

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS  
PELO PROCESSO ARAME TUBULAR NA MICROESTRUTURA  
E RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AÇO NAVAL ASTM A131 -A

CLEIDINEY CORRÊA MARINHO

MANAUS – AM

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS

CLEIDINEY CORRÊA MARINHO

INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS  
PELO PROCESSO ARAME TUBULAR NA MICROESTRUTURA  
E RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AÇO NAVAL ASTM A131 -A

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto

MANAUS – AM

2020

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M338i Marinho, Cleidiney Corrêa  
Influência da preparação de juntas soldadas pelo processo arame tubular na microestrutura e resistência mecânica do aço naval ASTM A131-A./ Cleidiney Corrêa Marinho. 2020  
133 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: José Costa de Macêdo Neto  
Dissertação: (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-  
Universidade Federal do Amazonas.

1. Goivagem na raiz. 2. Penetração inadequada. 3. Fusão incompleta. 4. Soldagem com arame tubular. 5. astm a131-a. I. Macêdo Neto, José Costa de. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CLEIDINEY CORRÊA MARINHO

INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS  
PELO PROCESSO ARAME TUBULAR NA MICROESTRUTURA  
E RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AÇO NAVAL ASTM A131 -A

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Área de Concentração: Metalurgia da Soldagem.

Aprovado em 12 de março de 2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Dr. Arlindo Pires Lopes.

Universidade do Estado do Amazonas

---

Dr. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto.

Universidade do Estado do Amazonas

Dedico esse trabalho à minha avó materna Thereza Neuza Corrêa que está em estágio alto de Alzheimer. Aos meus pais Maria Ney Corrêa Marinho e Carlos Batista Marinho pela compreensão e apoio incondicional para que eu continue a trilhar o caminho dos meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida e por sempre estar ao meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto pelos ensinamentos, incentivo e paciência que me auxiliaram a cumprir mais uma etapa dos meus objetivos. Suas orientações e conselhos foram muito importantes não só academicamente, mas também profissionalmente e pessoalmente.

À Universidade do Estado do Amazonas – UEA, por todo o conhecimento proporcionado na graduação, em especial a todos os meus professores brasileiros e cubanos por todo o conhecimento, apoio e torcida.

À todos os envolvidos, secretário, professores e coordenador, do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas PPGCEM-UFAM, pela oportunidade do curso e ambiente de estudo.

À FAPEAM pelo auxílio financeiro em forma de bolsa de mestrado.

Ao Josiel, Guilherme e a Débora do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade do Estado do Amazonas que tanto me auxiliaram na preparação dos corpos de provas e execução dos ensaios e pela amizade.

À Beconal – Bertolini Construção Naval da Amazônia Ltda, pela doação das chapas, consumíveis e soldagem dos corpos de prova, em especial aos funcionários da empresa Rodrigo Tiburcio e Reginaldo Martins dos Santos por toda atenção, ajuda e conhecimento. À toda a equipe de soldadores da empresa pela preparação e soldagem dos corpos de prova, além da boa recepção e auxílio nas dúvidas técnicas durante a soldagem.

Aos meus familiares, principalmente aos meus pais, Maria Ney Corrêa Marinho e Carlos Batista Marinho, por me apoiarem em qualquer situação e aos meus irmãos pelo cuidado e companheirismo.

À minha avó materna Thereza Neuza Corrêa, que não lembra mais quem eu sou, mas a todos que lerem esse trabalho saberão que ela jamais será esquecida por mim.

Ao meu namorado Shiva Kamal Punjabi por todo o apoio, amor, carinho e por sempre acreditar em mim. À minha sogra Maria Emília Kamal Punjabi pelo carinho e cuidado. Ao Meu sogro Kamal Sunderdas Punjabi pelos conselhos e cuidado.

À Zaja, por sempre estar do meu lado, fez com que as longas horas de estudos fossem mais suportáveis e divertidas.

À minha grande amiga da faculdade Sheila, as minha amigas do ensino médio Paola e Laynara que a nossa amizade continue por muitos anos. Aos amigos feitos nesse período de estudo no mestrado, Paula, Sr. Domingos, Ana, Éric, João e Sr. Magno. Aos colegas do grupo de pesquisa Alex, Greice, Rebeca, Jefferson, Érico e Darbens pelo auxílio.

Enfim, a todos que de alguma maneira acreditaram, torceram e contribuíram para a realização deste trabalho, pois não cheguei aqui sozinha.

Muito Obrigada!!

A melhor maneira de prever o futuro é cria-lo.

Peter Drucker

## RESUMO

A goivagem na raiz é um processo que ocorre durante a soldagem para soldas dupla e é definida como sendo a remoção do metal de solda e metal base da raiz da primeira solda de uma junta soldada para garantir que não haja penetração inadequada da junta ou fusão incompleta entre as soldas e metal base, onde ambos resultam em pontos de tensão, e as rachaduras que podem iniciar e propagar-se a medida que cordões de solda são depositados. O objetivo desse estudo é analisar as microestruturas e propriedades mecânicas da junta soldada do aço ASTM A131-A, resultante da soldagem com arame tubular e goivagem por esmerilhamento da raiz. Microscopia óptica e eletrônica com espectrômetro de raio-x de energia dispersiva, foram utilizados para avaliar a microestrutura e inclusões, o ensaio de tração e nanoindentação foram usados para avaliar a resistência mecânica em todo o cordão de solda. Resultados mostraram que a profundidade da goivagem pode efetivamente reduzir a resistência mecânica do aço ASTM A131-A. A junta soldada com goivagem de 5,0 mm de profundidade exibiu uma redução na resistência mais proeminente do que a junta soldada com goivagem de 1,5 mm de profundidade, que, por sua vez, a goivagem com 1,5 mm de profundidade teve uma redução no tempo de fabricação de 28,27 % para uma chapa de 1300 mm de comprimento com 9,5 mm de espessura.

**Palavras-chave: Goivagem na raiz; penetração inadequada; fusão incompleta; soldagem com arame tubular; ASTM A131-A.**

## ABSTRACT

Back gouging is a process that occurs during welding for double welds and is defined as the removal of the weld metal and base metal from the first weld of a welded joint to ensure that there is no inadequate joint penetration or incomplete fusion between welds and metal base, where both result in stress points, and the cracks that can start and propagate as weld beads are deposited. The objective of this study is to analyze the microstructures and mechanical properties of the welded joint of ASTM A131-A steel, resulting from flux cored arc welding and back gouging by grinding. Optical and electronic microscopy with x-ray spectrometer of dispersive energy, were used to evaluate the microstructure and inclusions, the tensile test and nanoindentation were used to evaluate the mechanical resistance in the entire weld bead. Results showed that the depth of gouging can effectively reduce the mechanical strength of ASTM A131-A steel. The 5.0 mm gouged welded joint exhibited a more prominent reduction in strength than the 1.5 mm gouged welded joint, which, in turn, the 1.5 mm deep gouge had a reduction in manufacturing time of 28.27% for a 1300 mm long plate with 9.5 mm thickness.

**Keywords: Back gouging; inadequate joint penetration; incomplete fusion; flux cored arc welding; ASTM A131-A.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subclassificação dos processos de soldagem a arco elétrico .....	5
Figura 2- Dois tipos de processo de soldagem a arco elétrico com arame tubular: autoprotégido (à esquerda) e com proteção gasosa (à direita) .....	10
Figura 3 - Equipamento básico para a soldagem semiautomática do processo de soldagem a arco elétrico com arame tubular .....	11
Figura 4 - Etapas do processo de goivagem para juntas preparadas em um lado, chanfro em V simples .....	12
Figura 5 - Etapas do processo de goivagem para juntas preparadas em dois lados, chanfro em V duplo .....	13
Figura 6 - Microestrutura da zona fundida (a) na raiz e (b) no segundo passe no aço ASTM A131-A. AF - ferrita acicular; PF - ferrita primária; FS - ferrita com segunda fase; FC - agregados ferrita-carboneto .....	18
Figura 7 - Microestrutura da zona afetada pelo calor (a) e zona fundida (b) para o aço da classe ASTM A131. AF - ferrita acicular; FS(A) - ferrita com segunda fase alinhada; ferrita alotrimórfica; ferrita windmastatten; PF(G) - ferrita de contorno de grão; PF(I) – ferrita poligonal intragranular; FP – ferrita primária e inclusões .....	18
Figura 8 - Desenho esquemático da região da junta soldada e das transformações microestruturais da ZAC para um único passe. ZF - Zona fundida; ZAC - Zona afetada pelo calor; ZAC-GG - Região de grão grosseiro; ZAC-RG - Região de refino de grão; ICZAC - Região intercrítica; SCZAC – Região subcrítica; MB - Metal base .....	19
Figura 9 - Morfologia e transição das microestruturas presentes na ZAC de passe único do aço de alta resistência S690QL .....	20
Figura 10 - Macrografia de uma junta soldada com dois passes de solda em chanfro de V duplo .....	21
Figura 11 - Desenho esquemático das transformações microestruturais da ZAC (zona afetada pelo calor) para dois passes de solda .....	22
Figura 12 - Microestrutura do aço ASTM A131-A após laminado e antes de algum processo térmico .....	26
Figura 13 - Microestrutura do aço ASTM A131 - A por microscopia de varredura eletrônica (MEV).....	26

Figura 14 - Localização da distribuição dos pontos no corpo de prova G1 (goivagem de 1,5 mm) para análise química.....	31
Figura 15 - Representação configuração das dimensões do chanfro.....	33
Figura 16 - Etapa da preparação dos corpos de prova. Passo 1: (a) soldagem com arame tubular, passe de raiz na primeira camada. (b) resultado da primeira camada .....	35
Figura 17 - Passo 2: remoção do metal de solda e metal base da raiz da primeira camada. (a) parte de trás da primeira camada sem goivagem. (b) processo de goivagem por esmerilhamento na raiz da primeira camada. (c) resultado da goivagem na raiz da primeira camada .....	36
Figura 18 - Passo 3: (a) soldagem a arco elétrico com arame tubular da segunda camada após goivagem. (b) resultado da segunda camada .....	36
Figura 19 - Organização para a soldagem dos corpos de prova .....	37
Figura 20 - Equipamento de Soldagem Origo™ Freed 304N P4.....	37
Figura 21 - Corte a plasma HyPerformance Plasma HPR130XD .....	41
Figura 22 - Retirada das amostras para os ensaios de propriedades microestruturais e mecânicos .....	42
Figura 23 - Regiões da junta soldada de G1(goivagem de 1,5 mm) (a) e G5 (goivagem de 5,0 mm) (b), onde foram realizados os ensaios de nanodureza .....	44
Figura 24 - Desenho esquemático dos corpos de prova na posição transversal da junta soldada para ensaio de tração. Dimensões em milímetros.....	45
Figura 25 - Desenho esquemático dos corpos de prova na posição longitudinal da junta soldada para ensaio de tração. Dimensão em milímetros. ....	46
Figura 26 - Macrografia do corpo de prova com goivagem de 1,5 mm de profundidade (G1) com as medidas das extensões em mm e inclusão de escória na ZAC e círculo vermelho.....	47
Figura 27 - Macrografia do corpo de prova com goivagem de 5,0 mm de profundidade (G5), com as medidas das extensões em mm e inclusão de escória na ZAC os círculos em vermelho .....	48
Figura 28 - Micrografia do metal base com presença de grão de ferrita (F) e perlita (P) .....	49
Figura 29 - Micrografia da ZAC-RG (ZAC de refino de grãos) do primeiro passe em G1 (goivagem de 1,5 mm) (a) e em G5 (goivagem de 5,0 mm) (b).....	51
Figura 30 - Micrografia da ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) do G1 (goivagem de 1,5 mm) (a) e do G5 (goivagem de 5,00 mm). FS(A) - Ferrita alinhada com carbonetos; FS(NA) - ferrita não alinhada; PF(G) - Ferrita de contorno de grão; FW- Ferrita de Widmanstätten...	53

Figura 31 - Micrografia da ZF (Zona fundida) do G1 (Goivagem de 1,5 mm) (a) e G5 (Goivagem de 5,00 mm). PF (I) – Ferrita primária poligonal intragranular; PF(G) – Ferrita primária de contorno de grão; FA - Ferrita acicular (FA); FW – Ferrita de Widmanstätten ...	55
Figura 32 - Micrografia da região da linha de fusão entre as zonas fundidas do primeiro passe e do segundo passe de solda .....	56
Figura 33 - Micrografia da região do meio da linha de fusão entre as zonas fundidas do primeiro passe e do segundo passe de solda.....	57
Figura 34 - Micrografia da região da entre ZF (zonas fundida) e correspondente a ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) modificada pelo segundo de solda.....	57
Figura 35 - Macroestrutura da junta soldada de G5 (goivagem de 5 mm) obtida por MO com ampliação de 10X .....	58
Figura 36 - Microestrutura da junta soldada de G5 (goivagem de 5 mm) obtida por MEV com ampliação de 250X .....	59
Figura 37 - Microestrutura da junta soldada de G5 (goivagem de 5 mm) na superfície obtida por MEV com ampliação de 250X .....	60
Figura 38 - Mapeamento da dureza ao longo das regiões da junta soldada de G1(goivagem de 1,5 mm) (a) e G5 (goivagem de 5,0 mm) (b), onde foram realizados as indentações de nanodureza.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Elementos desoxidantes adicionados no metal de solda .....	9
Tabela 2 - Eficiência térmica (n) para alguns processos de soldagem a arco elétrico .....	15
Tabela 3 - Classificação dos microconstituintes de uma junta soldada para aço baixo carbono .....	17
Tabela 4 - Condições de Fornecimento e Frequência de Teste de Impacto para o Aço Carbono de Grau A .....	24
Tabela 5 - Composição Química para Aços com Baixo Teor de Carbono Grau A.....	25
Tabela 6 - Valores de resistência mecânica exigidas para aços baixo carbono ASTM A131 grau A .....	25
Tabela 7 - Composição Química (%) do aço ASTM A131-A .....	29
Tabela 8 - Valores do Ensaio de Tração.....	30
Tabela 9 - Composição Química do arame tubular AWS A5.20-05 E71T-1C.....	30
Tabela 10 - Propriedades Mecânicas do arame tubular AWS A5.20-05 E71T-1C.....	31
Tabela 11 - Média dos elementos químicos em % para a amostra G1 (goivagem de 1,5 mm). MB – Metal base; ZAC – Zona afetada pelo calor; ZF – Zona fundida.....	32
Tabela 12 - Procedimento de soldagem a arco elétrico com arame tubular .....	34
Tabela 13 - Procedimento de Goivagem .....	34
Tabela 14 - Média dos Valores Coletados para Tensão (V) e Corrente (A) Durante a Soldagem dos Corpos de Prova G1 (goivagem de 1,5 mm) e G5 (goivagem de 5,0 mm).....	39
Tabela 15 - Tempo de Preparação dos Corpos de Prova G1 (goivagem de 1,5 mm) 3 G5 (goivagem de 5 mm).....	40
Tabela 16 - Distribuição dos corpos de prova para cada ensaio de propriedades microestruturais e mecânicas.....	41
Tabela 17 - Média dos valores de microdureza Vickers dos corpos de prova para as três áreas ensaiadas para G1 (goivagem de 1,5 mm). MB (metal base), ZAC-RG (ZAC de região de refino de grão), ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) e ZF (zona fundida) .....	62
Tabela 18 - Média dos valores de microdureza para as três áreas ensaiadas para G5 (goivagem de 5,0 mm).....	62
Tabela 19 - Resultado do ensaio de tração para G1 (goivagem de 1,5 mm) no sentido longitudinal do corpo de prova.....	64
Tabela 20 - Resultado do ensaio de tração para G5 (goivagem de 5,0 mm) no sentido longitudinal do corpo de prova.....	65

Tabela 21 - Resultado do ensaio de tração para G1 no sentido transversal do corpo de prova 66

Tabela 22 - Resultado do ensaio de tração para G5 no sentido transversal do corpo de prova 66

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AWS – *American Welding Society*

CP – Corpo de prova

EDS - Espectrômetro de Raio-X de Energia Dispersiva

EPS - Especificação de Procedimento de Soldagem

FA – Ferrita acicular

FC – Agregado Ferrita Carboneto

FCAW - *Flux Cored Arc Welding*

FS(A) – Ferrita com Segunda Fase Alinhada

FS(NA) – Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada

FW – Ferrita de Widmanstätten

ICZAC – Região Intercrítica da ZAC

IIW – *International Institute of Welding*

MB - Metal Base

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MO – Microscópio Óptico

P – Perlita

PF(G) – Ferrita Primária de Contorno de Grãos

PF(I) – Ferrita Primária Poligonal Intragranular

SCZAC – Região Subcrítica da ZAC

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZAC-GG – ZAC de região de grão grosseiro

ZAC-RG – ZAC de região de refino de grão

ZF – Zona Fundida

## LISTA DE SÍMBOLOS

G1 – Goivagem por Esmerilhamento de 1,50 mm de profundidade

G5 – Goivagem por Esmerilhamento de 5,00 mm de profundidade

$Q$  = Aporte de Energia (kJ/mm)

$n$  = Eficiência térmica do processo

$U$  = Tensão de soldagem (V)

$I$  = Corrente de soldagem (A)

$v$  = Velocidade de soldagem (mm/s)

## Sumário

1	Introdução.....	1
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Processo de Soldagem .....	4
2.1.1	Soldagem por Fusão .....	4
2.1.2	Soldagem a Arco Elétrico.....	5
2.1.3	Soldagem a Arco com Arame Tubular .....	6
2.2	Processo de Goivagem na Raiz.....	11
2.3	Energia de Soldagem .....	14
2.4	Microestrutura.....	16
2.4.1	Região da Junta Soldada.....	19
2.4.2	Soldagem Multipasse.....	21
2.5	Efeitos dos Elementos Microligantes no Aço Baixo Carbono.....	23
2.6	Aço ASTM A131 – A.....	24
3	Materiais e Métodos .....	29
3.1	Metal Base .....	29
3.2	Metal de Adição.....	30
3.3	Análise Química .....	31
3.4	Preparação da Junta e Procedimento de Soldagem.....	33
3.5	Anova e teste de Tukey .....	38
3.6	Técnica de Obtenção da Energia de Soldagem.....	38
3.7	Tempo de Preparação dos Corpos de Prova .....	40
3.8	Preparação e Identificação dos Corpos de Prova para Análise Microestrutural e Mecânica.....	40
3.9	Microscopia Óptica.....	43

3.10	Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectrômetro de Raio-X de Energia Dispersiva .....	43
3.11	Nanoindentação .....	43
3.12	Ensaio de Tração.....	45
4	Resultados e Discussões.....	47
4.1	Macrografia.....	47
4.2	Micrografia .....	49
4.2.1	Metal Base .....	49
4.2.2	Micrografia da ZAC-RG do G1 (Goivagem de 1,5 mm) e G5 (Goivagem de 5,0 mm).....	50
4.2.3	Micrografia ZAC-GG do G1 (Goivagem de 1,5 mm) e G5 (Goivagem de 5,0 mm).....	52
4.2.4	Micrografia ZF do G1 (Goivagem de 1,5 mm) e G5 (Goivagem de 5,0 mm) ...	54
4.3	Microestruturas Resultante da Soldagem Multipasse.....	56
4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectrômetro de Raio-X de Energia Dispersiva .....	58
4.5	Microdureza Vickers.....	61
4.6	Ensaio de Tração.....	64
5	Conclusão.....	68
6	Sugestões para trabalhos futuros .....	70
7	Referências .....	71
8	Apêndices.....	79

## 1 INTRODUÇÃO

A construção naval está passando por um período de revitalização, crescimento e avanço tecnológico. Um componente dessas inovações é melhorar as técnicas e materiais de soldagem para otimizar o tempo de processamento, reduzir custos e melhorar as propriedades e o desempenho do navio (RIBEIRO *et al.*, 2015)

Técnicas de soldagem incorretas, preparações inadequadas de materiais ou projetos de juntas incorretos promovem a fusão incompleta nas soldas, entrada de calor insuficiente, projeto inadequado da junta, ângulo de chanfro incorreto ou controle inadequado do arco promovendo penetração inadequada da junta, ambos resultam pontos de tensão, e as rachaduras que podem iniciar e propagar-se a medida que cordões de solda são depositados. Alguns procedimentos de soldagem para soldas dupla requerem goivagem na raiz da primeira solda antes de depositar a primeira passagem no segundo lado para garantir que não haja penetração inadequada da junta (SINGH, 2016).

A goivagem na raiz é um processo que ocorre durante a soldagem e é definida como sendo a remoção do metal de solda e metal base da raiz da primeira solda de uma junta soldada. Pode ser abordado de duas formas diferentes, no processo de fabricação tem a função de evitar defeitos de rachaduras causadas por problema de fusão incompleta e penetração incompleta da junta na soldagem subsequente a partir do lado goivado, garantindo 100 % de fusão na raiz, no caso de reparo de uma junta soldada tem o objetivo de remover descontinuidade da passagem da raiz (JEFFUS, 2017; WAN *et al.*, 2017; SINGH, 2016; WEMAN, 2012; AWS D1.1, 2010). A goivagem na raiz pode ser aplicada para remoção do material na superfície de um tubo (ALLOUTI *et al.*, 2014) ou em chapas (SIRISATIENA *et al.*, 2018).

Sarfudeen e Muthukumaran (2020) utilizaram a goivagem na raiz para uma penetração completa da junta soldada com o processo de soldagem ao arco submerso com e sem arame frio. Zhai *et al.*, (2020) realizaram soldagem multipasse em aços de 12 mm de espessura com juntas de topo com chanfro em 60° V, na parte superior foram utilizados 5 passes de solda e uma única passada na parte inferior após a goivagem na raiz. Porém, em ambos os estudos não especificaram o procedimento correto e os valores de penetração da goivagem na raiz, a mesma situação foi encontrado nos trabalhos de Mu *et al.*, (2019), Joshi *et al.*, (2019), Jiang *et al.*, (2018), Liu *et al.*, (2018) e Huang *et al.*, (2017). Por outro lado, Park *et al.*, (2019), usaram o processo de goivagem na raiz como parte do estudo para validar o uso da soldagem Super-TIG

em aços 9% Ni (ASTM A553-Tipo 1). O processo de goivagem escolhido foi a ar, com penetração de goivagem de 5 mm na junta do aço com chanfro em 60° V, a deposição foi realizada através da formação de uma camada com seis passes na parte superior e dois passes na parte inferior após o processo de goivagem na raiz. No entanto, a influência da goivagem na microestrutura e propriedades não foram analisadas, somente o processo de soldagem a ser validado. Em outro trabalho como os de Calarasu *et al.*, (2019), o tipo de processo de goivagem, procedimento e profundidade foram especificados, porém a influência da goivagem na junta soldada também não foram consideradas.

Silva *et al.*, (2020), avaliaram o desempenho à fadiga de juntas soldadas fabricados pelo processo de soldagem a arco gás-metal e arame tubular com e sem goivagem na raiz, os resultados indicam que as juntas soldadas com o processo de soldagem com arame tubular apresentam melhor desempenho à fadiga, no entanto, após a remoção dos reforços, ambos os processos de soldagem obtiveram resultados semelhantes, sugerindo que o efeito da penetração adequada do metal de adição e um procedimento cuidadoso de goivagem na raiz tem mais relevância para o desempenho à fadiga do que características mecânicas e metalúrgica das juntas soldadas. Sirisatien *et al.*, (2018), analisaram o efeito da técnica de soldagem ao arco submerso de uma passagem de um lado para economizar tempo e custo durante as etapas de soldagem, com objetivo de substituir a soldagem de dois lados com a técnica de goivagem na raiz e também a fim de diminuir o comportamento de distorção da chapa do aço ASTM A131-A. Nesta pesquisa, a distorção e a temperatura de pico durante a soldagem foram investigadas usando diferentes tipos de preparação de juntas, entrada de calor e condições de restrição. Nesses estudos a influência da goivagem na raiz foi abordada, porém, o procedimento e profundidade da goivagem não foram especificadas.

O aço ASTM A131-A é normalmente usado para construção na indústria naval, têm usos gerais na construção de casco de embarcações e estruturas offshore (ASSUNÇÃO *et al.*, 2017; AMBADEKAR *et al.*, 2016). Os métodos comuns de fabricação disponíveis para produzir o aço ASTM A131-A são na forma de chapa laminada a quente (MOSTAFANEJAD *et al.*, 2019; GONÇALVES *et al.*, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2015)

De acordo com a norma ASTM A131/A131M – 14 o aço ASTM A131-A é classificado como aço normal, possui força normal com escoamento mínimo de 235 MPa com limite de resistência à tração de 400 MPa à 520 MPa.

A soldagem é a maneira mais eficaz e confiável para unir dois materiais metálicos semelhantes ou diferentes (RAO *et al.*, 2020). Existem vários métodos de soldagem estudados na literatura para unir o aço ASTM A131-A, como por exemplo, soldagem ao arco submerso (SIRISATIEN *et al.*, 2018), soldagem a arco gás-metal com e sem arame frio (RIBEIRO *et al.*, 2015) e soldagem com arame tubular (HEO *et al.*, 2014).

Características da junta soldada gerada pelo processo de soldagem com arame tubular no aço ASTM A131 -A foram investigadas para efeito da taxa de alimentação do arame e das misturas de gases de proteção nas emissões de CO<sub>2</sub> e CO (MERT *et al.*, 2018), tensões residuais (GONÇALVES *et al.*, 2017), custo do retrabalho devido a deformação da soldagem na montagem de blocos na construção de navios (HEO *et al.*, 2014), influência dos tratamentos térmicos de pré e pós-aquecimento e processos vibracionais (MACIEL, 2014) e condições de soldabilidade e corrosão (PATARROYO *et al.*, 2010).

No entanto, não foi encontrado estudos sobre quais os efeitos da soldagem com arame tubular e goivagem na raiz por esmerilhamento nas microestruturas e propriedades mecânicas do aço ASTM A131-A. Assim, esta pesquisa tem como objetivo estudar as microestruturas e propriedades mecânicas da junta soldada do aço ASTM A131-A, resultante da soldagem com arame tubular e goivagem por esmerilhamento da raiz, com diferentes profundidade de goivagem de 1,5 mm e 5,0 mm.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processo de Soldagem

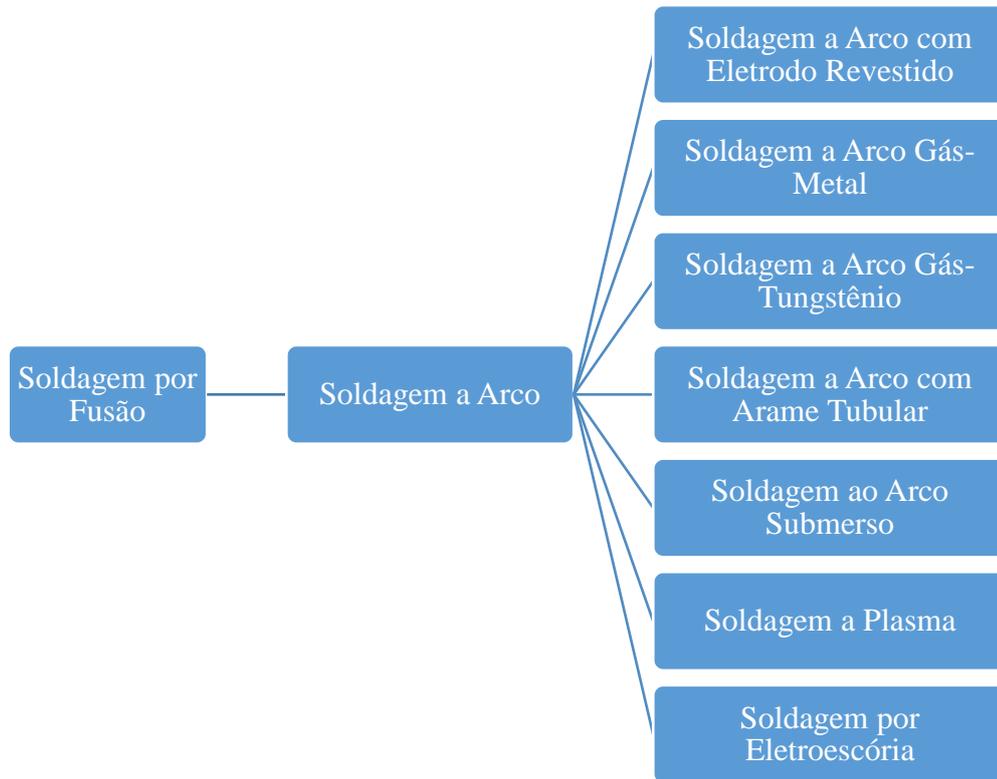
A soldagem é a união de duas peças de metal pelo aquecimento a uma temperatura alta o suficiente para causar amolecimento ou derretimento, com ou sem aplicação de pressão e com ou sem o uso de metal de adição (BOHNART, 2018).

Uma maneira de classificar os processos de soldagem consiste em agrupá-los em dois grandes grupos baseando-se no método dominante para produzir a solda: (a) soldagem por pressão e (b) soldagem por fusão (MODENESE e MARQUES, 2015). Existem um grande número de processos de soldagem tanto por pressão quanto por fusão, porém, o processo de soldagem utilizado nesse trabalho é soldagem a arco elétrico com arame tubular, ele faz parte de um subgrupo do processo de soldagem por fusão, sendo somente esse grupo apresentado aqui.

