

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ENGENHARIA MECÂNICA

RENAN SCIPIONI

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA E RECOZIMENTO EM
JUNTAS SOLDADAS POR ELETRODO REVESTIDO DE AÇO 316L**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2019

RENAN SCIPIONI

**INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA E RECOZIMENTO EM
JUNTAS SOLDADAS POR ELETRODO REVESTIDO DE AÇO 316L**

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava.

Orientador: Prof. Ms. João Paulo Gabre Ferreira

GUARAPUAVA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA E RECOZIMENTO EM JUNTAS SOLDADAS POR ELETRODO REVESTIDO DE AÇO 316L

RENAN SCIPIONI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em Guarapuava, Paraná na data 17 de Julho de 2019 como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Ms. JOÃO PAULO GABRE FERREIRA
Prof. Orientador

Dr^a VIVIANE TELEGINSKI MAZUR
Membro Da Banca

Ms. RICARDO VINÍCIUS BUBNA BISCAIA
Membro Da Banca

Dr. ALDO PRYBYSZ
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

SCIPIONI, Renan. **INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA E RECOZIMENTO EM JUNTAS SOLDADAS POR ELETRODO REVESTIDO DE AÇO 316L**. 2019. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2019.

Os aços inoxidáveis estão presentes em inúmeros setores industriais, pelo fato da sua característica de resistência a corrosão permitir a aplicação deste metal em ambientes que seriam danosos a outros tipos de materiais. É fato que, na indústria, falhas acontecem e a necessidade de manutenção nesse meio é constante, sendo o processo de soldagem um dos principais mecanismos para reparo de rupturas e avarias em metais. Sabendo disso, o presente trabalho visa avaliar o impacto de uma solda por eletrodo revestido em chapas de aço inoxidável austenítico SAE 316L. A metodologia desenvolve um comparativo entre os parâmetros de intensidade da corrente elétrica de soldagem e a condição inicial do metal de base para serem analisados. Os resultados são baseados em ensaios mecânicos e análises micro e macroestruturais, fazendo paralelos entre os parâmetros que foram variados. Estes resultados apontam uma resistência mecânica maior e uma microestrutura aparentemente sem efeitos de sensitização quando o metal se encontra na forma encruada e a solda é aplicada com uma intensidade de corrente elétrica mais alta.

Palavras-chave: Soldagem. Aços Inoxidáveis. Eletrodo Revestido. Microestrutura. Junta Soldada.

ABSTRACT

SCIPIONI, Renan. **THE INFLUENCE OF ELECTRIC CURRENT AND ANNEALING IN 316L STEEL JOINTS WELDED BY COATED ELECTRODE**. 2019. 69 p. End of Graduation Course Paper (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Federal University of Technology of Parana, 2019.

Stainless steels are present in many industrial sectors, due to the fact that their corrosion resistance characteristics allow the application of this metal on environments that would be harmful to other types of materials. It is a fact that, in the industry, failures happen and the need for maintenance in this environment is constant, being the welding process one of the main mechanisms for ruptures and damages repairs in metals. Knowing this, the present work aims to evaluate the impact of the stick weld on austenitic stainless steel SAE 316L sheets. The methodology develops a comparison between parameters of the electric current intensity of the weld and of the base metal initial condition to be analyzed. The results are based on mechanical tests and micro and macrostructural analyzes, making parallels between the parameters that were varied. These results indicate a higher mechanical resistance and a microstructure apparently without sensitizing effects when the metal is in the hardened form and the weld is applied with a higher electric current intensity.

Keywords: Welding. Stainless Steel. Coated Electrode. Microstructure. Welded Joint.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microestrutura de um aço P430 com sensitização.....	15
Figura 2 - Equipamentos básicos para a soldagem com eletrodo revestido.	17
Figura 3 - Relação entre Taxa de Deposição e Corrente de Soldagem para Eletrodos de Aço Carbono de 4.8 mm.....	21
Figura 4 – Influência da corrente de soldagem nas dimensões do cordão (eletrodo com 4mm de diâmetro).	22
Figura 5 - Angulo de soldagem.	23
Figura 6 - Regiões da junta soldada.....	25
Figura 7 - Variação da dureza em função da recristalização e crescimento de grão de materiais trabalhados à frio.	27
Figura 8 - Dimensões das amostras para soldagem.	29
Figura 9 - Fluxograma da metodologia do trabalho.....	30
Figura 10 – Desenho esquemático do posicionamento da fresa para usinagem do chanfro.	31
Figura 11 - Posicionamento do eletrodo revestido na soldagem SMAW.....	33
Figura 12 - Pontos (A, B, C...) onde foram executados os testes de dureza.....	37
Figura 13 - Setup para o Ataque Elérolítico com Ácido Oxálico 10%.....	38
Figura 14 - Cordões de solda logo após a soldagem.	41
Figura 15 - Aspecto da escória da junta soldada.	42
Figura 16 - Ensaio de Líquidos penetrantes.....	42
Figura 17 - Micrografia do metal antes do tratamento térmico (200x).....	51
Figura 18 - Micrografia do metal após o recozimento pleno (200X).....	51
Figura 19 - Macrografia das amostras soldadas a 70 amperes.....	53
Figura 20 - Macrografia das amostras soldadas a 90 amperes.....	54
Figura 21 - Micrografia da Zona Transição A) L70; B) L90.	55
Figura 22 - Micrografia da Zona Transição A) R70; B) R90.	56
Figura 23 - Micrografia da Zona Termicamente Afetada (500X) A) L70; B) L90.	57
Figura 24 - Micrografia da Zona Termicamente Afetada (500X) A) R70; B) R90.	57

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Mufla utilizada para o tratamento térmico.	31
Fotografia 2 – Fixação das amostras para soldagem, utilizando dois alicates de pressão.	33
Fotografia 3 - Exemplo de disposição dos cortes para corpos de prova.	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de revestimento para eletrodos com base na composição.....	19
Quadro 2 - Tipos de variáveis de soldagem.	20
Quadro 3 - Parâmetros de soldagem.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração em mm.	36
Tabela 2 - Parâmetros Qualitativos da Soldagem	43
Tabela 3 - Módulo de elasticidade e Alongamento obtidos pelo ensaio de tração das amostras soldadas.	46
Tabela 4 - Tensões Máxima e de Escoamento obtidas pelo ensaio de tração das amostras soldadas.	47
Tabela 5 - Médias e Desvios dos resultados dos ensaios de Dureza Rockwell B das amostras soldadas.	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo das Linhas de Tensão x Deformação das Amostras Soldadas (Ensaio de Tração).....	45
Gráfico 2 - Ensaio de Dureza no Cordão de Solda (Rockwell B).	49
Gráfico 3 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras L70.	63
Gráfico 4 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras L90.	65
Gráfico 5 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras R70. ...	67
Gráfico 6 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras R90. ...	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	11
1.2 JUSTIFICATIVA	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS	14
2.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos	14
2.1.2 Soldabilidade Dos Aços Inoxidáveis.....	16
2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO.....	16
2.4.1 Equipamentos	17
2.4.2 Eletrodos Revestidos.....	18
2.4.3 Variáveis De Soldagem	20
2.5 REGIÕES DA JUNTA SOLDADA	24
2.5.1 Zona Fundida	25
2.5.2 Zona Termicamente Afetada	26
3 METODOLOGIA	29
3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS	30
3.2 TRATAMENTO TÉRMICO	30
3.3 SOLDAGEM	32
3.4 ANÁLISE DAS DISCORDÂNCIAS	34
3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO	34
3.6 ENSAIO DE DUREZA	36
3.7 ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	37
3.7.1 Microscopia	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 ANÁLISE DE DISCORDÂNCIAS	40
4.2 Parâmetros quantitativos.....	43
4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	44
4.4 ENSAIO DE DUREZA	48
4.5 METALOGRAFIA	50
4.4.1 Análise do Material Previamente À Soldagem	50

4.4.2 Macrografia	52
4.4.3 Regiões Da Solda	54
5 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE A – GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS LAMINADAS SOLDADAS A 70 AMPERES.....	62
APÊNDICE B - GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS LAMINADAS SOLDADAS A 90 AMPERES	64
APÊNDICE C - GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS RECOZIDAS SOLDADAS A 70 AMPERES	66
APÊNDICE D - GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS RECOZIDAS SOLDADAS A 90 AMPERES	68

1 INTRODUÇÃO

Segundo a American Welding Society (AWS), soldabilidade é “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço” (MODENESI, 2011).

Para os aços inoxidáveis, o processo de soldagem mais acessível é o de eletrodo revestido. A soldagem por eletrodo revestido é uma das mais utilizadas em todo o mundo, e consiste em um processo de soldagem por arco elétrico, onde a união é produzida pelo calor do arco criado entre um eletrodo revestido e a peça a soldar (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

Aspectos fundamentais na soldagem de aços inoxidáveis são a necessidade de limpeza de modo a minimizar contaminações e cuidados com a forma do cordão, uma vez que irregularidades superficiais podem se tornar pontos de acúmulo de sujeira e impurezas que deterioreem a sua resistência à corrosão, que é sua principal característica (MODENESI, 2011).

Quando se trata de um aço inoxidável austenítico, existem outras precauções a se tomar em relação a soldagem, a sensitização. Ao atingir temperaturas entre 425 até 850°C, ou quando é submetido a temperaturas mais altas seguido de um resfriamento lento, o que pode ocorrer em processos de soldagem, o cromo e o carbono presentes na composição química do aço juntam-se para formar carbonetos de cromo do tipo Cr_{23}C_6 . Esses carbonetos se formam nos contornos de grão e diminuem a resistência à corrosão do aço (ASM TECHNICAL DEPARTMENT, 2013).

Desta forma o entendimento de como os aços inoxidáveis austeníticos se comportam devido ao processo de soldagem por eletrodo revestido é de fundamental importância no que diz respeito tanto nas suas propriedades mecânicas quanto na sua característica de resistência a corrosão.

1.1 OBJETIVOS

Analisar como a microestrutura inicial do metal de base e a intensidade da corrente elétrica de soldagem afetam as propriedades mecânicas e a microestrutura pós soldagem de juntas soldadas de aço inoxidável autêntico SAE 316L pelo processo de eletrodo revestido.

1.1.1 Objetivos Específicos

Objetivo específico 1: Analisar as discordâncias dos cordões de solda através de investigação visual e ensaios de líquidos penetrantes.

Objetivo específico 2: Analisar as propriedades mecânicas dos corpos de prova das juntas soldadas por ensaios de tração e dureza.

Objetivo específico 3: Caracterizar metalograficamente os corpos de prova das juntas soldadas via microscopia ótica.

Objetivo específico 4: Avaliar a influência da condição microestrutural inicial e dos parâmetros de soldagem na soldabilidade, nas propriedades mecânicas e na microestrutura da junta soldada.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os aços inoxidáveis são, basicamente, ligas de ferro-cromo, onde o cromo desempenha um papel fundamental para a resistência a corrosão, devido a formação de uma camada composta por um óxido protetor que impede o contato do metal de base com a atmosfera corrosiva. Por causa desse mecanismo anticorrosivo, os aços inoxidáveis são amplamente utilizados, tanto no ramo industrial, quanto no nosso cotidiano, como em eletrodomésticos e utensílios em geral.

Mais especificamente, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam boa soldabilidade e podem ser trabalhados a frio. No caso do aço SAE 316L, que pertence à família dos aços inoxidáveis austeníticos, sua aplicação abrange bombas, tanques, evaporadores e agitadores, condensadores, equipamentos têxteis, tanques soldados para estocagem de produtos químicos e orgânicos e até peças expostas à atmosfera marítima.

Acerca do processo de soldagem utilizado nesse estudo, além de consistir em um processo simples, versátil e de custo baixo, ele é também um dos métodos mais utilizados. Uma outra vantagem deste método, é a praticidade, ele pode ser aplicado em qualquer posição e em áreas de acesso limitado. Além disso, os eletrodos revestidos utilizados neste processo contêm em seu revestimento elementos que fornecem proteção para a junta soldada, excluindo a necessidade de uma atmosfera controlada para execução da solda.

Dentro dos parâmetros que regem os processos de soldagem a arco elétrico, a corrente elétrica de soldagem é o que mais pode influenciar na maioria das características do processo como, manuseio, velocidade, facilidade para abrir o arco e outras, o aspecto do cordão e as propriedades mecânicas e microestruturais da junta soldada.

Para se entender todos esses parâmetros, se faz necessária uma análise da microestrutura e das propriedades mecânicas da junta soldada, através da microscopia e de ensaios mecânicos de tração e dureza. A solda tem influência na microestrutura e nas propriedades mecânicas da junta e do metal de base no entorno da junta, logo, é interessante para o presente estudo, a realização dessa análise.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro e carbono com uma quantidade de no mínimo 10,5% de cromo, o qual tem o papel de fornecer uma resistência à corrosão elevada (CARBÓ, 2008).

Nos aços inoxidáveis, o papel de proteção contra a corrosão é exercido, por uma película protetora que separa o metal do meio corrosivo. Essa película pode ser gerada naturalmente pelo metal, por meio de uma reação química entre o metal e um meio que tenha oxigênio (esse fenômeno é chamado de passividade). Nos aços inoxidáveis, os átomos de cromo da superfície do metal absorvem oxigênio, formando uma película de óxido com alto teor de cromo (CHIAVERINI, 1988).

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) divide os aços inoxidáveis em dois grandes grupos, em relação a sua composição: a série 400 e a série 300. A série 400 contém os aços ferríticos e os martensíticos, que são basicamente ligas magnéticas de Fe-Cr, a diferença entre eles é que os ferríticos têm uma concentração de cromo maior e a de carbono menor que os martensíticos. A série 300 engloba os aços inoxidáveis austeníticos, que consistem em ligas não magnéticas de Fe-Cr-Ni (CARBÓ, 2008).

2.1.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

A adição do níquel nos aços inoxidáveis possibilita alterar a estrutura ferrítica, transformando-a e estabilizando-a em uma estrutura austenítica (SOUZA, 2006; CARBÓ, 2008). A resistência a corrosão é ampliada, pois, a adição do Ni faz com que a película protetora se forme mais rapidamente do que a de um aço inoxidável sem Ni (CHIAVERINI, 1988).

O encruamento de um metal resume-se no endurecimento por deformação plástica. O endurecimento provém do aumento da tensão em função do aumento da

deformação plástica, diminuindo a mobilidade das discordâncias do aço, aumentando a quantidade delas, fazendo com que seja necessária uma tensão maior para provocar uma deformação plástica (LOPES, 2009). Para os aços inoxidáveis austeníticos, o encruamento é o método de endurecimento de metais mais utilizado, pelo fato de sua estrutura ser CFC (cúbica de face centrada) na temperatura ambiente, não sendo passíveis de tratamento térmico de endurecimento (TSCHIPTSCHIN, et al, 2010).

Os aços inoxidáveis austeníticos são suscetíveis a um tipo de corrosão intergranular, chamada sensitização. Quando este tipo de aço é submetido a temperaturas entre 450 e 850°C, o cromo pode combinar-se com carbonos livres resultando em um carboneto de cromo do tipo C_6Cr_{23} , que se localizam nos contornos de grão. O contorno do grão age como uma região catódica em relação à matriz vizinha, que fica empobrecida em cromo, e caso o material seja exposto nessas condições a um ambiente corrosivo o mesmo pode ser induzido a uma corrosão intergranular. A sensitização pode originar-se de tratamentos térmicos ou soldas (VIOTO, et al, 2016) (ZANETIC, et al, 2001).

A Figura 1 apresenta um exemplo de microestrutura com sensitização, pode-se observar como os contornos de grão ficam mais grossos e escuros.

Figura 1 - Microestrutura de um aço P430 com sensitização.



Fonte: (BARBOSA, 2006)

Segundo (VIOTO, et al, 2016) o tratamento térmico de solubilização pode ser utilizado para corrigir a sensitização, aplicando uma temperatura acima de 1040°C seguido de um resfriamento rápido, no ar ou na água.

2.1.2 Soldabilidade Dos Aços Inoxidáveis

Sendo a principal característica dos aços inoxidáveis a sua resistência à corrosão, ao soldar esse tipo de metal se faz necessário uma limpeza, para tentar evitar contaminações prejudiciais, e também, deve-se evitar que o cordão da solda tenha irregularidades que possam acumular sujeira e criar pontos que facilitam a corrosão. Adicionalmente, os aços inoxidáveis têm propriedades físicas diferentes dos outros aços, implicando diferenças nos procedimentos de soldagem (MODENESI, 2011).

