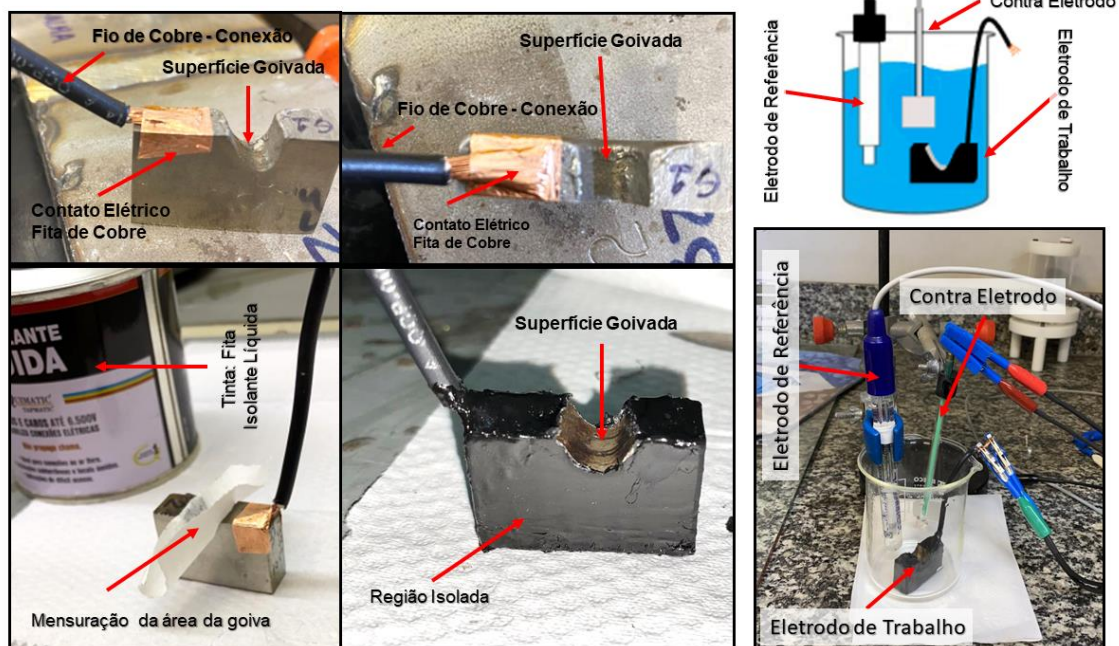


Figura. 5.15. Esquema DL-EPR para avaliar a interferência da camada aderida do AISI 316L e AISI 321 na condição de goivado, com diferentes parâmetros de goivagem, corrente baixa e eletrodo de  $\frac{1}{4}$ ", corrente alta e eletrodo de  $\frac{3}{8}$ " e diferentes parâmetros de limpeza, condição goivada, escovada e retificada. Para isolar eletricamente a região não avalia utilizou material polimérico.

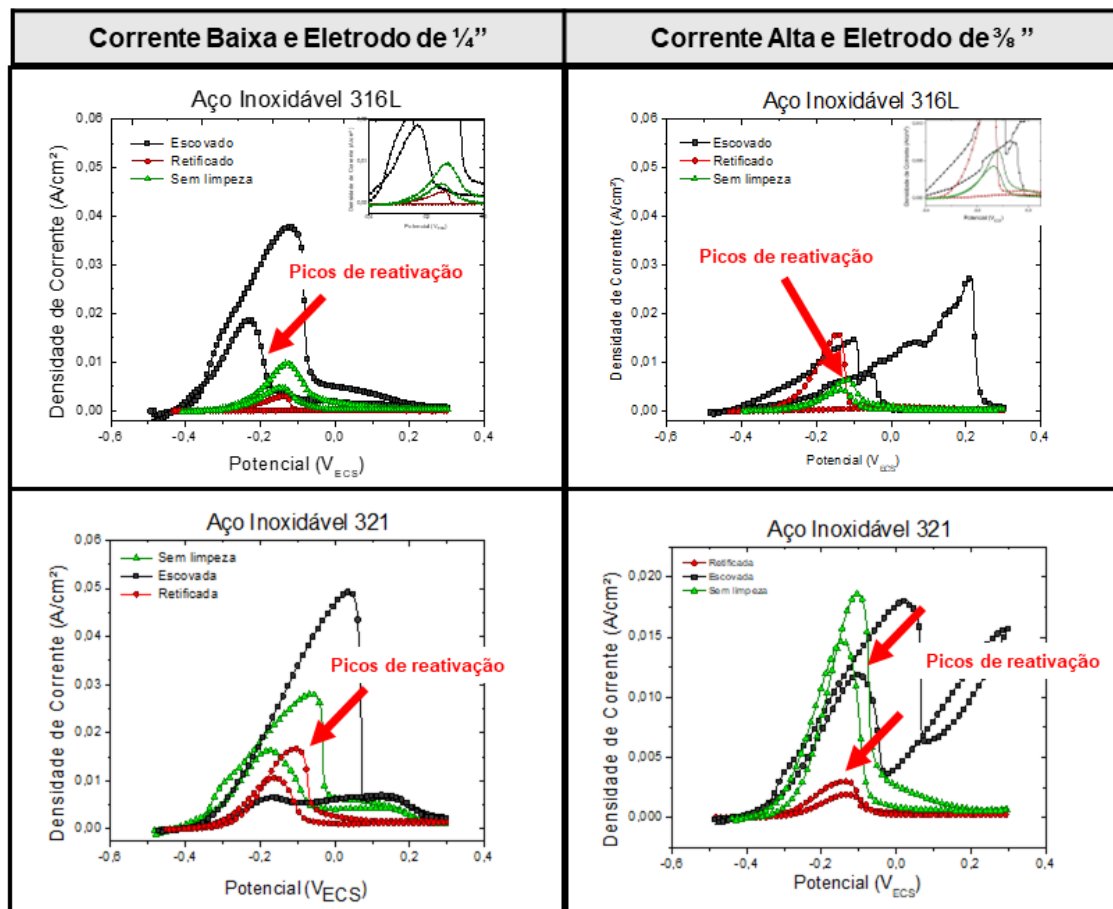


Figura 5.16. DL-EPR de AISI 316L e AISI 321 na condição de goivado, com diferentes parâmetros de goivagem, corrente baixa e eletrodo de 1/4", corrente alta e eletrodo de 3/8" e diferentes parâmetros de limpeza, condição goivada, escovada e retificada. As setas indicam a existência de picos de reativação.

Tabela 5.5 Classificação dos valores: razão das correntes de reativação e ativação ( $I_r/I_a$ ) referentes à sensibilização de acordo com as diretrizes (ISO 12732, 2006), nos parâmetros mostrados na Figura 5.16.