#### 2.1.1 Soldagem por Fusão

A soldagem por fusão é um processo de junção que usa a fusão do metal base para fazer o cordão de solda, nos quais os três principais tipos de processos de soldagem por fusão são: soldagem à gás, soldagem a arco elétrico e soldagem de alta intensidade (Kou, 2003). Desses, existem subclassificações, nesse trabalho será mostrado somente as subclassificações provenientes da soldagem a arco elétrico, conforme mostrado na Figura 1, pois está relacionado ao processo de soldagem utilizado nesse trabalho.

Figura 1 - Subclassificação dos processos de soldagem a arco elétrico



Fonte: Adaptado de Kou (2003).

Em geral a classificação dos processos de soldagem é organizada de diferente formas, varia de autor e norma reguladora mais comuns.

### 2.1.2 Soldagem a Arco Elétrico

A soldagem a arco elétrico refere-se aos processos de soldagem que dependem do calor de um arco elétrico para criar uma solda. O arco elétrico é um tipo de descarga elétrica que ocorre entre os elétrons quando uma tensão suficiente é aplicada através de um intervalo, causando a quebra ou ionização do gás. Geralmente, mas nem sempre, a soldagem a arco elétrico envolve o uso de metal de adição para completar a solda (PHILLIPS, 2016).

Em geral, o processo de soldagem a arco elétrico pode ser descrito como o processo no qual um arco de soldagem é atingido entre o material a ser unido e a ponta do eletrodo (SINGH, 2016). Eles podem usar corrente direta ou alternada e eletrodos consumíveis ou não consumíveis. A região de soldagem geralmente é protegida por algum tipo de gás de proteção, vapor ou escória. O processo de soldagem pode ser manual, semiautomático ou totalmente automatizado (PRADEEP *et al.*, 2019).

### 2.1.3 Soldagem a Arco com Arame Tubular

Hoje os tipos de soldagem a arco elétrico mais utilizados na indústria naval são: soldagem ao arco submerso, devido ao seu baixo custo, processo relativamente mais rápido, forma de construção mais leve e variada; soldagem a arco com eletrodo revestido, possui quase o mesmo o mesmo princípio da soldagem ao arco submerso, a diferença é que a soldagem do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido é manual e do arco submerso é automático; soldagem com arame tubular, usado devido ao seu baixo custo, processo relativamente mais rápido e operação pode ser semiautomática ou automática (PRATIKNO e DHANISTHA, 2020).

A soldagem com arame tubular é um dos processos que possui diferenças fundamentais com o processo de gás-metal com gás inerte (MIG), por exemplo, oferece mais flexibilidade na composição da liga, além de permitir maiores taxas de deposição do arame e uma maior estabilidade do arco, embora a eficiência do processo MIG seja normalmente mais alta (PRADEEP *et al.*, 2019). A soldagem com arame tubular é um processo em que a fusão é produzida pela ação de um arco elétrico estabelecido entre a peça e os arame consumível alimentado continuamente (CORRÊA, 2018).

O processo de soldagem com arame tubular exige menos habilidades de soldagem que os processos de soldagem a arco com eletrodo revestido e o gás tungstênio, as vantagens e desvantagens da soldagem com arame tubular são destacadas conforme Jukes (2018) e Phillips (2016):

Vantagens:

- Para alguns eletrodos, não é necessário gás de proteção, autoprotégido, o que é uma vantagem para ambientes ventosos ao ar livre;
- Taxas de deposição de solda mais rápidas que na soldagem a arco com eletrodo revestido, gás-tungstênio e gás-metal, porém não tão rápidas para soldagem ao arco submerso;
- Menos contaminação por metais de solda comparado ao processo de soldagem a arco gás-metal;
- Menos habilidade necessária do que na soldagem a arco com eletrodo revestido e a gás-tungstênio;

Desvantagens:

- Consumíveis mais caros que na soldagem a arco com eletrodo revestido, gás-tungstênio e gás-metal;
- Mais fumaça gerada do que na soldagem a arco com eletrodo revestido e a gás-tungstênio;
- Limitado apenas aos aços e ligas à base de níquel;
- A troca da carga requer a troca de todo o carretel e isso pode levar tempo;
- Equipamento mais complexo e caro comparado ao processo de soldagem a arco com eletrodo revestido;
- Depósitos feitos com consumíveis projetados para serem usados sem um gás de proteção, autoprotégido, geralmente apresentam baixa resistência.

O processo de soldagem a arco com arame tubular além de usado na construção naval, também é utilizado em processo de revestimento (SAHA *et al.*, 2019; GOMES *et al.*, 2013), construção de tubos e dutos para transporte de petróleo e gás natural (PRADEEP *et al.*, 2019) e na indústria marítima e offshore (JUKES, 2018). Pode ser utilizado fora do ambiente terrestre, em ambiente aquático denominado soldagem subaquática (Xing *et al.*, 2020; JIA *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018).

A soldagem a arco com arame tubular apresenta duas variações do processo, um chamado autoprotégido e outra proteção gasosa. No autoprotégido o eletrodo gera proteção gasosa suficiente, produzindo uma grande quantidade de fumaça devido à sua natureza e alta capacidade de deposição em comparação com o eletrodo do processo de soldagem com eletrodo revestido (BOHNART, 2018). Na proteção gasosa é usado o gás CO<sub>2</sub> ou uma mistura de CO<sub>2</sub> e gás argônio para a proteção da poça de fusão. A vantagem da versão com proteção gasosa é a menor produção de fumaça e uma maior capacidade de adicionar materiais benéficos ao fluxo, pois não há necessidade de incluir um material adicional para formar o gás de proteção (PHILLIPS, 2016). Esses dois processos são mostrados na Figura 2.

O objetivo dos fluxos são o mesmo que no processo de soldagem com eletrodo revestido, eles podem fornecer todo ou parte das seguintes funções apresentadas por Jeffus (2017):

- Desoxidante: o oxigênio pode estar presente na zona de soldagem de forma livre na atmosfera ao redor da solda ou como parte de um composto, como óxido de ferro ou dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Podendo causar porosidade na solda, se não

for removida ou controlada. Produtos químicos, Tabela 1, são adicionados, e reagem na presença do oxigênio e se combinam para formar compostos. Esses compostos podem se tornar parte da escória que solidifica sobre a solda, ou parte dela pode permanecer na solda como inclusões muito pequenas. Ambos resultam em uma solda com melhores propriedades mecânicas com menos porosidade;

- Escória formada: a escória no estado fundido se move através da poça de fusão e atua como ímã ou esponja para combinar quimicamente com as impurezas do metal e removê-las;
- Agentes de fluxo: o metal de solda fundido tende a ter uma alta tensão superficial, o que impede que ele flua para fora em direção às bordas da solda. Os agentes de fluxo tornam a solda mais fluida e permite que ela flua para as bordas da solda;
- Estabilizador do arco: os produtos químicos no fluxo afetam a resistência do arco, à medida que ela é reduzida, a tensão do arco cai e a penetração é reduzida. Quando a resistência do arco aumenta, a tensão do arco aumenta e a penetração é aumentada. Embora a resistência dentro do fluxo de arco ionizado possa mudar, o arco é mais estável e mais fácil de controlar;
- Elementos de liga: Alguns elementos alteram a força, ductilidade, dureza, fragilidade, tenacidade e resistência à corrosão da solda. O metal em pó pode ser adicionado ao fluxo e usado como elementos de liga ou eles podem simplesmente aumentar a deposição;
- Gás de proteção: os elementos no fluxo vaporizam após aquecidos pelo arco e formam nuvens de proteção, essas nuvens forçam o ar ao redor da zona de solda para longe da poça de fusão. Sem a proteção que esse processo proporciona ao metal fundido, ele oxidaria rapidamente, afetando as propriedades mecânicas da solda, tornando-a imprópria para serviço.

O gás de proteção é um dos fatores principais que afetam a microestrutura e as propriedades mecânicas das soldas, onde, em uma porcentagem de 100% CO<sub>2</sub> a área austenítica aumenta e a porcentagem de ferrita diminui, além de, o tamanho e volume de inclusões de óxidos aumentam (KATHERASAN *et al.*, 2013).

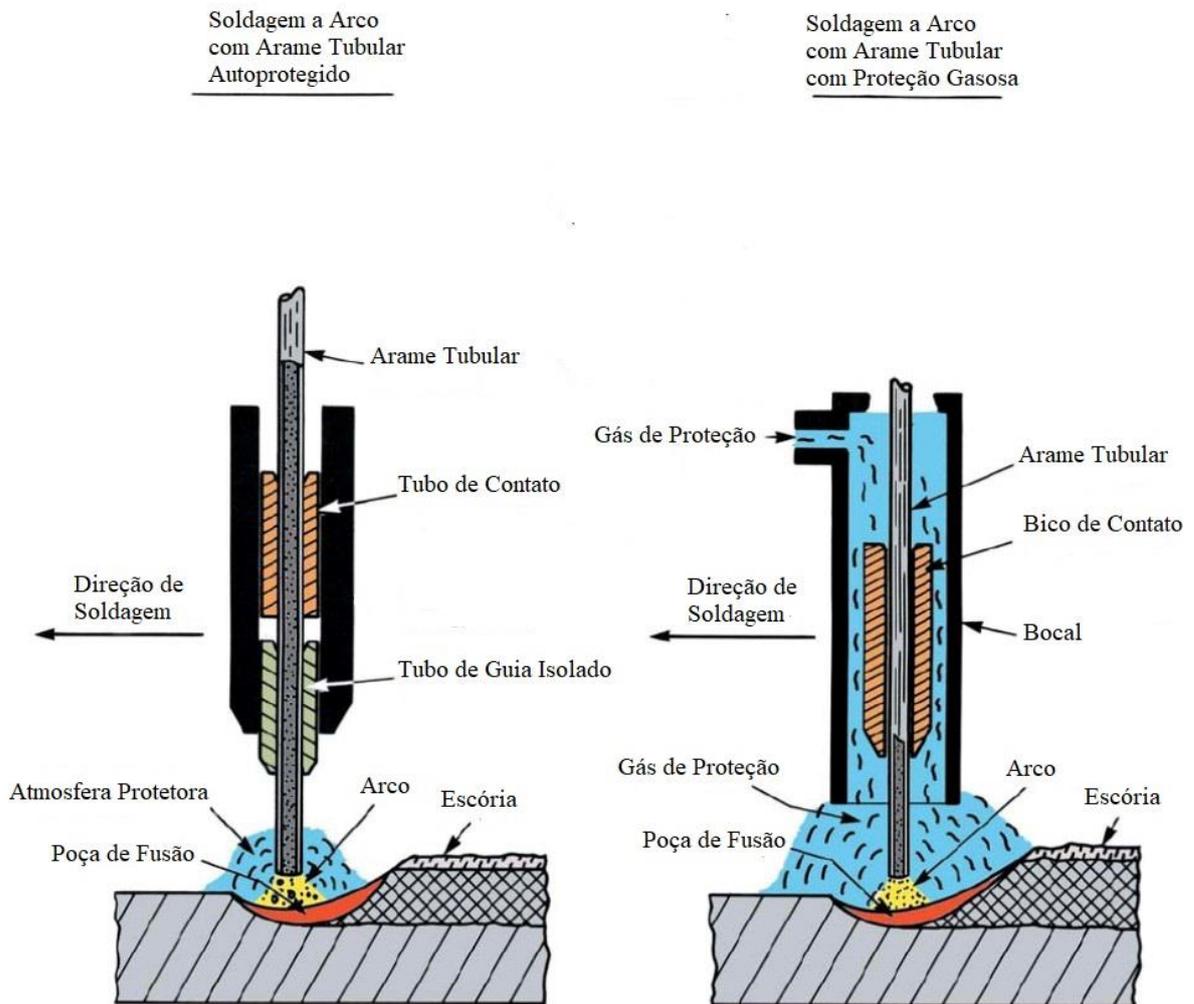
Tabela 1- Elementos desoxidantes adicionados no metal de solda

<b>Elemento Desoxidante</b>	<b>Intensidade</b>
Alumínio (Al)	Muito forte
Manganês (Mn)	Fraco
Silício (Si)	Fraco
Titânio (Ti)	Muito forte
Zircônio (Zr)	Muito forte

Fonte: Adaptado de Jeffus (2017).

Na Figura 2, ambos os métodos mostram a direção de soldagem, o fluxo do eletrodo, a deposição do metal de adição, o arco, o gás de proteção, a poça de fusão, e a escória protegendo a solda do ar. A diferença dessas duas variações está no método de proteção contra a contaminação atmosférica no arco e da poça de fusão.

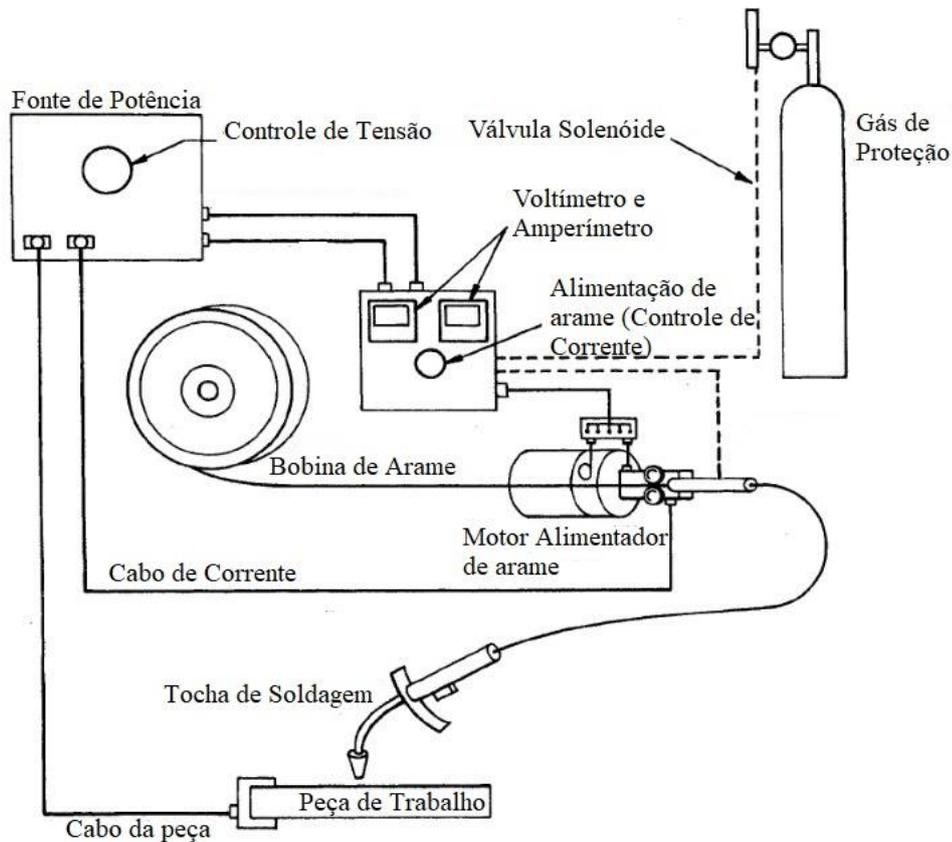
Figura 2- Dois tipos de processo de soldagem a arco elétrico com arame tubular: autoprottegido (à esquerda) e com proteção gasosa (à direita)



Fonte: Adaptado de O'Brien (2004).

A soldagem a arco com arame tubular é um processo de soldagem eficiente, prontamente adaptável a operações de soldagem semiautomáticas ou automáticas e capaz de produzir metal de solda de alta qualidade a uma alta taxa de deposição (O'BRIEN, 2004). O equipamento para a soldagem semiautomática da soldagem a arco com arame tubular de forma geral é composto por uma fonte de energia de tensão constante, um alimentador do arame, uma tocha de soldagem, cabos e mangueiras (MODENESE e MARQUES, 2015), conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Equipamento básico para a soldagem semiautomática do processo de soldagem a arco elétrico com arame tubular



Fonte: Adaptado de O'Brien (2004).

A diferença de equipamento dos tipos de soldagem a arco com arame tubular é que no tipo proteção gasosa onde há a necessidade uma fonte de gás, reguladores de pressão/vazão de gás ao arco e a tocha de soldagem é menos simples que no tipo autoprottegido.

Nesse trabalho o processo de soldagem com arame tubular utilizado é o com proteção gasosa de 100% CO<sub>2</sub>, eletrodo para soldagem a arco com arame tubular é o A5.20, *Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding (FCAW)*, da AWS, os eletrodos dessa classificação são específicos para uso na soldagem a arco com arame tubular em aços carbono.

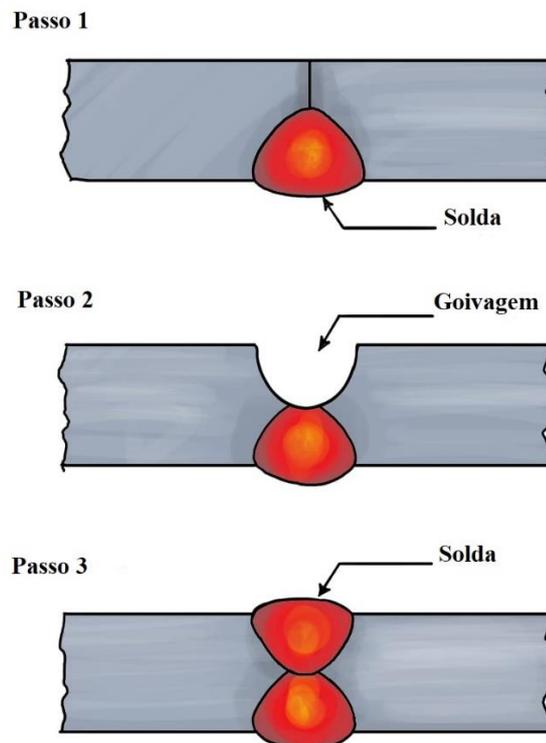
## 2.2 Processo de Goivagem na Raiz

A goivagem é um dos tipos de processo de fabricação comumente utilizado para corte e reparo, ela remove o material depositado na junta no intuito de limpar a raiz e para remoção de cordões de solda com defeitos (AWS D1.1, 2010). A goivagem na raiz é um processo que

ocorre durante a soldagem e é definida como sendo a remoção do metal de solda e metal base da raiz da primeira solda de uma junta soldada. Pode ser abordado de duas formas diferentes, no processo de fabricação tem a função de evitar defeitos de rachaduras causadas por problema de fusão incompleta e penetração incompleta da junta na soldagem subsequente a partir do lado goivado, garantindo 100 % de fusão na raiz, no caso de reparo de uma junta soldada tem o objetivo de remover descontinuidade da passagem da raiz (JEFFUS, 2017; WAN *et al.*, 2017; SINGH, 2016; WEMAN, 2012; AWS D1.1, 2010). A goivagem na raiz é caracterizada pela remoção do material na superfície de um tubo (ALLOUTI *et al.*, 2014) ou em chapas (SIRISATIENA *et al.*, 2018).

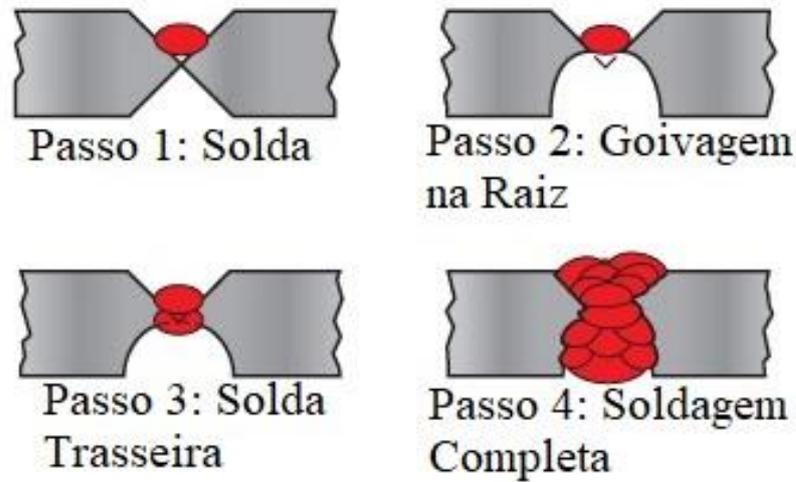
O processo de goivagem é demonstrada na Figura 4 para placas com as juntas preparadas em um lado, chanfro em V simples e na Figura 5 para placas com as juntas preparadas nos dois lados, chanfro em V duplo.

Figura 4 - Etapas do processo de goivagem para juntas preparadas em um lado, chanfro em V simples



Fonte: Adaptado de Jeffus (2017).

Figura 5 - Etapas do processo de goivagem para juntas preparadas em dois lados, chanfro em V duplo



Fonte: Adaptado de Jeffus (2017).

Nas soldas de topo, a selagem da raiz pode provocar sérios defeitos, como fragilização, fissuramento e inclusão de escória, devido à alta velocidade de resfriamento e à insuficiente penetração da soldagem naquela região, por estas razões, procede-se a goivagem da raiz, para remover os defeitos existentes, antes do passe final (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Após o primeiro passe de soldagem a raiz da primeira solda é removida, depois é limpo a área goivada e por fim é efetuado o passe final de soldagem do lado goivado. As superfícies devem ser completamente limpas antes da soldagem final (AWS D1.1, 2010). O passe final da raiz deve ser executado com a mesma classe de eletrodos utilizada nos passes precedentes, após a inspeção da operação de goivagem (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

É importante tentar não remover muito metal de solda em uma passagem, o processo funcionará melhor se pequenas quantidades forem removidas por vez, se for necessária uma remoção mais profunda, vários passes de goivagem podem ser usados (JEFFUS, 2017).

Para Silva *et al.*, (2020), o procedimento de goivagem na raiz se for aplicado adequadamente, as juntas soldadas irão apresentar um nível de qualidade adequado, possível de ser alcançado em um ambiente de campo ou de chão de fábrica. Pelo contrário, na ausência de goivagem na raiz ou com aplicação inadequada do procedimento, ocorre um nível de integridade mais baixa e, conseqüentemente, provavelmente seria observado um desempenho inferior à fadiga.

Existem três métodos principais de goivagem (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982):

- Goivagem a ar com arco elétrico;
- Goivagem a maçarico oxiacetilênico;
- Goivagem por meios mecânicos, compreendendo a usinagem e o esmerilhamento.

É necessário inspecionar a ranhura goivada, quer visualmente, quer por meio de gabaritos, onde para chapas finas o esmeril é suficiente para se efetuar a goivagem (OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

Nesse trabalho a junta soldada foi feita conforme os passos mostrados na Figura 4 e a goivagem na raiz do primeiro cordão de solda foi feita por meio mecânico utilizando esmeril.

### 2.3 Energia de Soldagem

Um parâmetro importante é a energia de soldagem na fabricação de uma solda, ela é expressa como energia por unidade de comprimento e é principalmente uma função da tensão, corrente e velocidade de soldagem (PHILLIPS, 2016).

A energia de soldagem durante a soldagem pode ser um fator principal que influencia as propriedades das soldas, afeta os ciclos de temperatura-tempo que ocorrem durante a soldagem (EN 1011-1, 2002). Os tamanhos da zona fundida e da zona afetada pelo calor são consideravelmente influenciados pela energia de soldagem, assim como, o tamanho dos grãos de austenita na zona afetada pelo calor e as fases presentes na zona fundida (CHEN *et al.*, 2020). Tensões residuais locais são influenciadas pela energia de soldagem e pela temperatura de pré-aquecimento, onde, maior energia de soldagem e pré-aquecimento levam a um aumento das tensões residuais de tração na solda e na ZAC (SCHAUPP, 2017).

A equação para definição da energia de soldagem utilizada nos trabalhos de Ostromecka (2017) e Amraei *et al.*, (2019) será utilizada nesse trabalho e é dada conforme a norma europeia EN 1011-1- *European Standard: Welding Recommendation for Welding of Metallic Materials: Part 1: General Guidance for Arc Welding:*

$$Q = n \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \text{ em kJ/mm}$$

Onde:

$Q$  = Aporte de energia (kJ/mm)

$n$  = Eficiência térmica do processo (norma EN 1011-1:2002)

$U$  = Tensão de soldagem (V)

$I$  = Corrente de soldagem (A)

$v$  = Velocidade de soldagem (mm/s)

Os valores de eficiência térmica do processo ( $n$ ) são escolhidos conforme o processo de soldagem utilizado. Ela é usada nos procedimentos de soldagem para calcular a energia por unidade de comprimento da solda, os valores de eficiência são fixos, estritamente definidos para cada processo de soldagem e independentes dos parâmetros de soldagem (HÄLSING *et al.*, 2017). A norma EN 1011-1:2002 informa os valores para  $n$  conforme mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 - Eficiência térmica ( $n$ ) para alguns processos de soldagem a arco elétrico

<b>Processo</b>	<b>Fator <math>n</math></b>
Soldagem MIG	0,8
Soldagem MAG	0,8
Soldagem a arco com arame tubular – sem proteção gasosa	0,8
Soldagem a arco com arame tubular – com proteção de gás ativa	0,8
Soldagem a arco com arame tubular – com proteção de gás inerte	0,8
Soldagem TIG	0,6

Fonte: Adaptado de EN 1011-1 (2002).

Para os cálculos de aporte térmico desse estudo será feito conforme a equação e fator  $n$  dado pela norma EN 1011-1.

O processo de soldagem pode ser entendido de uma maneira muito melhor se pudermos registrar as variações que ocorrem durante o próprio processo na mesma taxa em que estão acontecendo. Essas variações que ocorrem no arco de soldagem em um período muito curto de tempo que causam flutuações nos sinais de corrente e tensão de soldagem são devido a transferência de metal, curto-circuito, respingos e reações gás-metal (KUMAR *et al.*, 2019). Nesse trabalho foi feito o monitoramento e aquisição dos parâmetros de corrente e tensão na forma de gravação de vídeo direto no visor do equipamento de soldagem, devido à falta de equipamentos apropriados. Porém, existem outros processos melhores e mais recomendados do que o utilizado nesse trabalho, como por exemplo, sistema de aquisição de dados de soldagem o SAT V.30s da IMC® (SOEIRO JR, 2018), sistema de aquisição de dados TVC (*The Validation Center*) para capturar assinaturas de corrente e tensão (SUMESH *et al.*, 2018), sistema de monitoramento de corrente versus tempo e tensão versus tempo SAP V4 da IMC Welding (LUCHTENBERG *et al.*, 2019) e osciloscópio DSO (*Digital Storage Oscilloscope*) para coleta em tempo real e exibição dos parâmetros de soldagem (KUMAR *et al.*, 2019).

## 2.4 Microestrutura

A microestrutura dos aços apresenta diferentes morfologias que são influenciadas por um grande número de parâmetros, como elementos de liga, configuração da laminação, taxas de resfriamento, tratamento térmico e pós tratamentos (KRAUS, 2015).

A classificação de microestrutura do Instituto de Soldagem (IIW – *Internacional Institute of Welding*) é amplamente usado como material de apoio para a investigação de microestrutura dos aços (GIRÃO, 2018), (RIBEIRO, 2015), (RODRIGUES, 2011) e (THEWLIS, 2004).

Thewlis (2004) propôs um esquema de classificação e quantificação de microestruturas dos aços, com a forma de obter informações sobre microestruturas observadas em aço carbono e aço de baixa liga, onde usou como base para classificações e quantificação de microestruturas o esquema do IIW.

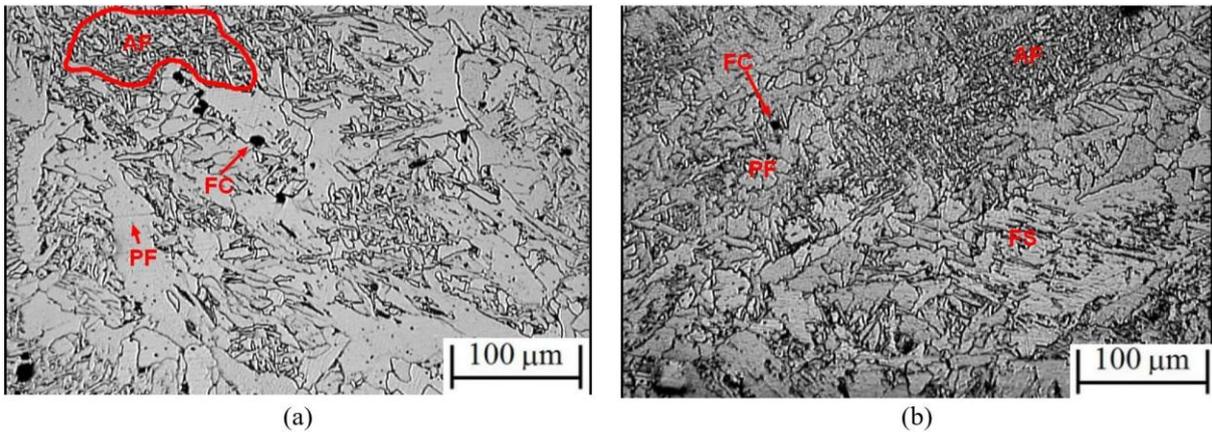
De acordo com esses autores, algumas dessas microestruturas mais comuns para aço baixo carbono estão descritas na Tabela 3 e demonstradas esquematicamente nas Figuras 6 e 7.