Em relação à soldabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, como visto na seção anterior, estes são suscetíveis a sofrerem uma sensitização, para tentar corrigir esse problema na solda, e também problemas de distorção, é recomendado aplicar uma velocidade de soldagem maior, para redução da energia térmica. A distorção pode aparecer pelo fato do coeficiente de expansão térmica deste metal ser alto. Usualmente utiliza-se uma corrente de soldagem moderada, menor que a usada em aços doces por exemplo, devido à sua temperatura de fusão e sua condução de calor serem baixas. O aparecimento de trincas pode ocorrer no caso de uma solidificação com estrutura completamente austenítica, essa condição é amenizada utilizando um metal de adição que tenha como resultado uma solidificação austeno-ferrítica (MODENESI, 2011).

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO

No processo de soldagem por eletrodo revestido, também chamado de SMAW, *Shielded Metal Arc Welding*, ou MMA, *Manual Metal Arc*, o arco elétrico é mantido entre um eletrodo revestido e a peça a ser soldada, onde ocorre uma fusão

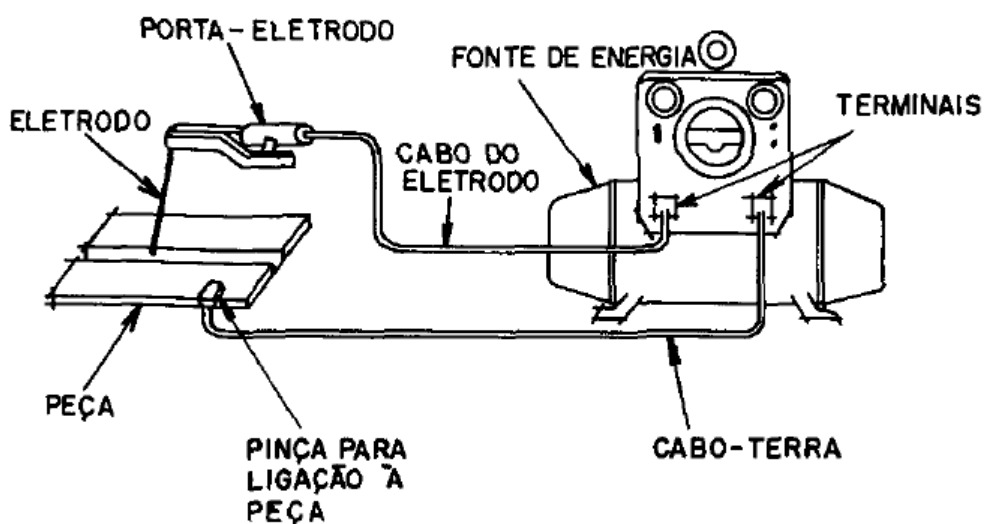
simultânea entre estes. O material fundido do eletrodo é repassado para o metal de base da peça, criando uma poça de fusão protegida pelos gases formados pelo revestimento do eletrodo. Adicionalmente, o revestimento produz uma camada de escória, a partir da queima de alguns elementos, que também tem como função proteger o cordão de solda (MICALLI JR, et al, 2002).

2.4.1 Equipamentos

O equipamento necessário para o processo de soldagem por eletrodo revestido apresenta, em relação aos outros métodos de soldagem, uma configuração muito simples, como mostra a Figura 2 (WAINER, et al, 1992).

É possível operar tanto com uma corrente alternada como com uma corrente contínua, sendo exigido que a fonte de energia seja capaz de manter uma corrente estável apesar das variações de tensão e comprimento do arco recorrentes na soldagem por eletrodo revestido (WAINER, et al, 1992).

Figura 2 - Equipamentos básicos para a soldagem com eletrodo revestido.



Fonte: Soldagem, Processos e Metalurgia (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

As fontes convencionais para soldagem a arco elétrico são compostas por geradores, transformadores e transformadores-retificadores. Transformadores são utilizados em CA e transformadores-retificadores são utilizados em CC, já os geradores são geralmente utilizados em CC, porém existem alguns que trabalham com CA. Porém, com o desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos, as fontes de energia convencionais para soldagem começaram a se tornar obsoletas, dando lugar para as fontes com controle eletrônico (MARQUES, et al, 2011).

Um dos tipos de fonte de energia com controle eletrônico mais comum são as inversoras, que contêm um transformador muito menor, aumentando a sua praticidade e ainda assim mantendo sua eficiência. Outra vantagem da inversora é a sua alta frequência, que permite reduzir a tensão (MARQUES, et al, 2011).

Os alicates de fixação do eletrodo se apresentam em dois formatos, o mais usual é em forma de garras que comprimem o eletrodo entre os contatos elétricos, através de uma mola, o outro tipo é na forma de pinças, utilizando o mesmo sistema de um mandril de furadeira (WAINER, et al, 1992). Os cabos devem ser maleáveis para facilitar a manipulação, e ainda assim executar a sua função primária, que é conduzir a corrente elétrica da fonte até o porta-eletrodos, geralmente são produzidos com cobre ou alumínio. Além disso, devem conter uma camada com material isolante que seja resistente a abrasão e sujeira (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Os equipamentos de proteção utilizados na soldagem por eletrodo revestido são, geralmente, roupas de proteção (luvas, aventais, sapatos, mangotes...) e um capacete com filtro protetor de radiação (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

2.4.2 Eletrodos Revestidos

Os eletrodos revestidos são compostos por um núcleo metálico, chamado de alma, e de um revestimento feito com materiais orgânicos e minerais. A alma é a parte que se funde ao metal de base, dessa maneira, deve ser constituída de um material similar ao da peça a ser soldada para não prejudicar suas propriedades mecânicas. A alma deve conter baixos teores de fósforo e enxofre, para evitar a fragilização no metal de solda, além disso, uma de suas principais funções conduzir a corrente elétrica. (MODENESI, et al, 2012) (MICALLI JR, et al, 2002).

Os revestimentos têm composições muito mais complexas, dado que eles são responsáveis por inúmeras funções (MICALLI JR, et al, 2002). Cada elemento que constitui o revestimento do eletrodo pode possuir mais de uma determinada função, sendo assim, detalhar estas funções se torna uma missão difícil. Ademais, certos constituintes têm seus efeitos alterados quando utilizados em atmosferas diferentes ou quando em contato de outros elementos. Em geral, as funções dos elementos do revestimento ficam em torno de: estabilização e abertura do arco, formação dos gases protetores da poça, formação da escória (agente fluxante), adição de componentes e ligas metálicas no depósito, melhorar as propriedades do revestimento (aderência, ductilidade etc.) e melhorar o processo de fabricação, como por exemplo, aperfeiçoar a extrudabilidade do eletrodo (WAINER, et al, 1992).

Os revestimentos podem ser separados em cinco classes principais, em relação a sua composição, que são: oxidante, ácido, rutilico, básico e celulósico. O quadro a seguir apresenta as características desses diferentes tipos de revestimentos (MARQUES, et al, 2011):

Quadro 1 - Tipos de revestimento para eletrodos com base na composição.

TIPO DE REVESTIMENTO	CARACTERÍSTICAS
Oxidante	A escória produzida é abundante, oxidante e de fácil remoção produzindo um cordão de aparência uniforme, porém tem baixa penetração e não é recomendado para aplicações de importância (baixo teor de carbono). Pode ser aplicado tanto em CC quanto em CA.
Ácido	Tem uma escória ácida abundante, porosa e de fácil remoção, com penetração média, porém, só pode ser aplicada em posições horizontais e planas devido a sua poça de fusão volumosa, além de baixa resistência a formação de trincas de solidificação. Utiliza CC ou CA.
Rutilico	Sua escória é abundante, densa e de fácil remoção. Usados de maneira geral, são versáteis, de fácil manipulação e produzem um cordão de aspecto uniforme. CC ou CA.
Básico	Escória protetora, reduz a formação de trincas de solidificação, produz soldas com baixo risco de

	fissuração e fragilização. Usado em soldagens que necessitam alta rigidez e que tenham grandes espessuras. Necessita cuidados especiais para armazenagem.
Celulósico	Pouca escória produzida, porém, sua composição orgânica gera uma quantidade alta de gases protetores. O arco é agressivo, com bastante respingos e tem elevada penetração. O cordão resultante é irregular. Recomendado para soldagens fora da posição plana.

Fonte: Informações retiradas de (MARQUES, et al, 2011).

2.4.3 Variáveis De Soldagem

Segundo MODENESI (2011), as variáveis do processo de soldagem a arco elétrico são divididas em quatro grupos básicos, que estão descritos no quadro a seguir:

Quadro 2 - Tipos de variáveis de soldagem.

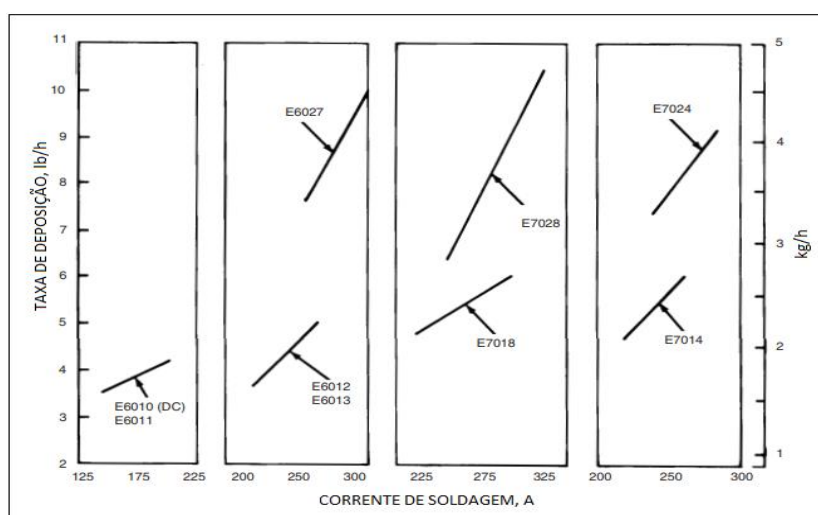
Grupo	Variáveis
Variáveis pré-determinadas	Tipo e espessura do metal de base, propriedades requeridas para o metal de solda e região afetada pelo calor
Variáveis de fundo	Processo de soldagem, tipo de equipamento, técnica básica de soldagem, projeto da junta, tipo de eletrodo, diâmetro do eletrodo
Variáveis secundárias	Stickout do eletrodo, posicionamento do eletrodo em relação à peça
Variáveis primárias	Corrente (tipo e valor), tensão, velocidade de soldagem

Fonte: (MODENESI, 2011).

A intensidade da corrente elétrica, além de controlar as características operatórias, como a velocidade de soldagem, de maneira preponderante, tem influência direta na taxa de deposição da solda, como mostra a Figura 3.

A seleção da corrente de soldagem para o processo do eletrodo revestido normalmente é feita com base no diâmetro do eletrodo, no catálogo do fabricante especifica-se a faixa de corrente ideal para soldagem, valores de corrente demasiadamente altos, levam a penetração excessiva, podendo furar a peça, além disso, aumenta a extensão da zona termicamente afetada e a energia de soldagem, diminui a velocidade de resfriamento, dentre outros efeitos negativos. Já valores muito baixos de corrente dificultam a abertura e estabilidade do arco elétrico, acarretam uma velocidade de resfriamento maior (principalmente quando comparadas peças de pequena espessura) e também diminui a velocidade de soldagem (ASIBELUO, et al, 2015) (WAINER, et al, 1992).

Figura 3 - Relação entre Taxa de Deposição e Corrente de Soldagem para Eletrodos de Aço Carbono de 4.8 mm.

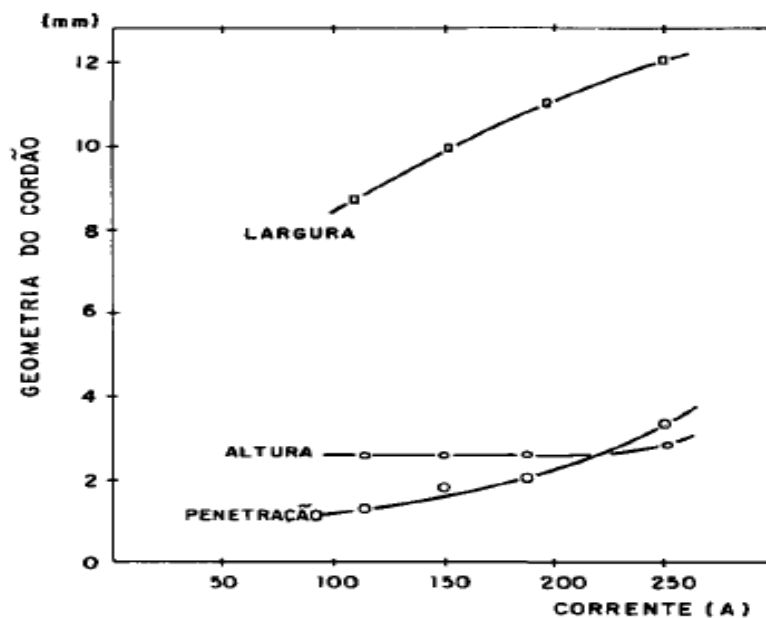


Fonte: Welding Handbook: Welding Processes, Part 1. 9ª ed. Vol 2 (AWS, 2004).

A intensidade da corrente elétrica também influencia nas dimensões do cordão de solda, como mostra a Figura 4. Nota-se que a largura e a penetração são mais influenciadas pela corrente do que a altura pois, uma maior corrente elétrica

implica em uma maior velocidade de soldagem e, a velocidade é inversamente proporcional à altura do cordão. (WAINER, et al, 1992).

Figura 4 – Influência da corrente de soldagem nas dimensões do cordão (eletrodo com 4mm de diâmetro).



Fonte: (WAINER, et al, 1992).

A velocidade de soldagem, como já citada, é um outro fator de grande impacto nas propriedades da soldagem por eletrodo revestido. Embora seu controle seja complicado recomenda-se, para que o cordão tenha boas propriedades, manter uma velocidade moderada, posicionando o arco elétrico sempre à frente da poça de fusão. Pouca velocidade pode produzir cordões muito largos e com penetração excessiva, já uma velocidade muito alta gera um cordão delgado, com baixa penetração e mordeduras. A velocidade de soldagem pode influenciar também na energia de soldagem (SILVA, 2017).

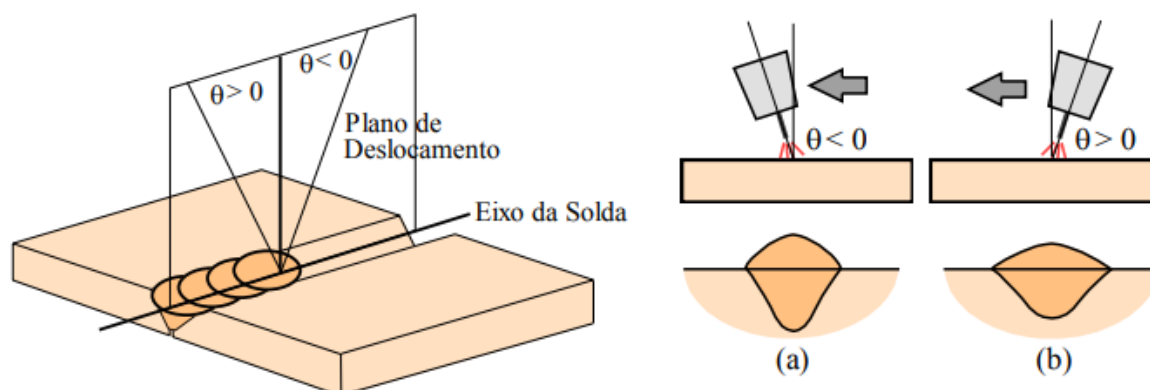
O diâmetro do eletrodo pode variar de 1 a 8 mm e é o principal fator na limitação do intervalo útil de corrente de soldagem, tendo em vista que ele é responsável pela densidade da corrente elétrica por unidade de área da seção transversal da alma (WAINER, et al, 1992). A espessura do metal a ser soldado é fator determinante para escolha do diâmetro do eletrodo, pelo fato que, por exemplo, uma chapa mais espessa exige correntes maiores para uma melhor penetração,

consequentemente, exige um eletrodo de diâmetro maior. Correntes muito baixas em relação ao diâmetro do eletrodo podem gerar instabilidade no arco e também aquecimento e fusão insuficientes, já correntes maiores que a máxima sugerida para certo diâmetro de eletrodo podem aquecê-lo excessivamente danificando o seu revestimento (MARQUES, et al, 2011).