<b>Classificação relativa à sensitização, segundo os critérios estabelecidos pela ISO 12732.</b>			
<b><math>I_r / I_a</math> (%)</b>		<b>Classificação</b>	
$I_r / I_a < 1\%$		NÃO SENSITIZADO	
$1\% < I_r / I_a < 5\%$		PARCIALMENTE SENSITIZADO	
$5\% < I_r / I_a$		SENSITIZADO	

<b>Classificação relativa à sensitização dos AISI 316L e AISI 321</b>			
Parâmetros de goivagem	Processo de retirada de escória	Correlação entre $I_r/I_a$ (%)	
		316L	321
Como recebido	-	-	0,1
Corrente Baixa e Eletrodo de $\frac{1}{4}$ "	Sem Limpeza	49,2	63,6
	Escovado	49,3	58,6
	Retificado	1,0	11,0
Corrente Alta e Eletrodo de $\frac{3}{8}$ "	Sem Limpeza	67,0	78,8
	Escovado	25,5	65,7
	Retificado	2,2	2,9

A goivagem influencia diretamente na susceptibilidade de ambos os aços, mas dependendo da limpeza de na goiva esta influência é desprezível; isto fica claro porque se verifica que o tamanho do eletrodo e a corrente aplicada influenciam nas características ou aspectos visuais, mas não metalúrgicos, que também são importantes

O processo de goivagem deixa camadas aderidas de carbono que influenciam na precipitação de carbonetos, aumentando a susceptibilidade a corrosão dos aços inoxidáveis, entretanto se, é feito uma retirada dessa camada aderida os efeitos ou a precipitação do carbeto pode ser desprezada classificando o material como não sensitizado.

### **5.3. Aços inoxidáveis goivados e soldados: Grau de sensitização e susceptibilidade a corrosão intergranular**

São apresentados a seguir os resultados dos ensaios de DL-EPR e ASTM A 262, em juntas de solda em V que foram ressoldadas, depois de passar pelo processo de goivagem para os aços AISI 316L e 321.

A macrografia e ilustração da seção transversal das juntas em “V” soldadas por SAW são vistas na Figura 5.17.a e Figura 5.17.b, respectivamente.

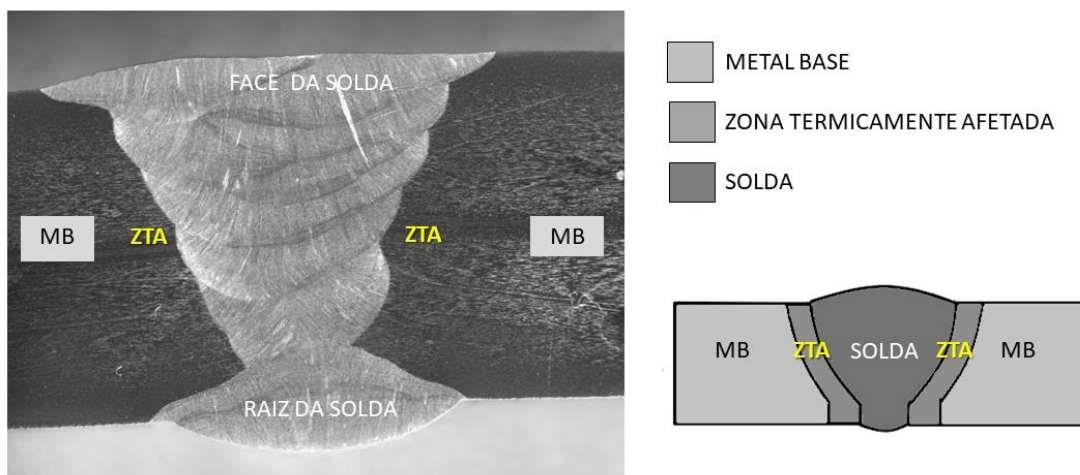


Fig. 5.17. Macrografia da seção transversal e representação da visão da seção transversal das chapas soldadas por Arco Submerso, e classificação da microestrutura.

A Figura 5.18 apresenta o esquema utilizado para a avaliação da corrosão intergranular nos aços AISI 316L e 321, ressaltando os locais onde os ensaios foram realizados.

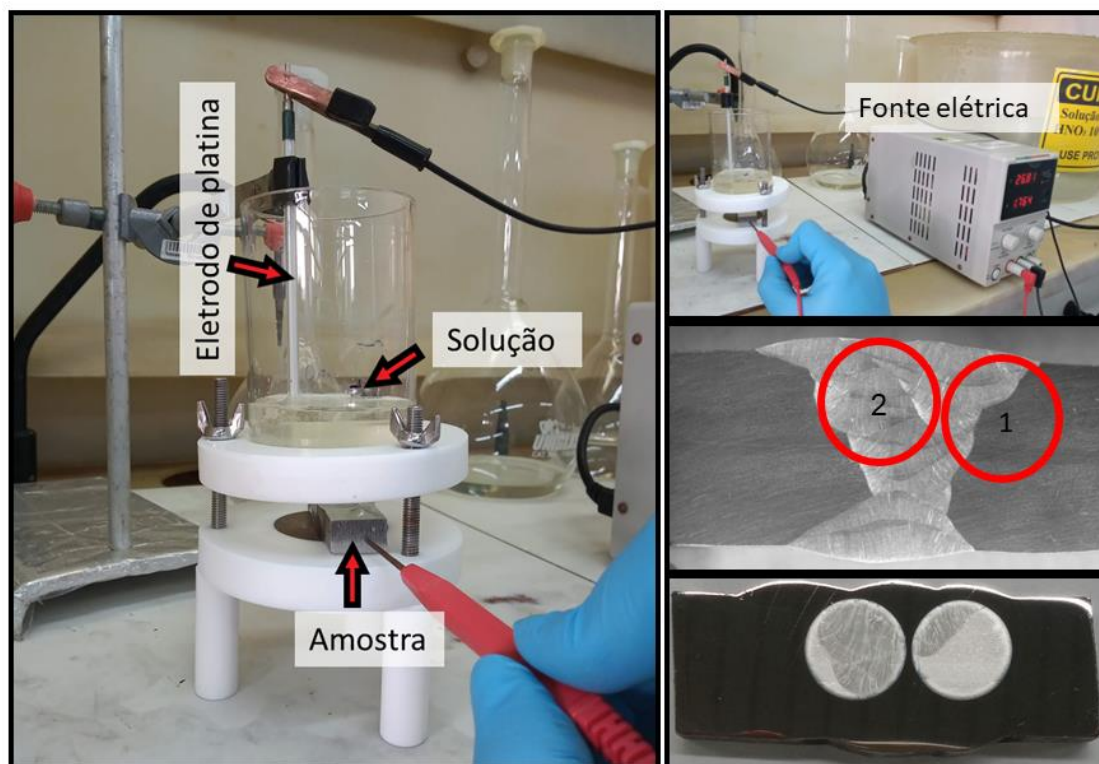


Figura. 5.18. Esquema de ensaios de corrosão intragranular (ASTM A262 PRATICA A) na seção transversal de amostras goivadas com eletrodo de grafite e soldadas por arco submerso (soldagem em V). Diferentes regiões foram analisadas: Metal base (1), Solda (1), Interface (Metal Base / Região Goivada) (2) e Interface (Solda / Região Goivada) (2).