Tabela 3 - Classificação dos microconstituintes de uma junta soldada para aço baixo carbono

<b>Microestrutura</b>	<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
Ferrita Primária de Contorno de Grãos	PF(G)	Veios de ferrita associados aos contornos de grãos austeníticos
Ferrita Primária Poligonal Intragranular	PF(I)	Grãos de ferrita poligonais, localizado dentro dos grãos austeníticos e mais 3 vezes maiores do que os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita
Ferrita Acicular	FA	Grãos de ferrita pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos austeníticos.
Ferrita com Segunda Fase Alinhada	FS(A)	Duas ou mais ripas paralelas ao longo dos contornos de grão austeníticos. No caso de apenas duas placas, a razão de aspecto é maior que 4:1
Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada	FS(NA)	Não se apresentam paralelas como a FS(A), porém seu mecanismo de formação é o mesmo. Apresentam circundando microfases ou a AF.
Agregado Ferrita Carboneto ou Perlita	FC ou P	Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos interfásicos e perlita, ele deve ser designado como FC (P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austeníticos prévio, ele deve ser desprezado
Ferrita Widmanstätten	FW	A nucleação pode ser no contorno de grão austenítico ou a partir de alotrimorfos nucleados inicialmente no contorno de grão.
Ferrita Alotrimórfica	-	Proveniente da nucleação e crescimento de um cristal ao longo do contorno de grão austenítico.

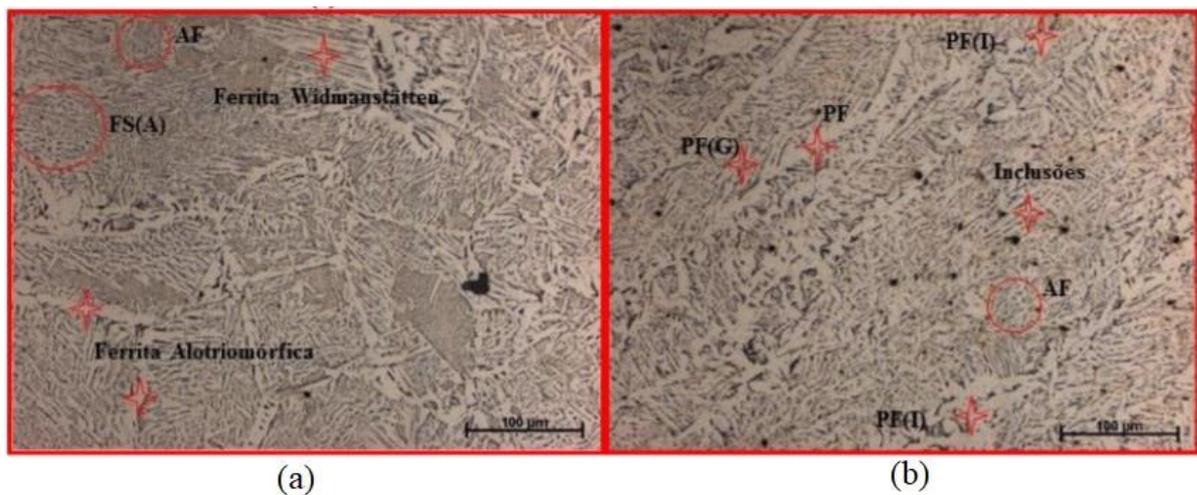
Fonte: Adaptado de Girão (2018), Bhadeshia e Honeycombe (2017), Ribeiro (2015), Rodrigues (2011), Copart (2008) e (Thewlis, 2004).

Figura 6 - Microestrutura da zona fundida (a) na raiz e (b) no segundo passe no aço ASTM A131-A. AF - ferrita acicular; PF - ferrita primária; FS - ferrita com segunda fase; FC - agregados ferrita-carboneto



Fonte: Gonçalves *et al.* (2017).

Figura 7 - Microestrutura da zona afetada pelo calor (a) e zona fundida (b) para o aço da classe ASTM A131. AF - ferrita acicular; FS(A) - ferrita com segunda fase alinhada; ferrita alotrimórfica; ferrita windmastatten; PF(G) - ferrita de contorno de grão; PF(I) - ferrita poligonal intragranular; FP - ferrita primária e inclusões



Fonte: Costa (2017).

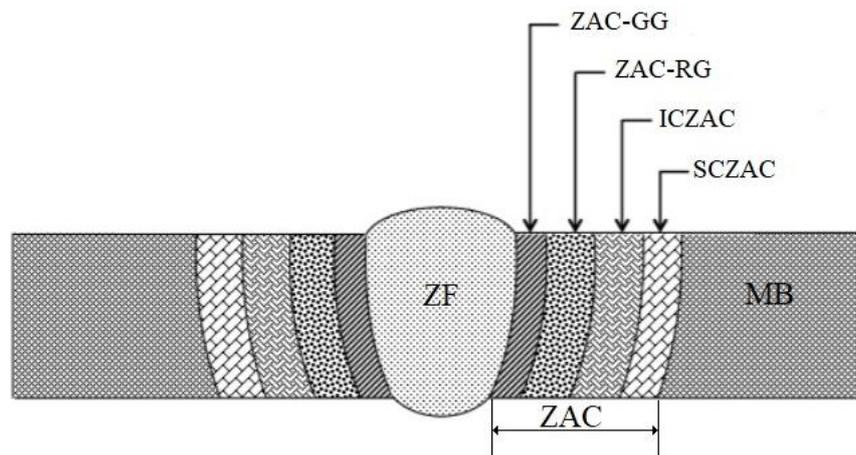
Ao correlacionar as microestruturas e as propriedades mecânicas a proporção de ferrita acicular é considerada benéfica para a tenacidade à fratura do material, e a ferrita Widmanstätten como prejudicial para as propriedades de tenacidade (SILVA *et al.*, 2020; RIBEIRO, 2016). A ferrita acicular é a fase mais comumente observada quando a austenita se transforma durante o resfriamento de depósitos de metal de solda em aço de baixa liga (SHIN *et al.*, 2015).

### 2.4.1 Região da Junta Soldada

A região da junta soldada compreende entre a região de zona fundida (ZF), zona afetada pelo calor (ZAC) e o metal base (MB), Figura 8. A metalurgia de cada área de solda está relacionada com as composições da base e dos metais de solda, ao processo de soldagem e aos procedimentos usados (JENNEY e O'BRIEN, 2001).

A zona afetada pelo calor (ZAC), é a região do metal base adjacente à solda que suporta o calor da soldagem associada a diferentes picos de temperatura. Durante a soldagem, a ZAC não derrete, mas sofre alterações microestruturais (SHARMA e MAHESHEARI, 2017).

Figura 8 - Desenho esquemático da região da junta soldada e das transformações microestruturais da ZAC para um único passe. ZF - Zona fundida; ZAC - Zona afetada pelo calor; ZAC-GG - Região de grão grosseiro; ZAC-RG - Região de refino de grão; ICZAC - Região intercrítica; SCZAC - Região subcrítica; MB - Metal base

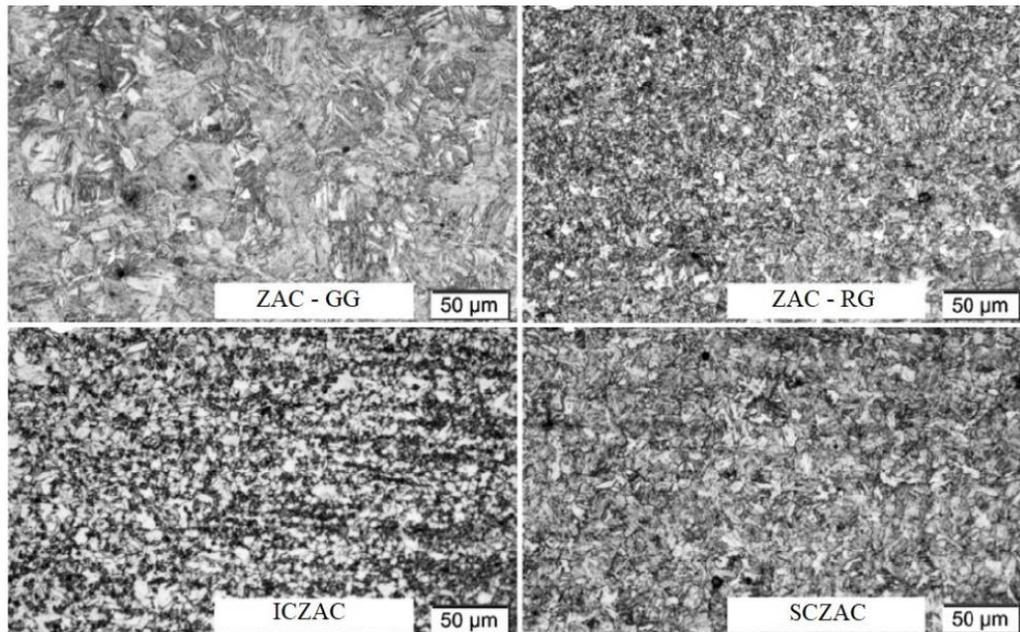


Fonte: Adaptado de Lolla (2014).

A evolução da microestrutura da ZAC real pode ser bastante complexa, dependendo da composição da liga, histórico de processamento anterior e fatores térmicos associados ao processo de soldagem (PHILLIPS, 2016). O autor informa que uma abordagem para entender os recursos microestruturais na ZAC é através do uso de diagramas de fases de equilíbrio, no entanto, as ligas metálicas que exibem transformações de fase, como os aços, podem formar microestruturas de solda que não são previstas por diagramas de fase de equilíbrio devido as condições de resfriamento sem equilíbrio típicos das soldas, sendo assim, muitos princípios metalúrgicos padrão existentes não podem ser aplicados ou apenas podem ser usados como uma aproximação do comportamento metalúrgico.

A Figura 8, mostra as transformações microestruturais (subzona) em condição de equilíbrio que compõe a ZAC para um único passe: região de grão grosseiro (ZAC-GG), região de refino de grão (ZAC-RG), região Intercrítica (ICZAC) e região subcrítica (SCZAC). A Figura 9, mostra a morfologia e transição das microestruturas presentes na ZAC.

Figura 9 - Morfologia e transição das microestruturas presentes na ZAC de passe único do aço de alta resistência S690QL



Fonte: Adaptado de Celin (2016).

Para Girão (2018) as principais características das subzonas da ZAC são:

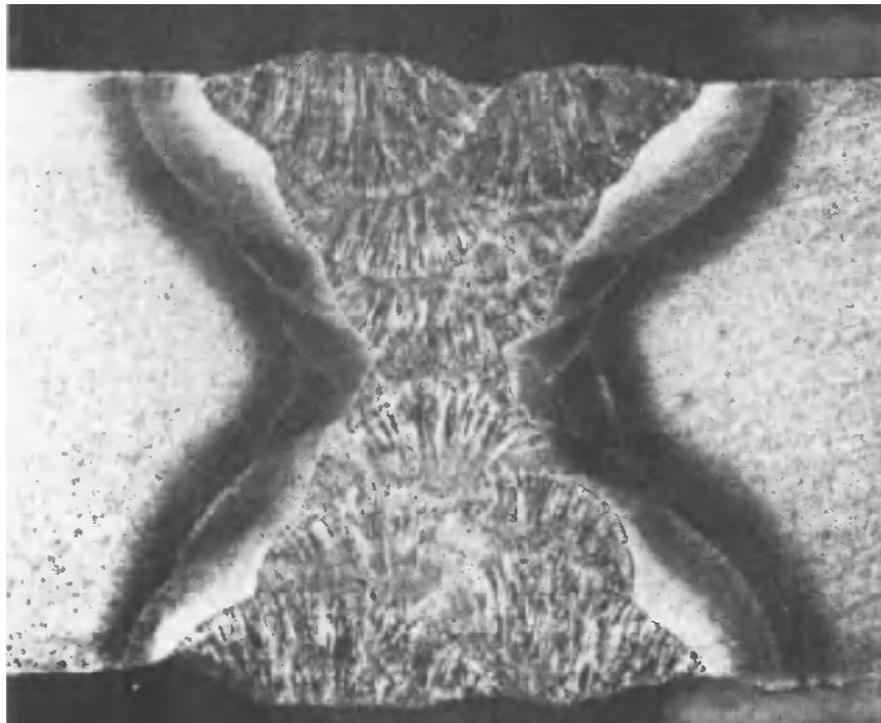
- Das microestruturas que merece mais atenção para projetos mecânicos é a região de grão grosseiro (ZAC-GG) por ser a região mais próxima da solda, é submetida a temperaturas próximas da de fusão, com isso permite um rápido crescimento do grão austeníticos (aproximadamente acima de 1000 °C);
- Na região de refino de grãos (ZAC-RG), o material é submetido a temperaturas próximas as de normalização, aproximadamente de 900 a 1000 °C, os grãos são caracterizados por uma estrutura de ferrita fina;
- Na região intercrítica (ICZAC), a temperatura varia entre 727 °C (temperatura eutetoide) e a linha A3, sendo caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal base.

- As características da ZAC dependem, do tipo de metal base e do processo e procedimento de soldagem, isto é, do ciclo térmico e da repartição térmica, dependendo do tipo de metal que está sendo soldado, os efeitos do ciclo térmico poderão ser os mais variados, por exemplo os aços carbono e aços baixa liga.

#### 2.4.2 Soldagem Multipasse

Soldas multipasses são utilizadas quando é necessário reduzir as tensões residuais. Na Figura 10, mostra uma junta soldada em V duplo, essa micrografia mostra como a estrutura fundida original do metal de solda é reaquecida localmente e modificada na aparência (EASTERLING, 1992). A soldagem multipasse permite iniciar um procedimento sem pré-aquecimento, contanto que, a sequência de soldagem permaneça para assim manter o nível de temperatura suficientemente alto entre as camadas (CALARASU *et al.*, 2019).

Figura 10 - Macrografia de uma junta soldada com dois passes de solda em chanfro de V duplo



Fonte: Easterling (1992)

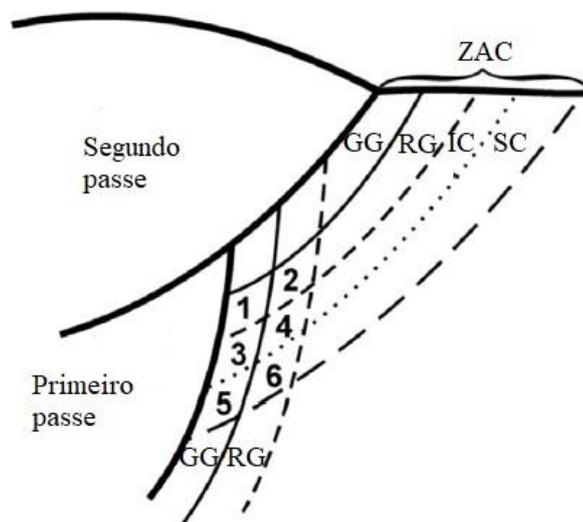
Juntas soldadas multipasses são significativamente mais complexas, já que os ciclos térmicos de passes subsequentes alteram a microestrutura dos passes anteriores, fazendo com que a ZAC seja dividida em diversas regiões de acordo com a temperatura de pico atingida ao longo dos

múltiplos passes (MACIEL, 2014). Nesse caso, as regiões da ZAC do primeiro passe são reaquecidas a diferentes temperaturas de pico durante o segundo ciclo térmico do segundo passe de solda (CELIN *et al.*, 2016).

Na Figura 11, mostra as transformações microestruturais de diferentes regiões da ZAC do primeiro passe de solda reaquecido como mostrado no trabalho de CELIN *et al.*, (2016) essas regiões são descritas:

- Região 1: ZAC – SCR ZAC-GG, ZAC de crescimento de grão supercrítico;
- Região 2: ZAC – IR ZAC-GG, ZAC de crescimento de grão intercrítica;
- Região 3: ZAC – SC ZAC-GG, ZAC de crescimento de grão subcrítico;
- Região 4: ZAC – SCR ZAC-RG, ZAC de crescimento de grão supercrítico;
- Região 5: ZAC – IR ZAC-RG, ZAC de crescimento de grão intercrítica;
- Região 6: ZAC – SC ZAC-RG, ZAC de crescimento de grão subcrítico.

Figura 11 - Desenho esquemático das transformações microestruturais da ZAC (zona afetada pelo calor) para dois passes de solda



Fonte: Adaptado de Celin (2016).

Se a região da ZAC-GG do primeiro passe for reaquecida, ela será denominada de SCR ZAC-GG, IR ZAC-GG e SC ZAC-GG, com base na temperatura de pico atingida por essa região durante a segunda passagem. Essa terminologia pode ser estendida de maneira semelhante a outras regiões da ZAC resultantes da primeira passagem como mostra a Figura 11 (LOLLA, 2014).

## 2.5 Efeitos dos Elementos Microligantes no Aço Baixo Carbono

Dependendo da quantidade, um elemento pode ser chamado de microligante, quando é capaz de exercer uma influência marcante ou específica sobre as propriedades e microestruturas de um aço (FERNANDES, 2011). De um modo geral, pode-se dizer que os elementos de liga podem influenciar no equilíbrio dos diagramas de fase de duas maneiras: expandindo ou contraindo o campo austeníticos (GIRÃO, 2018).

Os principais elementos microligantes do aço ASTM131-A são apresentados na Tabela 5 e são descritos conforme Bohnart (2018):

- O silício (Si) é adicionado principalmente como agente desoxidante para produzir solidez durante o processo de fabricação do aço. Uma grande quantidade de silício pode aumentar a resistência à tração. Se o teor de carbono também for alto, a adição de silício aumentará a tendência a rachaduras.
- O manganês (Mn) aumenta a resistência à tração e a dureza. Cuidados especiais devem ser tomados na soldagem, uma vez que os aços de manganês tendem a porosidade e fissuração.
- O fósforo (P), geralmente está presente no minério de ferro. Pequenas quantidades melhoram a usinabilidade do aço de baixo e alto carbono. No entanto, é uma impureza no que diz respeito à soldagem, e o conteúdo em aço deve ser o mais baixo possível, onde mais de 0,04% de fósforo torna as soldas quebradiças e aumenta a tendência a rachaduras.
- O enxofre é considerado uma impureza prejudicial no aço porque torna o aço quebradiço e causa rachaduras a altas temperaturas. O teor de enxofre no aço deve ser mantido abaixo de 0,05%. O enxofre aumenta a tendência do cordão de solda rachar durante o resfriamento e também pode causar porosidade extrema se a penetração da solda for profunda.

## 2.6 Aço ASTM A131 – A

O material utilizado neste trabalho para estudo é o aço ASTM A 131 – A, é um aço estrutural usado na fabricação de embarcações, esse material responde as especificações sendo um metal base para construção de estruturas soldadas conforme a norma AWS D1.1 (*Structural Welding Code – Steel*, 2010).

O aço ASTM A131-A é especificado pelo comitê da ASTM (*American Society for Testing and Materials*). A ASTM especifica esse aço em duas categorias:

- Força normal: Graus A, B, C, D e E, com o escoamento mínimo de 235 MPa.
- Força superior: Graus AH, DH, EH e FH, com o escoamento mínimo de 315 MPa, 350 MPa ou 390 MPa.

O aço ASTM A131-A é um aço com baixo teor de carbono comum com grau A, as especificações para esse tipo de aço seguem conforme o especificado, onde para a fabricação do aço ele deve ser acalmado com alumínio para obter um refinamento dos grãos. Os tratamentos térmicos e laminação devem seguir conforme mostrado na Tabela 4:

Tabela 4 - Condições de Fornecimento e Frequência de Teste de Impacto para o Aço Carbono de Grau A

Grau	Desoxidação	Produto <sup>A</sup>	Condição de Fornecimento <sup>B</sup> (Frequência para Teste de Impacto <sup>C</sup> )			
			Espessura (t), in (mm)			
			t > 0,25(6,4)	t > 1,0(25)	t > 1,375(35)	t > 2,0 (50)
			t ≤ 1,0(25)	t ≤ 1,375(35)	t ≤ 2,0(50)	t ≤ 4,0 (100)
		P				N(-) <sup>E</sup> , TM(-), CR (50(45)), AR (50 (45))
A	Acalmado			A (-)		NA <sup>D</sup>
		S				

Fonte: Adaptado da norma ASTM A131/A131M – 14 (2014)

<sup>A</sup> Produto: P= chapa e S= perfilados e barras

<sup>B</sup> Condições de Fornecimento: A= nenhuma condição; AR: laminado; N: normalizado; CR: laminação controlada; TM: processo termomecânico controlado.

<sup>C</sup> Frequência para Teste de Impacto: (tamanho do lote de teste de impacto em toneladas (Mg) para cada calor); (-) = nenhum teste de impacto é requisitado; (P): cada chapa laminada.

<sup>D</sup> Condição de fornecimento não é aplicado.

<sup>E</sup> Teste de Impacto para Grau A não são requisitados se o material é produzido por refino de grão e normalização.

A composição química deve estar em conformidade com teor de carbono na qual pertence o aço, na literatura para os aços classificados como baixo teor de carbono é de concentração menor que 0,25%p C, de acordo com o especificado pela ASTM a composição química do A131 -A está apresentada na Tabela 5:

Tabela 5 - Composição Química para Aços com Baixo Teor de Carbono Grau A

Composição Química (Análise Térmica) % max, exceto quando outra é especificada <sup>A</sup>										
Grau	A									
Desoxidação e	Acalmado ou Semi-acalmado t ≤ 2,0 in. (50 mm)									
Espessura (t)	Acalmado t > 2,0 in. (50 mm)									
Elemento	C	Mn, min	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	C + Mn/6
Quantidade	0,21 <sup>C</sup>	2,5 x C	0,50	0,035	0,035	E	E	E	E	0,40

Fonte: Adaptado da norma ASTM A131/A131M – 14 (2014).

<sup>A</sup> Elementos intencionalmente adicionados devem ser determinados e reportados.

<sup>C</sup> Um teor máximo de carbono 0,23% é aceitável para perfis e barras de Grau A.

<sup>E</sup> Quando o conteúdo de níquel, cromo, molibdênio e cobre deve ser determinado e relatado. Quando o valor não exceder 0,02%, esses elementos devem reportados como ≤ 0,02%.

De acordo com a composição os valores de limite de resistência, limite de escoamento e alongamento são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 - Valores de resistência mecânica exigidas para aços baixo carbono ASTM A131 grau A

Grau	A
Limite de Resistência ksi (MPa)	58 a 75 (400 a 520)
Limite de Escoamento ksi (MPa)	34 (235)
Alongamento em 8 in (200 mm), <sup>AB</sup> min, %	21
Alongamento em 2 in (50 mm), <sup>BC</sup> min, %	24

Fonte: Adaptado da norma ASTM A131/A131M – 14 (2014)

<sup>A</sup> Para espessura nominal ou diâmetro abaixo de 5/16 in. (8 mm), uma dedução da porcentagem especificada do alongamento deve ser feita. De acordo com o especificado na norma A6/A6M para valores de dedução.

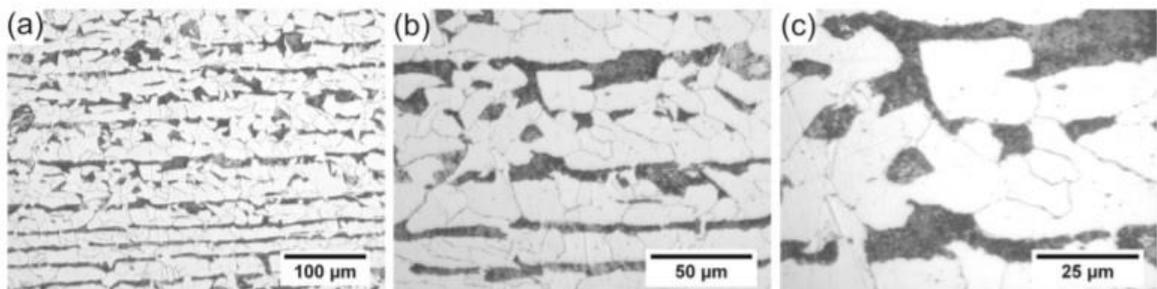
<sup>B</sup> O alongamento não é necessário para chapas para pisos laminados.

<sup>C</sup> Para espessura nominal ou diâmetro acima de 3,5 in. (90 mm), uma dedução da porcentagem especificada de alongamento deve ser feita. Verificar norma A6/A6M para valores de dedução.

<sup>D</sup> Para perfis e barras de Grau A, o limite de resistência pode ser 80 ksi (550 MPa).

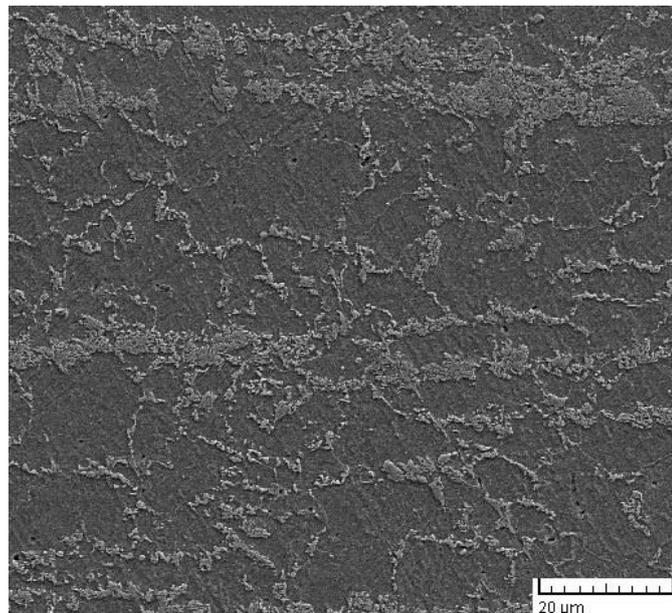
O aço naval ASTM A131-A possui uma microestrutura de ferrita-perlita (ASSUNÇÃO *et al.*, 2017), como mostrado na Figura 12. Como pode ser visto nas imagens MEV, Figura 13, o aço ASTM A131-A contém estrutura de fase de ferrita e perlita em forma de agulhas (MOSTAFANEJAD *et al.*, 2019), essas microestruturas são antes do aço passar por algum processo de soldagem.

Figura 12 - Microestrutura do aço ASTM A131-A após laminado e antes de algum processo térmico



Fonte: Assunção *et al.* (2017).

Figura 13 - Microestrutura do aço ASTM A131 - A por microscopia de varredura eletrônica (MEV)



Fonte: Mostafanejad *et al.* (2019).

Características da junta soldada gerada pelo processo de soldagem com arame tubular no aço ASTM A131 -A foram investigadas para efeito da taxa de alimentação do arame e das misturas de gases de proteção nas emissões de CO<sub>2</sub> e CO (MERT *et al.*, 2018), tensões residuais (GONÇALVES *et al.*, 2017), custo do retrabalho devido a deformação da soldagem na montagem de blocos na construção de navios (HEO *et al.*, 2014), influência dos tratamentos térmicos de pré e pós-aquecimento e processos vibracionais (MACIEL, 2014) e condições de soldabilidade e corrosão (PATARROYO *et al.*, 2010).

O comportamento de corrosão do aço ASTM A131-A foi investigada por Mostafanejad (2019) em água do mar simulada por meio de teste de taxa de deformação lenta, teste de carga estática em combinação com observação de fratura e avaliações eletroquímicas. Os resultados revelaram suscetibilidade ao craqueamento por corrosão sob tensão, taxa de corrosão foi aumentada com aplicação de tensão de tração na faixa elástica e baixa resistência à corrosão comparado com o aço de alta resistência e da mesma norma A131-AH32. No entanto, aplicação de tensão elástica não teve efeito no potencial de corrosão do aço ASTM A131-A.

Outros estudos foram feitos com o aço ASTM A131-A como por exemplo para validar o protótipo SuSy (*Surfacing System for Ship Recovery*), que são balões inflados a gás que fornece fluidez de reserva a navios danificados com o objetivo de impedir o emborque e/ou naufrago do navio, além de levantar destroços do fundo do mar (ZILAKOS *et al.*, 2018). A viabilidade do processo de soldagem a arco gás-metal com arame frio de soldar um chanfro de 5 mm de largura foi estudada através da análise da seção transversal da junta, microestrutura e dureza Vickers, revelando que, devido a fixação do arco no arame frio, a erosão da parede lateral foi reduzida em comparação com as juntas soldadas pelo processo de soldagem a arco gás-metal convencional (ASSUNÇÃO *et al.*, 2017).

Sirisatien *et. al.*, (2018), analisaram o efeito da técnica de soldagem ao arco submerso de uma passagem de um lado para economizar tempo e custo durante as etapas de soldagem, com objetivo de substituir a soldagem de dois lados com a técnica de goivagem na raiz e também a fim de diminuir o comportamento de distorção da chapa do aço ASTM A131-A. Nesta pesquisa, a distorção e a temperatura de pico durante a soldagem foram investigadas usando diferentes tipos de preparação de juntas, entrada de calor e condições de restrição. Os resultados mostraram as temperaturas de pico nas amostras em chanfro V único de 30 ° foram maiores do que em amostras em chanfro quadrado com mesma energia de soldagem. Os valores de deflexão máxima foram comparados com a distorção encontrada na amostra de referência

soldada com a técnica tradicional de dois lados e duas passadas com goivagem, algumas amostras de soldagem com a técnica de uma passada de um lado tiveram valores de distorção máximos maiores do que a amostra de referência.