No processo de soldagem por arco elétrico com eletrodos revestidos, a tensão de soldagem pode variar entre 17 e 36 V, esse parâmetro depende da corrente de soldagem, do diâmetro do eletrodo e do comprimento do arco e tende a aumentar com o aumento destes parâmetros. O comprimento do arco depende da habilidade do soldador e é importante para a estabilidade do arco e para a obtenção de uma solda aceitável (MARQUES, et al, 2011).

O ângulo de deslocamento eletrodo é uma variável de difícil controle, pois depende diretamente da perícia do operador da solda, ainda assim, tem alta importância na produção de um cordão de solda com formato regular e com poucos defeitos além de ajudar no controle do metal líquido na poça de fusão (WAINER, et al, 1992). O ângulo de deslocamento do eletrodo é definido como o ângulo formado entre o plano normal à face da solda e o eletrodo, como mostra a figura 5. Em função desse ângulo, o processo de soldagem pode ser feito “puxando” ($\theta < 0$) ou “empurrando” ($\theta > 0$) a poça de fusão (MODENESI, 2011).

Figura 5 - Angulo de soldagem.



Fonte: (MODENESI, 2011).

Além destas variáveis, Marques e Modenesi (2014) descrevem uma outra propriedade tem bastante influência na condição final da junta soldada, a energia de soldagem. Definida como a energia liberada pela fonte de calor por unidade de comprimento da solda, é de grande utilidade para avaliar os efeitos da soldagem sobre as propriedades mecânicas e microestruturais da junta soldada. A equação de energia de soldagem é dada conforme a Equação 1:

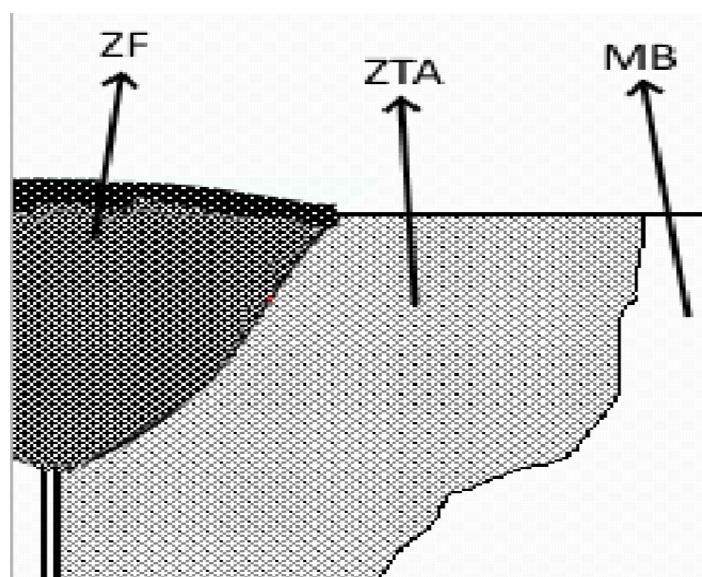
$$Q = \frac{1}{vT} \int_0^T VI dt \approx \frac{VI}{v} \quad (1)$$

Onde Q é a energia de soldagem, em Joules por centímetro; V é a tensão de soldagem, em Volts; I é a corrente de soldagem, em Amperes; v é a velocidade de soldagem, em centímetros por segundo.

2.5 REGIÕES DA JUNTA SOLDADA

Um exame microestrutural da junta soldada evidencia que existem distintas regiões que podem ser observadas, a Figura 6 mostra um desenho representativo destas regiões. Uma delas, a zona fundida (ZF), é assim descrita pois é nesta região que ocorre a formação da junta, por meio da fusão e da solidificação tanto do metal de base quanto do metal de adição. A zona termicamente afetada (ZTA) é uma região que, apesar de não sofrer fusão, tem sua microestrutura e propriedades afetadas pelas condições térmicas apresentadas durante e após a soldagem. Além da ZTA ainda existe a região do metal de base que não é afetada pela solda (LIPPOLD, 2015).

Figura 6 - Regiões da junta soldada



Fonte: Autoria própria.

2.5.1 Zona Fundida

A zona fundida é representada pela poça de fusão, onde ocorre uma fusão e uma solidificação completa da junta soldada. Geralmente, esta região é microestruturalmente diferente da zona termicamente afetada ao seu redor. Quando se utiliza um metal de adição com composição diferente do metal de base, a zona fundida se divide em três partes: a zona do composto (ZC) é a maior delas e corresponde na região onde o metal de adição está diluído uniformemente com o metal de base, adicionalmente à ela estão as outras duas zonas, a zona não-misturada (ZNM) onde o metal de base e o metal de adição não se misturaram completamente, e entre a ZNM e a ZC fica a zona de transição (ZT) (LIPPOLD, 2015).

Para LIPPOLD (2015), existem três tipos definidos de zonas fundidas, com base no uso ou não de metal de adição e na composição desse metal de adição em relação ao material de base. O primeiro tipo é chamado de solda autógena, que correspondem a soldas que não utilizam metal de adição, onde a zona fundida é composta pelo metal de base. O segundo é definido como solda homogênea, neste tipo o metal de adição possui composição química similar ao metal de base, formando uma zona fundida uniforme. O último tipo é a solda heterogênea, aqui, diferentemente da homogênea, o metal de adição tem uma composição desigual a do metal de base, formando uma zona fundida com estrutura irregular.

A estrutura básica de solidificação da zona fundida é de grãos dendríticos orientados contra o sentido de extração de calor da poça de fusão. Porém, alterações dessa morfologia podem ser observadas principalmente em ligas transformáveis, como os aços carbonos, onde, após a solidificação, o material ainda sofre transformações de fase no estado sólido antes de atingir a temperatura ambiente (MODENESI, et al, 2012).

2.5.2 Zona Termicamente Afetada

A zona termicamente afetada, ou ZTA, é uma região da solda que recebe alterações nas suas propriedades microestruturais, devido aos efeitos causados pela energia térmica da soldagem, entre outros fatores. O tipo de material e a condição microestrutural deste antes da solda, o processo de soldagem em si e a taxa de aquecimento e resfriamento são variáveis que podem interferir na forma final da microestrutura após a soldagem (LIPPOLD, 2015).

Os fenômenos que ocorrem na ZTA são complexas e dão-se de várias maneiras possíveis, em toda a extensão da ZTA podem ocorrer as seguintes reações: recristalização, crescimento de grão, transformações de fase, formação e dissolução ou super-envelhecimento de precipitados, alívio de tensões e tensões residuais (LIPPOLD, 2015).

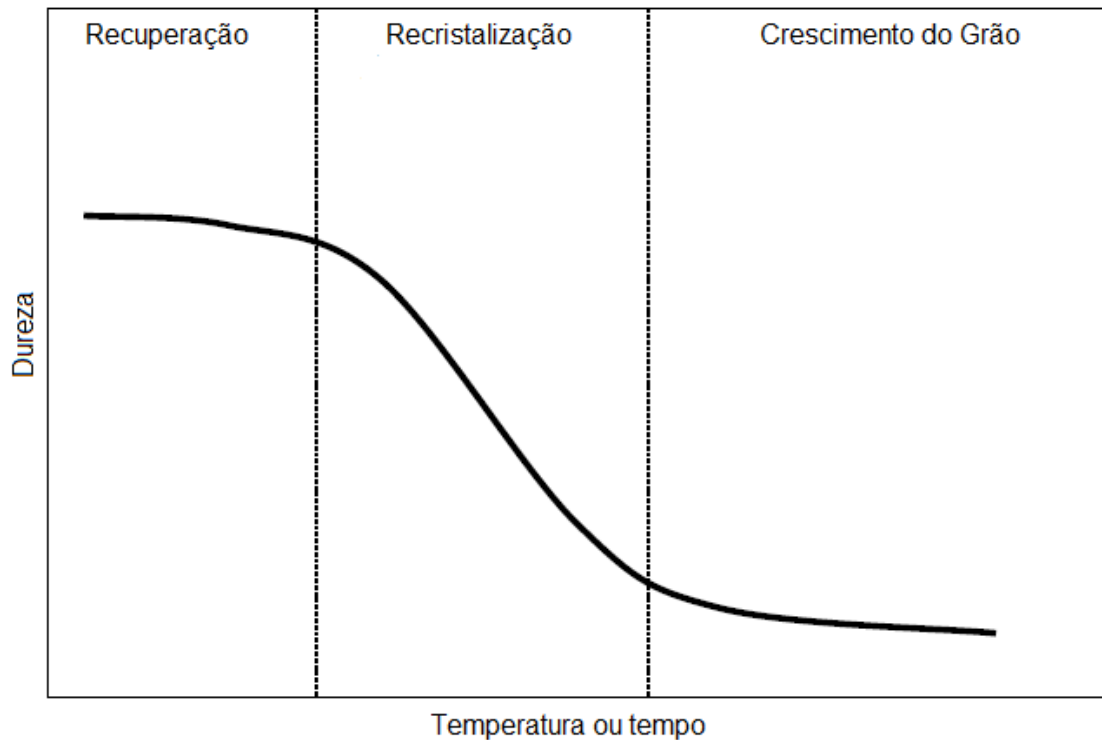
2.5.2.1 Recristalização e crescimento de grão

Em soldagens com materiais que foram endurecidos por trabalhos a frio ocorre uma redução da dureza na região da ZTA, devido a recristalização e o crescimento do grão que acontece nessa região. Esse processo é dividido em três partes: recuperação, recristalização e crescimento do grão (figura 7).

Durante a recuperação, um rearranjo das discordâncias ocorre, diminuindo a energia interna, esse processo cria regiões livres de tensão que fazem o papel de núcleos para os novos grãos formados (LIPPOLD, 2015). Na recristalização, as

discordâncias têm sua densidade reduzida, conforme o novo grão cresce. Esse crescimento de grão ocorre na medida que os novos núcleos, originados pelas regiões livres de tensões, aumentam os contornos desse próprio grão (BARBOSA, et al, 2004).

Figura 7 - Variação da dureza em função da recristalização e crescimento de grão de materiais trabalhados à frio.



Fonte: (LIPPOLD, 2015)

O crescimento do grão continua em função da variação da temperatura, do tempo e da composição química do material. Da maneira que o tamanho do grão aumenta, a área total de contornos de grão diminui, diminuindo também a energia mecânica associada a eles. Isso também resulta numa queda na dureza do material nessa região, por isso, é recomendado o controle do crescimento do grão, para evitar a redução excessiva das propriedades mecânicas do metal (LIPPOLD, 2015) (BARBOSA, et al, 2004).

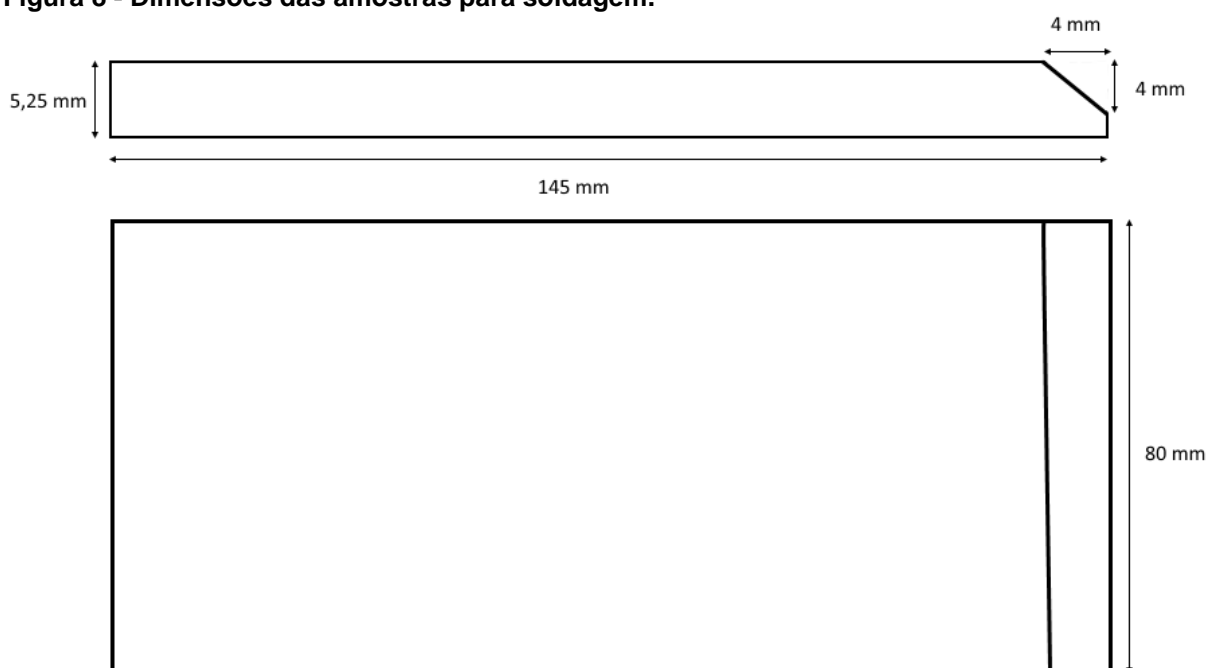
2.5.2.2 Reações de precipitação

Durante o resfriamento da solda, reações de precipitação podem ocorrer, nas áreas da ZTA onde aconteceram dissoluções no aquecimento do material. O grau de precipitação depende da taxa de resfriamento e da composição do material. Em alguns casos, esse fenômeno é benéfico, pelo fato de que ele pode endurecer o metal em questão, mas em outros casos, como em aços inoxidáveis ricos em cromo, esse fenômeno é prejudicial, tendo em vista que ele diminui a resistência a corrosão desses metais (LIPPOLD, 2015).

3 METODOLOGIA

Inicialmente 8 amostras do aço SAE 316L foram cortadas e chanfradas, conforme a figura 8.

Figura 8 - Dimensões das amostras para soldagem.



Fonte: Autoria própria.

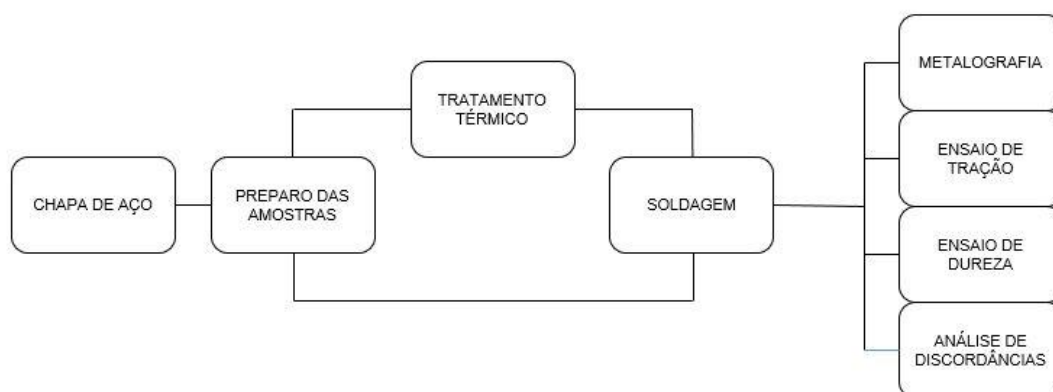
O tratamento térmico de recozimento pleno foi aplicado em 4 amostras, visando alterar a condição inicial do metal, recuperando-o da sua condição encruada.

A solda foi realizada em todas as amostras, com dois diferentes parâmetros de corrente elétrica, resultando em 4 corpos de prova soldados.

Executou-se o estudo das propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados por meio de ensaios mecânicos de tração e de dureza. Foi realizado a análise metalográfica do aço, para verificar as características microestruturais da junta soldada.

A Figura 9 ilustra um esquema com as etapas da metodologia do presente trabalho.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia do trabalho.



Fonte: Autoria própria.