A Figura 5.19 apresenta a microestrutura do aço inoxidável 316L na condição como soldado (sem goivagem). As regiões inspecionadas estão mostradas previamente na Figura 5.18, (Figuras 5.18.a,b) foram o Metal base (1) (Figuras 5.18c,f), Interface Metal Base-Solda (2) (Figuras 5.18 d,g) e Solda (3)(Figuras 5.18.e,h), todas representadas por círculos vermelhos. O Metal Base apresenta grãos equiaxiais e ferrita delta, sendo classificada como Step Structure (ASTM A 262), a região da solda apresenta estrutura típica de soldagem, sendo classificada como Isolated Ferrite Pools (ASTM A 262 ). Portanto, para estas condições de trabalho o aço 316L não sofreu sensibilização, o mesmo vale para a região de interface, pois apresenta microestrutura similar às outras regiões.

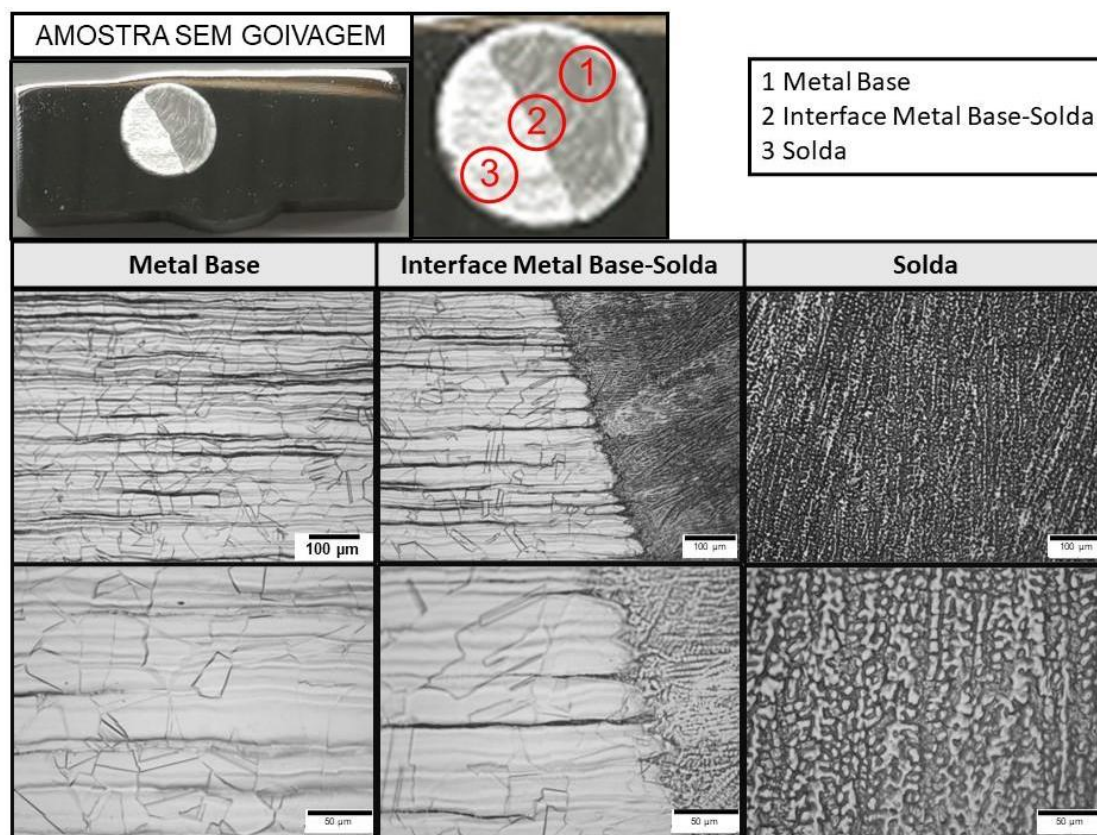


Figura 5.19. Micrografias ópticas do material base, zona termicamente afetada e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 316L soldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

A Figura 5.20 apresenta a microestrutura do aço inoxidável 316L na condição como soldado, goivado e ressoldado. As regiões inspecionadas, (Figuras 5.20.a,b) foram o Metal base (1) (Figuras 5.20.c,g), Interface Metal Base-Goiva (2) (Figuras 5.20.d,h), Interface Solda-Goiva (3) (Figuras 5.20.e,i) e Solda (4) (Figuras 5.20.e,i). O Metal Base apresenta grãos equiaxiais e ferrita delta, sendo classificada como Step Structure (ASTM A 262), a região da solda apresenta estrutura típica de soldagem, sendo classificada como Isolated Ferrite Pools (ASTM A 262). Portanto, para estas condições de trabalho o aço 316L não sofreu sensitização, o mesmo vale para as regiões de interface, pois apresenta microestrutura similar às outras regiões.

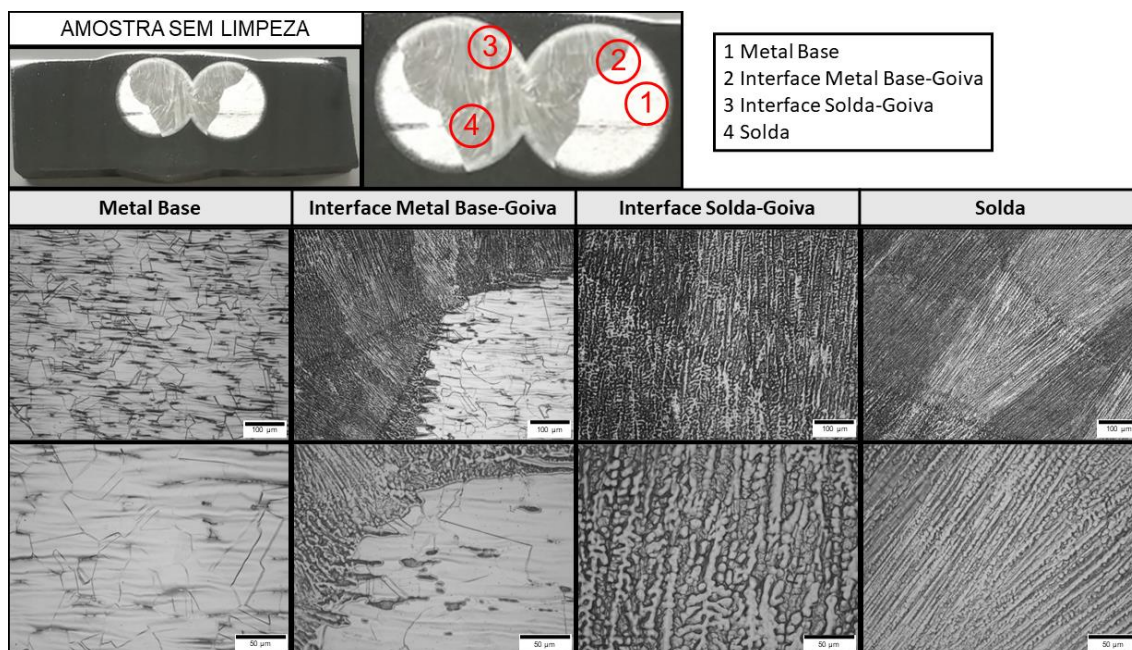


Figura 5.20. Micrografias ópticas do material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 316L, goivado, sem limpeza da goiva e ressoldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

A Figura 5.21 apresenta a microestrutura do aço inoxidável 316L na condição como soldado, goivado, goiva escovada e ressoldado. As regiões inspecionadas, (Figuras 5.21.a,b) foram o Metal base (1) (Figuras 5.21.c,g), Interface Metal Base-Goiva (2) (Figuras 5.21.d,h), Interface Solda-Goiva (3) (Figuras 5.21e,i) e Solda (4) (Figuras 5.21.e,i). O Metal Base apresenta grãos equiaxiais e ferrita delta, sendo classificada como *Step Structure* (ASTM A 262), a região da solda apresenta estrutura típica de soldagem, sendo classificada como *Isolated Ferrite Pools* (ASTM A 262). Portanto, para estas condições de trabalho o aço 316L não sofreu sensibilização, o mesmo vale para a regiões de interface, pois apresenta microestrutura similar às outras regiões.