Informações sobre o método de fabricação, composição química e características mecânicas conforme a norma do material que será estudado é de grande importância para nível de comparação com o apresentado no certificado do fabricante e com os valores medidos no trabalho, assim os resultados analisados e decisão sobre as conformidades envolvida na estrutura de um componente será dada de forma confiável. O material utilizado nessa dissertação foram chapas do aço ASTM A131-A, que foram conformadas por laminação a quente, processo por onde são obtidas chapas de diferentes espessuras, comprimentos e larguras de forma uniforme.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Metal Base

Foram soldadas duas chapas do aço carbono ASTM A131-A, fabricado pela USIMINAS, aproximadamente nas medidas 9,5 mm x 230 mm x 1300 mm. A composição química e as propriedades do metal base são fornecidos nas Tabela 7 e 8 respectivamente, conforme especificado pelo fabricante:

Tabela 7 - Composição Química (%) do aço ASTM A131-A

<b>Composição Química (%)</b>					
C	0,13	0,16	Cr	0,02	0,01
Si	0,17	0,19	Ni	0,01	0,01
Mn	0,65	0,69	Mo	0,00	0,00
P	0,021	0,024	Sn	0,000	0,000
S	0,010	0,014	N	0,0039	0,0040
Al	0,022	0,031	As	0,006	0,006
Cu	0,01	0,01	B	0,0001	0,0001
Nb	0,001	0,001	Ca	0,0002	0,0002
V	0,001	0,001	Sb	0,00	0,00
Ti	0,001	0,001	Pb	0,000	0,001

Fonte: Adaptado do Usiminas

Tabela 8 - Valores do Ensaio de Tração

<b>Ensaio de Tração</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Limite de Escoamento - LE (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Limite de Resistência - LR (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>LE/LR (%)</b>	<b>Alongamento - AL</b>
1	311	436	71	30
2	316	435	73	29
3	327	454	72	33

Fonte: Adaptado do Usiminas.

As chapas e metal de adição utilizadas nesse trabalho foram doadas por um estaleiro localizado em Manaus – Amazonas. No estaleiro foi realizado o processo de soldagem dos corpos de provas analisados nesse trabalho. As informações mostradas aqui estão conforme a especificação dos produtos fornecidos pela empresa.

### 3.2 Metal de Adição

O metal de adição utilizado foi o AWS A5.20-05 ASMESF A5.20/2013 E71T-1C da ESAB, com diâmetro do arame de 1,2 mm, as informações sobre os componentes químicos e propriedades do arame tubular estão conforme a especificação do fabricante, mostrado nas Tabelas 9 e 10 respectivamente:

Tabela 9 - Composição Química do arame tubular AWS A5.20-05 E71T-1C

<b>Análise Química (%)</b>				
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
0,069	0,350	1,000	0,025	0,011

Fonte: Adaptado ESAB.

Tabela 10 - Propriedades Mecânicas do arame tubular AWS A5.20-05 E71T-1C

<b>Propriedades Mecânicas Típicas</b>				
<b>Resistência a Tração (MPa)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Teste de Impacto Charpy – V (J)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
590	550	32	65	-30

Fonte: Adaptado ESAB.

Esse metal de adição pode ser usado para soldas de passagem única e múltipla nas posições plana (1G e 1F) e horizontal (2F), com proteção gasosa de 100% de CO<sub>2</sub> (JEFFUS, 2017).

### 3.3 Análise Química

Os elementos químicos presentes no metal base (MB), zona afetada pelo calor (ZAC) e zona fundida (ZF) foram medidos por espectrômetro de emissão óptica SPECTROMAXX – Analisador de metais fixo, da marca AMETEK, modelo MAXX LM 15, que utiliza o método por absorção dos feixes de elétrons para a determinação dos elementos químicos. O ensaio foi feito em somente um corpo de prova de goivagem com profundidade de 1,5 mm (G1), uma vez que não foi alterado o tipo de chapa, metal de adição e proteção gasosa em ambos os corpos de prova G1 e G5 (5,0 mm), logo, possuem composição química semelhantes. Foram realizadas 6 queimas em cada amostra como mostrado na Figura 14, em seguida foi tirado a média dos elementos químicos detectados. Detalhes dos valores em % detectados estão no Apêndice A.

Figura 14 - Localização da distribuição dos pontos no corpo de prova G1 (goivagem de 1,5 mm) para análise química



Fonte: Autora (2020).

Na Tabela 11, apresenta a média dos dados da análise química da junta soldada para o corpos de prova com goivagem de 1,5mm (G1). Comparando o valor de média do metal base com os valores de concentração na norma ASTM A131 – A, Tabela 5, os resultados mostraram-se em conformidade.

Tabela 11 - Média dos elementos químicos em % para a amostra G1 (goivagem de 1,5 mm). MB – Metal base; ZAC – Zona afetada pelo calor; ZF – Zona fundida

<b>Composição Química (%) de G1</b>											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Al	Co	Cu	Fe
MB	0,17	0,6415	0,176	0,0202	0,0086	0,0146	0,0242	0,0296	0,0089	0,0119	98,85
ZAC	0,20	0,637	0,1775	0,0211	0,0087	0,0134	0,0232	0,0325	0,0090	0,0117	98,85
ZF	0,17	0,986	0,379	0,0282	0,0104	0,0232	0,025	0,0249	0,0117	0,0199	98,25

Fonte: Autora (2020)

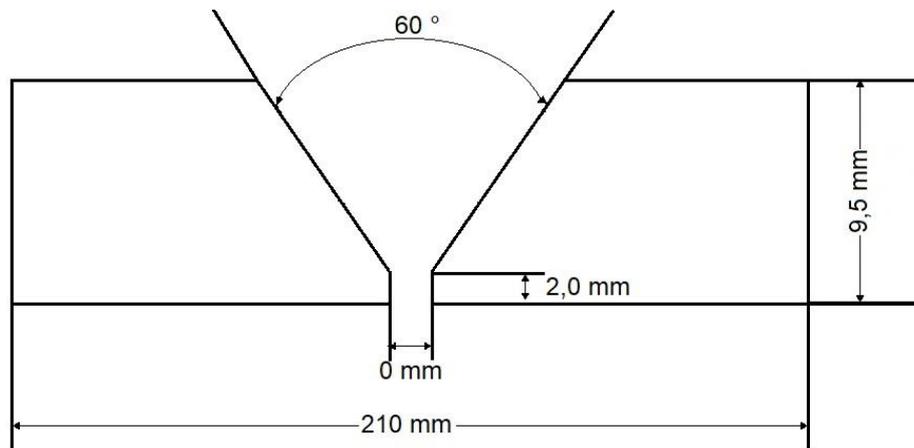
Analisando a Tabela 11, o silício (Si) e o manganês (Mn) apresentam valores maiores de 53,70 % e 115,34 %, respectivamente, na zona fundida (ZF) comparado com o metal base (MB) e a zona afetada pelo calor (ZAC). Isso é devido a composição do metal de adição utilizado na soldagem dos corpos de prova que apresenta concentrações de Mn e Si maiores do que as concentrações apresentado no metal base (MB), Tabela 9. O Si e o Mn são ligas primárias que são oxidadas e perdidas pelo metal de adição na poça de fusão, isso acontece pois, o CO<sub>2</sub> quando em contato com o arco elétrico forma monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O), por isso, em um eletrodo projetado para o uso com 100% de CO<sub>2</sub>, caso desse trabalho, terá níveis mais altos de silício e manganês para compensar as perdas por oxidação (JEFFUS, 2017). Além de que, Mn e Si, são produtos químicos que podem ajudar aumentar a resistência mecânica do material (DING *et al.*, 2020), isso será explorado nos resultados de resistência mecânica.

### 3.4 Preparação da Junta e Procedimento de Soldagem

Para a preparação do chanfro e procedimento de soldagem seguiram conforme o especificado na EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) e consulta na norma AWS D1.1, 2010. A preparação do chanfro, soldagem com arame tubular e goivagem por esmerilhamento foram realizados no estaleiro da BECONAL - Bertolini Construção Naval da Amazônia Ltda.

Abertura do chanfro de  $60^\circ$  em forma de V foram feitas nas placas do aço ASTM A131-A de 9,5 mm de espessura conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Representação configuração das dimensões do chanfro



Fonte: Autora (2020).

Tipo de Chanfro: V-simples.

Espessura: 9,5 mm

Profundidade do Chanfro: 7,5 mm

Face da Raiz: 2 mm

Ângulo do Chanfro:  $60^\circ$

Abertura da Raiz: 0 mm

Os procedimentos de soldagem e goivagem são típicos da prática industrial e são mostrados na Tabela 12 e 13 respectivamente, sendo os parâmetros variáveis a profundidade da goivagem em dois níveis 1,5 e 5 mm.

Tabela 12 - Procedimento de soldagem a arco elétrico com arame tubular

<b>Camada</b>	<b>Passe</b>	<b>Polaridade</b>	<b>Amperagem (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Velocidade de Soldagem (m/min)</b>
1	Raiz	CCEP	134 a 165	24 a 26	12 a 20
2	Acabamento	CCEP	134 a 165	24 a 26	12 a 20

Fonte: Adaptado da EPS 2015

Tabela 13 - Procedimento de Goivagem

<b>Profundidade (mm)</b>	<b>Disco de Corte</b>	<b>Dimensões do Disco (mm)</b>
1,50	Corte e Debaste	180 x 3,0 x 22,23
5,00	Corte e Debaste	180 x 3,0 x 22,23

Fonte: Adaptado do Procedimento do Estaleiro

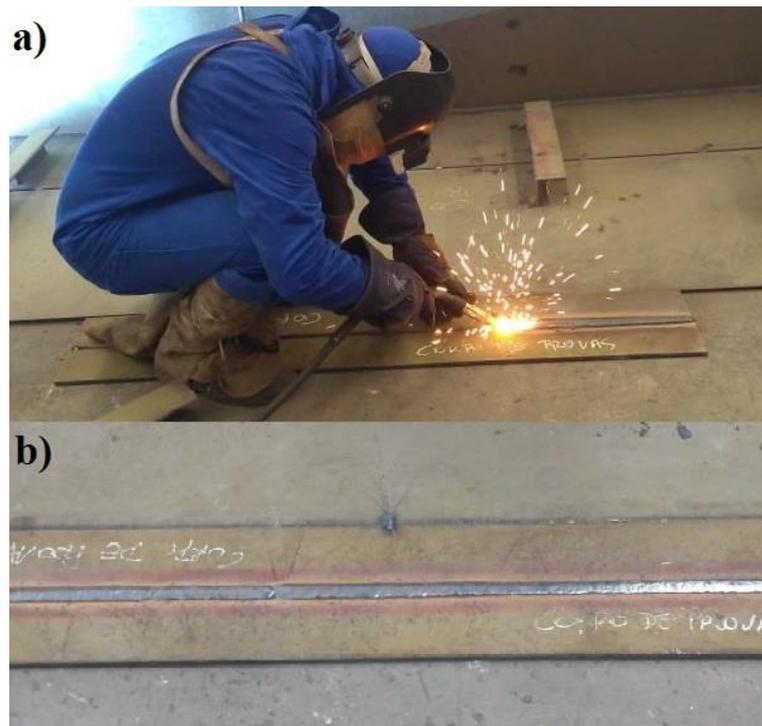
Antes do início da soldagem as chapas do aço ASTM A131-A foram adequadamente posicionadas e fixadas via ponteamto nas laterais das chapas. A junta de ambos os processos com goivagem de 1,5 mm e 5,0 mm foram preenchidas por duas camadas e dois cordões de solda como mostrado na Figuras 4.

A sequência de execução dos passes de solda e goivagem segue conforme na Figura 4 e distrito a seguir:

- Passo 1: a primeira camada foi preenchida pelo passe de raiz;
- Passo 2: remoção do metal de solda e metal base da raiz do passe de raiz;
- Passo 3: após a goivagem, a segunda camada foi preenchida pelo passe de acabamento.

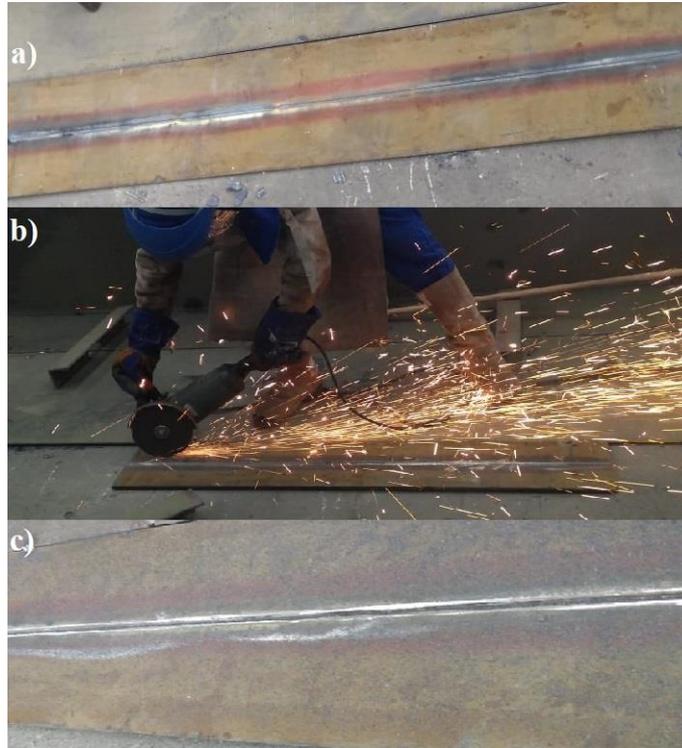
Para cada cordão de solda foi utilizado os mesmos parâmetros de soldagem mudando somente a penetração da goivagem, que foram de 1,5 mm e 5,0 mm. Nas Figuras 16, 17 e 18 são mostrados os passos descritos acima sendo executados no estaleiro em Manaus -AM. O fluxograma, na Figura 19, mostra a organização para a soldagem dos corpos de prova.

Figura 16 - Etapa da preparação dos corpos de prova. Passo 1: (a) soldagem com arame tubular, passe de raiz na primeira camada. (b) resultado da primeira camada



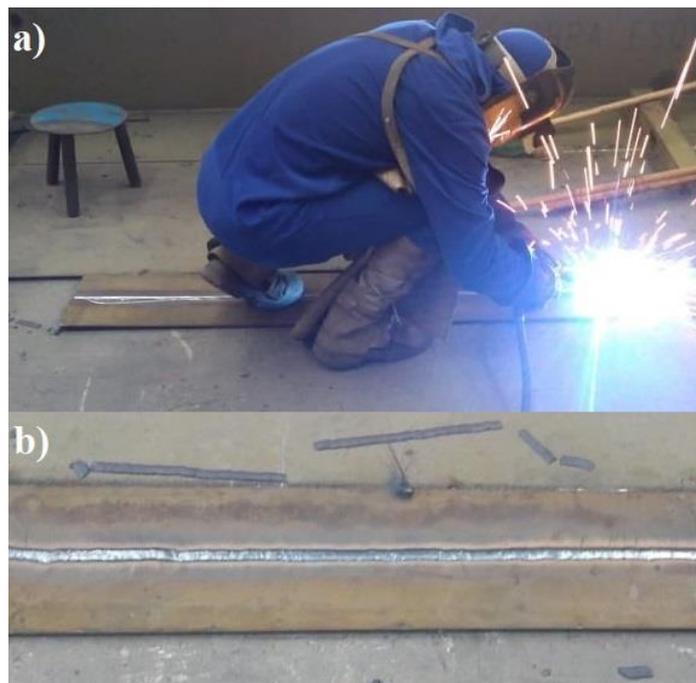
Fonte: Autora (2020)

Figura 17 - Passo 2: remoção do metal de solda e metal base da raiz da primeira camada. (a) parte de trás da primeira camada sem goivagem. (b) processo de goivagem por esmerilhamento na raiz da primeira camada. (c) resultado da goivagem na raiz da primeira camada



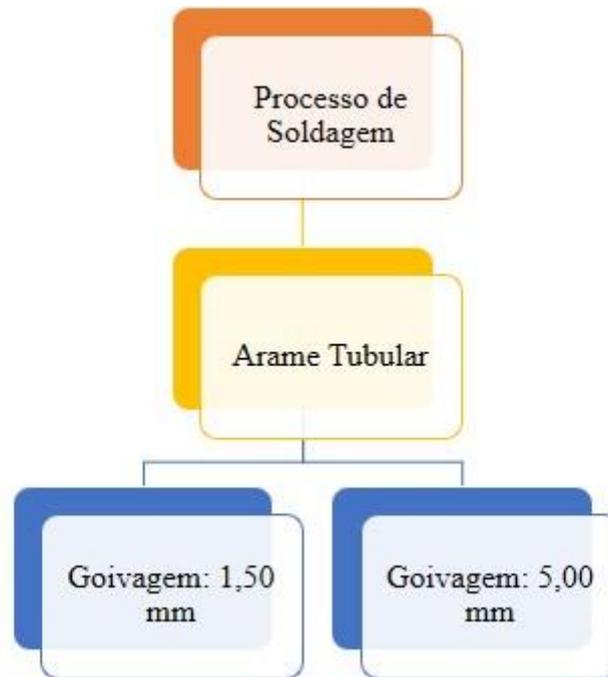
Fonte: Autora (2020)

Figura 18 - Passo 3: (a) soldagem a arco elétrico com arame tubular da segunda camada após goivagem. (b) resultado da segunda camada



Fonte: Autora (2020)

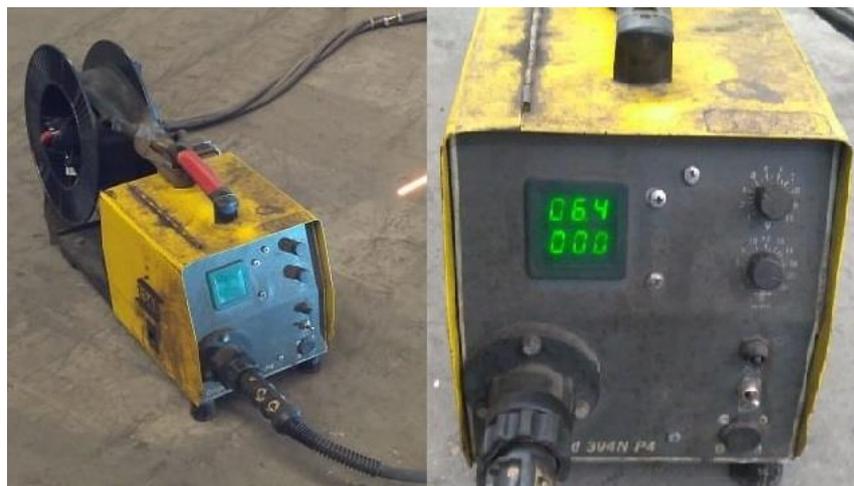
Figura 19 - Organização para a soldagem dos corpos de prova



Fonte: Autora (2020).

Processo de Soldagem utilizado foi o arame tubular com proteção gasosa, o equipamento utilizado foi Origo™ Freed 304N P4, Figura 20, soldagem semiautomático, na posição plana (1G) com proteção gasosa 100 % CO<sub>2</sub> e goivagem na raiz por esmerilhamento com disco de corte apropriado para aço baixo carbono.

Figura 20 - Equipamento de Soldagem Origo™ Freed 304N P4



Fonte: Autora (2020).

### 3.5 Anova e teste de Tukey

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) nos dados quantitativos para entender a influência dos parâmetros nas respostas. O objetivo principal da ANOVA é apontar se um grupo é estatisticamente diferente do outro ou não, baseado na análise de comparação das médias oriundas desses grupos, permitindo investigar a existência de diferença significativa entre os grupos (CORRÊA, 2018; COSTA, 2017). Porém, a anova mostra somente se há ou não diferença entre os grupos sem mostrar quais são esses grupos. A fim de comparar os valores de média entre os grupos e saber quais os grupos interferem entre si, foi usado o método Tukey. Para a realização dessas análises foram utilizado o software Excel da Microsoft Office e o software SPSS da IBM. Foi utilizado em todas as análises um nível de significância de 5%.

### 3.6 Técnica de Obtenção da Energia de Soldagem

Nesse trabalho foi feito o monitoramento e aquisição dos parâmetros de corrente e tensão na forma de gravação de vídeo direto no visor do equipamento de soldagem, devido à falta de equipamentos apropriados. Porém, existem outros processos melhores e mais recomendados do que o utilizado nesse trabalho já citados anteriormente. A cada um minuto foram registrados a tensão e corrente que foram utilizados para o cálculo de energia de soldagem. Outros dados coletados foram o tempo de soldagem para cada camada e tempo de goivagem para cada profundidade. Detalhes dos valores medidos estão no Apêndice B e C.

A média dos dados obtidos para tensão e corrente estão apresentados na Tabela 14. A comparação das médias utilizando o método de Tukey é mostrado no Apêndice D. O valor da velocidade de soldagem é definido no equipamento de soldagem antes do início da solda, o valor de 20 m/min foi utilizado em todos os passes e está em conformidade com o definido no EPS da empresa mostrado na Tabela 12. Na Tabela 14 o valor para velocidade de soldagem foi convertido em função dos cálculos de energia de soldagem.

Tabela 14 - Média dos Valores Coletados para Tensão (V) e Corrente (A) Durante a Soldagem dos Corpos de Prova G1 (goivagem de 1,5 mm) e G5 (goivagem de 5,0 mm)

<b>Resultado da Energia de soldagem</b>				
<b>Corpo de Prova</b>	<b>G1</b>		<b>G5</b>	
Camada	1 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup>	1 <sup>o</sup>	2 <sup>o</sup>
Cordão de Solda	Passe de Raiz	Passe de Acabamento	Passe de Raiz	Passe de Acabamento
Tensão (V)	37,54	36,2	36,61	36,86
Corrente (A)	202,22	244	223,11	265,6
Velocidade de Soldagem (mm/s)	333,333	333,333	333,333	333,333
Eficiência	0,8	0,8	0,8	0,8
Energia de Soldagem (kJ/mm)	0,0182±0,0009	0,0212±0,0011	0,0196±0,0012	0,0235±0,0003

Fonte: Autora (2020)

O passe de acabamento de G1, apresenta diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % quando comparado com o passe de raiz de G1 e G5. O passe de acabamento de G1 apresentou um aumento de 16,48 % na energia de soldagem quando comparado com o passe de raiz de G1 e aumentou 7,69% comparado com o passe de raiz de G5.

A segunda camada de G5 apresenta uma diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % quando comparado com a segunda camada de G1 e primeira camada de G5. A segunda camada de G5 apresentou um aumento de 10,85 % na energia de soldagem quando comparado com a segunda camada de G1 e aumento de 19,90% comparado a primeira camada de G5.

### 3.7 Tempo de Preparação dos Corpos de Prova

Com o menor tempo de preparação dos corpos de prova, o G1 (goivagem de 1,5 mm de profundidade) teve o tempo total de soldagem 28,27% menor do que G5 (goivagem de 5,0 mm de profundidade), conforme mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Tempo de Preparação dos Corpos de Prova G1 (goivagem de 1,5 mm) 3 G5 (goivagem de 5 mm)

<b>Corpo de Prova</b>	<b>G1</b>	<b>G5</b>
	Tempo (s)	Tempo (s)
1 <sup>o</sup> Camada	545	568
Goivagem na raiz	82	372
2 <sup>o</sup> Camada	266	305
Tempo Total	893	1245

Fonte: Autora (2020)

### 3.8 Preparação e Identificação dos Corpos de Prova para Análise Microestrutural e Mecânica

Foram retirados das chapas soldadas os corpos de prova no sentido transversal (todos os ensaios) e longitudinal (somente para o ensaio de tração) da junta soldada por meio de corte a plasma HyPerformance Plasma HPR130XD, Figura 21, para os ensaios de propriedades microestruturais e mecânicos conforme Tabela 16 e esquematizado na Figura 22, descartando 30 mm do início e 30 mm do fim das chapas soldadas.

Figura 21 - Corte a plasma HyPerformance Plasma HPR130XD



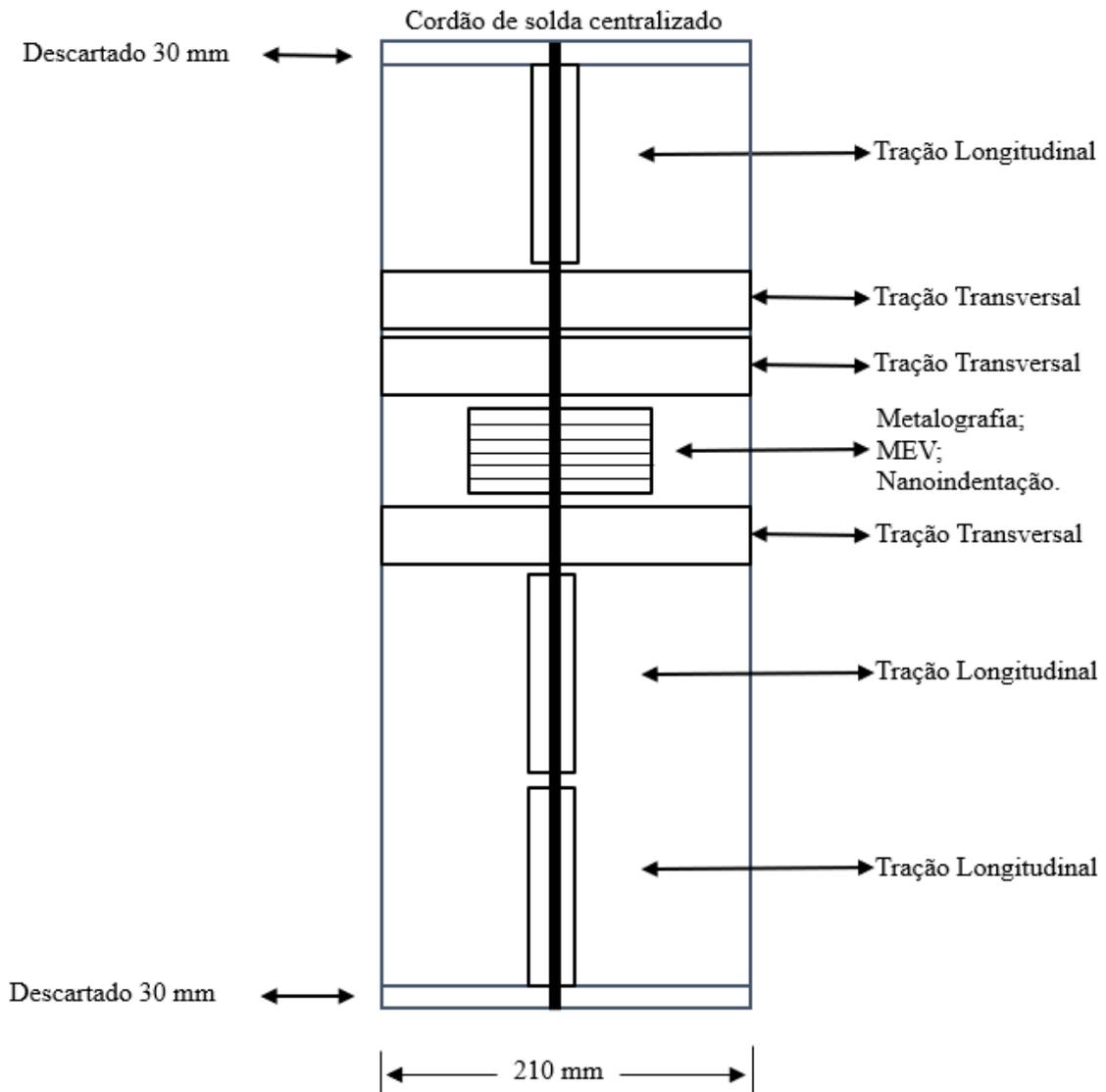
Fonte: Autora (2020)

Tabela 16 - Distribuição dos corpos de prova para cada ensaio de propriedades microestruturais e mecânicas

<b>Ensaio</b>	<b>Goivagem (1,5 mm)</b>	<b>Goivagem (5 mm)</b>	<b>Subtotal de Amostras</b>
Metalográfico	2	2	4
Mev	2	2	4
Análise Química	1	1	2
Nanoindentação	1	1	2
Tração	6	6	12
<b>Total de Amostras</b>			<b>24</b>

Fonte: Autora, 2020.

Figura 22 - Retirada das amostras para os ensaios de propriedades microestruturais e mecânicos



Fonte: Autora (2020)

Para o processo metalográfico, MEV, análise química e nanoindentação os corpos de prova foram preparados conforme a norma ASTM E3-11 - *Standard Guide For Preparation of Metallographic Specimens*, 2017. O exame metalográfico requer a remoção das juntas soldadas e a preparação para o exame macroscópico ou microscópico, este método revela a microestrutura da junta soldada, permitindo que o inspetor analise a porosidade e outras falhas, como fluxo insuficiente de metal de adição, difusão do metal de adição, etc, (O'Brien, 2004). Desse modo, primeiro os corpos de prova foram cortados nas dimensões 40 mm x 10 mm x 9,5 mm, seguido de embutimento a frio, lixamento na Politriz/Lixadeira Arotec Aropol 2V nas granulometria , 200, 400, 600 e 2000  $\mu\text{m}$ , foi realizado o polimento na Politriz Panambra DP-

p com o uso de alumina de 1 $\mu$ m e por último o ataque químico com nital 5%, a duração do ataque químico na amostra foi cerca de 5 segundos em seguida a amostra foi colocada em água corrente e secada. Para o ensaio de tração as medidas dos corpos de prova foram retiradas conforme a norma AWS B4.0 - *Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*, 2007.

Os corpos de prova foram identificados como G1 para goivagem com 1,5 mm e G5 para corpos de prova com goivagem de 5 mm.

### 3.9 Microscopia Óptica

Um microscópio óptico com aumento de 10x, 40x e 100x da marca Olympus modelo CX31 no Laboratório de Materiais, Escola Superior de Tecnologia – EST/UEA, foi utilizado para a captura da seção transversal do cordão de solda para revelar a geometria do cordão de solda para análise macroscopia e microestruturas para análise microscópica.