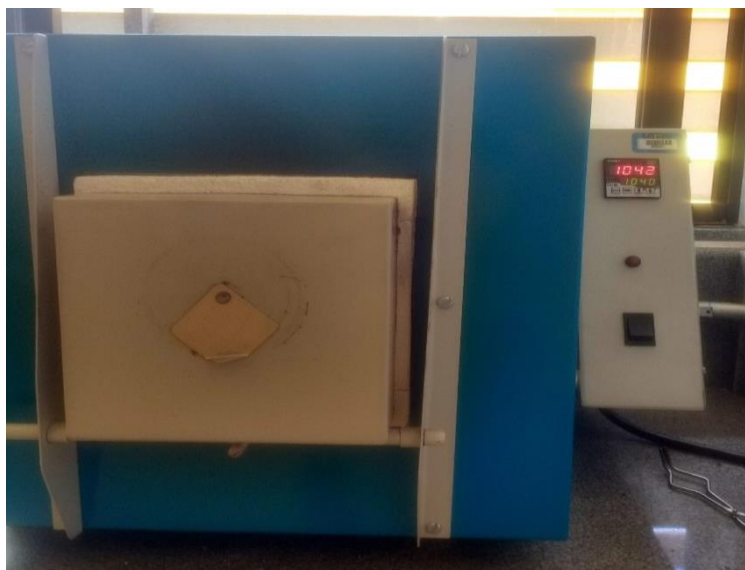
3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS

Uma chapa de aço, inicialmente medindo 30x180 cm e com 5,25 mm de espessura, foi cortada em oito amostras menores com as dimensões de aproximadamente 80 mm de largura, 145 mm de comprimento. Para o corte foi utilizado uma esmerilhadeira com disco de corte para aços inoxidáveis.

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

Quatro das oito amostras foram submetidas ao tratamento térmico de recozimento pleno. Foi utilizado o forno mufla (Fotografia 2) do laboratório de ensaios mecânicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Guarapuava, que foi aquecido a 1040°C, onde as chapas de aço permaneceram nesta temperatura por duas horas para depois resfriarem lentamente dentro do forno.

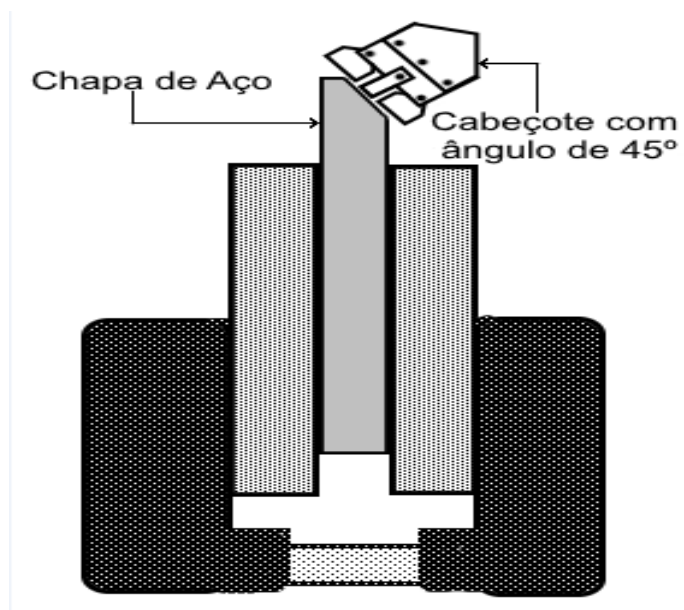
Fotografia 1 - Mufla utilizada para o tratamento térmico.



Fonte: Autoria própria.

Após o tratamento térmico, tanto as chapas tratadas quanto as sem tratamento foram chanfradas para garantir a penetração total do cordão de solda. O chanfro foi feito em uma fresadora Diplomat no laboratório de usinagem da UTFPR-GP, empregando um ângulo de 45° , como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Desenho esquemático do posicionamento da fresa para usinagem do chanfro.



Fonte: Autoria própria.

Após a usinagem, as chapas foram limpas com escova de aço e esmeril, para remoção de rebarbas e outros tipos de impurezas, ficando prontas então para serem soldadas.

3.3 SOLDAGEM

A soldagem das amostras foi efetuada com uma máquina de solda TIG/MMA AC/DC Lion 300, utilizando corrente contínua. As condições de soldagem utilizados estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de soldagem.

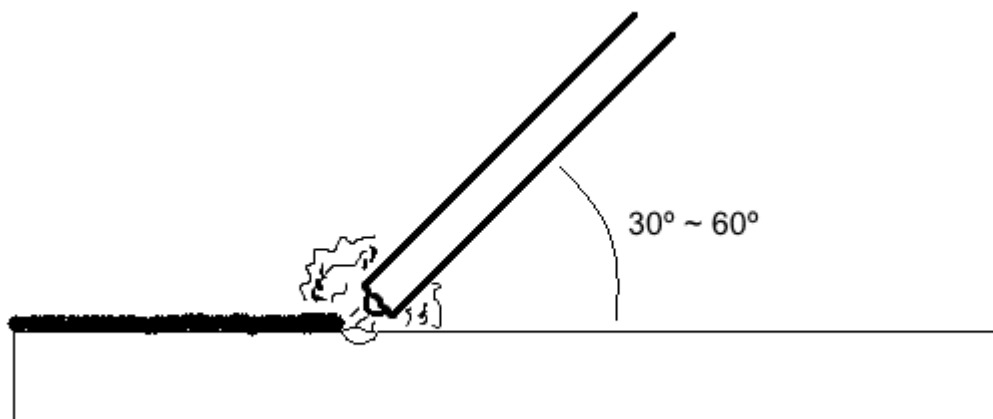
Corrente de Soldagem	Condição Inicial
70 A	Encruado
70 A	Recozido
90 A	Encruado
90 A	Recozido

Fonte: Autoria própria

O eletrodo utilizado foi o OK 6130 que possui 3,25 mm de diâmetro e 350 mm de comprimento, da marca ESAB, que é um eletrodo para soldagem de aços inoxidáveis, com classificação na ASME é E308-17. Esse eletrodo possui revestimento do tipo rutilico e alma metálica composta por: 0,03% de C, 0,8% de Si, 0,8% de Mn, 19,6% de Cr e 9,9% de Ni.

O posicionamento utilizado do eletrodo está ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Posicionamento do eletrodo revestido na soldagem SMAW.



Fonte: Autoria própria.

Para assegurar que as amostras não se movimentassem e que não empenassem durante o procedimento de soldagem, sua fixação foi feita com dois alicates de pressão. A Fotografia 3 ilustra como foram posicionadas as amostras.

Fotografia 2 – Fixação das amostras para soldagem, utilizando dois alicates de pressão.



Fonte: Autoria própria.

Previamente à soldagem, as chapas foram ponteadas. O tecimento empregado foi de movimentos circulares, pois constatou-se por testes prévios que este tipo de movimento é mais prático e eficiente no preenchimento do chanfro. Outros tipos de movimentos como cordões lineares, meia lua e em Z foram testados e descartados, por resultarem em cordões de solda irregulares e de baixa qualidade.

Através da filmagem das operações, o tempo de soldagem foi medido, para posteriormente calcular a velocidade e a energia de soldagem. O comprimento do eletrodo foi medido antes e depois da soldagem, para uma avaliação e cálculo do volume de metal de adição depositado.

Após o resfriamento ao ar dos corpos de prova e remoção das escórias, suas dimensões foram medidas com um paquímetro.

3.4 ANÁLISE DAS DISCORDÂNCIAS

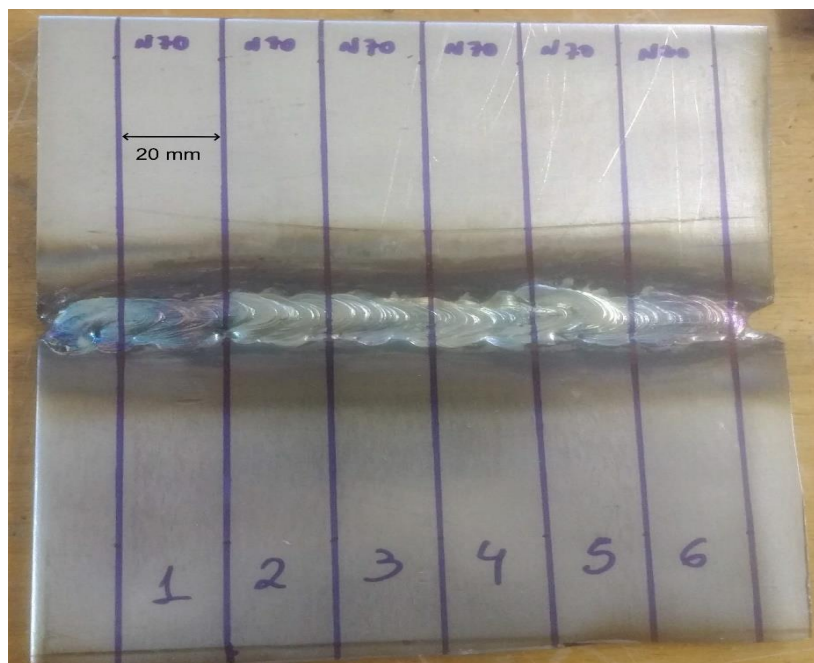
Para uma análise de discordâncias um ensaio de líquidos penetrantes foi aplicado, utilizando o líquido penetrante SKL-WP e o revelador não aquoso SKD-S2, ambos da Spotcheck.

Outras análises foram feitas através da avaliação visual do aspecto cordão soldado.

3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

A fotografia 4 mostra a disposição dos cortes feitos com uma esmerilhadeira e um disco de corte para aços inoxidáveis, os corpos de prova foram usinados em uma fresadora nas dimensões de 19 a 20 mm de largura, 5,25 mm de espessura e comprimentos na faixa entre 78 e 85 mm.

Fotografia 3 - Exemplo de disposição dos cortes para corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

A tabela 1 apresenta as dimensões finais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração. Os corpos de prova são definidos em relação condição do metal, aqueles denominados L são corpos de prova provenientes das peças laminadas e os denominados R são aqueles que foram retirados das peças recozidas. Seguindo a letra que denomina a condição do metal vem a intensidade da corrente em amperes e o número do corpo de prova, por exemplo, o corpo de prova 1 extraído da amostra laminada e soldada com uma corrente de 70 A é intitulado de L701.

Para os ensaios de tração, a máquina de ensaio universal Emic DL 30000N do laboratório de materiais da UTFPR-GP foi utilizada e os valores de alongamento foram obtidos por meio deslocamento registrado pelo software do equipamento. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada parâmetro analisado, estes foram fixados com 3 cm em cada garra da máquina e o comprimento foi medido antes e depois para avaliação da deformação do teste.

Tabela 1 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração em mm.

Corpo de prova	Largura	Espessura da chapa	Espessura do cordão	Comprimento total	Comprimento Útil
L701	20,4	5,25	6,20 – 6,48	165	105
L702	20,8	5,25	5,8 – 6,1	164	104
L703	20,35	5,25	6,05 – 6,22	162	102
R701	20	5,25	6,2 – 6,4	165	105
R702	19,6	5,25	5,8 – 6,4	164	107
R703	20,8	5,25	5,2 – 5,9	165	107
L901	20,2	5,25	5,2 – 5,6	160	100
L902	20,4	5,25	5,4 – 6,2	159	100
L903	19,3	5,25	5,3 – 5,4	157	96
R901	20,15	5,25	5,95 – 6,7	159	100
R902	20,3	5,25	6,05 – 6,34	159	100
R903	21,15	5,25	6,6 – 6,7	159	100

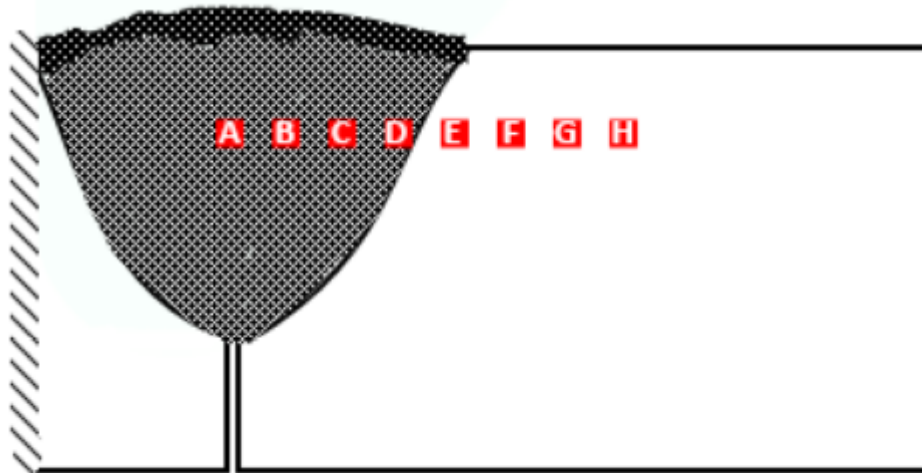
Fonte: Autoria própria

3.6 ENSAIO DE DUREZA

Medidas de dureza foram realizadas ao longo da seção transversal do cordão de solda, como mostra a figura 12.

O ensaio de dureza foi feito no durometro do laboratório de materiais da UTFPR-GP, a escala utilizada para verificação foi a Rockwell B, utilizando um penetrador esférico de 1/16", pré-carga de 10 kgf e uma carga principal de 100kgf. Os testes foram realizados ao longo da seção longitudinal do corpo de prova da solda até que fosse atingido um ponto onde a composição predominante fosse de metal base, totalizando 8 pontos onde os testes foram realizados.

Figura 12 - Pontos (A, B, C...) onde foram executados os testes de dureza.



Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas 4 baterias de ensaios de dureza para cada parâmetro variado e, ao fim dos ensaios, foi feita a média e o desvio padrão destes resultados.

3.7 ANÁLISE METALOGRAFICA

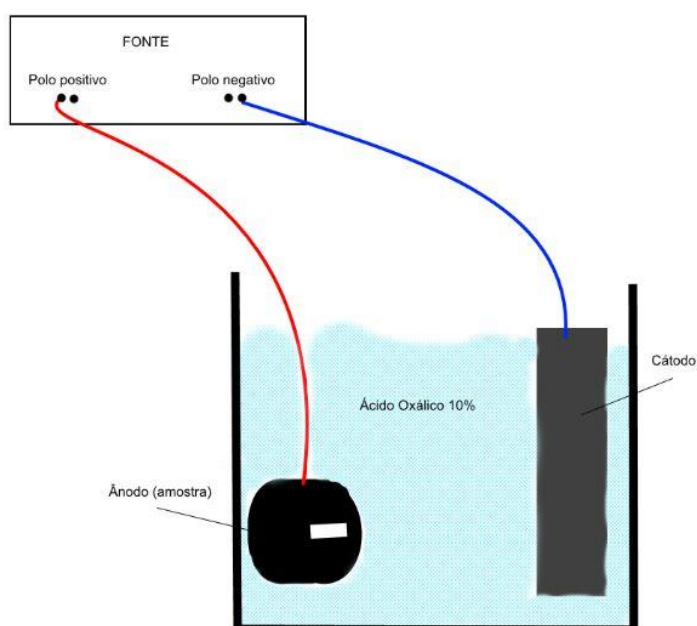
A preparação para a análise metalográfica se iniciou com o corte das amostras, utilizando uma cortadora metalográfica CM 60 da teclago com discos de corte abrasivos. Após o corte as amostras foram embutidas a quente em moldes de baquelite em uma embutidora metalográfica Teclago EM30D. Os embutimentos foram realizados a uma pressão de 100 bar, a uma temperatura de 170°C por um tempo de 5 minutos.

O lixamento foi realizado de forma manual com lixas da água de granulometria 320, 600 e 1200, e na sequência uma poltriz metalográfica semiautomática foi utilizada para polir as amostras com alumina de 1 μm , 0,5 μm e pasta de diamante de 0,3 μm .

Com um intuito de revelar a microestrutura do material foi necessário realizar um ataque químico. Dada a característica dos aços inoxidáveis, essa etapa acabou se tornando um dos grandes desafios do trabalho. Diversos tipos de reagentes em diversas concentrações foram testados. Contudo, o ataque eletroquímico com ácido oxálico 10% se mostrou o mais eficiente em revelar os contornos de grão do aço inoxidável austenítico 316L, fazendo o uso de uma fonte e de um agitador, realizando assim um ataque eletrolítico forçado, para que a corrosão ocorra efetivamente (FILHO, 2013).

O ataque eletrolítico forçado consistiu na indução de uma corrente elétrica entre a amostra e um outro metal, imersos em um meio condutor, de modo a gerar uma diferença de potencial para que a corrosão aconteça (FILHO, 2013). Para expor a estrutura da amostra, a corrosão deve ocorrer na sua superfície da amostra, deste modo, o polo positivo (cátodo) da fonte é ligado na amostra, transformando-a no ânodo desse sistema (Figura 13). Um outro pedaço de metal é conectado ao ânodo da fonte, assumindo assim, o papel do cátodo do sistema. O ataque foi aplicado por 90 segundos a uma tensão de 11V, o que gerou uma corrente de 1.62 A.