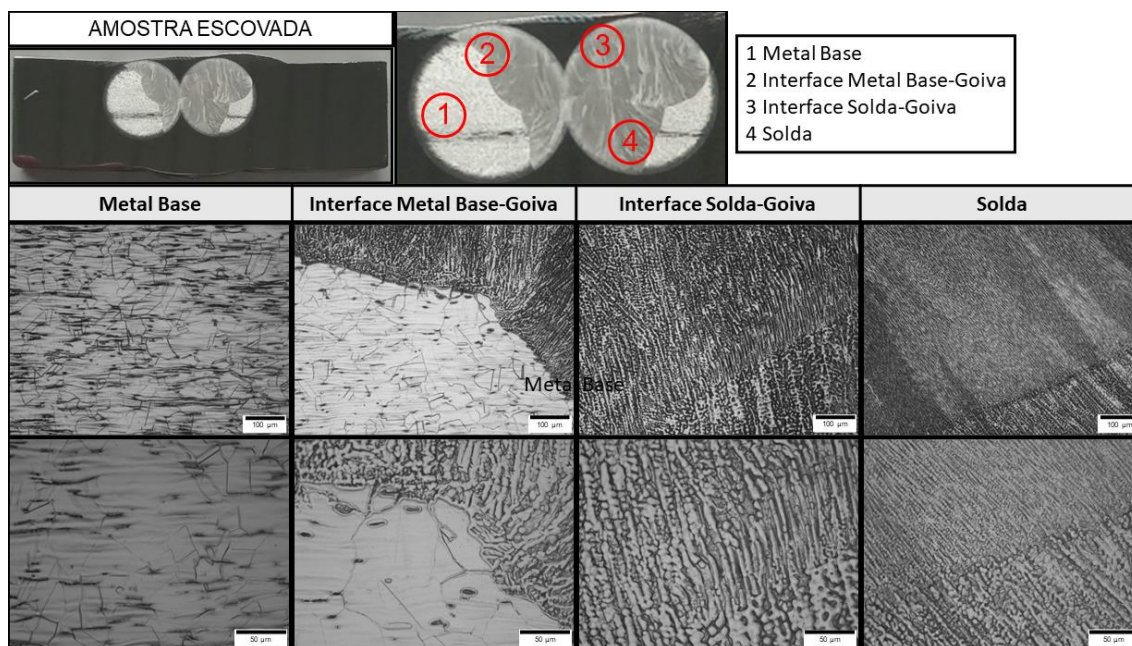


Figura 5.21. Micrografias ópticas do material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 316L, goivado, escovado e ressoldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

A Figura 5.22 apresenta a microestrutura do aço inoxidável 316L na condição como soldado, goivado, goiva retificada e ressoldado. As regiões inspecionadas, (Figuras 5.22.a,b) foram o Metal base (1) (Figuras 5.22.c,g), Interface Metal Base-Goiva (2) (Figuras 5.22.d,h), Interface Solda-Goiva (3) (Figuras 5.22.e,i) e Solda (4) (Figuras 5.22.e,i). O Metal Base apresenta grãos equiaxiais e ferrita delta, sendo classificada como Step Structure (ASTM A 262), a região da solda apresenta estrutura típica de soldagem, sendo classificada como Isolated Ferrite Pools (ASTM A 262 ). Portanto, para estas condições de trabalho o aço 316L não sofreu sensitização, o mesmo vale para a regiões de interface, pois apresenta microestrutura similar às outras regiões.

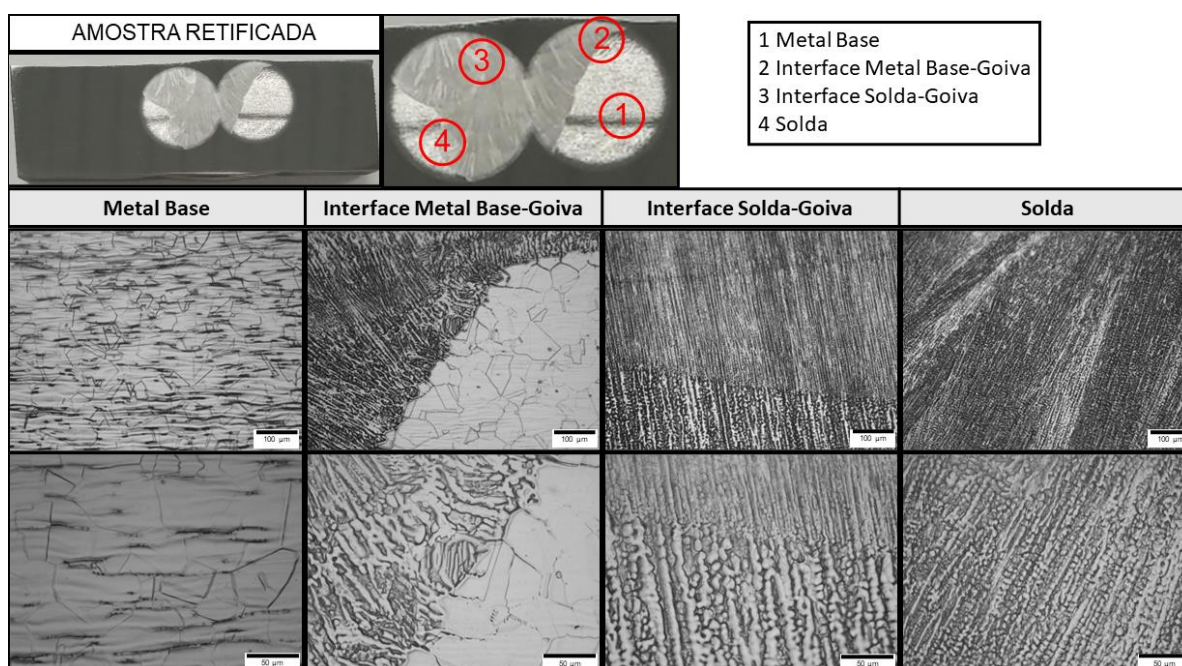


Figura 5.22. Micrografias ópticas do material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 316L, goivado, retificado e ressoldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

As Figuras 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26 se referem aos resultados do aço AISI 321.