### 3.10 Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectrômetro de Raio-X de Energia Dispersiva.

Foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de marca JEOL e modelo JEOL IT 500HR acoplado com um detector de EDS (espectrômetro de raio-X de energia dispersiva). A imagem e microanálise foram realizadas no laboratório CMABio – Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos, instalado na Escola Superior de Saúde da Universidade do Estado do Amazonas.

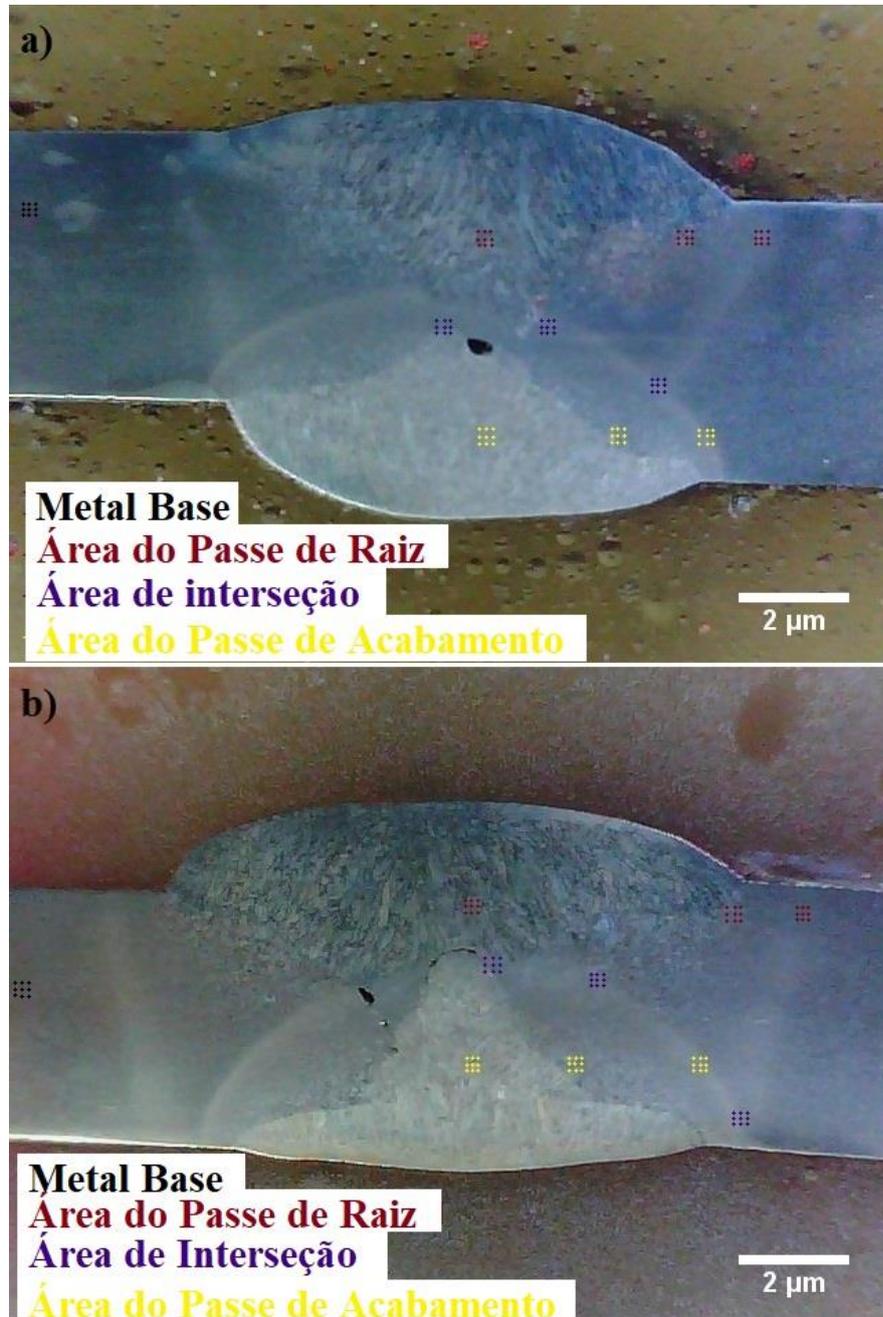
### 3.11 Nanoindentação

Para a análise de dureza no cordão de solda foi adotado o método de nanoindentação, o ensaio seguiu conforme as normas ISO 6507 - 2018 e 14577 – 20115. O ensaio foi realizado no laboratório P&D da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas - EST/UEA, o equipamento utilizado foi o nanodurômetro da marca FISCHERSCOPE, modelo HM 2000.

As medições de nanodureza foram traçados por pontos em grade de 3x3 na ZF, ZAC-GG, ZAC-RG e MB, há uma distância entre os pontos de 100  $\mu$ m a uma carga de 420 mN/20s em três áreas denominadas de área do primeiro cordão de solda, área de interseção e área do

segundo cordão de solda, Figura 23, no intuito de observar a alteração da dureza do metal base, na ZAG-RG, ZAC-GG e ZF.

Figura 23 - Regiões da junta soldada de G1 (goivagem de 1,5 mm) (a) e G5 (goivagem de 5,0 mm) (b), onde foram realizados os ensaios de nanodureza

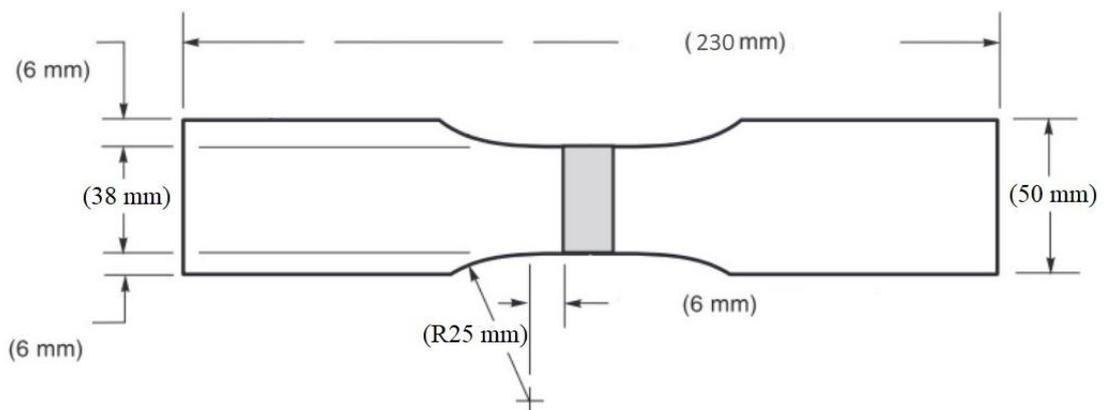


Fonte: Autora, 2020.

### 3.12 Ensaio de Tração

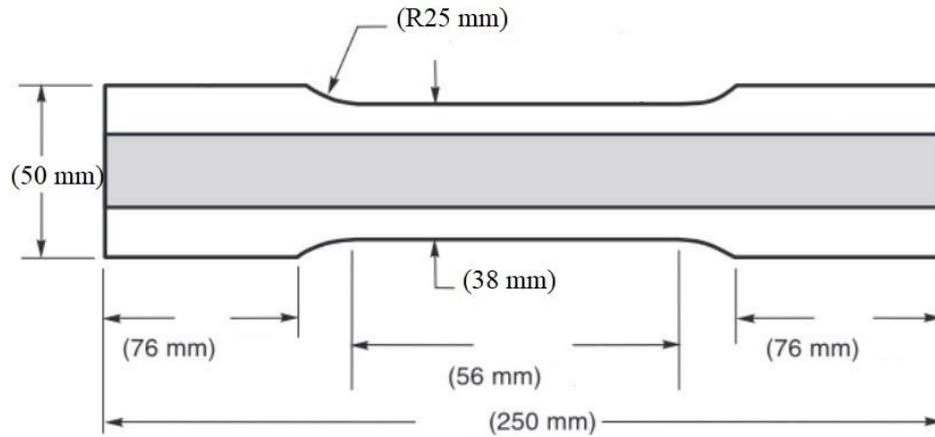
Para obter as propriedades mecânicas da junta soldada foram preparados corpos de prova de ensaio a tração de acordo com a norma AWS B4.0, 2007. Os ensaio de tração foram realizados utilizando a máquina universal modelo UH-300KNA, fabricante Shimadzu Corporation, capacidade 300 kN. Foram preparados 12 corpos de provas, 6 transversais e 6 longitudinais, sendo 3 para G1 e 3 para G5 para cada posição. Nas figuras 24 e 25 mostram as dimensões utilizadas nos corpos de prova na posição transversal e longitudinal respectivamente.

Figura 24 - Desenho esquemático dos corpos de prova na posição transversal da junta soldada para ensaio de tração. Dimensões em milímetros



Fonte: Adaptado da AWS B4.0, 2007.

Figura 25 - Desenho esquemático dos corpos de prova na posição longitudinal da junta soldada para ensaio de tração. Dimensão em milímetros.



Fonte: Adaptado da AWS B4.0, 2007.

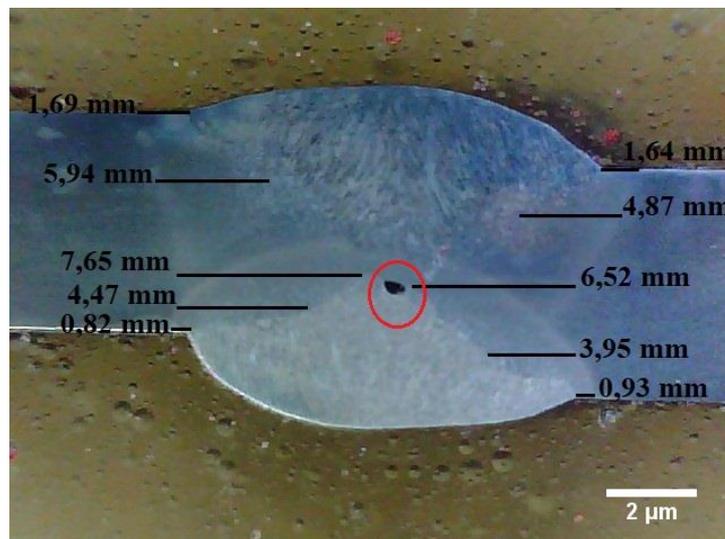
O ensaio de tração foi feito a temperatura ambiente com velocidade de deslocamento de até 10 mm/min, o ensaio foi realizado no laboratório de ensaios de materiais da empresa Moto Honda de Manaus.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Macrografia

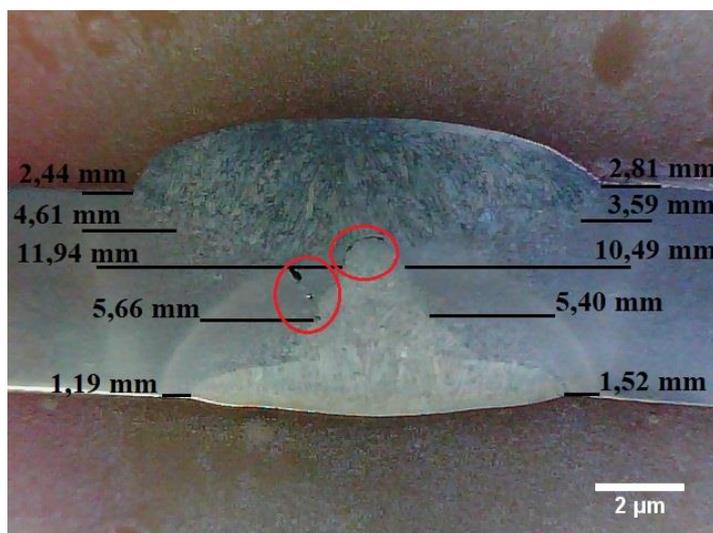
A presença de inclusão de escória e penetração incompleta na linha de fusão entre os cordões de solda e metal base podem ser observados nas macrografias apresentadas nas Figuras 26 e 27, onde ambos os corpos de prova G1 e G5 foram afetados por este tipo de defeito. Para um melhor entendimento da desses defeitos foi feito uma microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro de raio x de energia dispersiva, os resultados serão discutidos mais à frente.

Figura 26 - Macrografia do corpo de prova com goivagem de 1,5 mm de profundidade (G1) com as medidas das extensões em mm e inclusão de escória na ZAC e círculo vermelho



Fonte: Autora (2020).

Figura 27 - Macrografia do corpo de prova com goivagem de 5,0 mm de profundidade (G5), com as medidas das extensões em mm e inclusão de escória na ZAC os círculos em vermelho



Fonte: Autora (2020).

Comparando as Figuras 26 e 27 pode -se notar que a extensão da ZAC da junta soldada G1, Figura 26, é mais estreita em comparação a junta soldada de G5, Figura 27, essa diferença de extensão da ZAC está relacionado com a energia de soldagem para cada passe aplicado, onde com o aumento da energia de soldagem ocorre o aumento da extensão da ZAC (RIBEIRO, 2015), assim como, reduzir a energia de soldagem contribui para reduzir o tamanho da ZAC (CHEN *et al.*, 2020).

Na Tabela 14, é possível visualizar diferentes picos de energia de soldagem, onde os maiores valores estão para G5. A tabela também evidencia que a raiz e parte da zona afetada pelo calor do primeiro passe foram reaquecidas pelo segundo passe, sendo outra distinção entre as juntas soldadas de G1 e G5 que está relacionada à extensão e proporção da região reaquecida.

Tanto no G1 quando no G5 foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem, alternando somente a profundidade da goivagem. Em G1 foram realizados dois passes, um de raiz e outro de acabamento, no intervalo entre os passes foi realizado a goivagem por esmerilhamento de 1,5 mm de profundidade em um tempo de 82 s. Neste caso a junta foi aquecida três vezes.

Em G5 foram realizados a mesma quantidade de passe, porém no intervalo entre os passes foi realizado goivagem por esmerilhamento de 5,00 mm de profundidade em um tempo de 372 s. A junta também foi aquecida três vezes, porém em G5 foi introduzido mais calor durante a soldagem devido ao tempo de realização da goivagem por esmerilhamento. Com isso as regiões

sofreram aquecimento por mais tempo devido a profundidade de goivagem de G5, causando um reaquecimento na junta, aumentando a energia de soldagem e por consequência um aumento nas extensões das regiões da ZAC.

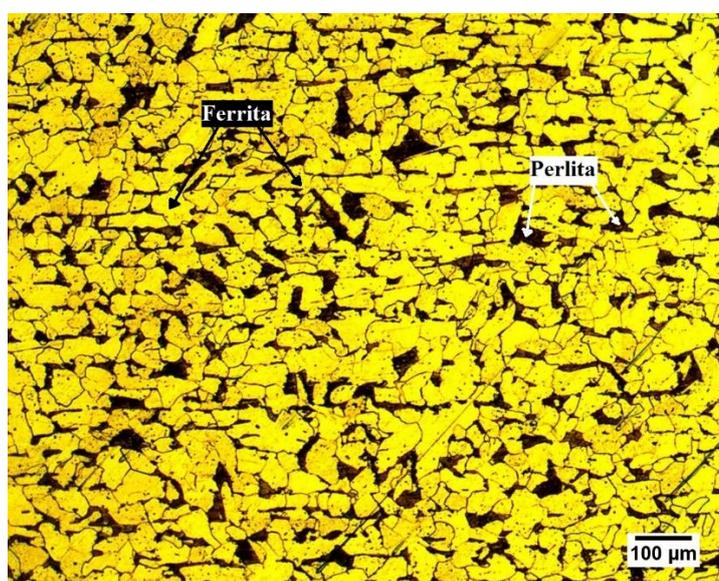
Outra explicação pode ser dada com relação ao volume de metal fundido a ser enchido e menor velocidade de soldagem para com G5 uma vez que a goivagem retira uma maior área da raiz do primeiro cordão de solda comparado com G1. Essa dedução partiu do trabalho de Sirisatien et al (2018), onde para a mesma entrada de calor, a temperatura foi maior para chanfro simples de 30° V em comparação com um chanfro quadrado, devido ao seu maior volume de metal de adição a ser enchimento e menor velocidade de soldagem.

## 4.2 Micrografia

### 4.2.1 Metal Base

Na micrografia no metal de base, Figura 28, pode ser visto a microestrutura ferrita-perlítica (ASSUNÇÃO *et al.*, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2015), mostra que o aço ASTM A131-A contém composição de baixo teor de carbono. Devido a laminação a quente, no qual os aços ASTM A131-A são fabricados (MOSTAFANEJAD *et al.*, 2019; GONÇALVES *et al.*, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2015), esses materiais apresentam uma estrutura formada por ferrita e perlita em forma de agulhas (MOSTAFANEJAD *et al.*, 2019).

Figura 28 - Micrografia do metal base com presença de grão de ferrita (F) e perlita (P)



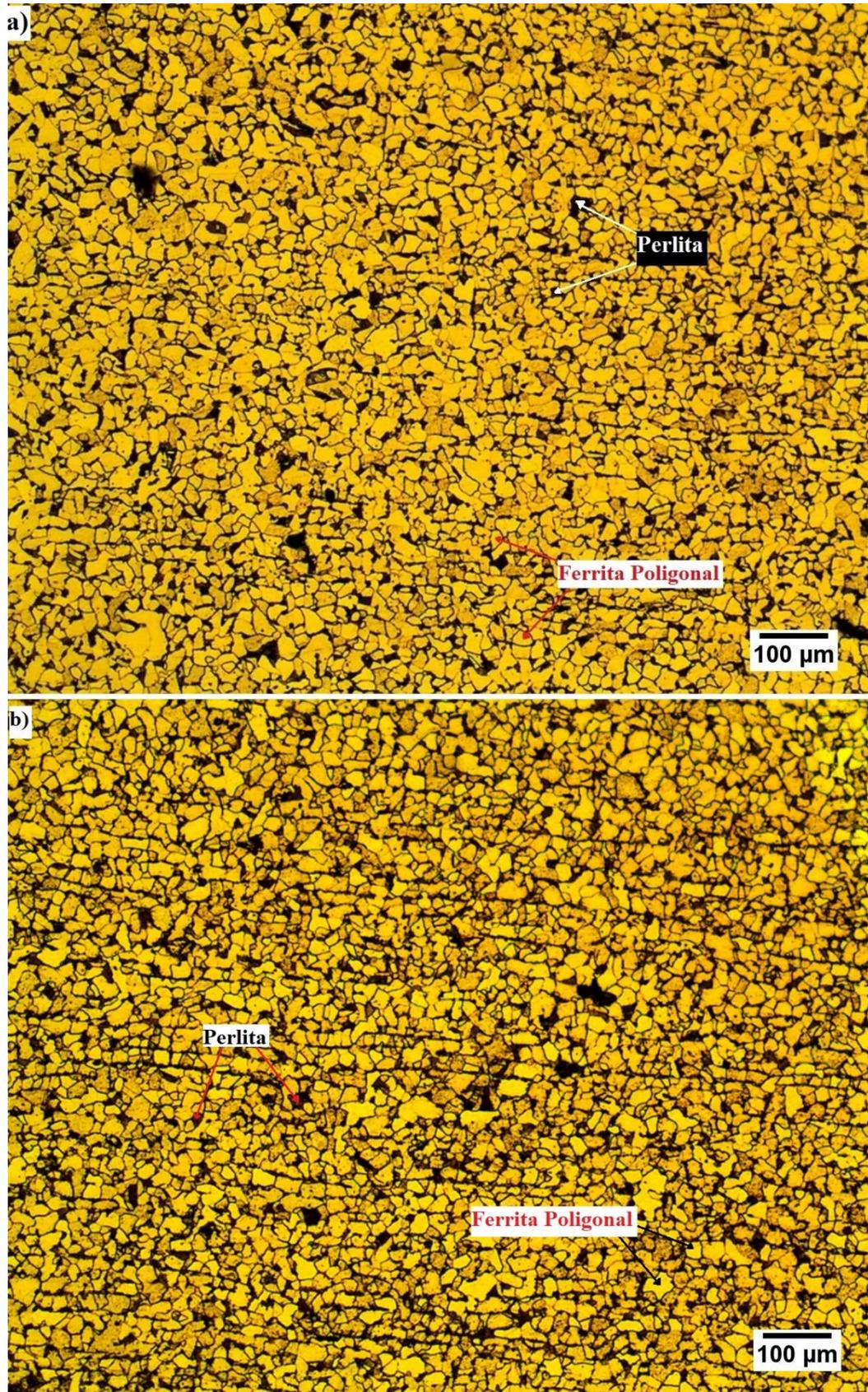
#### 4.2.2 Micrografia da ZAC-RG do G1 (Goivagem de 1,5 mm) e G5 (Goivagem de 5,0 mm)

As micrografias mostradas aqui foram obtidas da região do primeiro passe da junta soldada, uma vez que ele foi afetado pelo ciclo térmico do segundo passe. As regiões capturadas foram as regiões da ZAC-RG (ZAC de região de refino de grão), ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) e ZF (Zona fundida).

A região de refino de grãos da ZAC consiste em finos grãos ferríticos, pois durante o processo de soldagem a temperatura é suficiente para formar a austenita, no entanto o pico de temperatura alcançado não é o suficiente para dissolver completamente os precipitados (carbonetos e nitretos), porém ocorre na região da ZAC - RG (Ribeiro, 2015). Na região da ZAC-RG o material é submetido a temperaturas próximas as de normalização, aproximadamente de 900 a 1000 °C (GIRÃO, 2018).

A Figura 29 (a), mostra as microestruturas analisadas na ZAC-RG para condição de soldagem com goivagem por esmerilhamento de 1,5 mm (G1). As microestruturas presentes para essa região são ferrita poligonal intragranular PF(I) e perlita (P). A presença de PF(I) nessa região está no fato de que a taxa de resfriamento nesta região é menor que na ZAC-GG e no metal de solda, os grãos apresentam uma morfologia que lembram uma forma poligonal (KRAUSS, 2015).

Figura 29 - Micrografia da ZAC-RG (ZAC de refino de grãos) do primeiro passe em G1 (goivagem de 1,5 mm) (a) e em G5 (goivagem de 5,0 mm) (b)



A região de grão fino ZAC-RG do G5, Figura 29 (b), basicamente é muito parecida com a do G1, tendo sua microestrutura composta por perlita (P) e ferrita poligonal (PF).

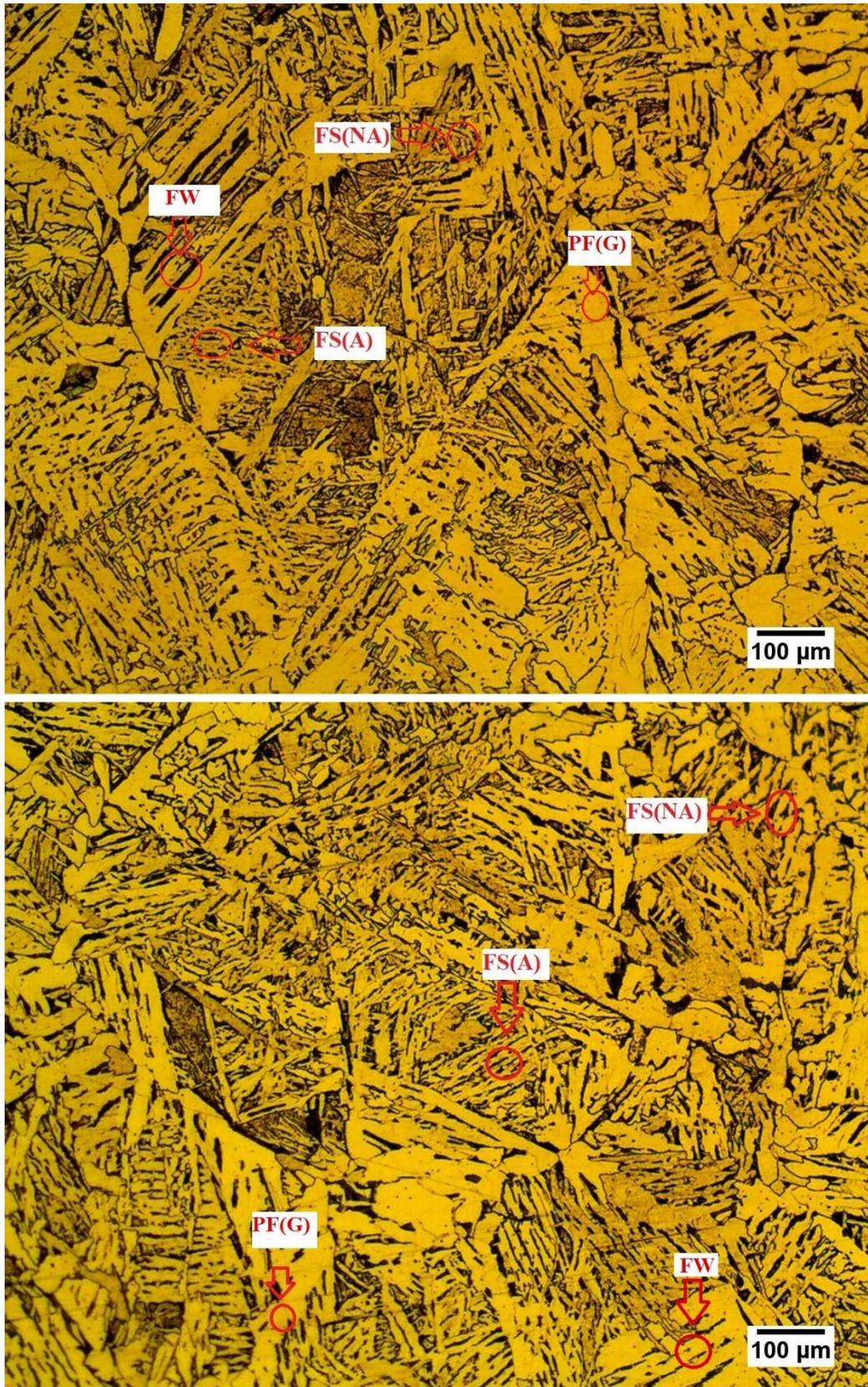
#### 4.2.3 Micrografia ZAC-GG do G1 (Goivagem de 1,5 mm) e G5 (Goivagem de 5,0 mm)

Das microestruturas que merece mais atenção para projetos mecânicos é a região de grão grosseiro (ZAC-GG) por ser a região mais próxima da solda, é submetida a temperaturas próximas da de fusão (aproximadamente acima de 1000 °C), com isso permite um rápido crescimento do grão austeníticos (GIRÃO, 2018). As transformações da microestrutura para essa região ocorrem pois, na soldagem multipasse a microestrutura da região de crescimento de grão da ZAC-GG é afetada pelo ciclo térmico inicial e refinada pelos subsequentes passes de soldagem (RIBEIRO, 2015).

Na região da ZAC-GG para G1 pode ser observada na Figura 30 (a). A microestrutura é composta por ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita alinhada com carbonetos (FS(A)), ferrita não alinhada (FS(NA)) e ferrita de windmastatten (FW).

A ferrita de Widmanstätten apresenta grãos relativamente grosseiros, com pequena diferença de orientação cristalina entre si, e contorno ricos em carbono que configuram um microconstituente com baixa tenacidade e, portanto, pouco desejável em juntas soldadas (RIBEIRO, 2016).

Figura 30 - Micrografia da ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) do G1 (goivagem de 1,5 mm) (a) e do G5 (goivagem de 5,00 mm). FS(A) - Ferrita alinhada com carbonetos; FS(NA) - ferrita não alinhada; PF(G) - Ferrita de contorno de grão; FW- Ferrita de Widmanstätten



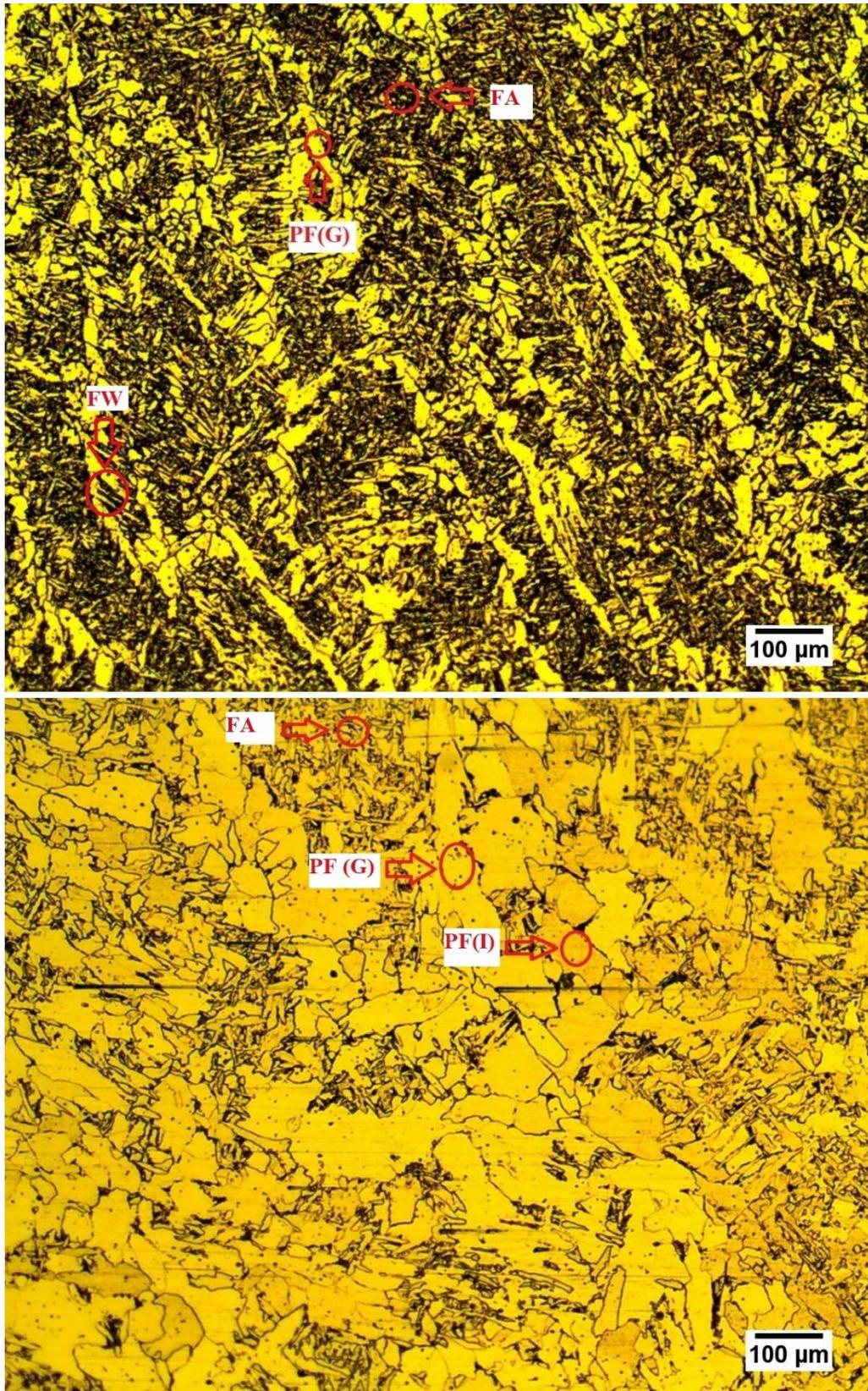
A região ZAC-GG do G5, Figura 30 (b), tem a microestrutura parecida com a de G1, sendo constituída por ferrita alinhada (FS(A)), ferrita não alinhada (FS(NA)), ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita de Widmanstätten.