Figura 13 - Setup para o Ataque Elérolítico com Ácido Oxálico 10%.



Fonte: Autoria própria

3.7.1 Microscopia

As imagens dos cordões de solda foram obtidas com o auxílio do microscópio BX51 da marca Olympus do laboratório de materiais da UTFPR Câmpus Guarapuava. Para as macroscopia, diversas imagens de toda a secção transversal da junta soldada foram tiradas com a lente de 100 vezes de aumento, e em seguida foram unidas para mostrar a totalidade da junta soldada.

Já as micrografias foram realizadas com as lentes de 500 vezes de aumento como o objetivo de avaliar como a corrente elétrica de soldagem e o recozimento influenciam o metal de base e a formação da ZTA e da ZF.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE DISCORDÂNCIAS

Neste capítulo, parâmetros operacionais como a facilidade de manuseio da solda e as características da junta soldada como a qualidade do cordão serão apresentados e discutidos.

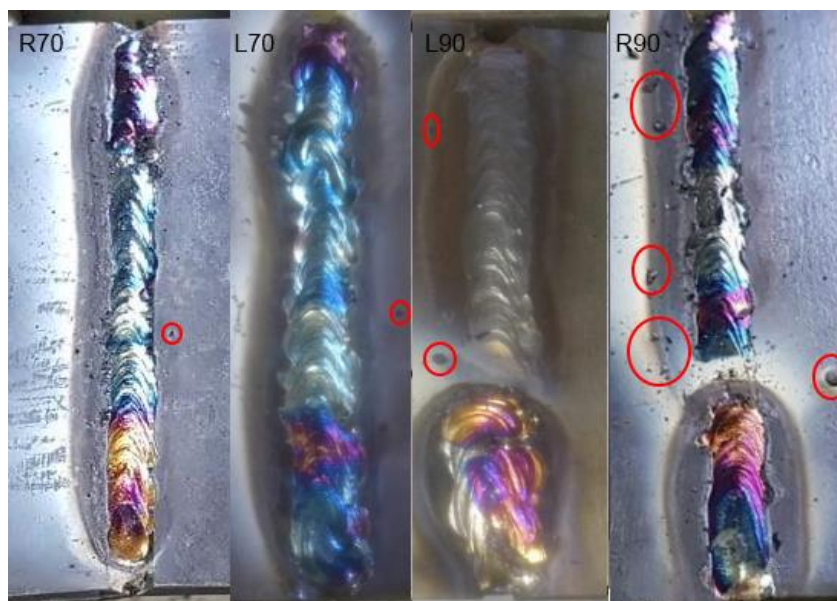
A soldagem do aço inoxidável austenítico pelo processo de eletrodo revestido revelou-se não tão trivial quando comparada a juntas de aços carbono mais tradicionais, ainda mais se tratando de uma junta chanfrada, sendo necessário bastante treinamento antes de efetuar as juntas soldadas que foram estudadas neste trabalho. A abertura do arco elétrico requer destreza e quanto menor a intensidade da corrente utilizada, mais difícil fica para abrir o arco, sendo assim, a solda em que a corrente de 90 A foi empregada apresentou uma abertura de arco mais simples comparada a soldagem a 70 A.

Além disso, a estabilidade do arco foi maior quando utilizada a corrente de 90 A, tornando o manuseio do eletrodo mais fácil. Apesar disso, as soldas de 70 A geraram menos respingos e apresentaram um arco elétrico menos intenso.

O ângulo de soldagem foi determinante para a qualidade da solda, uma vez que quando um ângulo de 90° do eletrodo em relação ao cordão era utilizado, o revestimento acaba penetrando na poça de fusão, gerando inclusões. Além do mais, quando se utilizou de um ângulo de aproximadamente 45° em relação a peça obteve-se uma melhor penetração do cordão, bem como uma menor ocorrência de defeitos e um cordão com melhor aparência.

Ainda com relação a qualidade da junta soldada, no caso em que uma corrente de soldagem de 90 A é empregada, o aspecto do cordão ficou mais uniforme e limpo, o que pode ser evidenciado na figura 14. Também é possível observar que os respingos, destacados em vermelho, próximos as juntas L90 e R90 são maiores que nas soldas L70 e R70.

Figura 14 - Cordões de solda logo após a soldagem.



Fonte: Autoria própria.

As características da escória proporcionada pelo eletrodo ASME E308-17 foram as mesmas em todas as soldas realizadas. Foram obtidas escórias uniformes e de fácil destacabilidade, sendo que em alguns casos saltaram de maneira espontânea, como as regiões destacadas em amarelo na figura 13. Entretanto, em alguns pontos da junta, principalmente no pé do cordão, a escória acabou penetrando no cordão, sendo difícil remove-la.

É possível identificar também na figura 15, as juntas apresentaram uma oxidação aparente, no entorno da solda, isso indica que os gases de proteção gerados pelo eletrodo ASME E308-17 não foram suficientes para proteger a totalidade do entorno da solda.

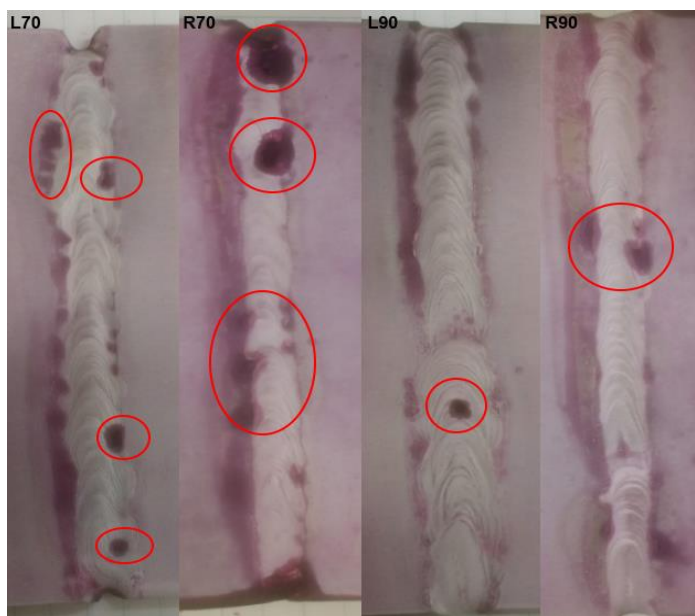
Figura 15 - Aspecto da escória da junta soldada.



Fonte: Autoria própria.

A análise qualitativa dos cordões de solda foi complementada por um ensaio de líquidos penetrantes e os resultados podem ser visualizados na figura 16.

Figura 16 - Ensaio de Líquidos penetrantes.



Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 16, observa-se que as soldas produzidas com uma corrente elétrica de soldagem menor apresentaram maiores descontinuidades, na forma de poros e imperfeições. Os cordões de soldas feitos com corrente elétrica maior obtiveram uma poça de fusão mais uniforme.

4.2 Parâmetros quantitativos

As correntes usadas para a soldagem das peças foram de 90 e 70 amperes, e juntamente com o tempo de soldagem que foi cronometrado, os valores da velocidade, tensão e energia de soldagem foram calculados. A energia de soldagem foi calculada utilizando a Equação (1), a tensão usada nessa equação foi obtida pela regressão linear a partir dos parâmetros da máquina de solda.

Além destes parâmetros, os valores de taxa de deposição e a altura média e máxima do cordão são apresentados na tabela 2. A taxa de deposição foi calculada pelo volume da alma metálica depositado.

Tabela 2 - Parâmetros Qualitativos da Soldagem

Solda	<i>i</i> (A)	<i>U</i> (V)	<i>t</i> (s)	<i>v</i> (cm/s)	Δd (g/s)	<i>Hcm</i> (mm)	DP (mm)	Q (kJ/cm)
L90	90	23.6	85	0.171	0.3304	5.4	0.360	12.42
L70	70	22.8	80	0.181	0.2556	6.08	0.372	8.82
R90	90	23.6	88	0.165	0.2837	6.34	0.357	12.87
R70	70	22.8	74	0.196	0.2675	6.05	0.458	8,14

Fonte: Autoria própria.

Para esclarecimento, *i* é a corrente de soldagem medida em Amperes (A); *U* é a tensão medida em Volts (V); *t* é o tempo em segundos (s); *v* é a velocidade de soldagem em centímetros por segundo (cm/s); Δd é a taxa de deposição em gramas por segundo (g/s); *Hcm* é altura média do cordão de solda em milímetros (mm); DP é o desvio padrão da média das alturas do cordão de solda; Q é a energia de soldagem medida em kiloJoule (kJ/cm).

Com a análise dos dados da tabela 2, nota-se que com o aumento da corrente houve um aumento do tempo de soldagem, e conseqüentemente uma diminuição da velocidade. Porém, como visto em (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011), a velocidade de soldagem deve ser aplicada de maneira a posicionar o arco elétrico sempre à frente da poça de fusão. A queda da velocidade em relação ao aumento da corrente ocorrida neste trabalho, foi devido à ocorrência de uma maior penetração, levando a um preenchimento do chanfro mais demorado e, conseqüentemente, o reposicionamento do arco elétrico para cada passo levou mais tempo, diminuindo a velocidade de soldagem.

Outro parâmetro que sofre alteração com a variação tanto da corrente quanto da velocidade de soldagem é a energia de soldagem. A energia de soldagem está ligada diretamente com o aporte térmico que é a quantidade de energia, que é efetivamente transferida da fonte para a peça que está sendo soldada (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992).

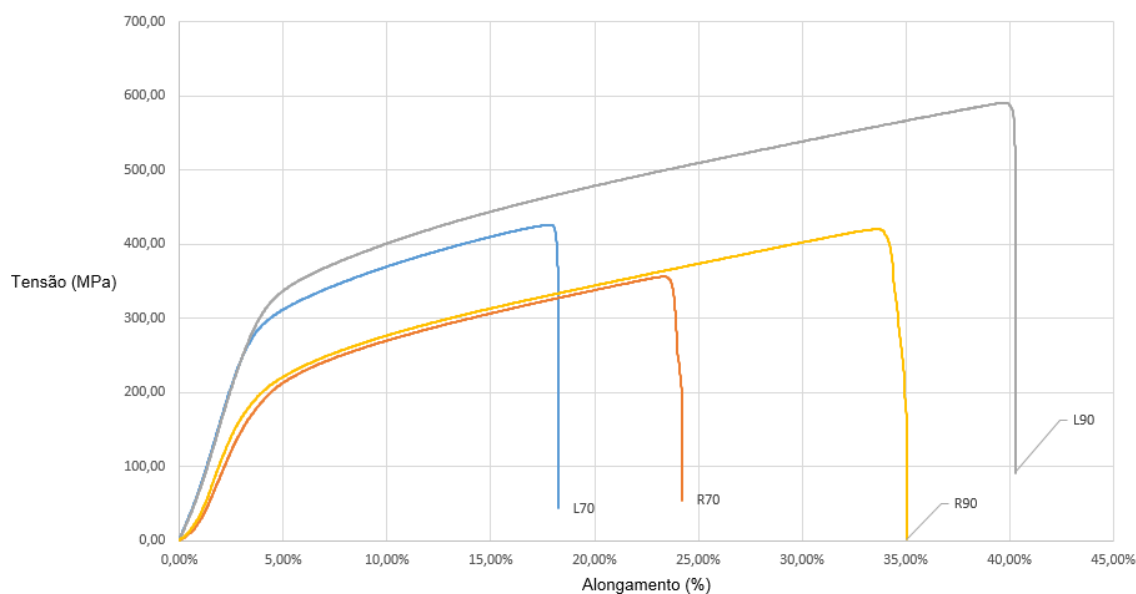
Por meio da equação 1 é possível notar que uma maior corrente e uma menor velocidade de soldagem levam valores de energia de soldagem maiores e como bem descrevem (WAINER; BRANDI; DE MELLO, 1992) e (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011) valores de energia maiores afetam diretamente o ciclo térmico durante a soldagem, seja aumentando as temperaturas de pico nos mais diversos pontos da junta sendo soldada, ou também aumentando os tempos de retenção e/ou diminuindo a velocidade de resfriamento. Isso pode acarretar, por exemplo, em maiores penetrações do cordão de solda, maior coeficiente de diluição, maior fusão do metal de base, porém a ZTA pode se tornar mais extensa.

No caso específico dos aços inoxidáveis, LIPPOLD (2015) evidencia que um maior tempo de retenção ocasionado pela menor taxa de resfriamento pode favorecer a precipitação de uma quantidade maior de carbeto nos contornos de grão da junta soldada.

4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os gráficos obtidos por meio dos ensaios de tração podem ser visualizados no gráfico 1, na imagem estão apresentados os resultados de apenas uma amostra de cada parâmetro, os demais gráficos estão presentes nos anexos A, B, C e D.

Gráfico 1 - Comparativo das Linhas de Tensão x Deformação das Amostras Soldadas (Ensaio de Tração).



Fonte: Autoria própria.

Por meio do gráfico tensão x deformação é possível notar que as amostras soldadas na condição laminada apresentam tanto uma tensão de escoamento quanto um limite de resistência a tração superior às amostras soldadas na condição recozida. Isso sugere que a resistência mecânica da solda está intrinsecamente ligada com a resistência mecânica do metal de base.

Nota-se também que a corrente de soldagem também teve uma influência significativa em relação a resistência mecânica, onde uma intensidade de corrente mais elevada gerou uma penetração de soldagem e uma fusão dos metais maior, fazendo com que o metal base e metal de adição resultassem uma união mais resistente. Com o objetivo de melhor entender o comportamento do aço inoxidável AISI 316L frente ao tratamento térmico e a corrente de soldagem os dados de módulo de elasticidade, alongamento, tensão máxima e tensão de escoamento estão apresentados nas tabelas 3 e 4. Os valores em vermelho foram desconsiderados nos cálculos de média e desvio padrão por serem muito discrepantes.

Tabela 3 - Módulo de elasticidade e Alongamento obtidos pelo ensaio de tração das amostras soldadas.

	Módulo de elasticidade (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (%)	Alongamento (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
L701	8114.45			18.27		
L702	7959.80	7748.64	4.43	20.02	19.15	6.46
L703	7531.80			7.94		
R701	4670.47			21.57		
R702	4383.20	4545.49	8.18	24.23	21.72	11.25
R703	6212.16			19.35		
L901	8092.94			40.28		
L902	8965.98	8207.18	6.65	41.30	40.24	2.69
L903	7515.75			39.14		
R901	5227.11			35.04		
R902	4773.88	5159.93	10.61	32.59	35.14	7.39
R903	5944,47			37.78		

Fonte: Autoria própria.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, aparentemente a condição inicial do metal de base tem um efeito mais contundente do que a variação da corrente, onde o tratamento térmico gerou uma queda de 41.34% no caso das amostras soldadas a 70 A e de 37.13% no caso das amostras soldadas com 90 A. Esse fato ocorreu porque o módulo de elasticidade é uma medida que leva em consideração a deformação elástica do corpo de prova como um todo, dessa forma, a região soldada tem uma dimensão pequena quando comparada ao corpo de prova inteiro, gerando um impacto muito menor nesta propriedade mecânica. Apesar de pouco significativo, a intensidade da corrente teve uma pequena influência no módulo de elasticidade, nas amostras laminadas esse aumento foi de 5.92% e nas amostras recozidas o aumento foi de 13.52%.

Com relação ao alongamento final do corpo de prova, não se pode traçar um comportamento claro dos corpos de prova no que diz respeito a condição do metal de base, onde para as amostras soldadas a 70 A a condição recozida teve um alongamento 2% maior, porém, para a corrente de 90 A a condição recozida teve um

alongamento 5% menor. Os gráficos de todos os ensaios, dispostos nos anexos, demonstraram um comportamento parecido ao Gráfico 1, reafirmando essa hipótese.

Já com relação a corrente de soldagem, o alongamento aumentou consideravelmente com o aumento da corrente de soldagem, onde as amostras laminadas apresentaram um aumento mais acentuado, de 21.09%. O esperado para este trabalho seria que, em ambos os valores de corrente, a condição recozida apresentasse um alongamento maior, porém, isso não foi observado. Acredita-se que esse fato está ligado com uma possível falta de fusão e de penetração associada a correntes de soldagem menor, da mesma maneira que ocorre no parâmetro de resistência mecânica. Essa falta de penetração gera regiões de concentração de tensão, levando os corpos de prova a não suportar uma deformação tão apreciável quanto os corpos de prova soldados com uma corrente maior.