Figura 5.23. Micrografias ópticas do material base, zona termicamente afetada e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 321 soldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

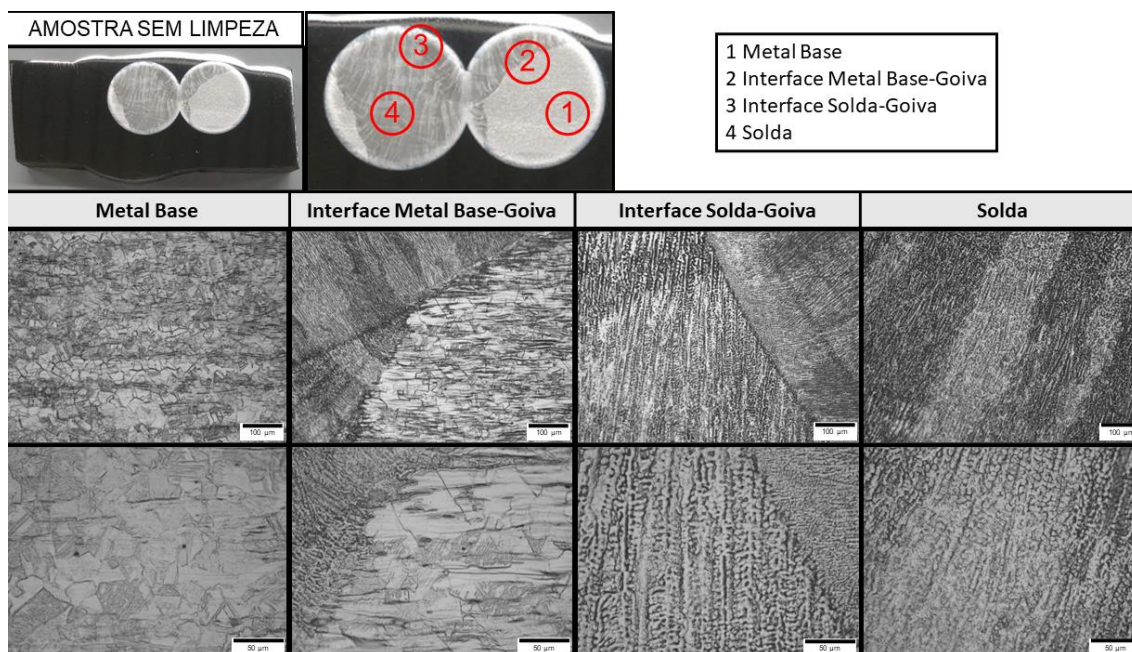


Figura 5.24. Micrografias ópticas do material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 321, goivado, sem limpeza da goiva e ressoldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

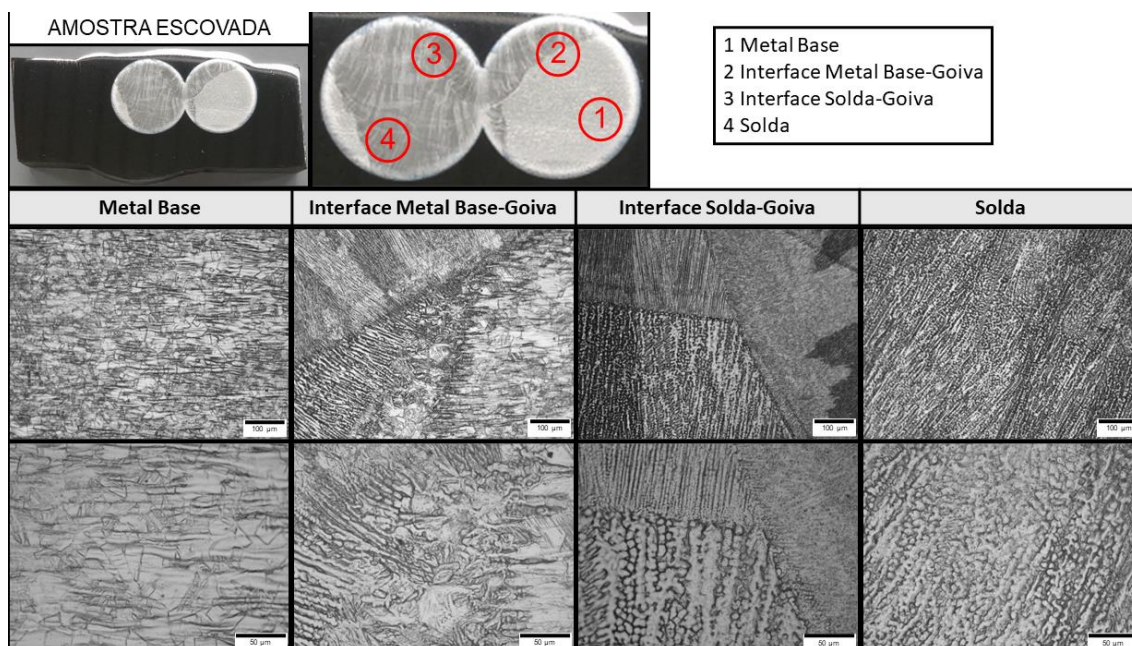


Fig. 5.25. Micrografias ópticas do material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 321, goivado, escovado e ressoldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

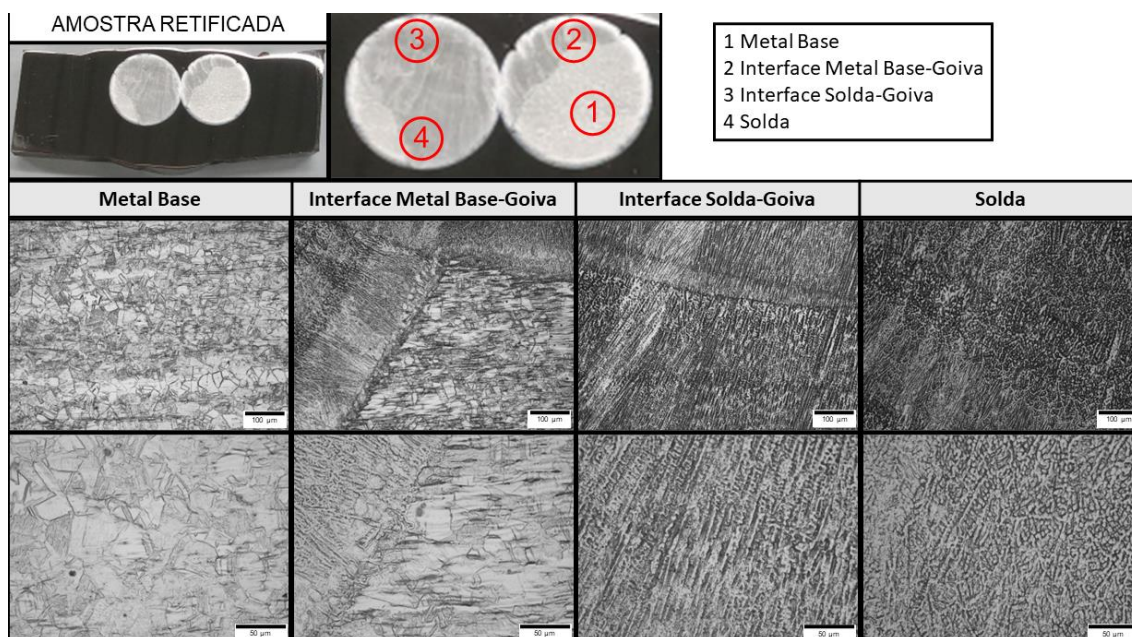


Figura 5.26. Micrografias ópticas do material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, após ataque com ácido oxálico (ASTM A262, 2015), Prática A, para classificação das estruturas do AISI 321, goivado, retificado e ressoldado por Arco Submerso, em aumento de 200X e de 500X.