#### 4.2.4 Micrografia ZF do G1 (Goivagem de 1,5 mm) e G5 (Goivagem de 5,0 mm)

Na Figura 31 (a), mostram características similares quanto as microestruturas da zona fundida, na qual podem ser observados variações de ferrita como ferrita primária poligonal intragranular (PF(I)), ferrita primária de contorno de grãos – PF(G), ferrita acircular (FA) e ferrita de Widmanstätten (FW).

A presença de ferrita acicular (FA) é frequentemente considerada a microestrutura ideal devido à sua boa combinação de resistência e tenacidade, devido aos pequenos grãos interligados e aos limites de alto ângulo (SCHÖNMAIER *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

Figura 31 - Micrografia da ZF (Zona fundida) do G1 (Goivagem de 1,5 mm) (a) e G5 (Goivagem de 5,00 mm).  
PF (I) – Ferrita primária poligonal intragranular; PF(G) – Ferrita primária de contorno de grão; FA - Ferrita acicular (FA); FW – Ferrita de Widmanstätten

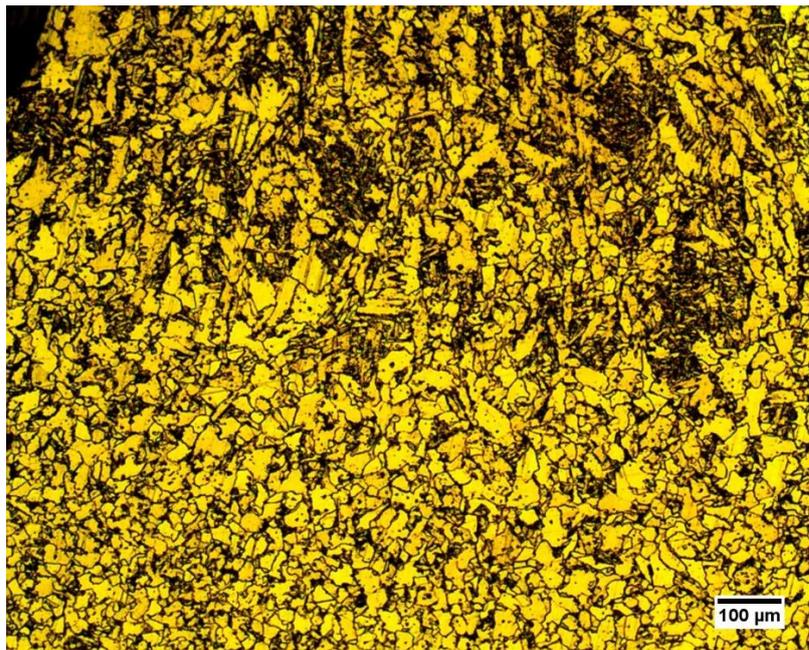


A região da ZF do G5, Figura 31 (b), tem a microestrutura constituída por ferrita primária poligonal intragranular (PF(I)), ferrita acicular (FA) e ferrita primária de contorno de grão (PF(G)).

### 4.3 Microestruturas Resultante da Soldagem Multipasse

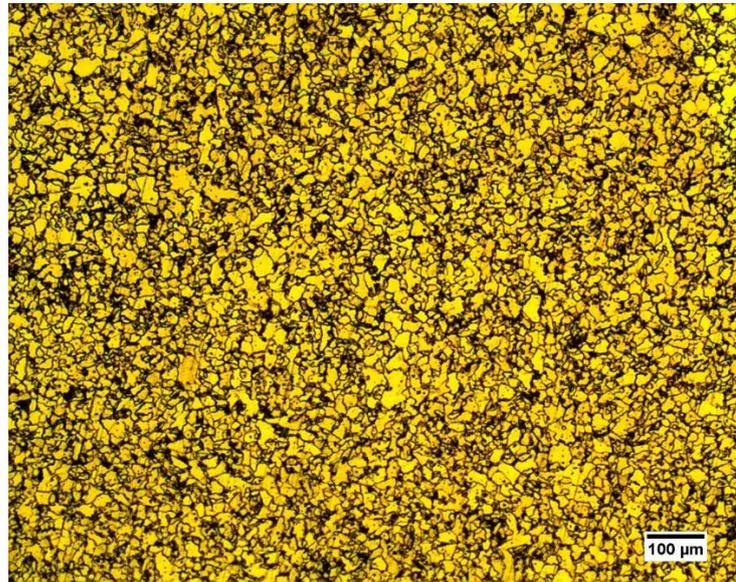
Na junta soldada existem regiões que foram alteradas pelo segundo passe de solda, no caso, o passe de acabamento. Na região de encontro entre as ZFs (zonas fundida) o resultado é um refinamento do grão na região de linha de fusão entre a zona fundida do passe de raiz e passe de acabamento, mostrado nas Figuras 32 e 33. Mesmo resultado encontrado nos estudos de Costa (2018).

Figura 32 - Micrografia da região da linha de fusão entre as zonas fundidas do primeiro passe e do segundo passe de solda



Fonte: Autora (2020).

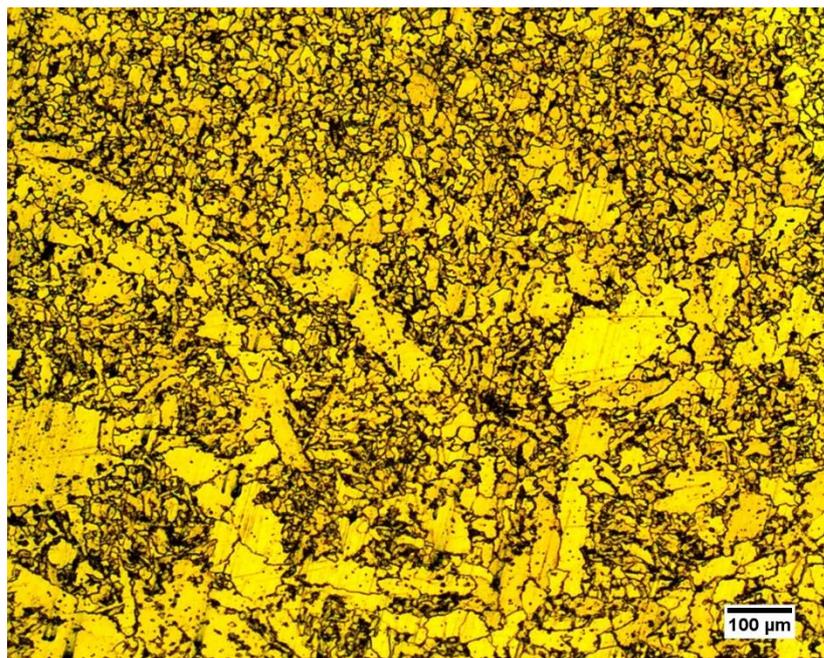
Figura 33 - Micrografia da região do meio da linha de fusão entre as zonas fundidas do primeiro passe e do segundo passe de solda



Fonte: Autora (2020)

A ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) do primeiro passe também teve a sua microestrutura alterada, a região que para passe único apresenta uma região de grão grosseiros, sofreu um refinamento de grãos em consequência do segundo passe de solda, Figura 34.

Figura 34 - Micrografia da região da entre ZF (zonas fundida) e correspondente a ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) modificada pelo segundo de solda



Fonte: Autora (2020).

#### 4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectrômetro de Raio-X de Energia Dispersiva.

Na análise das imagens obtidas via microscópio óptico em G5, foi observado a presença de inclusão de escória e penetração incompleta na linha de fusão entre os cordões de solda e metal base, pode ser visualizada na Figura 35, indicada pelo círculo preto, situados próximo à linha de fusão entre a ZF1 e ZF2 e ZAC 2.

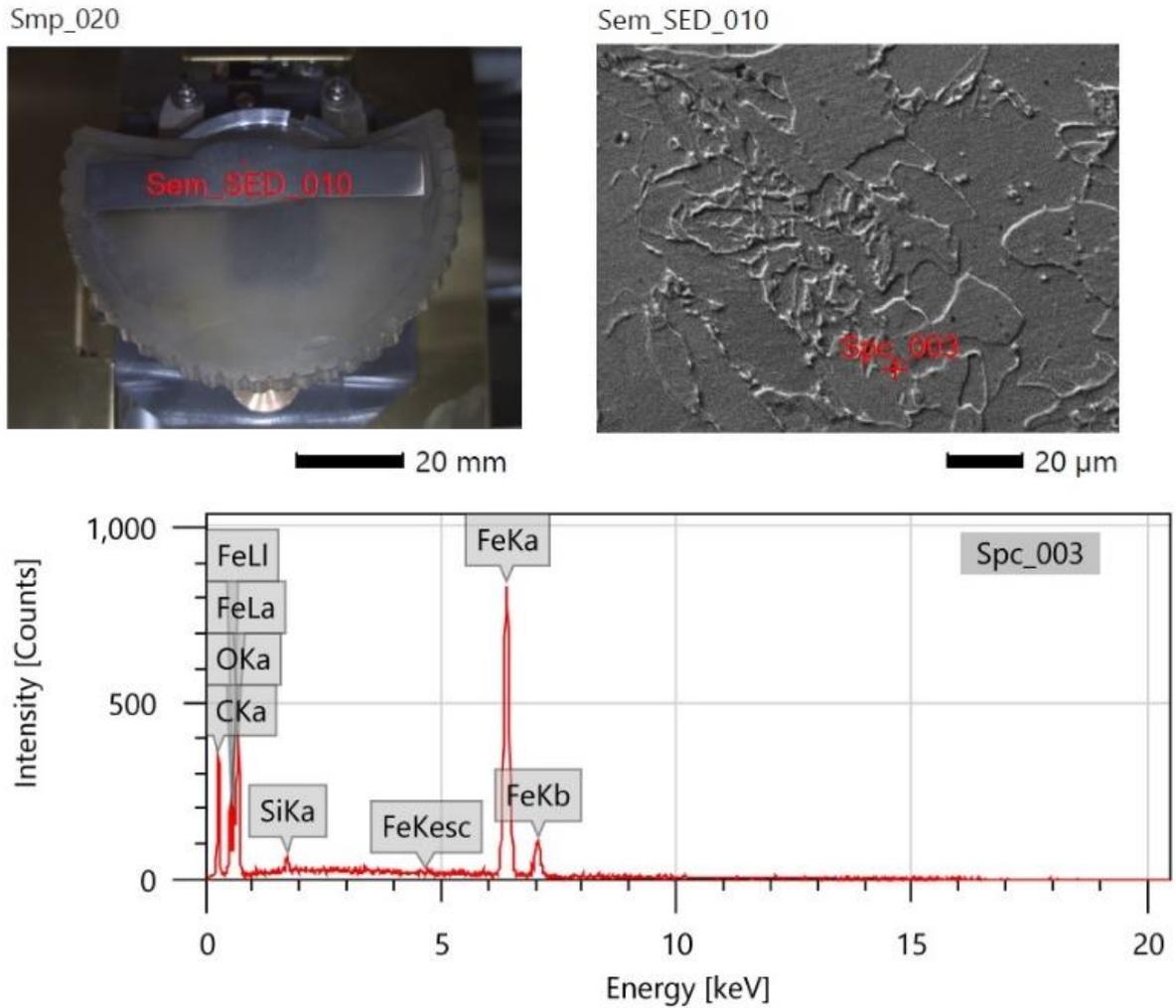
Figura 35 - Macroestrutura da junta soldada de G5 (goivagem de 5 mm) obtida por MO com ampliação de 10X



Fonte: Autora (2020)

Utilizando o mesmo corpo de prova e captura na área próxima à linha de fusão entre a ZF1 e ZF2, foi utilizado o MEV acoplado com EDS para examinar a superfície da inclusão, pode ser visualizada na Figura 36, com o intuito de identificar qual a composição predominante desta área.

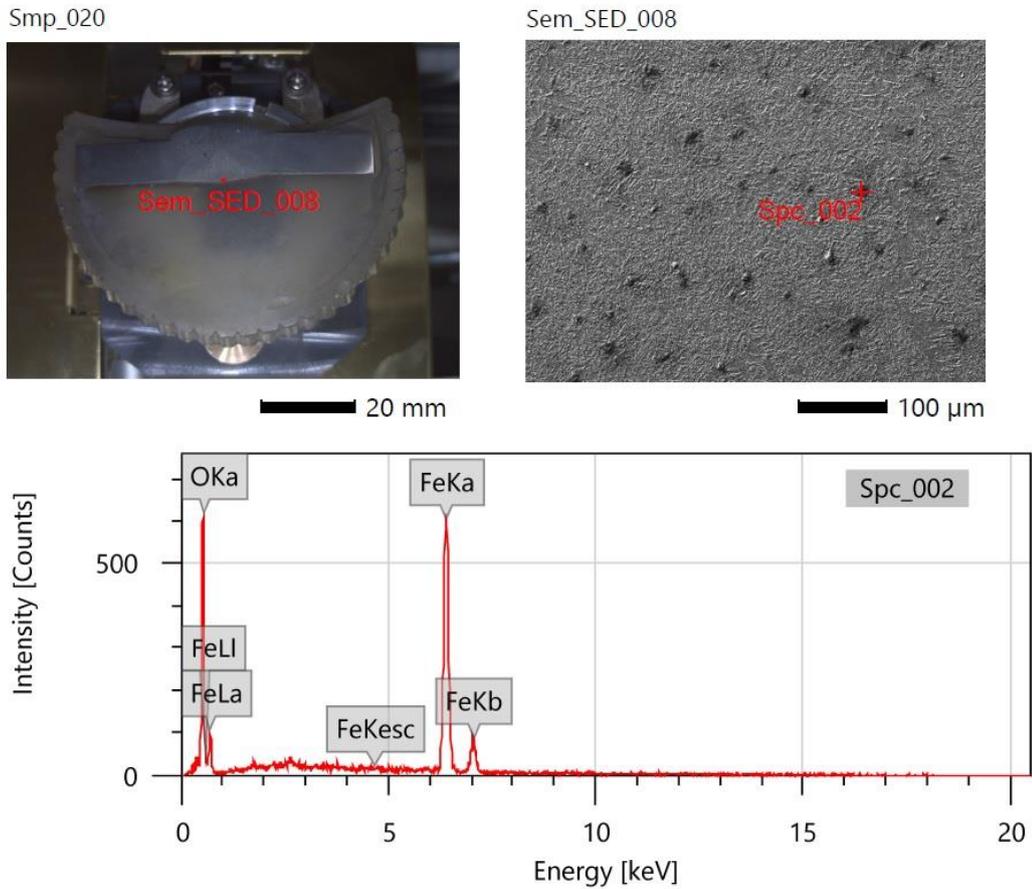
Figura 36 - Microestrutura da junta soldada de G5 (goivagem de 5 mm) obtida por MEV com ampliação de 250X



Fonte: Autora (2020).

Na Figura 37 mostra a composição química dos pontos escuros feitos na superfície da ZF via MEV acoplado com EDS, onde resultou na presença de óxidos de ferro. O que justifica a presença de inclusões de escória nas regiões de encontro entre ZF1 e ZF2 e ZAC2.

Figura 37 - Microestrutura da junta soldada de G5 (goivagem de 5 mm) na superfície obtida por MEV com ampliação de 250X



Fonte: Autora (2020).

As inclusões são materiais não metálicos, como escória e óxidos, presos no metal de solda, entre cordões de solda ou entre a solda e metal base, eles podem se formar em uma linha contínua, que faz como que as tensões se concentrem e reduz a integridade estrutural (perda de resistência) da solda (Jeffus, 2017).

As inclusões de óxidos podem ser formados com o aumento de porcentagem de CO<sub>2</sub> no gás de proteção, onde, quanto maior a porcentagem de CO<sub>2</sub> maior será o volume e o tamanho de inclusões por óxidos (KATHERASAN *et al.*, 2013).

As inclusões de escória ocorrem, geralmente entre as passagens nas soldas multipasses, ao fazer essas soldas em chapas grossas, deve-se tomar cuidado para remover todos os vestígios de escória (Weman, 2012).

## 4.5 Microdureza Vickers

Os dados de média obtidos no ensaio de microdureza Vickers nos corpos de prova com goivagem de 1,5 mm (G1) e goivagem de 5,0 mm (G5) estão apresentados na Tabela 17 e 18, respectivamente. As comparações das médias foram feitas utilizando o método de Tukey, mostrados no Apêndice F, G e H. As medições foram feitas ao longo das regiões do metal base (MB), ZAC de região de refino de grão (ZAC-RG), ZAC de região de grão grosseiro (ZAC-GG) e zona fundida (ZF), nas três áreas mostradas na Figura 38, denominadas de área do passe de raiz, área de interseção e área do passe de acabamento. Cada área corresponde a um total de 27 pontos somando um total de 91 pontos por junta soldada.

Figura 38 - Mapeamento da dureza ao longo das regiões da junta soldada de G1 (goivagem de 1,5 mm) (a) e G5 (goivagem de 5,0 mm) (b), onde foram realizadas as indentações de nanodureza

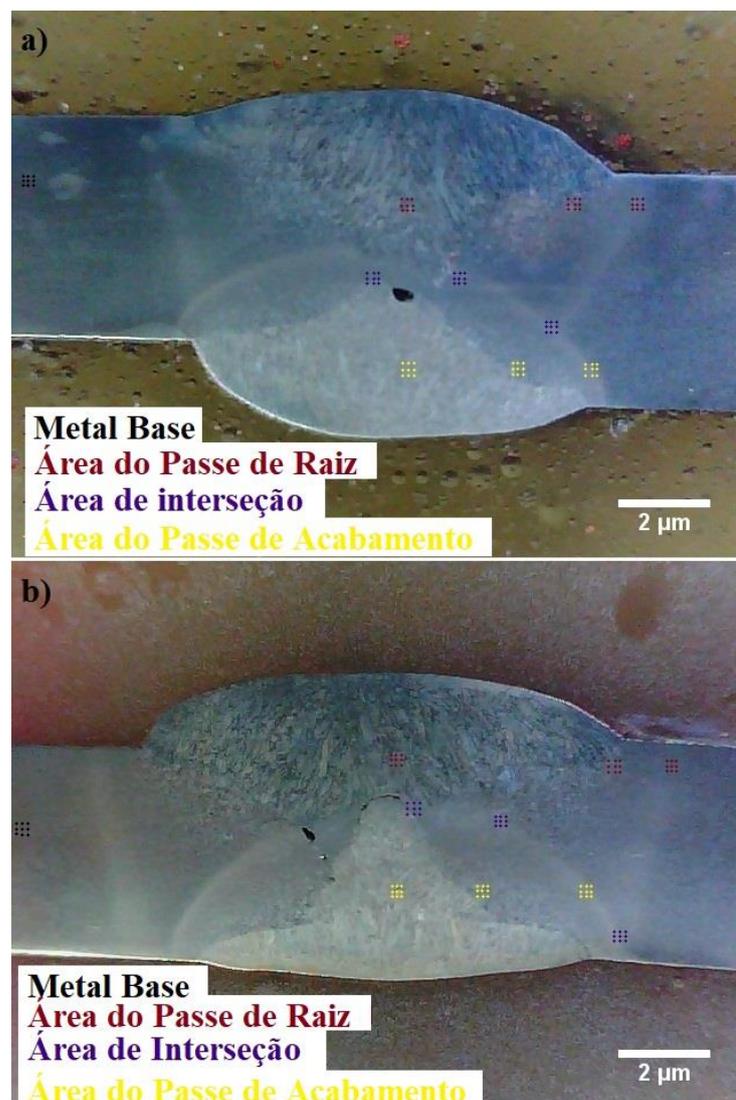


Tabela 17 - Média dos valores de microdureza Vickers dos corpos de prova para as três áreas ensaiadas para G1 (goivagem de 1,5 mm). MB (metal base), ZAC-RG (ZAC de região de refino de grão), ZAC-GG (ZAC de região de grão grosseiro) e ZF (zona fundida)

<b>Resultado da Nanodureza Vickers para Junta Soldada G1 (HV)</b>				
<b>Área</b>	<b>MB</b>	<b>ZAC-RG</b>	<b>ZAC-GG</b>	<b>ZF</b>
Passe de Raiz	213,51 ±11,51	208,62±23,62	219,57±32,42	214,65±18,46
Interseção	213,51 ±11,51	194,75±15,59	197,04±31,04	193,25±17,38
Passe de Acabamento	213,51 ±11,51	193,08±31,40	201,95±12,14	200,96±12,14

Fonte: Autora (2020).

Analisando a média dos resultados para microdureza Vickers na Tabela 17 para G1, nenhuma das médias do passe de raiz, interseção e passe de acabamento, apresentam diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % quando comparado com MP (metal base), ou seja, os corpos de provas obtiveram as propriedades de dureza médias muito próximas entre si.

Tabela 18 - Média dos valores de microdureza para as três áreas ensaiadas para G5 (goivagem de 5,0 mm)

<b>Junta Soldada G5 (HV)</b>				
<b>Área</b>	<b>MB</b>	<b>ZAC-RG</b>	<b>ZAC-GG</b>	<b>ZF</b>
Passe de Raiz	213,51 ±11,51	161,64±20,49	179,22±15,40	191,32±15,22
Interseção	213,51 ±11,51	194,32±6,92	173,45±9,58	193,63±12,83
Passe de Acabamento	213,51 ±11,51	185,75±17,63	191,34±18,18	212,42±17,20

Fonte: Autora (2020)

Analisando a área do passe de raiz de G5, Tabela 18, a ZAC-RG apresenta uma redução de 24,29 % na microdureza quando comparado com o MB e 15,51% menor que a ZF. A ZAC-

GG não apresenta diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % quando comparado ao ZAC-RG e ZF1, e é 16,06% menor que o MB.

Comparando as médias de dureza do passe de raiz com a área de interseção e passe de acabamento do G5, a ZAC-RG do passe de raiz apresenta uma redução de 16,82% na microdureza quando comparado com o ZAC-RG da área de interseção e 12,98 % para a ZAC-RG do passe de acabamento. Essa redução da microdureza pode ser devido ao aumento de energia de soldagem do passe de raiz para o passe de acabamento (RIBEIRO, 2015). A ZAC-GG do passe de raiz não apresenta diferença significativa no intervalo de confiança de 95% quando comparado a ZAC-GG da área de interseção e ZAC-GG do passe de acabamento. Assim como ZF do passe de raiz quando comparado com ZF da área de interseção e ZF do passe de acabamento.

Analisando o passe de acabamento de G5, a ZAC-RG do passe de acabamento apresenta diferença significativa no intervalo de confiança de 95% quando comparado ao MB e ZF. A ZAC-RG apresenta uma redução de 13,00% na nanodureza quando comparado com o MB e 12,55% menor que a ZF.

Comparando as juntas soldadas de G1 e G5, para a área de passe de raiz, G5 apresentou diferença significativa de 95 % quando comparada a G1, onde ZAC-RG de G5, apresenta uma redução 22,53% do que a ZAC-RG de G1. A ZAC-GG de G5, possui microdureza 18,38% inferior a ZAC-GG de G1, é 16,06 % inferior ao metal base. A ZF de G5 não apresenta diferença significativa no intervalo de confiança de 95% quando comparado a ZF de G1. Na região da ZAC a variação ocorre devido as diferentes morfologias ferríticas e a presença de perlita (RIBEIRO, 2015).

Comparando as juntas soldadas de G1 e G5, para a área de interseção e passe de acabamento, não apresentaram diferença significativa no intervalo de confiança de 95% para nenhum valor de média de dureza.

Os valores de média de microdureza Vickers obtidos na juntas soldada de G1 e G5 estão em conformidade com os valores encontrados por Gonçalves *et al.*, (2017), os autores encontraram valores entre 140 a 200 HV em juntas soldadas do aço ASTM A131-A com o processo de soldagem a arco com arame tubular.

Comparando as profundidades de goivagem utilizadas pode-se dizer que G1 (goivagem com 1,5 mm) é a que possui os perfis de dureza mais simétricos com o metal base e com valores de dureza acima dos 190 HV.

#### 4.6 Ensaio de Tração

Nas Tabelas 19 e 20, estão organizados os resultados do ensaio de tração de modo comparativo para as duas profundidade de goivagem para G1 (goivagem, de 1,50 mm) e G5 (goivagem, de 5,0 mm), no sentido longitudinal da junta soldada. Nas Tabelas 21 e 22 estão os resultados para o sentido transversal da junta soldada. Os resultados de média nas Tabelas 19, 20, 21 e 22 para limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento estão em conformidade com os valores estipulados na norma para o aço ASTM A131-A, demonstrado na Tabela 6. Para mais detalhes dos dados medidos estão no Apêndice I. A comparação das médias utilizando o método Tukey são mostrados nos Apêndices J, K e L. As imagens das fraturas dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração estão no Apêndice M.

Tabela 19 - Resultado do ensaio de tração para G1 (goivagem de 1,5 mm) no sentido longitudinal do corpo de prova

<b>Goivagem 1,50 mm (G1) no Sentido Longitudinal.</b>			
<b>Amostra</b>	<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento</b>
1	549,466	428,844	29,42
2	557,606	426,981	29,33
3	551,329	433,159	31,12
<b>Média</b>	<b>552,800 ± 4,265</b>	<b>429,661 ± 3,169</b>	<b>29,956 ± 1,008</b>

Fonte: Autora (2020).

Tabela 20 - Resultado do ensaio de tração para G5 (goivagem de 5,0 mm) no sentido longitudinal do corpo de prova

<b>Goivagem 5,00 mm (G5) no Sentido Longitudinal</b>			
<b>Repetição</b>	<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	<b>Limite de escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento</b>
1	517,987	423,745	29,96
2	542,994	424,824	28,93
3	538,090	432,669	30,81
<b>Média</b>	<b>533,023 ± 13,25</b>	<b>427,079 ± 4,871</b>	<b>29,90 ± 0,941</b>

Fonte: Autora (2020).

O corpo de prova de G5 no sentido longitudinal, apresenta diferença significativa no intervalo de confiança de 95% quando comparado ao G1 no sentido longitudinal para o limite de resistência à tração. O G5 apresentou uma redução no limite de resistência à tração em 3,58 % quando comparado ao G1. Ao se comparar com o limite de escoamento e alongamento, o G5 não apresenta diferença significativa no intervalo de confiança de 95% quando comparado com G1, os valores de médias foram muito próximos para haver uma influência significativa.

A redução de 3,58% quando comparado as médias dos valores de resistência à tração de G5 para G1 pode estar relacionado com a profundidade da goivagem, onde quando maior a penetração da goivagem maior será o valor de redução dessa propriedade. Nos trabalhos de Naghipour *et al.*, (2018), resultou que, com maior profundidade de goivagem mesmo pequenas larguras e comprimentos de goivagem podem resultar em degradação significativa da resistência.

Porém, as propriedade de limite de escoamento e alongamento tiveram as médias muito próximas entre si, sendo que todos os valores de propriedades estão em conformidade com a norma do ASTM A131. Mostrando que a profundidade da goivagem e o procedimento de soldagem estão em conformidade.

Nas Tabelas 21 e 22, estão organizados os resultados do ensaio de tração de modo comparativo para as duas profundidade de goivagem G1 e G5 no sentido transversal da junta soldada.

Tabela 21 - Resultado do ensaio de tração para G1 no sentido transversal do corpo de prova

<b>Goivagem 1,50 mm (G1) no Sentido Transversal</b>			
<b>Amostra</b>	<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento</b>
1	443,75	294,395	23,91
2	441,985	290,472	23,82
3	438,749	288,511	22,60
<b>Média</b>	<b>441,490 ± 2,536</b>	<b>291,126 ± 2,996</b>	<b>23,443 ± 0,731</b>

Fonte: Autora, 2020.