Tabela 4 - Tensões Máxima e de Escoamento obtidas pelo ensaio de tração das amostras soldadas.

	Tensão Máxima (MPa)	Média da Tensão Máxima (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Média da Tensão de Escoamento (MPa)
L701	426.07		306.87	
L702	438.69	432,38	314.45	310.66
L703	327.30		264.92	
R701	336.23		240.75	
R702	356.38	344.25	253.72	246.08
R703	340.13		243.77	
L901	590.38		367.97	
L902	560.17	581.92	336.70	356.79
L903	595.20		365.76	
R901	422.40		244.13	
R902	369.16	427.80	237.69	242.94
R903	433.40		246.99	

Fonte: Autoria própria.

Além dos dados de alongamento e módulo de elasticidade, o gráfico de tensão e deformação também apresenta resultados de tensão máxima e de escoamento dos ensaios de tração, estes dados estão explícitos na tabela 4. É possível observar um

aumento considerável da tensão máxima em relação ao aumento da intensidade da corrente de soldagem, pelo fato de que uma maior amperagem gera uma maior penetração na soldagem. Também é possível perceber uma redução de tensão máxima em comparação com o tratamento térmico efetuado, onde as amostras laminadas obtiveram resultados maiores. Os valores destacados em vermelho foram desconsiderados, uma vez que o rompimento destas amostras ocorreu por acúmulos de tensão que foram gerados por falhas na solda.

Com base nos dados da tabela 4, observa-se que tensão de escoamento foi influenciada praticamente apenas pelo tratamento térmico. Em comparação, as amostras laminadas tiveram um aumento médio em relação às amostras recozidas de 23.24%, quando soldadas a 70 A, e de 46.86%, quando soldadas a 90 A. Apenas no caso do aço laminado a intensidade da corrente teve impacto, onde a solda a 90 A teve uma tensão de escoamento, em média, 14.85% maior. Apesar de pouco significativo, a diferença aqui se faz pelo fato de que a qualidade da solda com amperagem mais alta foi melhor e, nos ensaios de tração dos corpos soldados com 70 A, o rompimento das amostras teve origem na parte posterior a solda, onde a penetração foi menor.

4.4 ENSAIO DE DUREZA

Como mostra a Tabela 5, os resultados dos ensaios de dureza confirmaram o efeito de diminuição da dureza ocasionado pelo recozimento pleno, onde, considerando os valores das amostras soldadas a 90 A, o metal de base encruado apresentou uma dureza 14.11% maior do que o metal recozido. Porém, em relação as regiões de soldagem os resultados obtidos tiveram uma variação inesperada, prejudicando a sua avaliação. No Gráfico 2, pode-se notar que a região central da zona fundida (ZF) apresentou um pequeno aumento da dureza nas amostras laminadas, e entre essas, as amostras soldadas com correntes maiores também apresentaram um pequeno aumento da dureza. Na ZTA (zona termicamente afetada) as linhas de durezas das chapas laminadas apresentaram uma leve concavidade para baixo, ao contrário das chapas recozidas, além de apresentarem uma dureza maior do que na região do metal de base, o que não condiz com a teoria, onde, segundo

(CHIAVERINI, 1988) o aço inoxidável austenítico não é endurecível por tratamentos térmicos.

Tabela 5 - Médias e Desvios dos resultados dos ensaios de Dureza Rockwell B das amostras soldadas.

		Zona Fundida	ZTA	Metal Base
L70	Média (HRB)	87.35	88.10	79.85
	Desvio (%)	4.67	3.77	8.93
R70	Média (HRB)	83.10	79.50	79.45
	Desvio (%)	2.68	3.15	6.15
L90	Média (HRB)	88.05	89.95	84.95
	Desvio (%)	7.19	6.17	5.97
R90	Média (HRB)	81.00	76.50	74.25
	Desvio (%)	6.34	5.47	5.88

Fonte: Autoria Própria.

Gráfico 2 - Ensaio de Dureza no Cordão de Solda (Rockwell B).



Fonte: Autoria própria.

Na região do metal de base, a dureza da amostra L70 caiu, chegando a ser igual a dureza das amostras recozidas, o que não deveria ocorrer, tendo em vista que

o encruamento por laminação aumenta a dureza da chapa, ou seja, as chapas laminadas deveriam apresentar uma dureza maior do que as chapas recozidas, onde o tratamento térmico diminui a dureza. Os resultados obtidos aqui podem ter sido influenciados pelo fato das superfícies das amostras serem muito estreitas para criar uma base estável para o teste, em alguns casos a amostra chegou a pender para o lado, prejudicando o resultado. Além disso, o ensaio de dureza Rockwell utilizado nessas análises apresenta uma grande área de indentação, não sendo o ideal para o levantamento da variação da dureza em relação as regiões da solda.

4.5 METALOGRAFIA

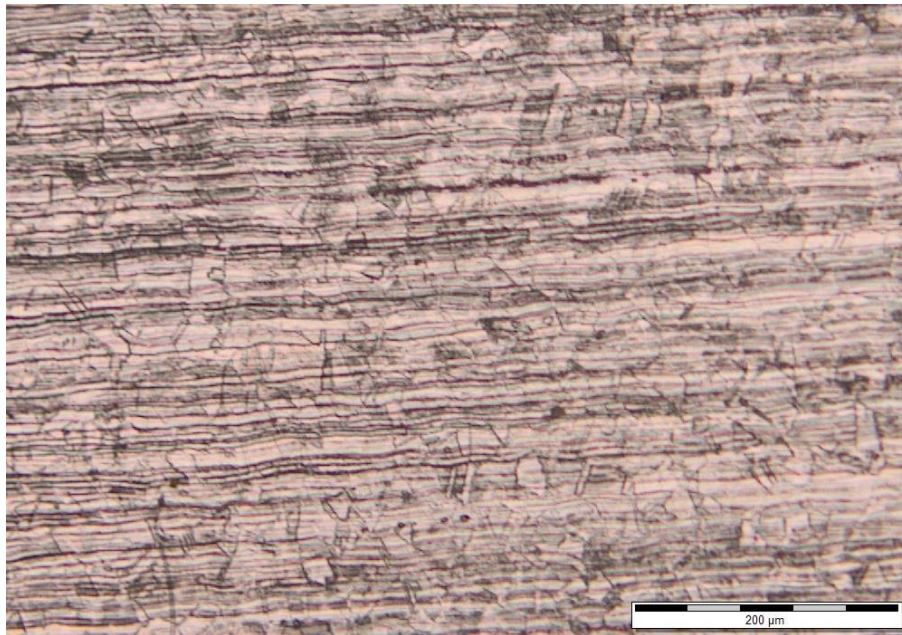
A análise metalográfica será apresentada em 3 etapas, a primeira corresponde a análise micrográfica do material previamente a soldagem, na segunda etapa os cordões foram submetidos a análise macrográfica com o objetivo de um estudo mais global de parâmetros como penetração e também na identificação das distintas regiões do cordão. Por fim, as diferentes regiões do cordão foram observadas por metalografia para a análise de como a estrutura do material variou após a soldagem.

4.4.1 Análise do Material Previamente À Soldagem

A micrografia do metal antes da soldagem apresenta a influência do recozimento em relação ao encruamento pelo processo de laminação encontrado nas chapas de aço 316L que foram estudadas. A Figura 17 apresenta o metal na condição em que foi adquirido, encruado, já a Figura 18 apresenta o metal após o tratamento térmico de recozimento pleno.

As imagens captadas pelo microscópio apresentadas na Figura 17 exibem o metal de base da chapa laminada antes do tratamento térmico e, como é possível observar, as linhas de deformação aparecem juntamente com grãos pequenos, evidenciando o encruamento oriundo do processo de laminação da chapa.

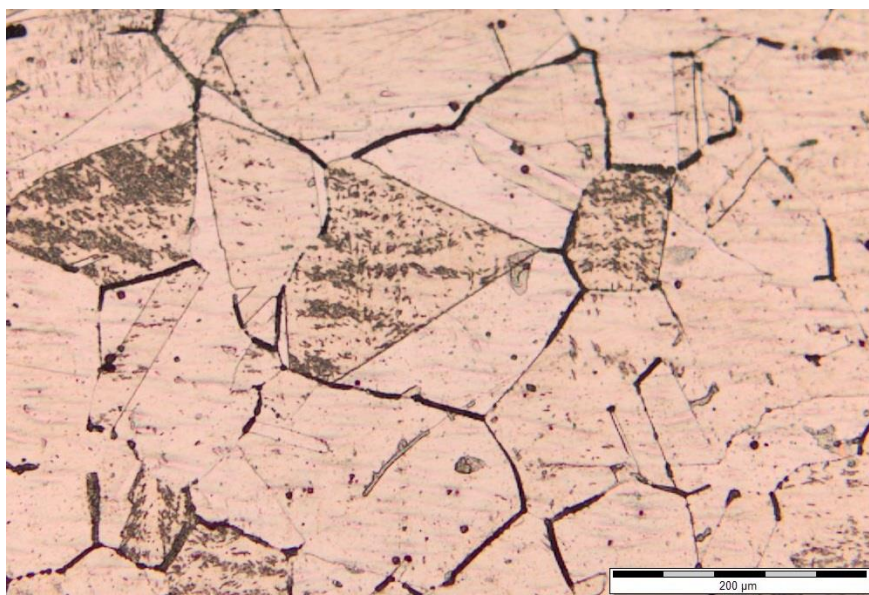
Figura 17 - Micrografia do metal antes do tratamento térmico (200x).



Fonte: Autoria própria.

Analisando a micrografia das chapas recozidas na Figura 18, pode-se perceber como o tratamento térmico realizou efetivamente o aumento do grão, fato esse que explica algumas das alterações no comportamento mecânico das soldas, como por exemplo, a diminuição da dureza.

Figura 18 - Micrografia do metal após o recozimento pleno (200X).



Fonte: Autoria própria.

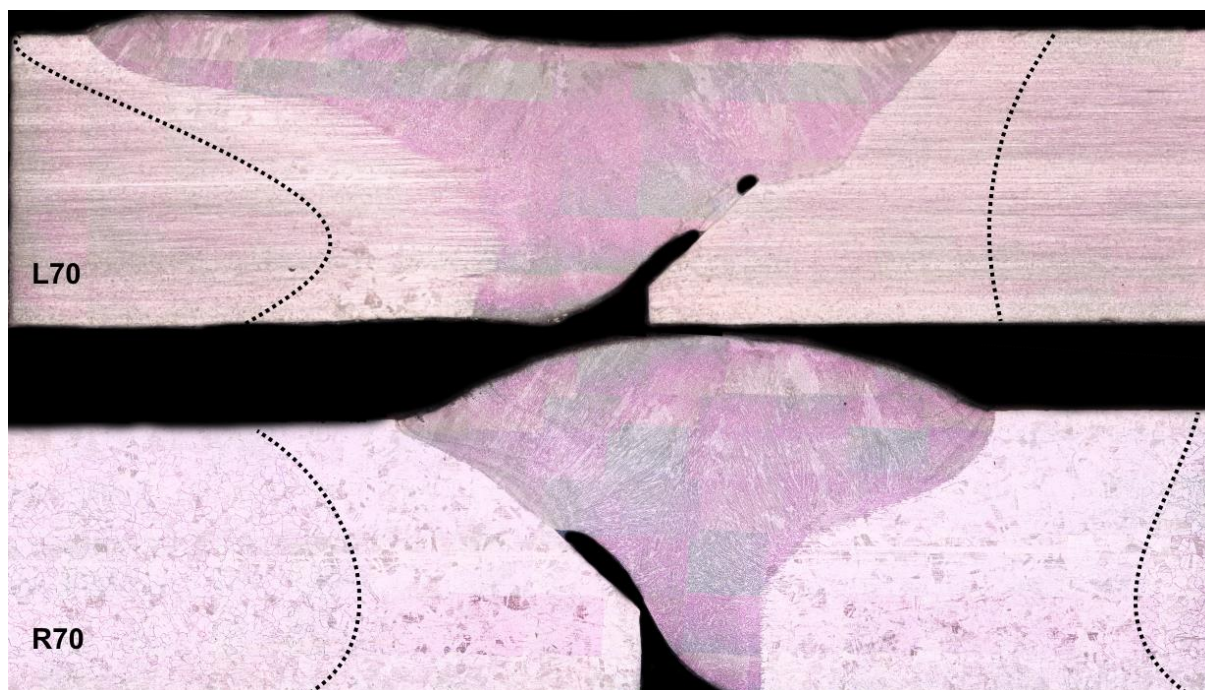
Outro fenômeno que se faz visível é o aumento da espessura do contorno de grão e, comparando com as imagens da página 19, pode-se indicar a presença de sensitização, que é um mecanismo que diminui a resistência à corrosão intergranular. Na sensitização, os carbonetos de cromo se acumulam nos contornos de grão, isso acontece entre 450 e 850°, e pode ter ocorrido durante o resfriamento lento do recozimento pleno (VIOTO; ANTUNES, 2016).

4.4.2 Macrografia

As Figuras 19 e 20 apresentam o mapeamento das juntas soldadas das amostras dos 4 parâmetros variados, obtidos através de um microscópio ótico. Nelas se faz possível analisar as disposições das regiões de soldagem assim como a penetração da solda e o nível de fusão.

A figura 19 apresenta a macrografia das amostras soldadas a 70 amperes e, pode-se perceber que a penetração não foi efetiva, além disso, a fusão também não foi completa, fazendo com que a parte posterior a solda não aderisse a solda. Também é possível notar que a zona termicamente afetada (regiões destacadas pelas linhas tracejadas) da amostra recozida foi ligeiramente maior que a amostra sem tratamento térmico e, na amostra L70 a poça de fusão foi mais larga na superfície, gerando uma ZTA mais curvada nessa região.

Figura 19 - Macrografia das amostras soldadas a 70 amperes.

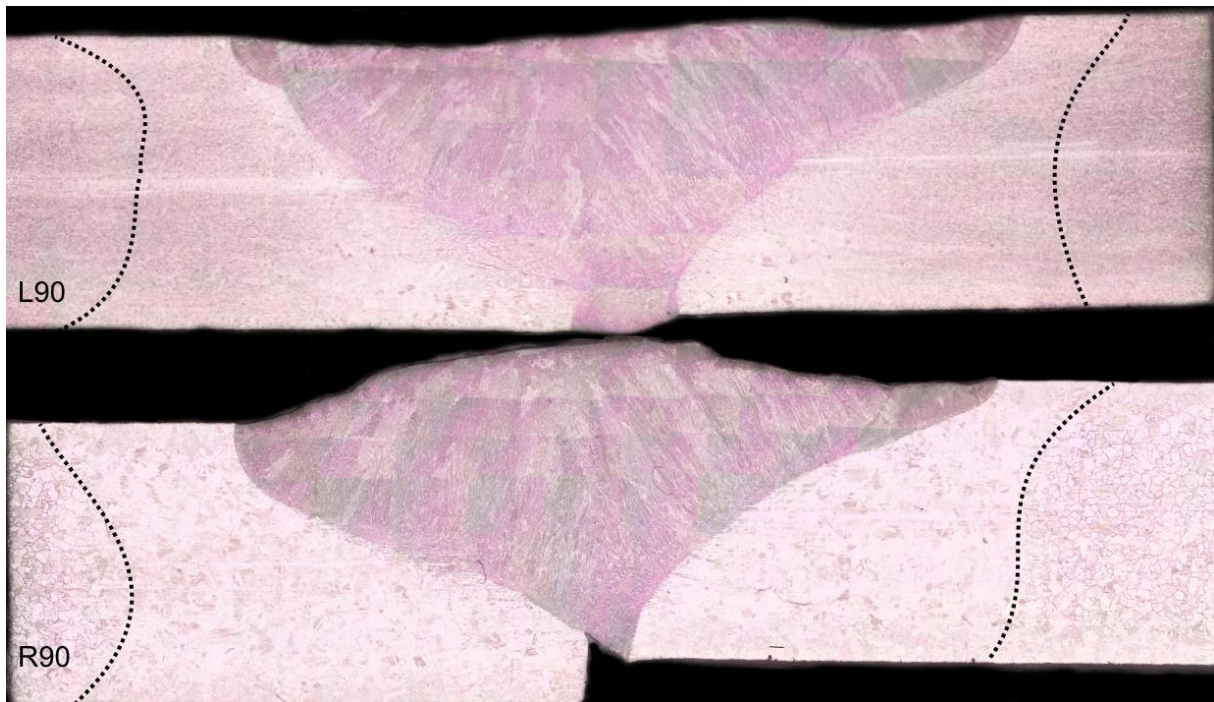


Fonte: Autoria própria

O crescimento da ZTA em relação ao tratamento térmico é justificado pelo fato da temperatura de soldagem influenciar na sensitização ocorrida nos contornos de grão das amostras que foram submetidas ao recozimento. Nas amostras laminadas, esse efeito não aconteceu, apenas o crescimento de grão e a amenização das linhas de deformação foram evidenciados, estes efeitos só ocorreram próximos a solda, onde a temperatura foi maior.