A Figura 5.27 mostra o esquema de ensaios de DL-ERP na seção transversal de amostras goivadas com eletrodo de grafite e soldadas por arco submerso (soldagem em V). Diferentes regiões foram analisadas: Metal base (1), Solda (2), Interface (Metal Base / Região Goivada) (3) e Interface (Solda / Região Goivada) (4)

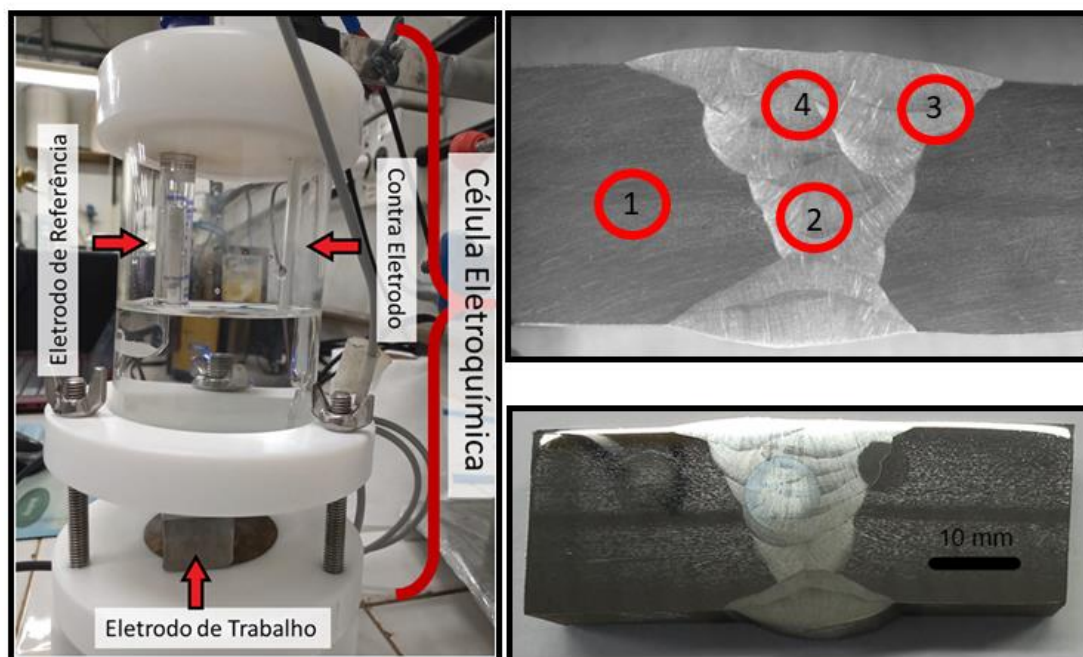


Figura. 5.27. Esquema de ensaios de DL-ERP na seção transversal de amostras goivadas com eletrodo de grafite e soldadas por arco submerso (soldagem em V). Diferentes regiões foram analisadas: Metal base (1), Solda (2), Interface (Metal Base / Região Goivada) (3) e Interface (Solda / Região Goivada) (4).

A Figura 5.28 mostra os resultados para o aço AISI 316L nas diferentes condições de preparo da superfície goivada, e a Figura 5.29 para o aço AISI 321.

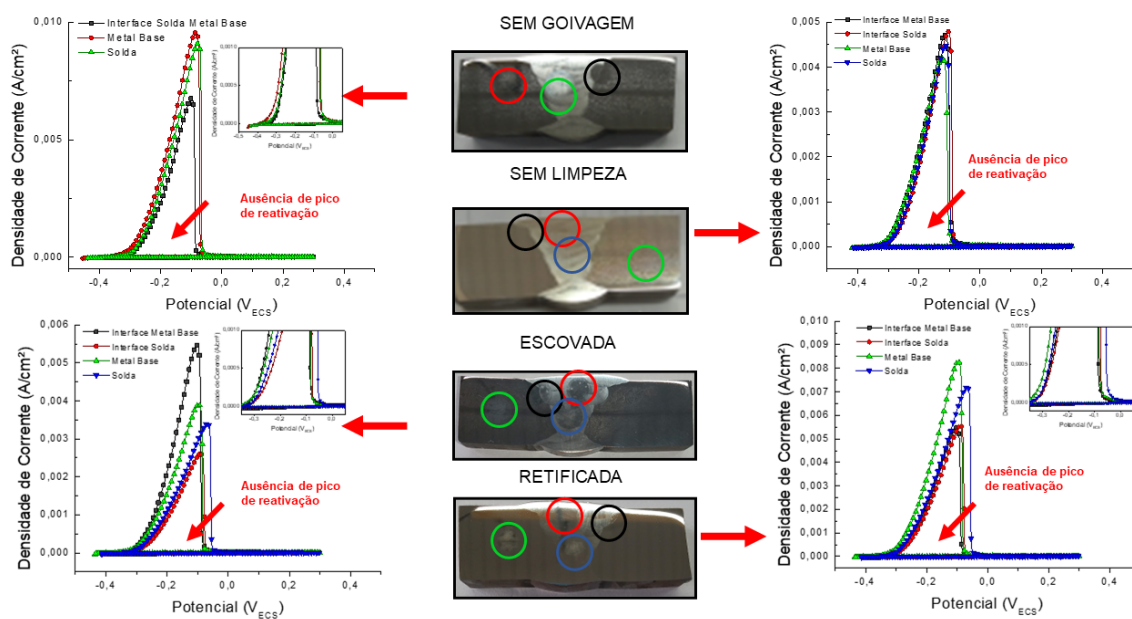


Figura 5.28. DL-EPR do AISI 316L soldado por Arco Submerso nas condições, sem goiva, goiva sem limpeza, goiva escovada e goiva retificada. As Regiões inspecionadas foram o material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, para as condições com goivagem; para a condição sem goivagem as regiões inspecionadas foram material base, zona termicamente afetada e cordão de solda.