Tabela 22 - Resultado do ensaio de tração para G5 no sentido transversal do corpo de prova

<b>Goivagem 5,00 mm (G5) no Sentido Transversal</b>			
<b>Amostra</b>	<b>Limite de Resistência (MPa)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento</b>
1	443,358	286,452	21,80
2	439,926	289,001	19,70
3	438,8471	289,394	27,10
<b>Média</b>	<b>440,710 ± 2,356</b>	<b>288,282 ± 1,597</b>	<b>22,87 ± 3,814</b>

Fonte: Autora, 2020.

O G5 no sentido transversal, teve limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento, sem diferença significativa no intervalo de confiança de 95% quando comparado ao G1 no sentido transversal, ou seja, os corpos de provas obtiveram as propriedades mecânicas médias muito próximas entre si.

Os corpos de prova no sentido transversal para as duas profundidade de goivagem G1 e G5 romperam no metal base, em conformidade com a tendência de que os corpos de prova rompam no metal base e o estabelecido pela norma AWS D1.1 (2010), que determina que os corpos de provas devem romper no metal base. Trabalhos que obtiveram os mesmos resultados foram de Sarfudeen e Muthukummaram (2020), Park *et al.*, (2019), Costa (2018), Maciel (2014), Rodrigues (2011).

Os valores de média para limite de resistência a tração no sentido longitudinal foram superiores ao no sentido transversal do corpo de prova para ambas as profundidades de G1 e G5, com um aumento de 25,12 % e 20,95 % respectivamente. Essa diferença de propriedades é dada devido a presença do silício (Si) e do magnésio (Mg) (DING *et al.*, (2020)), onde o Si é adicionado principalmente como agente desoxidante para produzir solidez durante o processo de fabricação do aço. Uma grande quantidade de silício pode aumentar a resistência à tração. E o Mn aumenta a resistência à tração e a dureza (BOHNART, 2018).

Os diferentes valores de limite de resistência à tração podem ser explicados também devido as transformações microestruturais apresentados nos tópicos de macrografia e microscopia óptica. A microestrutura da zona fundida apresenta ferrita acicular (FA), enquanto a região da ZAC apresenta maior proporção de ferrita poligonal e grãos refinados na área de interseção, diferentes do metal base, (RIBEIRO, 2015). A presença de ferrita acicular (FA) é frequentemente considerada a microestrutura ideal devido à sua boa combinação de resistência e tenacidade, devido aos pequenos grãos interligados e aos limites de alto ângulo (SCHÖNMAIER *et al*, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

## 5 CONCLUSÃO

As seguintes conclusões podem ser dadas com base nos resultados apresentados nesse trabalho:

1. O passe de acabamento de G1 (goivagem de 1,5 mm) tem um aumento de 16,48 % na energia de soldagem comparado ao passe de raiz. O passe de acabamento de G5 (goivagem de 5,0 mm) tem um aumento na energia de soldagem de 19,90 % comparado ao passe de raiz e um aumento de 10,85% comparado ao passe de acabamento de G1.
2. Com o menor tempo de preparação dos corpos de prova, o G1 (goivagem de 1,5 mm de profundidade) teve o tempo total de soldagem 28,27% menor do que G5 (goivagem de 5,0 mm de profundidade).
3. Na análise química apresenta concentrações 53,70 % e 115,34 % maiores para Mn e Si na zona fundida comparado com o metal base.
4. Na macrografia do corpo de prova de G1, a zona afetada pelo calor é mais estreita em comparação com G5. Isso está relacionado com a energia de soldagem e tempo de soldagem maior para G5.
5. A microestrutura que compõe a ZAC para ambos os corpos de prova G1 e G5 foi ferrita de contorno de grãos, ferrita poligonal, ferrita com segunda fase alinhada, ferrita de segunda fase não alinhada e ferrita de Widmanstätten.
6. Há a presença de óxidos de ferro nas inclusões de escória nas regiões de encontro entre ZF do passe de raiz e ZF do passe de acabamento e ZAC do passe de acabamento.
7. Comparando as profundidades de goivagem G1 e G5, pode-se dizer que G1 (goivagem com 1,5 mm) é a que possui os perfis de dureza mais simétricos com o metal base e com valores de dureza acima dos 190 HV.
8. Os resultados de média para limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento estão em conformidade com os valores estipulados na norma para o aço ASTM A131-A, porém houve uma redução significativa de 3,58% quando comparado as médias dos valores de resistência à tração de G5 para G1.
9. Todos os corpos de prova no sentido transversal romperam no metal base durante o ensaio de tração, confirmando a integridade da junta soldada de ambas profundidades.
10. A soldagem com arame tubular e preparação de junta com goivagem na raiz é uma alternativa para eliminar defeitos nos cordões de solda das juntas soldadas, porém devem ser tomadas medidas de controle com relação as dimensões da goivagem, pois

há uma diminuição dos valores de propriedades mecânicas com dimensões muito grandes.

11. A goivagem com 1,5 mm de profundidade apresenta melhor condição em juntas soldadas do aço ASTM A131-A com soldagem com arame tubular com proteção gasosa 100 % CO<sub>2</sub>, à medida que as propriedades mecânicas apresentam pouca ou nenhuma variação comparado com o metal base, mantendo a integridade da solda, comprovado por meio dos ensaios destrutivos. Além do tempo de soldagem menor para a preparação de juntas soldas, aumentando a produtividade e menor custo operacional.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado no desenvolvimento desta dissertação e nos resultados obtidos, sugere-se como trabalhos futuros:

- Medir o ciclo térmico para a obtenção da temperatura de pico, da taxa de aquecimento e resfriamento para identificar as temperaturas de transformação das microestruturas obtidas no aço.
- Utilizar sensores e softwares adequados para obter parâmetros como por exemplo de corrente e tensão na soldagem dos corpos de prova. Para obter um cálculo adequado de energia de soldagem e estudo de influência dos parâmetros de soldagem utilizados.
- Confeccionar diferentes corpos de prova para cada quantidade de camadas de solda e profundidade de soldagem, com o objetivo de analisar melhor a influência dos passes de raiz, enchimento e acabamento, e profundidade de raiz, sobre a zona afetada pelo calor.
- Medir a fração volumétrica dos microconstituintes para comparar as regiões da junta soldada e correlacionar com as propriedades mecânicas.
- Aumentar a quantidade de profundidade de goivagem a serem avaliados, uma vez que, neste estudo foram utilizadas somente duas profundidade de goivagem. Assim, são necessários mais dados e mais estudos para determinar as relações detalhadas entre redução das propriedades mecânicas e a profundidade de goivagem.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALLOUTI, M., SCHMITT, C., PLUVINAGE, G. Assessment of a gouge and dent defect in a pipeline by a combined criterion. **Engineering Failure Analysis**, v. 36. p. 1-13, 2014.
- AMBADEKAR, P.; AYARE, A.; MAHAJAN, B.; BADE, S.; DESAI-PATIL, V. Fatigue and structural analysis of azimuth thruster assembly. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v.3, 2016.
- AMRAEI, M.; AHOLA, A.; AFKHAMI, S.; BJÖRK, T.; HEIDARPOUR, A.; ZHAO, X. L. Effects of heat input on the mechanical properties of butt-welded high and ultra-high strength steels. **Engineering Structures**, v. 198, 2019.
- ASSUNÇÃO, P. D'A. C.; RIBEIRO, R. A.; SANTOS, E. B. F. S.; GERLICH, A. P.; BRAGA, E. M. Feasibility of Narrow Gap Welding Using the Cold-wire Gas Metal Arc Welding (CW-GMAW) Process. **Welding in the World**, v. 61, p. 659 – 666, 2017.
- ASTM A131/A131M – 14. **Standard Specification for Structural Steel for Ships**, 2014
- ASTM E3-11 – **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**, 2017
- AWS B4.0:2007 – **Standard Methods for Mechanical Testing of Welds**, 2007
- AWS D1.1/D1.1M:2010 – **Structural Welding Code – Steel**, 2010
- BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMB, R. W. K. **Steel: Microstructure and Properties**. 4th ed. USA: Elsevier, 2017.
- BOHNART, E. R. **Welding – Principles and Practices**. 5th ed. New York: Mc.Graw-Hill Education, 2018.
- CALARASU, S.; JIVU, C.; HOLT, C.; ROSU, L. New welding technologies applied in order to repair nonconformities on coke oven chambers at Rompetrol Rafinare S.A. **Advanced Materials Research**, v. 1153, p. 64-77, 2019.
- CELIN, R.; BURJA, J.; KOSEC, G. A comparison of as-welded and simulated heat affected zone (HAZ) microstructures. **Materials and Technology**, v. 50, p. 455-460, 2016.

CHEN, L.; NIE, P.; QU, Z.; OJO, O. A.; XIA, L.; LI, Z.; HUANG, J. Influence of heat input on the changes in the microstructure and fracture behavior of laser welded 800 MPa grade high-strength low-alloy steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v.50, p. 132 – 141, 2020.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

CORREA, C. A. **Uma contribuição ao processo de soldagem de revestimento com arame tubular pulsado de um aço CA6NM aplicando o método de taguchi**. 2018. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

COSTA, E. S. **Avaliação de tensões residuais em soldas GMAW e GMAW-CW por birrefringência acústica e difração de raio x**. 2017. Tese (Doutor em Engenharia de Recursos Naturais) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

COZZA, L. M.; MEDEIROS, J. L. B.; BIEHL, L. V.; SOUZA, J.; FERREIRA FILHO, D. Escolha das Energias de Soldagem para Aplicação na Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ASTM 131 Grau AH36. **Soldagem & Inspeção**, 2019; 24:e2405. <https://doi.org/10.1590/01049224/SI24.05>.

DING, F. X.; LAN, L. F.; YU, Y. J.; MAN, M. K.; Experimental study of the effect of a slow-cooling heat treatment in the mechanical properties of high strength steels. **Construction and Building Material**, v.241, 2020.

EASTERLING K. **Introduction to Physical Metallurgy of Welding**. 2nd ed. Butterworth-Heinemann Ltd, 1992.

EN 1011-1. **European Standard: Welding recommendation for welding of metallic materials: Part 1: General guidance for arc welding**. Brussels, 2002.

FERNANDES, P. E. A. **Avaliação da Tenacidade à Fratura da Zona Afetada Pelo Calor (ZAC) do aço API 5L X80 Soldado pelos Processos SMAW e FCAW**. 2011. Tese (Doutor em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GIRÃO, I. F. **Estudo do Efeito do Aporte Térmico de uma Solda SAW na Zona Afetada pelo Calor de um Material API 5L X100M Através de Simulações Computacionais**. 2018. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

GOMES, J. H. F.; PAIVA, A. P.; COSTA, S. C.; BALESTRASSI, P. P.; PAIVA, E. J. Weighted Multivariate mean square error for processes optimization: A case study on flux-cored arc welding for stainless steel claddings. **European Journal of Operational Research**, p. 522-535, 2013.

GONÇALVES, D. C.; MARTINS, M. C.; FONSECA, M. P. C. Estudo experimental e numérico de tensões residuais em juntas soldadas com e sem restrição. **Soldagem & Inspeção**, v. 22, 2017.

HÄELSIG, A.; PEHLE, S.; KUSCH, M.; MAYR, P. Reducing potential errors in the calculation of cooling rates for typical arc welding processes. **Welding in the World**, v.61, p. 745-754, 2017.

HEO, H.; CHUNG, H. Stochastic assessment considering process variation for impact of welding shrinkage on cost of ship production. **International Journal of Production Research**, v.52, p. 6076 – 6091, 2014.

HUANG, L.; HUA, X., WU, D., JIANG, Z.; LI, F.; WANG, H.; SHI, S. Microstructural characterization of 5083 aluminium alloy thick plates welded with GMAW and twin wire GMAW processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.93, p. 1809-1817, 2017.

JEFFUS, L. **Welding: Principles and Applications**. 8th ed. Boston – USA: Cengage Learning, 2017.

JENNEY, C. L.; O'BRIEN, A. **Welding Handbook: Welding Science and Technology**. 9th ed. Miami: AWS, 2001.

JIA, C.; ZHANG, Y.; WU, J.; XING, C.; ZHAO, B.; WU, C. Comprehensive analysis of spatter loss in wet FCAW considering interactions of bubbles, droplets and arc- Part 2: Visualization & mechanisms. **Journal of Manufacturing Processes**, p. 105 – 112, 2019.

JIANG, Z.; HUA, X.; HUANG, L.; WU, D.; LI, F.; ZHANG, Y. Double-side hybrid laser-MIG welding plus MIG welding of 30 mm thick aluminium alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.97, p. 903-913, 2018.

JOSHI, J.; YADAV, A.; JOSHI, K.; SINGH, D.; PATEL, H.; ULAHANNAN, S.; VINAYKUMAR, A.; GIRISH, M.; KHAN, M.; MANOHAR.; SINGH, M.; BANDYOPADHYAY, M.; CHAKRABORTY, A. Manufacturing experience and commissioning of large size (volume>180 m<sup>3</sup>) UHV class vacuum vessel for Indian test facility (INTF) for neutral beam. **Fusion Engineering and Design**, v.146, p. 1377-1380, 2019.

JUKES, P. Fabrication Welding Processes. **Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering**, John Wiley & Sons Ltd, 2018.

KATHERASAN, D., SATHIYA, P. RAJA, A. Shielding gas effects on flux cored arc welding of AISI 316L (N) austenitic stainless steel joints. **Materials & Design**, p. 43-51, 2013.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure and Performance**. 2nd ed. USA: ASM International, 2015.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

KUMAR, V.; ALBERT, S. K.; CHANDRASEKHAR, N. Signal processing approach on weld data for evaluation of arc welding electrodes using probability density distributions. **Measurement**, v 133, p. 23-32, 2019.

LI, H. L.; LIU, D.; YAN, Y. T.; GUO, N.; FENG, J. C. Effects of heat input on arc stability and weld quality in underwater wet flux-cored arc welding of E40 steel. **Journal of Manufacturing Processes**, p. 833-843, 2018.

LIU, C.; YANG, J.; SHI, Y.; FU, Q.; ZHAO, Y. Modelling of residual stresses in a narrow-gap welding of ultra-thick curved steel mockup. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 256, p. 239-246, 2018.

LOLLA, T.; **Understanding the role of initial microstructure on intercritically reheated heat affected zone microstructure and properties of multi-pass welds**. 2014. Dissertation (Degree Doctor of Philosophy) - The Ohio State University, 2014.

LUCHTENBERG, P.; CAMPOS, P. T.; SOARES, P.; LAURINDO, C. A. H.; MARANHO, O. TORRES, R. D.; Effect of welding energy on the corrosion and tribological properties of duplex stainless steel weld overlay deposited by GMAW/CMT process. **Surface and Coatings Technology**, v. 375, p. 688 – 693, 2019.

MACDONALD, K. A., COSHAM, A. Best Practice for the Assessment of Defects in Pipelines – Gouges and Dents. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, p. 720 – 745, 2005.

MACIEL, L. F. C. **Efeitos da vibração simultânea nas propriedades mecânicas de juntas de aço ASTM A131 soldadas pelo processo arame tubular (FCAW)**. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

MERT, T.; BILGILI, L.; CELEBI, U. B.; EKINCI, S. Experimental Investigation of the effects of parameters on CO<sub>2</sub> and CO emissions during FCAW of structural steel. Estimation and evaluation of environmental and health impacts. **Acta Physica Polonica A**, v. 134, p. 354-357, 2018.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Departamento de Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte, jan, 2015.

MOSTAFANEJAD, A.; IRANMANESH, M.; ZAREBIDAKI, A. An experimental study on stress corrosion behavior of A131/A and A131/AH32 low carbon steels in simulated seawater. **Ocean Engineering**, v.188, 2019.

MU, W.; LI, Y.; CAI, Y.; WANG, M.; HUA, X. The cryogenic low-cycle fatigue performance of 9%Ni steel joint made by flux cored arc welding. **Materials Characterization**, v. 151, p. 27 – 37, 2019.

NAGHIPOUR, M.; EZZATI, M.; ELYASI. Analysis of High-strength pressurized pipes (API-5L-X80) with local gouge and dent defect. **Applied Ocean Research**, v. 78, p. 33-49, 2018.

O'BRIEN, A. **Welding Handbook: Welding Processes**. 9th ed. Part 1. V.2. Miami: AWS, 2004.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1982.

OSTROMECKA, M. Effect of Heat Input on Selected Quality Aspects of Pulsed Current GTAW Joints. **Welding Technology Review**, v. 89, 2017.

PARK, J. H.; KIM, Y. H.; BAEK, H. J. CHO, S. M. A study process development of super-TIG welding for 9% nickel steel with alloy 625. **Journal of Manufacturing Process**, v. 40, p. 140 – 148, 2019.

PATARROYO, A.; SOLANO, E.; CUECA, F.; ROJAS, F.; MORALES, A. Validating the weldability with flux core arc welding “FCAW” for deteriorated naval steels (flux cored arc welding). **Ship Science & Technology**, v.3, p. 41-52, 2010.

PHILLIPS, D. H. **Welding Engineering: An Introduction**. 2nd ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2016.

PRADEEP, G. M.; GANESH, S.; ASWIN, M. R.; ANAND, V. A review on various pipe line welding processes in oil and gas industry. **Engineering Reports**, v.2, 2019.

PRATIKNO, H.; DHANISTHA, W. L. Comparison of Welding Process SAW and FCAW on ASTM A36. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, p. 261-266, 2020.

RAO, V. K.; VIGNESH B. S.; SHREYAS, S. M. Brief study on different types of welding processes. **Adalya Journal**, v.9, 2020.

RATHOD, C.; REDDY, GK. Experimental Investigation of Angular Distortion and Tranverse Shrinkage in CO<sub>2</sub> Arc Welding Process. **International Journal of Mechanical Engineering**, v. 5, n. 4, p. 21-28, 2016.

RIBEIRO, A. C. N.; HENEIN, H.; IVERY, D. G.; BRANDI, S. D. Evaluation of AH36 microalloyed steel welded joint by submerged arc welding process with one and two wires. **Materials Research**, 2015.

RIBEIRO, A. C. N. **Avaliação da Soldagem do Aço Naval AH36 Microligado Soldado pelo Processo Arco Submerso com Um e Dois Arames**. 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

RIBEIRO, H. V. **Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas a laser em um aço ARBL**. 2016. Tese (Doutor em Ciências) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo. Lorena, 2016

RODRIGUES, L. A. S. **Caracterização Microestrutural e de Propriedades Mecânicas de Soldas do Aço ASTM A131 Pelos Processos FCAW Convencional e com Adição de Arame Frio**. 2011. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SAHA, M. K.; MONDAL, A.; HAZRA, R.; DAS, S. Influence of Heat Input on Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Cladding on Low-Alloy Steel by FCAW. In: 7th INTERNATIONAL AND 28th ALL INDIA MANUFACTURING TECHNOLOGY, DESIGN AND RESEARCH (AIMTDR) CONFERENCE, 2018, India. **Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering**, p. 563-720, 2019.

SARFUDEEN, M.; MUTHUKUMMARAN, S. Effect of cold wire addition on improvement in productivity by submerged arc welding in wind turbine tower fabrication. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

SCHAUPP, T.; SCHROEPFER, D.; KROMM, A.; KANNENGIESSER, T. Welding residual stresses in 960 MPa grade QT and TMCP high-strength steels. **Journal of Manufacturing Processes**, p. 226-232, 2017.

SCHÖNMAIER, H.; GRIMM, F. KERIN, R.; KIRCHHEIMER, K.; SCHNITZER, R. Microstructural evolution of 2,25Cr-1Mo-0,25V submerged arc weld metal. **Welding in the World**, p. 379-393, 2020.

SHARMA, S. K.; MAHASHWARI, S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, p. 203-217, 2017.

SHIN, H. S.; PARK, K. T.; LEE, C. H.; CHANG, K. H.; DO, V. N. V. Low temperature impact toughness of structural steel welds with different welding processes. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, p. 1431 – 1437, 2015.

SILVA, M. S.; SOUZA, D.; LIMA, E. H.; BIANCHI, K. E., VILARINHO, L. O. Analysis of fatigue-related aspects of FCAW and GMAW butt-welded joints in a structural steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2020

SINGH, R. **Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards**. 2nd ed. USA: Elsevier, 2016.

SIRISATIEN, T.; MAHABUNPHACHAI, S.; SOJIPHAN, K., Effect of Submerged Arc Welding Process with One-Side One-Pass Welding Technique on Distortion Behavior of Shipbuilding Steel Plate ASTM A131 grade A. **Materials Today: Proceedings**, 2018.

SOEIRO JÚNIOR, J. C. **Soldabilidade metalúrgica do aço ASTM A553 tipo I com 9% de níquel**. 2018. Tese (Doutor em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

SUMESH, A.; NAIR, B. B.; RAMESHKUMAR, K.; SANTHAKUMARI, A.; RAJA, A.; MOHANDAS, K. Decision tree based weld defect classification using current and voltage signatures in GMAW process. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 8354-8363, 2018.

THEWLIS, G. Classification and quantification of microstructures in steels. **Materials Science and Technology**, v.20, p. 143 – 160, 2004.

WAN, Y.; JIANG, W.; LI, J.; SUN, G.; KIM, D. K.; WOO, W.; TU, S. T.; Weld residual stresses in a thick plate considering back chipping: neutron diffraction, contour method and finite element simulation study. **Materials Science and Engineering:A**, v. 699, p. 62 – 70, 2017.

WEMAN, K. **Welding process handbook**. USA: Woodhead Publishing Limited, 2012.

XING, C.; JIA, C.; HAN, Y.; DONG, S.; YANG, J.; WU, C. Numerical analysis of the metal transfer and welding arc behaviors in underwater flux-cored arc welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2020.

ZHAI, P.; XUE, S.; WANG, J.; TAO, Y.; CHEN, W.; CHEN, T.; JI, S. Comparative study of droplet transfer modes on appearance, microstructure, and mechanical properties of weld during pulsed GMAW. **Metals**, v. 10, 2020.

ZILAKOS, I.; CHATZIDOUROS, E.; TSOUVALIS, N. Na innovative ship salvage concept and its effect on hull structural response. **Journal of Marine Engineering & Technology**, 2018.

## 8 APÊNDICES

### APÊNDICE A

Neste apêndice é apresentado os valores medidos no ensaio de composição química no corpo de prova com goivagem de 1,5 mm (G1) e cálculo da média, mostrado conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Dados medidos no ensaio de composição química no corpo de prova (G1).

<b>Composição Química de G1 (%)</b>												
<b>Região</b>		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Co	Cu	Fe
<b>Metal</b>	1	0,19	0,178	0,648	0,0193	0,0083	0,015	0,0248	0,0329	0,0097	0,013	98,8
<b>Base</b>	2	0,15	0,174	0,635	0,0212	0,009	0,0142	0,0237	0,0263	0,0082	0,0108	98,9
	<b>Média</b>	0,17	0,176	0,6415	0,0202	0,0086	0,0146	0,0242	0,0296	0,0089	0,0119	98,85
<b>ZAC</b>	1	0,22	0,179	0,64	0,0228	0,0093	0,0137	0,0233	0,0346	0,0093	0,013	98,8
	2	0,19	0,176	0,634	0,0195	0,0081	0,0131	0,0232	0,0305	0,0088	0,0105	98,9
	<b>Média</b>	0,20	0,1775	0,637	0,0211	0,0087	0,0134	0,0232	0,0325	0,0090	0,0117	98,85
<b>ZF</b>	1	0,16	0,362	0,976	0,0304	0,0102	0,023	0,0256	0,0349	0,0139	0,0226	98,3
	2	0,18	0,396	0,996	0,0261	0,0107	0,0234	0,0244	0,015	0,0096	0,0172	98,2
	<b>Média</b>	0,17	0,379	0,986	0,02825	0,0104	0,0232	0,025	0,0249	0,0117	0,0199	98,25

## APÊNDICE B

Neste apêndice são apresentados os valores medidos para o cálculo de energia de soldagem nos corpos de prova com goivagem de 1,5 mm (G1) e goivagem de 5,0 mm (G5), mostrado conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Dados obtidos para o cálculo de energia de soldagem nos corpos de prova (G1) e (G5).

Goivagem de 1,5 mm – 1:22 min					
Primeiro Cordão - 9:05 min			Segundo Cordão – 4:26 min		
Tempo (min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (min)	Tensão (V)	Corrente (A)
1:00	37,1	196	1:00	35,9	244
2:00	37,5	196	2:00	37,1	256
3:00	37,1	200	3:00	35,9	236
4:00	37,5	204	4:26	35,9	240
5:00	37,9	220			
6:00	37,1	212			
7:00	37,9	188			
8:00	37,9	204			
9:05	37,9	200			
Goivagem 5,0 mm – 6:12 min					
Primeiro Cordão – 9:28 min			Segundo Cordão – 6:12 min		
Tempo (min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tempo (min)	Tensão (V)	Corrente (A)
1:00	36,3	236	1:00	37,1	260
2:00	37,1	208	2:00	36,7	268
3:00	35,9	232	3:00	36,7	272
4:00	37,1	216	4:00	36,7	264
5:00	36,3	240	5:05	37,1	264
6:00	36,7	228			
7:00	37,1	208			
8:00	36,7	200			
9:28	36,3	240			

## APÊNDICE C

Neste apêndice são apresentados os dados obtidos para o cálculo de energia de soldagem nos corpos de prova com goivagem de 1,5 mm (G1) e goivagem de 5,0 mm (G5) de profundidade, conforme mostrado na Figura 1, 2, 3 e 4.

Figura 1 - Valores para corrente (A) e tensão (V) do primeiro passe de raiz do corpo de prova G1.

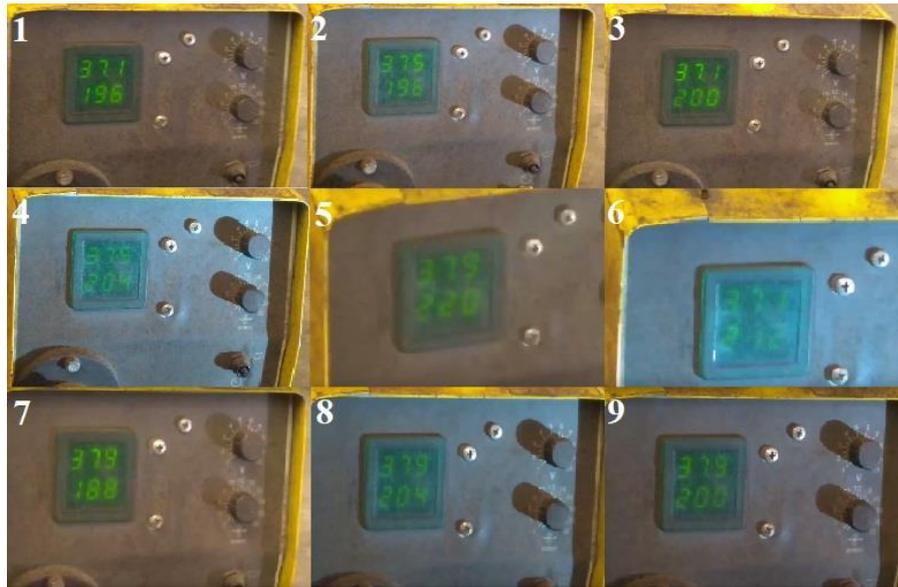


Figura 2 - Valores para corrente (A) e tensão (V) do segundo cordão do corpo de prova G1



Figura 3 - Valores para corrente (A) e tensão (V) do primeiro cordão do corpo de prova G5

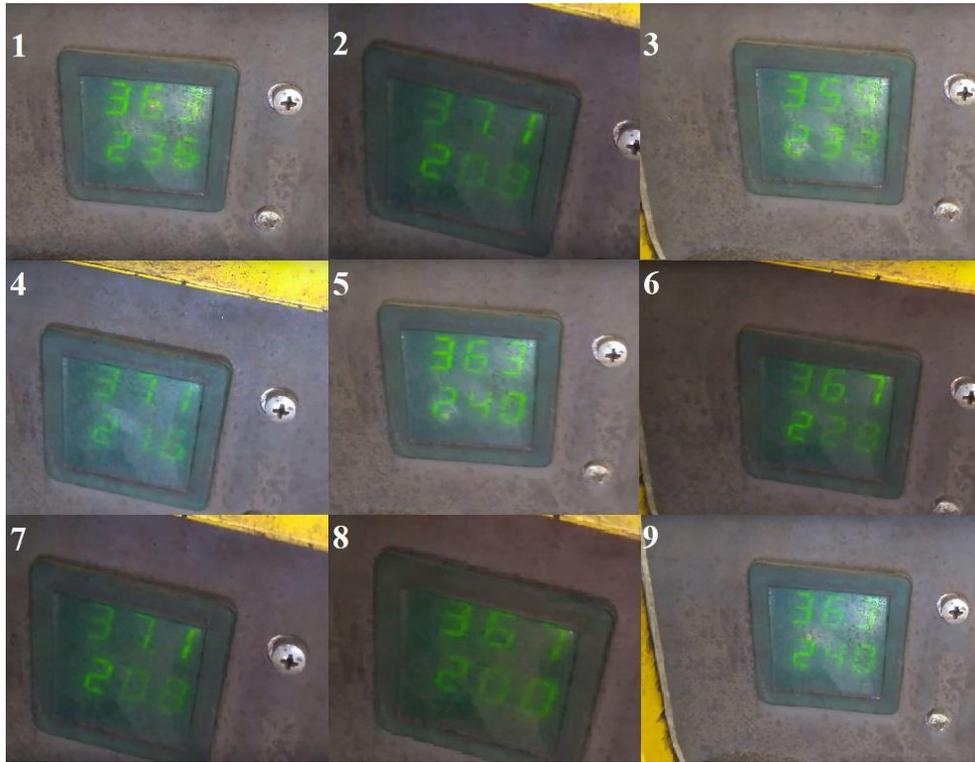


Figura 4 - Valores para corrente (A) e tensão (V) do segundo cordão do corpo de prova G5



## APÊNDICE D

Neste apêndice é mostrado o resumo da análise estatística para energia de soldagem nos corpos de prova com goivagem de 1,5 mm (G1) e goivagem de 5,0 mm (G5) de profundidade.