Na figura 20 pode-se perceber que, nas soldas efetuadas com uma intensidade de corrente maior, a penetração foi mais efetiva e preencheu o chanfro completamente, o que gerou uma boa fusão dos materiais, resultando em uma união satisfatória entre as chapas, que pode ser comprovado pelos ensaios de tração. A ZTA manifestou um crescimento nas soldas com uma intensidade da corrente de 90 A, principalmente em relação as chapas laminadas.

Figura 20 - Macrografia das amostras soldadas a 90 amperes.



Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Regiões Da Solda

Por meio do ataque eletrolítico realizado nas amostras foi possível distinguir as regiões da ZTA e da ZF, destacando suas características e particularidades e, dessa maneira, possibilitando o entendimento mais aprofundado dos efeitos da soldagem por eletrodo revestido nas propriedades do aço inoxidável austenítico.

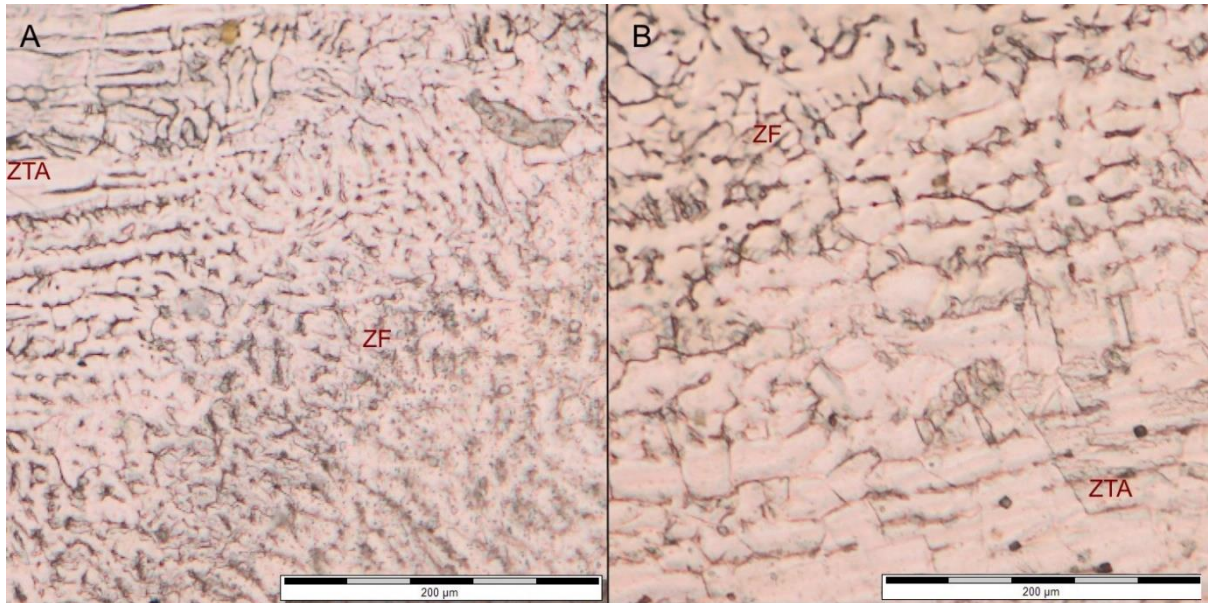
Com objetivo de melhor investigar essas regiões e as alterações provocadas pela solda, imagens com ampliações maiores foram obtidas.

4.4.3.1 Zona fundida

Os grãos da ZF apresentam o formato característico de dendritas alongadas no sentido contrário à extração de calor da região do cordão de solda. Como pode-se observar nas Figuras 21 e 22, a variação da intensidade da corrente causou um

aumento desses grãos dendríticos conforme a corrente elétrica de soldagem aumenta. Esse aumento no tamanho dos grãos da ZF possivelmente é explicado por uma menor velocidade de resfriamento oriunda de uma maior corrente de soldagem (NEVES; LOTTO; BERRETA; ROSSI; VIEIRA, 2009).

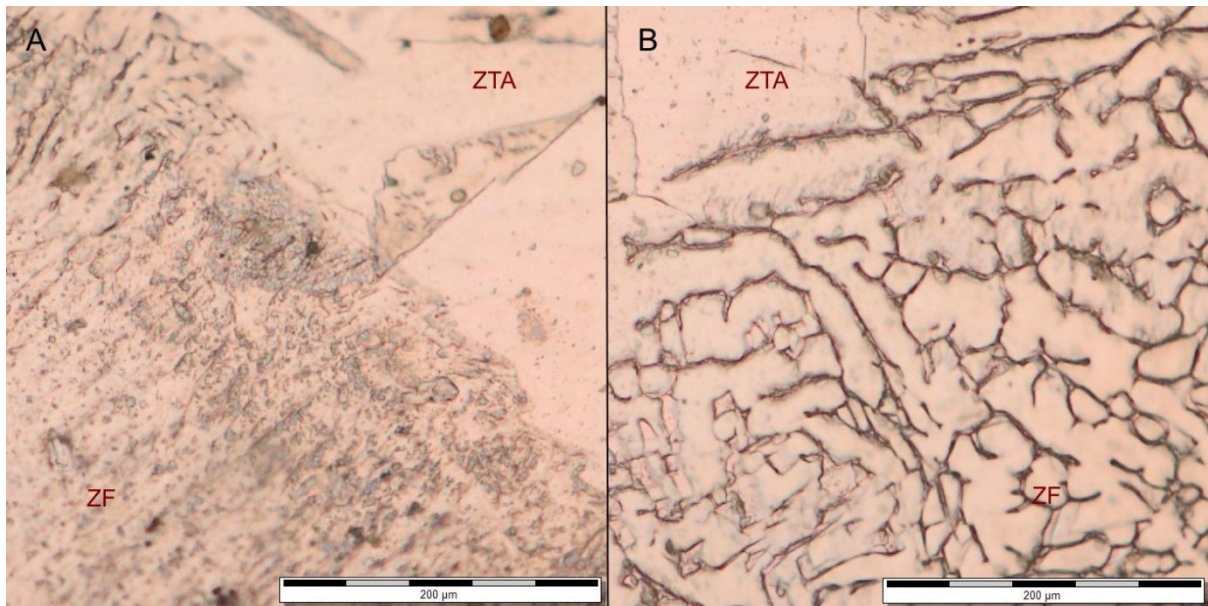
Figura 21 - Micrografia da Zona Transição A) L70; B) L90.



Fonte: A autoria própria.

Com o aumento da intensidade também foi possível observar uma maior fusão entre o metal de base e o metal de adição. Em relação ao tratamento térmico, não foram evidenciadas grandes alterações, apesar da amostra R70 (Figura 22 A) apresentar uma linha de transição entre metal de adição e metal base bem destacada, podendo indicar pouca fusão.

Figura 22 - Micrografia da Zona Transição A) R70; B) R90.

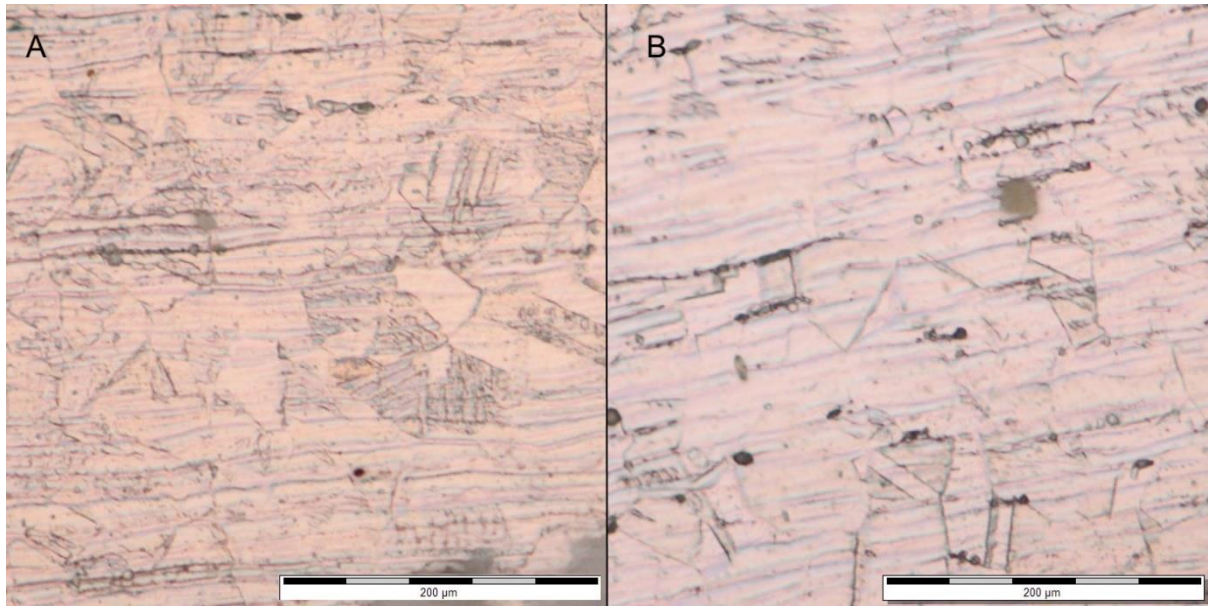


Fonte: Autoria própria.

4.4.3.2 Zona termicamente afetada

Nas zonas termicamente afetadas das amostras encruadas, exibidas na Figura 23, fica visível o crescimento dos grãos e uma suavização das linhas de deformação, sem o aparecimento da sensitização. Quanto ao aumento da corrente elétrica, a soldagem com 90 A gerou uma suavização maior das linhas de deformação na amostra laminada, porém, não foi evidenciado um crescimento de grão em relação a amperagem.

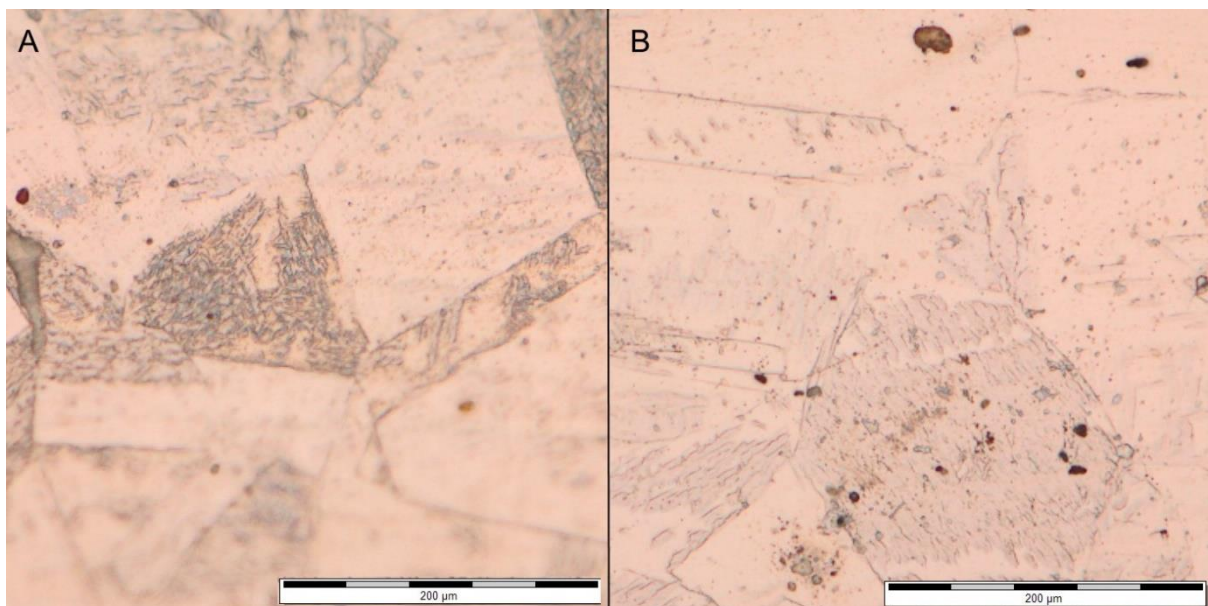
Figura 23 - Micrografia da Zona Termicamente Afetada (500X) A) L70; B) L90.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 24, pode-se notar que na ZTA das chapas recozidas soldadas os grãos também tiveram um crescimento e, além disso, a sensitização foi aparentemente desfeita.

Figura 24 - Micrografia da Zona Termicamente Afetada (500X) A) R70; B) R90.



Fonte: Autoria própria.

Uma hipótese a respeito da redução da sensitização é que a operação de soldagem impôs temperaturas acima de 1040° na ZTA, ocorrendo assim a solubilização dos carbonetos presentes na região, seguido de um resfriamento rápido no ar atmosférico, prevenindo uma nova precipitação dos mesmos.

O aumento da corrente não parece ter afetado a ZTA das amostras recozidas, embora seja possível reparar que a chapa soldada a 90 A apresentou uma maior dificuldade na observação dos contornos de grão, sendo estes mais finos, o que pode ter sido resultado de uma maior solubilização dos carbonetos situados nos contornos de grão, fazendo com que o ataque eletrolítico seja menos eficiente no destaque dos contornos de grão.

5 CONCLUSÃO

Sua praticidade e baixo custo tornam o processo de soldagem SMAW bastante usual em diversas situações e, no caso do aço inox AISI 316L, se mostrou eficiente, indicando a boa soldabilidade deste metal.

A variação da corrente, revelou uma qualidade melhor da solda para uma intensidade maior, mas não maior que a máxima recomendada para o eletrodo em questão. Características importantes como penetração e facilidade para manuseio e abertura do arco demonstraram uma melhoria significativa em relação ao aumento da corrente elétrica da solda.

Pode-se notar que, com o aumento da intensidade da corrente de soldagem, propriedades mecânicas como a resistência mecânica e o alongamento apresentaram crescimento. Além disso, foi identificado que o tratamento térmico de recozimento reduziu a dureza do metal de base e a tensão de escoamento da junta soldada.

O recozimento gerou alívio das tensões criadas pelo encruamento das chapas de aço inox AISI 316L, eliminando as linhas de deformação, gerando o crescimento de grãos almejado. Porém, adicionalmente originou uma sensitização nos contornos de grão do metal, efeito que não é positivo, de modo que se trata de um aço inoxidável, o que indica que este tipo de tratamento térmico não é o ideal para a recuperação do encruamento desta classe de aço inoxidável. Também foi possível observar que o aumento da corrente gerou maior penetração do cordão, o que pode explicar a melhoria nas propriedades mecânicas.

Ademais, a soldagem se mostrou benéfica em outro aspecto neste cenário, agindo como um tratamento térmico de solubilização, corrigindo assim a sensitização.