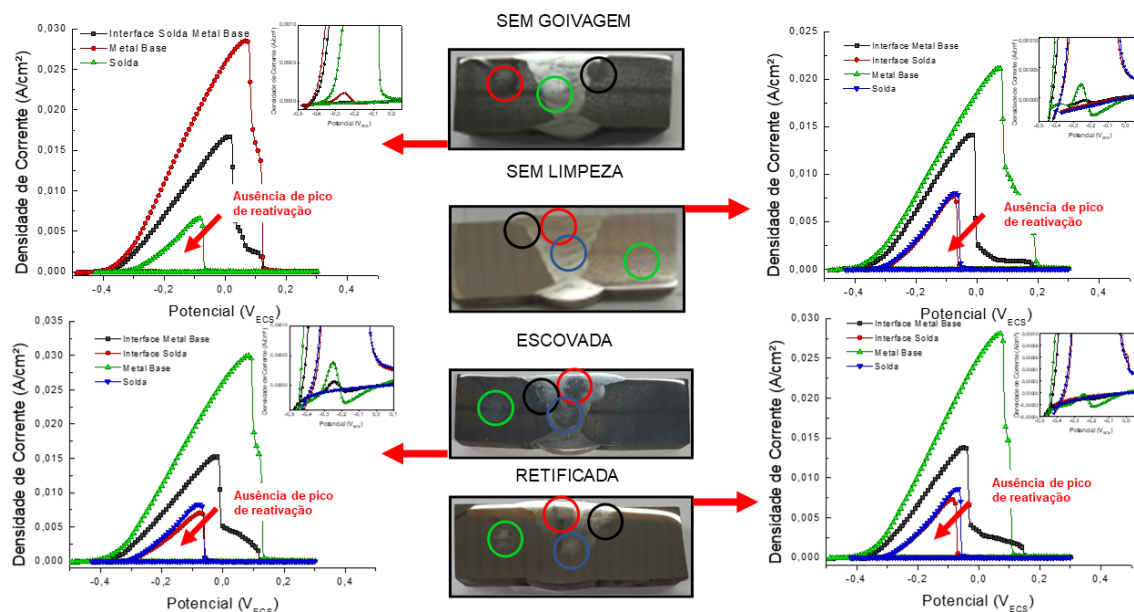


Figura 5.29. DL-EPR do AISI 321 soldado por Arco Submerso nas condições, sem goiva, goiva sem limpeza, goiva escovada e goiva retificada. As Regiões inspecionadas foram o material base, interface metal base-goiva, interface solda-goiva e cordão de solda, para as condições com goivagem; para a condição sem goivagem as regiões inspecionadas foram material base, zona termicamente afetada e cordão de solda.

O resumo dos resultados está mostrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Classificação dos valores razão das correntes de reativação e ativação ( $I_r/I_a$ ) referentes à sensibilização de acordo com as diretrizes (ISO 12732, 2006) para chapas soldadas por Arco Submerso.

Classificação relativa à sensitização, segundo os critérios estabelecidos pela ISO 12732.					
Ir / Ia (%)		Classificação			
Ir / Ia < 1%		NÃO SENSITIZADO			
1% < Ir / Ia < 5%		PARCIALMENTE SENSITIZADO			
5% < Ir / Ia		SENSITIZADO			
Tipo de Material	Processo de retirada de escória do sulco da Goiva	Correlação entre Ir/Ia (%)			
		Metal Base	Interface Metal Base-Goiva	Interface Solda-Goiva	Solda
316L	Sem Goivagem	-	-	-	-
	Sem Limpeza	-	-	-	-
	Escovado	-	-	-	-
	Retificado	-	-	-	-
321	Sem Goivagem	0,0039	-	-	-
	Sem Limpeza	0,1047	-	-	-
	Escovado	0,0013	0,0004	-	-
	Retificado	-	-	-	-

Há ensaios que não apresentam valores numéricos na Tabela 5.6, pois não há corrente anódica relativa à reativação nos ensaios. Os que apresentam valores numéricos são inexpressivos.

#### 5.4. Discussão dos resultados

Chapas de aço inoxidável AISI 316L e 321 com espessura de aproximadamente 19 mm foram soldadas pelo processo de arco submerso. Esse processo foi escolhido porque é um dos que tem maior aporte térmico e, por conseguinte, podem catalisar processos de precipitação de carbonetos em aços inoxidáveis e provocar corrosão localizada. Essas soldas foram realizadas atendendo requisitos da Norma N-133 da Petrobrás no tocante à seleção de parâmetros de soldagem e de preparação das juntas a serem soldadas. Para estudar o efeito do processo de goivagem a arco elétrico com eletrodo de grafita ao ar simulou-se o reparo de uma junta soldada com chanfro em V. Parte da solda, supostamente com defeito, em uma profundidade de aproximadamente 1/3 da espessura e localizada na interface Solda/Zona termicamente afetada, foi retirada pelo processo de goivagem e ressoldada por

arco submerso. Previamente a esse procedimento, o processo de goivagem foi aplicado na superfície das chapas com diferentes parâmetros, em especial o diâmetro do eletrodo (influencia na geometria do chanfro e na expulsão do material fundido) e na corrente de goivagem (aporte térmico para fundir a parte a ser removida e influencia no ciclo térmico). O objetivo foi de verificar aspectos importantes como geometria da goiva, limpeza, presença de resíduos, rugosidade, interrupção do arco de maneira a selecionar parâmetros mais adequados para a realização da simulação do reparo de soldagem. Tanto as goivas para seleção de parâmetros quanto os reparos foram submetidos a ensaios de corrosão para verificar se o procedimento afeta a resistência a corrosão, utilizando-se para isso das técnicas de i) Corrosão intergranular segundo a prática A da norma ASTM A262-15 e de Reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop (DL-EPR).

Os resultados mostraram que as goivas estão sensibilizadas pela contaminação superficial com carbono e resíduos do processo de goivagem, em especial do material fundido que não foi removido e permaneceu aderido na superfície da goiva. O processo de limpeza por escova rotativa não elimina a sensibilização, porém, o processo de retífica elimina os resíduos e a sensibilização. Análises das seções transversais das goivas mostraram, porém, que a espessura do material fundido e não removido é muito fina, da ordem de algumas dezenas de microns. Essa espessura e seu respectivo volume são pequenos em relação ao volume total da goiva, a ser preenchida com material de solda na ressoldarem.

Nas soldagens os resultados mostraram que os aços não foram sensibilizados, mesmo para as goivas que não sofreram processo de limpeza ou escovamento. Isso significa que a contaminação residual nas goivas é em um nível insuficiente para provocar o aumento considerável no teor de carbono da zona de solda, o que evita a sensibilização dessa região. Em nenhuma das soldas e para qualquer condição de limpeza e localização na junta soldada, o pico de reativação no ensaio DL-EPR ficou acima de 1% (Ir/Ia). Esses resultados contrariam o senso comum predominante na comunidade de soldagem que o processo de goivagem a arco elétrico com eletrodo de carbono

ao ar não poderia ser utilizado para aços inoxidáveis, inclusive é proibido pelas normas da Petrobrás, pela sensitização inerente que provocaria devido a contaminação por carbono. Essa contaminação realmente ocorre, mas em um volume muito pequeno, insuficiente para elevar o teor de carbono no metal de solda da ressoldagem a um patamar capaz de provocar sensitização. Um aspecto que era pouco considerado nessas análises é a termodinâmica envolvida no processo. Basicamente, tem-se um excesso de oxigênio no processo pelo ar injetado na região sendo goivada. O carbono do eletrodo no arco elétrico tem três possibilidades: i) difundir/dissolver no metal líquido, ii) formar óxidos de metais presentes nos aços e iii) formar CO<sub>2</sub> e ser eliminado na forma gasosa. Se observarmos o diagrama de Ellingham, que representa as curvas de energia livre de formação de óxidos, a reação mais provável na temperatura do arco elétrico e com um excesso de oxigênio é a formação de CO<sub>2</sub>. A segunda reação mais provável seria a formação de óxidos como os de cromo e de ferro. A terceira e menos provável seria a dissolução do carbono no metal líquido e difusão para a zona termicamente afetada.

A análise das goivas mostra que óxidos se formam e podem ficar aprisionados na superfície das mesmas quando não eliminados junto com o metal fundido. A geometria em U, obtida com os eletrodos de maior diâmetro, parece facilitar a expulsão desse material fundido e oxidado. Não houve evidência de aumento de teor de carbono nem nas zonas de solda nem na termicamente afetada. Apesar de não ter sido monitorado o gás evolvido após a goivagem, muito provavelmente o CO<sub>2</sub> foi formado e responsável pela eliminação da maior parte do carbono liberado dos eletrodos de grafita. Isso contribuiu para um pequeno nível de contaminação nas regiões goivadas, que foi insuficiente para elevar o nível de carbono o suficiente para provocar sensitização. Outra contaminação que poderia ocorrer seria a do nitrogênio, o qual, por ser gamagênico, poderia aumentar o teor de austenita (ou reduzir o de ferrita) na região de solda. Apesar de isso não ter sido monitorado, nas micrografias a ferrita está presente em volume suficiente para evitar trinca a quente nas regiões soldadas, trincas essas que nunca foram observadas nas soldas realizadas.

## 6 CONCLUSÕES

- O processo de goivagem a arco elétrico ao ar com eletrodo de carbono pode contaminar a superfície das goivas com carbono e óxidos.
- Essa contaminação, uma vez que parâmetros adequados de goivagem sejam selecionados, tem um volume muito pequeno, insuficiente para elevar o nível de carbono a patamares capazes de provocar sensitização em aços inoxidáveis das séries AISI 316L e 321, mesmo que não se realize qualquer limpeza na superfície das regiões goivadas antes da ressoldarem.

## 7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Marques, P. V; Modenesi. P. J; Bracarense, A. Q, Soldagem Fundamentos e Tecnologia , Ed. UFMG, 3ª ed.atualizada. Belo Horizonte, 2009.
- [2] ASM Metals Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, ASM Int, 1933.
- [3] Tavares, W. S., Estudo das técnicas de remoção de material empregadas em soldagens de fabricação ou de manutenção de estruturas de aços, tese, UFC-Ce, Fortaleza, 2009.
- [4] PETROBRAS. N-133: Soldagem. rev. N., 2017. 116 p.
- [5] API 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry.Recommended Practice.American petroleum Institute.Second Edition, April 2011.
- [6] KRAUSS, G.2005. Steels. Processing, Structure and Performance, ASM Internation.
- [7] Kim, Jeong-Hyeon & Kim, Seul-Kee & Lee, Chi-Seung & Kim, Myung-Hyun & Lee, Jae-Myung. (2014). A constitutive equation for predicting the material nonlinear behavior of AISI 316L, 321, and 347 stainless steel under low-temperature conditions. International Journal of Mechanical Sciences. 87.
- [8] Chaves, P. N., Influência do Nitrogênio e do Hidrogênio no Gás de Proteção Argônio na Soldagem TIG Autógena de Aço Inoxidável Duplex, Tese, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- [9] Escriba, D. M., Morris E. M.; Plaut R. L., Padilha, A. F. (2006) Efeito do Molibdênio na composição química da fase sigma em três tipos de aços inoxidáveis, 17ºCBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.
- [10] Silva, B. R. D. S. D., (2015) Estudo da Fragilização Pelo Hidrogênio em Juntas Soldadas de Tubos de Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [11] PERREN, R.; SUTER, T. e UGGOWITZER, P. "Corrosion resistance of super duplex stainless steels in chloride ion containing environments: investigations by means of a new microelectrochemical method II. Influence of precipitates". Corrosion science, v. 43, p. 727-745, 2001.

- [12] VILLANUEVA, D.M.E.; JUNIOR, F.C.P.; PLAUT, R.L.; PADILHA, A.F. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex. *Materials Science and Technology*, v.22, n.9, 1098-1104, 2006.
- [13] Leal, Pedro Henrique Moura. Análise crítica da técnica de reativação eletroquímica potenciocinética em duplo loop (DL-EPR) aplicada a aços inoxidáveis duplex: Limitações e potencialidades / Pedro Henrique Moura Leal. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.
- [14] NILSSON, J. O. “Super duplex stainless steels”. *Materials science and technology*, v. 8, n. 8, p. 685–700, 1992.
- [15] Paschoal, Mariana & Romana, Raquel & Magnabosco, Rodrigo. (2015). QUANTIFICAÇÃO DE FASES INTERMETÁLICAS EM AÇO INOXIDÁVEL SUPERDÚPLEX POR ESTEREOLOGIA QUANTITATIVA EFEITO DE DIFERENTES FONTES DE IMAGENS. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*.
- [16] ARRUDA, S. M. de; CHAGAS, J. Glossário de Biblioteconomia e Ciências afins. Florianópolis: Cidade Futura, 2002.
- [17] Machado, I. G. Soldagem e Técnicas conexas: processos.M149s. ed. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477 p.:il.
- [18] Philips, D. F., *Welding Engineering - An Introduction*, Ed. John Wiley & Sons, 1ª ed. 2016
- [19] THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. *The PROCEDURE HANDBOOK of Arc Welding*. Fourteenth Edition. Cleveland, Ohio: AWS, 2000.
- [20] AWS *Welding Handbook Welding Processes, Part 1* 2004
- [21] Higa, S. Mi. H634ac Avaliação da corrosão intergranular de aços inoxidáveis por meio de normas e de ensaios eletroquímicos em altos potenciais / Silvia Midori Higa. -- São Carlos : UFSCar, 2011. 72 p. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.
- [22] McGuire, M. F. Austenitic Stainless Steels. in *Stainless Steels for Design Engineers* 69–78 (ASM International, 2008).
- [23] *Welding Handbook, vol. 2, Welding Processes, Part 1*, 9ª ed. AWS, 2004.

- [24] ASTM A262-15 Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels
- [25] Revie, R. W. e Uhlig, H. H. Corrosion and corrosion control - An Introduction to Corrosion Science and Engineering. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. p. 490
- [26] International Organization for Standardization. ISO 12732:2006(E): Corrosion of metals and alloys - Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Čihal's method). Suíça, 2006.
- [27] Čihal, V. e Štefec, R. "On the development of the electrochemical potentiokinetic method". Electrochimica Acta, v. 46, n. 24-25, p. 3867–3877.
- [28] <http://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/inspecao/apostila-de-acompanhamento-pratico-eletrodo.pdf>
- [29] SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1996. p. 436
- [30] ASTM G61 - 86(2018)  
Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys
- [31] JONES, D. A. Principles and prevention of corrosion. Prentice Hall, v. 2, 1996.
- [32] ASTM A240 / A240M-18 Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications
- [33] ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- [34] ASTM E45-18a Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.
- [35] ASTM E407-07(2015)e1 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.
- [36] STM E340 - 15 Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys

[37] ASTM 8/E8M-16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

[38] ASTM E23-18 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

[39] METALS HANDBOOK, Volume 9 Metallography and microstructure. USA: ASM (American Society for Metals), 1989.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Realizar ensaios mecânicos nas juntas soldadas para verificar se o nível de inclusões nos casos das goivas não retificadas pode afetar negativamente as propriedades mecânicas, em especial para parâmetros de goivagem não ideais.