REFERÊNCIAS

- J. MODENESI, P. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. UFMG, 2011.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. Editora Edgard Blucher Ltda. 10ª reimpressão. São Paulo, 1992.
- MICALLI JR, A. R.; BATALHA, J. R.; RAZERA, R.; MARIUCCI, S. L. **Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem**. Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade. São Paulo, 2002.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2011.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: Welding Processes, Part 1**. 9ª ed. Vol 2. AWS. Miami, 2004.
- ASIBELUO, I. S.; EMIFONIYE, E. Effect of Arc Welding Current on the Mechanical Properties of A36 Carbon Steel Weld Joints. **SSRG International Journal of Mechanical Engineering**, Ogwashe-UKU (Delta State, Nigéria), v.2, ed.9, p. 29-37, set. 2015.
- SILVA, N. M. C. S. e. **Influência da velocidade e posição de soldagem nas propriedades de juntas soldadas pelo processo de eletrodo revestido**. 2017. 38 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/156995>>.
- CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. AcelorMittal Inox Brasil. São Paulo, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, ed. 6. São Paulo, 1988.
- SOUZA, J. F. P. **Propriedades Mecânicas de Aços Inoxidáveis Austeníticos Nitretados Submetidos à Hidrogenação Catódica**. UFPR. Curitiba, 2006.
- VIOTO, R. P.; ANTUNES, R. A. **Estudo do Fenômeno de Sensitização do Aço Inoxidável Austenítico Estabilizado AISI 347**. CECS-UFABC. Santo André, 2016
- ZANETIC, S. T.; FALLEIROS, N, A. **Determinação do grau de sensitização de aços inoxidáveis austeníticos pelo método DL-EPR**, Boletim Técnico FATEC-SP, vol.11, 2001.
- LIPPOLD, J. C. **Welding Metallurgy and Weldability**. John Wiley & Sons. Nova Jersey, 2015.

BARBOSA, R. P.; CAMPOS, S. G. S.; FONSECA, M. A. **Recristalização de um Aço Inoxidável Austenítico/ Uma Abordagem Estatística**. Revista online Unileste, vol.2, Ipatinga, Jul/Dez 2004. Disponível em: <www.unilestemg.br/revistaonline/volumes/02/download/artigo_13_pdf>. Acesso em: Jun, 2019.

LIMA FILHO, H. M. R. **Análise de Ataques Químicos Para Revelação de Microestrutura de Soldas Dissimilares de Aços Austeníticos e Ferríticos**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. UFC. Fortaleza, 2013;

ASM TECHNICAL DEPARTMENT. **The Atlas Specialty Metals Technical Handbook of Bar Products**. Atlas Specialty Metals, Melbourne, 2013. Disponível em: <<http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas%20Technical%20Handbook%20rev%20Aug%202013.pdf>>. Acesso em: Abr, 2019.

NEVES, M. D. M.; LOTTO, A.; BERRETTA, J. R.; ROSSI, W.; VIEIRA, N. D. JR. Solidificação da Zona de Fusão na soldagem do AISI 304 com Inconel 600 por laser de Nd:YAG. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v.14, ed.2, p. 104-113, Abr/Jun 2009.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. UFMG. Belo Horizonte, 2012.

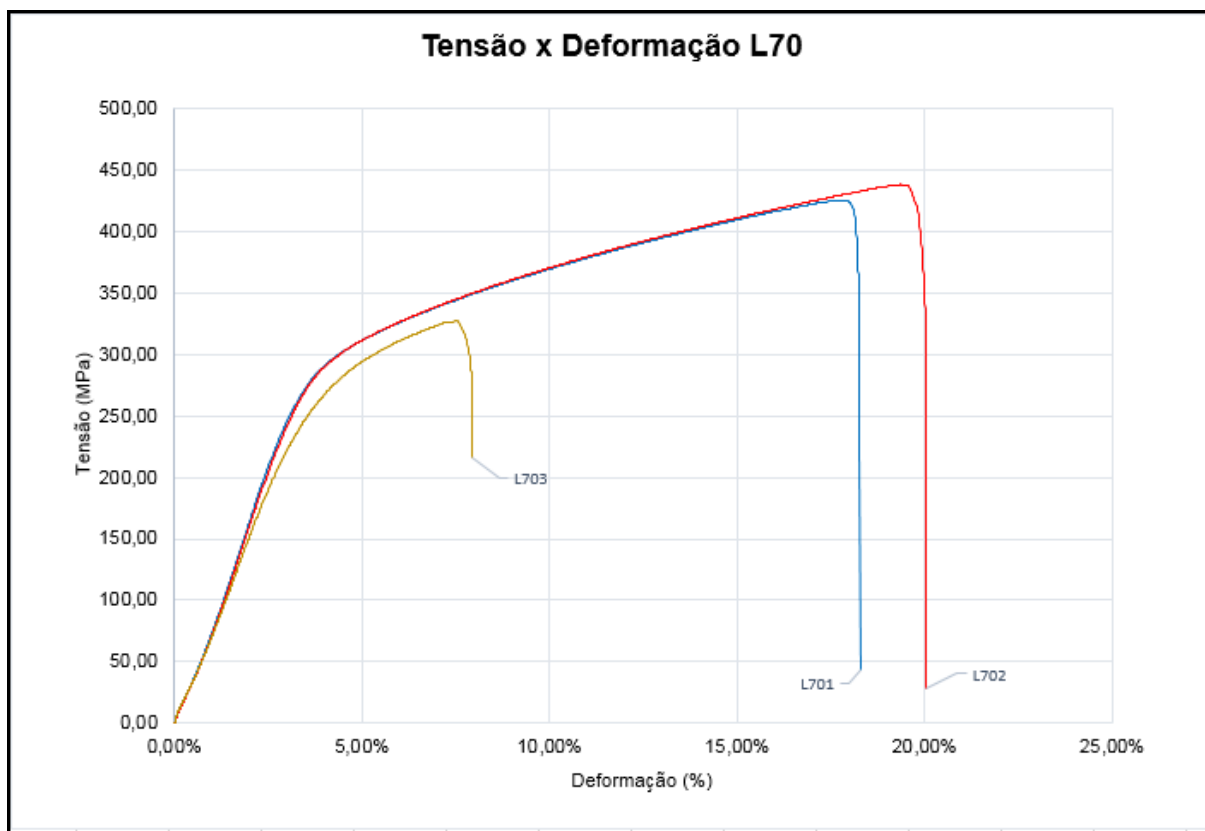
MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Algumas Equações Úteis em Soldagem. **Soldag. Insp**, São Paulo, v. 19, n. 01, p. 91-102, Jan/Mar 2014.

LOPES, W. **Estudo do Encruamento dos Aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2009.

TSCHIPTSCHIN, A. P.; PINEDO, C. E. **Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138 nitretado sob plasma à baixa temperatura**. Revista Escola de Minas, v. 63, n. 1, 137-141, Ouro Preto, 2010.

**APÊNDICE A – GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS
LAMINADAS SOLDADAS A 70 AMPERES**

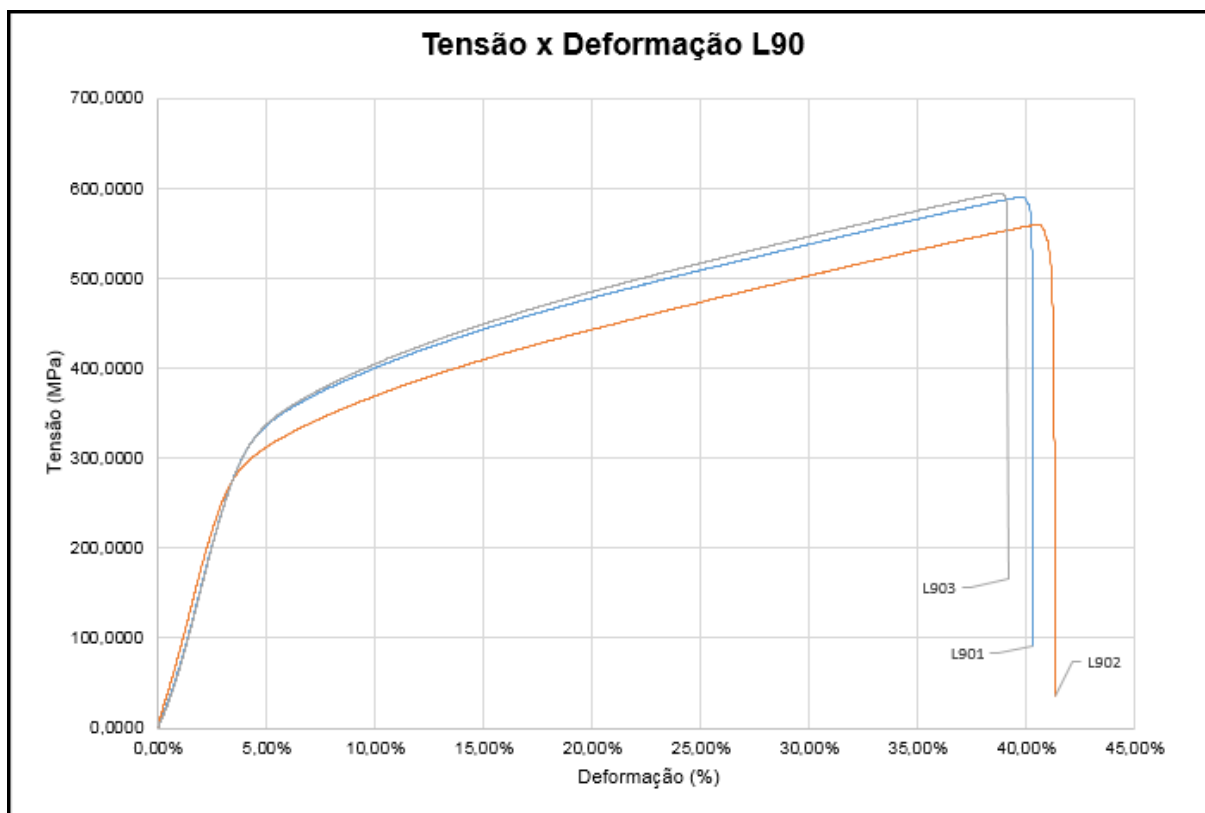
Gráfico 3 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras L70.



Fonte: Autoria própria.

**APÊNDICE B - GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS
LAMINADAS SOLDADAS A 90 AMPERES**

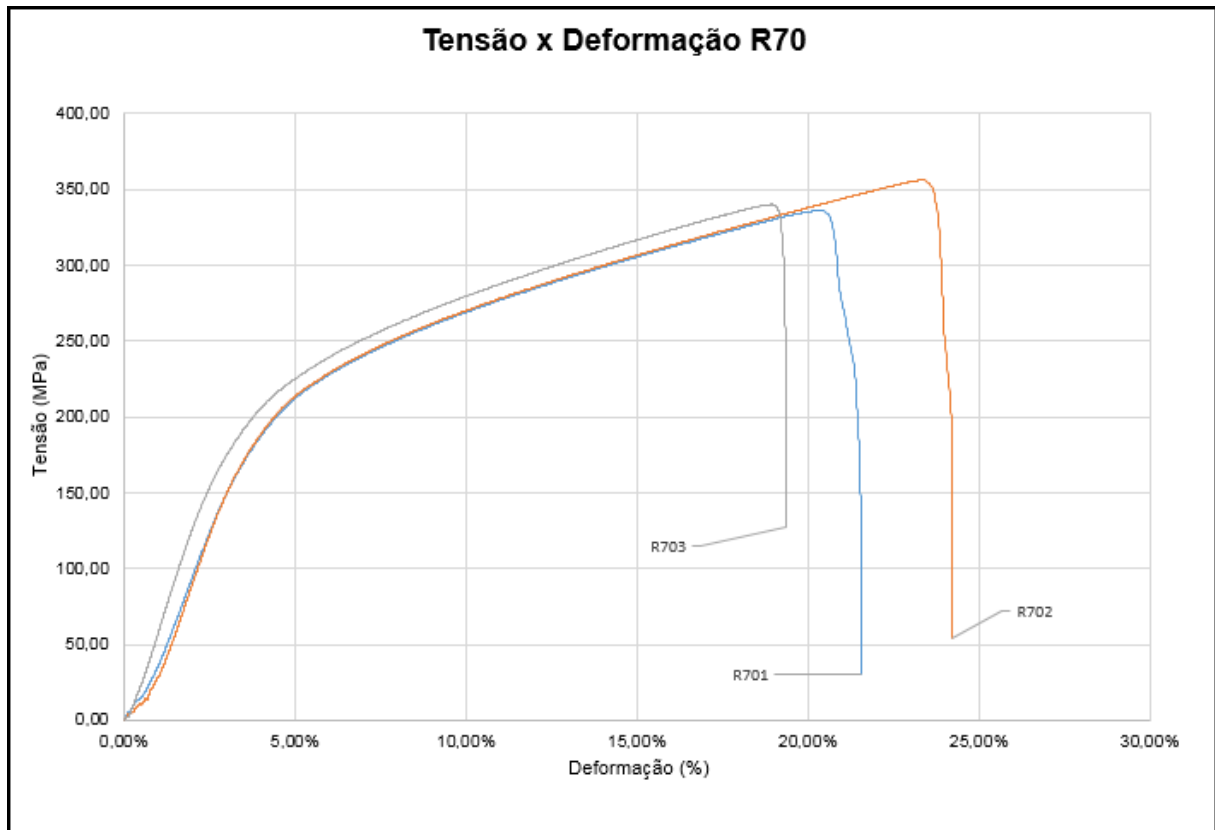
Gráfico 4 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras L90.



Fonte: Autoria própria.

**APÊNDICE C - GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS
RECOZIDAS SOLDADAS A 70 AMPERES**

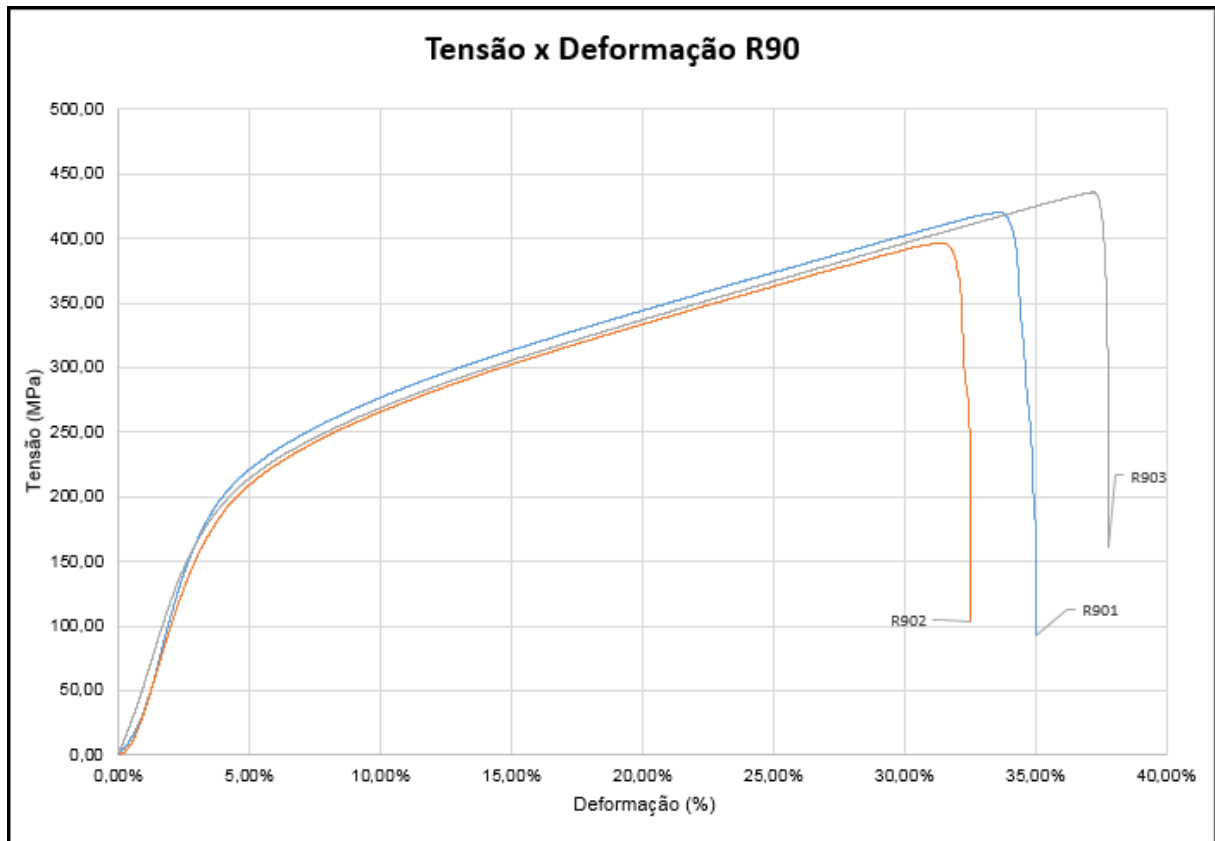
Gráfico 5 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras R70.



Fonte: Autoria própria.

**APÊNDICE D - GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS
RECOZIDAS SOLDADAS A 90 AMPERES**

Gráfico 6 - Gráfico tensão x deformação do ensaio de tração das amostras R90.



Fonte: Autoria própria.