ONEWAY Energia De Soldagem BY CP

/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY

/PLOT MEANS

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05).

Um fator

### **Estatística Descritivas**

Energia de Soldagem

	N	Média	Estatística do teste Desvio	Estatística do teste Padrão
G1-1C	9	,018222	,0008748	,0002916
G1-2C	4	,021207	,0010947	,0005474
G5-1C	9	,019593	,0011797	,0003932
G5-2C	5	,023495	,0003177	,0001421
Total	27	,020098	,0021289	,0004097

### **ANOVA**

Energia de Soldagem

	Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	,000	3	,000	34,838	,000
Nos grupos	,000	23	,000		
Total	,000	26			

Testes Posteriori

**Comparações múltiplas**

Variável dependente: Energia

Tukey HSD

(I) CP	(J) CP	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.
G1-1C	G1-2C	-,0029856*	,0005777	,000
	G5-1C	-,0013714*	,0004532	,029
	G5-2C	-,0052729*	,0005362	,000
G1-2C	G1-1C	,0029856*	,0005777	,000
	G5-1C	,0016142*	,0005777	,047
	G5-2C	-,0022873*	,0006449	,009
G5-1C	G1-1C	,0013714*	,0004532	,029
	G1-2C	-,0016142*	,0005777	,047
	G5-2C	-,0039015*	,0005362	,000
G5-2C	G1-1C	,0052729*	,0005362	,000
	G1-2C	,0022873*	,0006449	,009
	G5-1C	,0039015*	,0005362	,000

\*. A diferença média é significativa no nível 0.05.

Observação: 1C (Primeiro cordão de solda), 2C (Segundo cordão de solda)

## APÊNDICE E

Neste apêndice são apresentados os dados obtidos no ensaio de nanoindentação nos corpos de prova com goivagem de 1,5 mm (G1) e goivagem de 5,0 mm (G5) de profundidade.

Tabela 3 - Dados medidos no ensaio de nanoindentação nos corpos de prova (G1) e (G5).

Resultado de Microdureza Vickers (HV) para Área do Passe de Raiz de G1					Resultado de Microdureza Vickers (HV) para Área do Passe de Raiz de G5				
Ponto	MB	ZAC-RG	ZAC-GG	ZF	Ponto	MB	ZAC-RG	ZAC-GG	ZF
1	225,3	222,00	175,9	232,9	1	-	147,5	166,6	210,8
2	215,8	205,9	170,3	201,7	2	-	156,8	207,5	194
3	226,7	248,9	217,9	227,3	3	-	158,8	156,2	217,9
4	198,7	175,00	237,2	214,5	4	-	177,5	168,2	186,9
5	211,1	202,1	212,00	246,9	5	-	132,9	176,9	189
6	199,4	185,1	239,00	218	6	-	191,3	178,9	173,5
7	223,9	230,5	215,3	202,5	7	-	135,5	186,1	189,1
8	220,1	194,00	293,3	197	8	-	177,9	182,6	189,6
9	200,6	214,1	215,3	191,1	9	-	176,6	190	171,1
Resultado de Microdureza Vickers (HV) para Área de Interseção de G1					Resultado de Microdureza Vickers (HV) para Área de Interseção de G5				
Ponto	MB	ZAC-RG	ZAC-GG	ZF	Ponto	MB	ZAC-RG	ZAC-GG	ZF
1	-	213,1	147,3	176,8	1	-	194,1	171,8	187,6
2	-	181,1	187,8	200,2	2	-	182,6	172,1	174,3
3	-	214,8	258,5	190,7	3	-	201,1	173,1	207,6
4	-	173,6	213,1	169,9	4	-	194,9	186,9	204,9
5	-	204,5	196,1	206,1	5	-	189,3	160	192,7
6	-	194,9	206,5	168,3	6	-	198,8	180,5	189,3
7	-	198,5	188,7	207,9	7	-	186,2	185,9	195,2
8	-	198,7	209,9	210,9	8	-	201,4	169,5	212,2
9	-	173,6	165,5	208,5	9	-	200,5	161,3	178,9

Resultado de Microdureza Vickers (HV) para Área do Passe de Acabamento de G1					Resultado de Microdureza Vickers (HV) para Área do Passe de Acabamento de G5				
Ponto	MB	ZAC-RG	ZAC-GG	ZF	Ponto	MB	ZAC-RG	ZAC-GG	ZF
1	-	215	199,1	223,3	1	-	198	186,7	193,2
2	-	154,5	185,9	204,9	2	-	193,5	182,5	187,5
3	-	159,5	198,3	206,3	3	-	155	206,5	223,9
4	-	224,6	206,1	199	4	-	204,3	194,4	225,6
5	-	146,8	220,7	180,5	5	-	169,8	190,5	222,6
6	-	227,1	204,1	195,4	6	-	192	185,6	224,2
7	-	194,2	209,1	189,6	7	-	165	224,1	196,8
8	-	213	182,5	208,2	8	-	198,7	156,9	223,6
9	-	203,1	211,8	201,5	9	-	195,5	194,9	214,4

## APÊNDICE F

Resumo da análise estatística para microdureza HV nos corpos de prova com goivagem de 1,50 mm (G1).

ONEWAY Nanodureza BY Zona

/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05).

Um fator

**Estatística Descritivas**

Nanodureza HV

	N	Média	Estatística do teste Desvio	Estatística do teste Padrão
MB	9	213,511	11,5136	3,8379
G1 ZAC-RG1	9	208,622	23,0690	7,6897
G1 ZAC-GG1	9	219,578	36,3243	12,1081
G1 ZF1	9	214,656	18,4589	6,1530
G1 ZAC-RG2	9	194,756	15,5902	5,1967
G1 ZAC-GG2	9	197,044	31,4539	10,4846
G1 ZF2	9	193,256	17,3816	5,7939
G1 ZAC-RG3	9	193,089	31,4000	10,4667
G1 ZAC-GG3	9	201,956	12,1393	4,0464
G1 ZF-3	9	200,967	12,1359	4,0453
Total	90	203,743	23,4071	2,4673

Observação: RG1, GG1 e ZF1 correspondem à Área do Passe de Raiz. RG2, GG2 e ZF2 correspondem à Área de Interseção. RG3, GG3 e ZF3 correspondem à Área do Passe de Acabamento.

**ANOVA**

Nanodureza HV

	Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	7641,821	9	849,091	1,652	,115
Nos grupos	41120,400	80	514,005		
Total	48762,221	89			

Testes Posteriores

**Comparações múltiplas**

Variável dependente: Nanodureza HV

Tukey HSD

(I) Zona	(J) Zona	Estatística			(I) Zona	(J) Zona	Estatística		
		Diferença média(I-J)	do teste Padrão	Sig.			Diferença média(I-J)	do teste Padrão	Sig.
MB	G1 ZAC-RG1	4,8889	10,6875	1,000	G1 ZAC-GG1	MB	6,0667	10,6875	1,000
	G1 ZAC-GG1	-6,0667	10,6875	1,000	G1 ZAC-RG1		10,9556	10,6875	,990
	G1 ZF1	-1,1444	10,6875	1,000	G1 ZF1		4,9222	10,6875	1,000
	G1 ZAC-RG2	18,7556	10,6875	,761	G1 ZAC-RG2		24,8222	10,6875	,386
	G1 ZAC-GG2	16,4667	10,6875	,871	G1 ZAC-GG2		22,5333	10,6875	,527
	G1 ZF2	20,2556	10,6875	,672	G1 ZF2		26,3222	10,6875	,304
	G1 ZAC-RG3	20,4222	10,6875	,662	G1 ZAC-RG3		26,4889	10,6875	,296
	G1 ZAC-GG3	11,5556	10,6875	,985	G1 ZAC-GG3		17,6222	10,6875	,820
	G1 ZF3	12,5444	10,6875	,974	G1 ZF3		18,6111	10,6875	,769

G1 ZAC-RG1	MB	-4,8889	10,6875	1,000	G1 ZF1	MB	1,1444	10,6875	1,000
	G1 ZAC-GG1	-10,9556	10,6875	,990		G1 ZAC-RG1	6,0333	10,6875	1,000
	G1 ZF1	-6,0333	10,6875	1,000		G1 ZAC-GG1	-4,9222	10,6875	1,000
	G1 ZAC-RG2	13,8667	10,6875	,951		G1 ZAC-RG2	19,9000	10,6875	,694
	G1 ZAC-GG2	11,5778	10,6875	,985		G1 ZAC-GG2	17,6111	10,6875	,820
	G1 ZF2	15,3667	10,6875	,911		G1 ZF2	21,4000	10,6875	,600
	G1 ZAC-RG3	15,5333	10,6875	,906		G1 ZAC-RG3	21,5667	10,6875	,589
	G1 ZAC-GG3	6,6667	10,6875	1,000		G1 ZAC-GG3	12,7000	10,6875	,972
	G1 ZF3	7,6556	10,6875	,999		G1 ZF3	13,6889	10,6875	,955
G1 ZAC-RG2	MB	-18,7556	10,6875	,761	G1 ZAC-GG2	MB	-16,4667	10,6875	,871
	G1 ZAC-RG1	-13,8667	10,6875	,951		G1 ZAC-RG1	-11,5778	10,6875	,985
	G1 ZAC-GG1	-24,8222	10,6875	,386		G1 ZAC-GG1	-22,5333	10,6875	,527
	G1 ZF1	-19,9000	10,6875	,694		G1 ZF1	-17,6111	10,6875	,820
	G1 ZAC-GG2	-2,2889	10,6875	1,000		G1 ZAC-RG2	2,2889	10,6875	1,000
	G1 ZF2	1,5000	10,6875	1,000		G1 ZF2	3,7889	10,6875	1,000
	G1 ZAC-RG3	1,6667	10,6875	1,000		G1 ZAC-RG3	3,9556	10,6875	1,000
	G1 ZAC-GG3	-7,2000	10,6875	1,000		G1 ZAC-GG3	-4,9111	10,6875	1,000
	G1 ZF3	-6,2111	10,6875	1,000		G1 ZF3	-3,9222	10,6875	1,000

G1 ZF2	MB	-20,2556	10,6875	,672	G1 ZAC-RG3	MB	-20,4222	10,6875	,662
	G1 ZAC-RG1	-15,3667	10,6875	,911		G1 ZAC-RG1	-15,5333	10,6875	,906
	G1 ZAC-GG1	-26,3222	10,6875	,304		G1 ZAC-GG1	-26,4889	10,6875	,296
	G1 ZF1	-21,4000	10,6875	,600		G1 ZF1	-21,5667	10,6875	,589
	G1 ZAC-RG2	-1,5000	10,6875	1,000		G1 ZAC-RG2	-1,6667	10,6875	1,000
	G1 ZAC-GG2	-3,7889	10,6875	1,000		G1 ZAC-GG2	-3,9556	10,6875	1,000
	G1 ZAC-RG3	,1667	10,6875	1,000		G1 ZF2	-,1667	10,6875	1,000
	G1 ZAC-GG3	-8,7000	10,6875	,998		G1 ZAC-GG3	-8,8667	10,6875	,998
	G1 ZF3	-7,7111	10,6875	,999		G1 ZF3	-7,8778	10,6875	,999
G1 ZAC-GG3	MB	-11,5556	10,6875	,985	G1 ZF3	MB	-12,5444	10,6875	,974
	G1 ZAC-RG1	-6,6667	10,6875	1,000		G1 ZAC-RG1	-7,6556	10,6875	,999
	G1 ZAC-GG1	-17,6222	10,6875	,820		G1 ZAC-GG1	-18,6111	10,6875	,769
	G1 ZF1	-12,7000	10,6875	,972		G1 ZF1	-13,6889	10,6875	,955
	G1 ZAC-RG2	7,2000	10,6875	1,000		G1 ZAC-RG2	6,2111	10,6875	1,000
	G1 ZAC-GG2	4,9111	10,6875	1,000		G1 ZAC-GG2	3,9222	10,6875	1,000
	G1 ZF2	8,7000	10,6875	,998		G1 ZF2	7,7111	10,6875	,999
	G1 ZAC-RG3	8,8667	10,6875	,998		G1 ZAC-RG3	7,8778	10,6875	,999
	G1 ZF3	,9889	10,6875	1,000		G1 ZAC-GG3	-,9889	10,6875	1,000

## APÊNDICE G

Resumo da análise estatística para microdureza HV para os corpos de prova com goivagem de 5mm (G5) de profundidade.

ONEWAY Nanodureza BY Zona

/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05).

Um fator

### **Estatística Descritivas**

Nanodureza HV

	N	Média	Estatística do teste Desvio	Estatística do teste Padrão
MB	9	213,511	11,5136	3,8379
G5 ZAC-RG1	9	161,644	20,4944	6,8315
G5 ZAC-GG1	9	179,222	14,9618	4,9873
G5 ZF1	9	191,322	15,2166	5,0722
G5 ZAC-RG2	9	194,322	6,9213	2,3071
G5 ZAC-GG2	9	173,456	9,5812	3,1937
G5 ZF2	9	193,633	12,8261	4,2754
G5 ZAC-RG3	9	185,756	17,6302	5,8767
G5 ZAC-GG3	9	191,344	18,1815	6,0605
G5 ZF3	9	212,422	15,4565	5,1522
Total	90	189,663	20,7326	2,1854

**ANOVA**

Nanodureza HV

	Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	20715,889	9	2301,765	10,498	,000
Nos grupos	17539,900	80	219,249		
Total	38255,789	89			

Testes Posteriores

**Comparações múltiplas**

Variável dependente: Nanodureza

Tukey HSD

(I) Zona	(J) Zona	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.	(I) Zona	(J) Zona	Diferença média (I- J)	Estatística do teste Padrão	Sig.
MB	G5 ZAC-RG1	51,8667*	6,9801	,000	G5 ZAC-GG1	MB	-34,2889*	6,9801	,000
	G5 ZAC-GG1	34,2889*	6,9801	,000		G5 ZAC-RG1	17,5778	6,9801	,275
	G5 ZF1	22,1889	6,9801	,061		G5 ZF1	-12,1000	6,9801	,773
	G5 ZAC-RG2	19,1889	6,9801	,173		G5 ZAC-RG2	-15,1000	6,9801	,490
	G5 ZAC-GG2	40,0556*	6,9801	,000		G5 ZAC-GG2	5,7667	6,9801	,998
	G5 ZF2	19,8778	6,9801	,139		G5 ZF2	-14,4111	6,9801	,557
	G5 ZAC-RG3	27,7556*	6,9801	,006		G5 ZAC-RG3	-6,5333	6,9801	,995
	G5 ZAC-GG3	22,1667	6,9801	,062		G5 ZAC-GG3	-12,1222	6,9801	,771
	G5 ZF3	1,0889	6,9801	1,000		G5 ZF3	-33,2000*	6,9801	,000

G5 ZAC-RG1	MB	-51,8667*	6,9801	,000	G5 ZF1	MB	-22,1889	6,9801	,061
	G5 ZAC-GG1	-17,5778	6,9801	,275		G5 ZAC-RG1	29,6778*	6,9801	,002
	G5 ZF1	-29,6778*	6,9801	,002		G5 ZAC-GG1	12,1000	6,9801	,773
	G5 ZAC-RG2	-32,6778*	6,9801	,000		G5 ZAC-RG2	-3,0000	6,9801	1,000
	ZAC-GG2	-11,8111	6,9801	,797		ZAC-GG2	17,8667	6,9801	,254
	ZF2	-31,9889*	6,9801	,001		ZF2	-2,3111	6,9801	1,000
	ZAC-RG3	-24,1111*	6,9801	,029		ZAC-RG3	5,5667	6,9801	,998
	ZAC-GG3	-29,7000*	6,9801	,002		ZAC-GG3	-,0222	6,9801	1,000
	ZF3	-50,7778*	6,9801	,000		ZF3	-21,1000	6,9801	,091
G5 ZAC-RG2	MB	-19,1889	6,9801	,173	G5 ZF2	MB	-19,8778	6,9801	,139
	G5 ZAC-RG1	32,6778*	6,9801	,000		G5 ZAC-RG1	31,9889*	6,9801	,001
	G5 ZAC-GG1	15,1000	6,9801	,490		G5 ZAC-GG1	14,4111	6,9801	,557
	G5 ZF1	3,0000	6,9801	1,000		G5 ZF1	2,3111	6,9801	1,000
	G5 ZAC-GG2	20,8667	6,9801	,099		G5 ZAC-RG2	-,6889	6,9801	1,000
	G5 ZF2	,6889	6,9801	1,000		G5 ZAC-GG2	20,1778	6,9801	,125
	G5 ZAC-RG3	8,5667	6,9801	,966		G5 ZAC-RG3	7,8778	6,9801	,980
	G5 ZAC-GG3	2,9778	6,9801	1,000		G5 ZAC-GG3	2,2889	6,9801	1,000
	G5 ZF3	-18,1000	6,9801	,238		G5 ZF3	-18,7889	6,9801	,195

G5 ZAC-GG2	MB	-40,0556*	6,9801	,000	G5 ZAC-RG3	MB	-27,7556*	6,9801	,006
	G5 ZAC-RG1	11,8111	6,9801	,797		G5 ZAC-RG1	24,1111*	6,9801	,029
	G5 ZAC-GG1	-5,7667	6,9801	,998		G5 ZAC-GG1	6,5333	6,9801	,995
	G5 ZF1	-17,8667	6,9801	,254		G5 ZF1	-5,5667	6,9801	,998
	G5 ZAC-RG2	-20,8667	6,9801	,099		G5 ZAC-RG2	-8,5667	6,9801	,966
	G5 ZF2	-20,1778	6,9801	,125		G5 ZAC-GG2	12,3000	6,9801	,756
	G5 ZAC-RG3	-12,3000	6,9801	,756		G5 ZF2	-7,8778	6,9801	,980
	G5 ZAC-GG3	-17,8889	6,9801	,253		G5 ZAC-GG3	-5,5889	6,9801	,998
	G5 ZF3	-38,9667*	6,9801	,000		G5 ZF3	-26,6667*	6,9801	,009
G5 ZAC-GG3	MB	-22,1667	6,9801	,062	G5 ZF3	MB	-1,0889	6,9801	1,000
	G5 ZAC-RG1	29,7000*	6,9801	,002		G5 ZAC-RG1	50,7778*	6,9801	,000
	G5 ZAC-GG1	12,1222	6,9801	,771		G5 ZAC-GG1	33,2000*	6,9801	,000
	G5 ZF1	,0222	6,9801	1,000		G5 ZF1	21,1000	6,9801	,091
	G5 ZAC-RG2	-2,9778	6,9801	1,000		G5 ZAC-RG2	18,1000	6,9801	,238
	G5 ZAC-GG2	17,8889	6,9801	,253		G5 ZAC-GG2	38,9667*	6,9801	,000
	G5 ZF2	-2,2889	6,9801	1,000		G5 ZF2	18,7889	6,9801	,195
	G5 ZAC-RG3	5,5889	6,9801	,998		G5 ZAC-RG3	26,6667*	6,9801	,009
	G5 ZF3	-21,0778	6,9801	,092		G5 ZAC-GG3	21,0778	6,9801	,092

\*. A diferença média é significativa no nível 0.05.

## APÊNDICE H

Resumo da análise estatística para microdureza comparando os resultados dos corpos de prova com goivagem de 1,50 mm e goivagem de 5,00 mm de profundidade.

ONEWAY Nanodureza HV BY Zona

/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05).

Um fator

### **Estatística Descritivas**

Nanodureza

	N	Média	Estatística do teste Desvio	Estatística do teste Padrão
MB	9	213,511	11,5136	3,8379
G1 ZAC-RG1	9	208,622	23,0690	7,6897
G1 ZAC-GG1	9	219,578	36,3243	12,1081
G1 ZF1	9	214,656	18,4589	6,1530
G1 ZAC-RG2	9	194,756	15,5902	5,1967
G1 ZAC-GG2	9	197,044	31,4539	10,4846
G1 ZF2	9	193,256	17,3816	5,7939
G1 ZAC-RG3	9	193,089	31,4000	10,4667
G1 ZAC-GG3	9	201,956	12,1393	4,0464
G1 ZF3	9	200,967	12,1359	4,0453
G5 ZAC-RG1	9	161,644	20,4944	6,8315
G5 ZAC-GG1	9	179,222	14,9618	4,9873
G5 ZF1	9	191,322	15,2166	5,0722
G5 ZAC-RG2	9	194,322	6,9213	2,3071
G5 ZAC-GG2	9	173,456	9,5812	3,1937
G5 ZF2	9	193,633	12,8261	4,2754
G5 ZAC-RG3	9	185,756	17,6302	5,8767
G5 ZAC-GG3	9	191,344	18,1815	6,0605
G5 ZF3	9	212,422	15,4565	5,1522
Total	171	195,819	23,2888	1,7809

**ANOVA**

Nanodureza

	Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	34602,469	18	1922,359	5,073	,000
Nos grupos	57599,791	152	378,946		
Total	92202,260	170			

Testes Posteriores

**Comparações múltiplas**

Variável dependente: Nanodureza

Tukey HSD

(I) Zona	(J) Zona	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.	(I) Zona	(J) Zona	Diferença média (I- J)	Estatística do teste Padrão	Sig.
MB	G1 ZAC-RG1	4,8889	9,1766	1,000	G1 ZAC-GG1	MB	6,0667	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG1	-6,0667	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG1	10,9556	9,1766	1,000
	G1 ZF1	-1,1444	9,1766	1,000		G1 ZF1	4,9222	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG2	18,7556	9,1766	,862		G1 ZAC-RG2	24,8222	9,1766	,410
	G1 ZAC-GG2	16,4667	9,1766	,952		G1 ZAC-GG2	22,5333	9,1766	,594
	G1 ZF2	20,2556	9,1766	,770		G1 ZF2	26,3222	9,1766	,303
	G1 ZAC-RG3	20,4222	9,1766	,758		G1 ZAC-RG3	26,4889	9,1766	,292
	G1 ZAC-GG3	11,5556	9,1766	,999		G1 ZAC-GG3	17,6222	9,1766	,914
	G1 ZF3	12,5444	9,1766	,997		G1 ZF3	18,6111	9,1766	,869
	G5 ZAC-RG1	51,8667*	9,1766	,000		G5 ZAC-RG1	57,9333*	9,1766	,000
	G5 ZAC-GG1	34,2889*	9,1766	,031		G5 ZAC-GG1	40,3556*	9,1766	,003
	G5 ZF1	22,1889	9,1766	,622		G5 ZF1	28,2556	9,1766	,192
	G5 ZAC-RG2	19,1889	9,1766	,838		G5 ZAC-RG2	25,2556	9,1766	,377
	G5 ZAC-GG2	40,0556*	9,1766	,003		G5 ZAC-GG2	46,1222*	9,1766	,000
	G5 ZF2	19,8778	9,1766	,795		G5 ZF2	25,9444	9,1766	,328
G5 ZAC-RG3	27,7556	9,1766	,217	G5 ZAC-RG3	33,8222*	9,1766	,036		
G5 ZAC-GG3	22,1667	9,1766	,624	G5 ZAC-GG3	28,2333	9,1766	,193		
G5 ZF3	1,0889	9,1766	1,000	G5 ZF3	7,1556	9,1766	1,000		

G1 ZAC-RG1	MB	-4,8889	9,1766	1,000	G1 ZF1	MB	1,1444	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG1	-10,9556	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG1	6,0333	9,1766	1,000
	G1 ZF1	-6,0333	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG1	-4,9222	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG2	13,8667	9,1766	,991		G1 ZAC-RG2	19,9000	9,1766	,794
	G1 ZAC-GG2	11,5778	9,1766	,999		G1 ZAC-GG2	17,6111	9,1766	,915
	G1 ZF2	15,3667	9,1766	,975		G1 ZF2	21,4000	9,1766	,685
	G1 ZAC-RG3	15,5333	9,1766	,972		G1 ZAC-RG3	21,5667	9,1766	,672
	G1 ZAC-GG3	6,6667	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG3	12,7000	9,1766	,997
	G1 ZF3	7,6556	9,1766	1,000		G1 ZF3	13,6889	9,1766	,993
	G5 ZAC-RG1	46,9778*	9,1766	,000		G5 ZAC-RG1	53,0111*	9,1766	,000
	G5 ZAC-GG1	29,4000	9,1766	,142		G5 ZAC-GG1	35,4333*	9,1766	,020
	G5 ZF1	17,3000	9,1766	,926		G5 ZF1	23,3333	9,1766	,528
	G5 ZAC-RG2	14,3000	9,1766	,988		G5 ZAC-RG2	20,3333	9,1766	,764
	G5 ZAC-GG2	35,1667*	9,1766	,022		G5 ZAC-GG2	41,2000*	9,1766	,002
	G5 ZF2	14,9889	9,1766	,981		G5 ZF2	21,0222	9,1766	,714
	G5 ZAC-RG3	22,8667	9,1766	,567		G5 ZAC-RG3	28,9000	9,1766	,162
	G5 ZAC-GG3	17,2778	9,1766	,927		G5 ZAC-GG3	23,3111	9,1766	,530
	G5 ZF3	-3,8000	9,1766	1,000		G5 ZF3	2,2333	9,1766	1,000

G1 ZAC-RG2	MB	-18,7556	9,1766	,862	G1 ZAC-GG2	MB	-16,4667	9,1766	,952
	G1 ZAC-RG1	-13,8667	9,1766	,991		G1 ZAC-RG1	-11,5778	9,1766	,999
	G1 ZAC-GG1	-24,8222	9,1766	,410		G1 ZAC-GG1	-22,5333	9,1766	,594
	G1 ZF1	-19,9000	9,1766	,794		G1 ZF1	-17,6111	9,1766	,915
	G1 ZAC-GG2	-2,2889	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG2	2,2889	9,1766	1,000
	G1 ZF2	1,5000	9,1766	1,000		G1 ZF2	3,7889	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG3	1,6667	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG3	3,9556	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG3	-7,2000	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG3	-4,9111	9,1766	1,000
	G1 ZF3	-6,2111	9,1766	1,000		G1 ZF3	-3,9222	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG1	33,1111*	9,1766	,046		G5 ZAC-RG1	35,4000*	9,1766	,021
	G5 ZAC-GG1	15,5333	9,1766	,972		G5 ZAC-GG1	17,8222	9,1766	,906
	G5 ZF1	3,4333	9,1766	1,000		G5 ZF1	5,7222	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG2	,4333	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG2	2,7222	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG2	21,3000	9,1766	,693		G5 ZAC-GG2	23,5889	9,1766	,508
	G5 ZF2	1,1222	9,1766	1,000		G5 ZF2	3,4111	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG3	9,0000	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG3	11,2889	9,1766	,999
	G5 ZAC-GG3	3,4111	9,1766	1,000		G5 ZAC-GG3	5,7000	9,1766	1,000
	G5 ZF3	-17,6667	9,1766	,912		G5 ZF3	-15,3778	9,1766	,975

G1 ZF2	MB	-20,2556	9,1766	,770	G1 ZAC-RG3	MB	-20,4222	9,1766	,758
	G1 ZAC-RG1	-15,3667	9,1766	,975		G1 ZAC-RG1	-15,5333	9,1766	,972
	G1 ZAC-GG1	-26,3222	9,1766	,303		G1 ZAC-GG1	-26,4889	9,1766	,292
	G1 ZF1	-21,4000	9,1766	,685		G1 ZF1	-21,5667	9,1766	,672
	G1 ZAC-RG2	-1,5000	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG2	-1,6667	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG2	-3,7889	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG2	-3,9556	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG3	,1667	9,1766	1,000		G1 ZF2	-,1667	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG3	-8,7000	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG3	-8,8667	9,1766	1,000
	G1 ZF3	-7,7111	9,1766	1,000		G1 ZF3	-7,8778	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG1	31,6111	9,1766	,074		G5 ZAC-RG1	31,4444	9,1766	,078
	G5 ZAC-GG1	14,0333	9,1766	,990		G5 ZAC-GG1	13,8667	9,1766	,991
	G5 ZF1	1,9333	9,1766	1,000		G5 ZF1	1,7667	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG2	-1,0667	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG2	-1,2333	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG2	19,8000	9,1766	,800		G5 ZAC-GG2	19,6333	9,1766	,811
	G5 ZF2	-,3778	9,1766	1,000		G5 ZF2	-,5444	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG3	7,5000	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG3	7,3333	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG3	1,9111	9,1766	1,000		G5 ZAC-GG3	1,7444	9,1766	1,000
	G5 ZF3	-19,1667	9,1766	,839		G5 ZF3	-19,3333	9,1766	,829

G1 ZAC-GG3	MB	-11,5556	9,1766	,999	G1 ZF3	MB	-12,5444	9,1766	,997
	G1 ZAC-RG1	-6,6667	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG1	-7,6556	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG1	-17,6222	9,1766	,914		G1 ZAC-GG1	-18,6111	9,1766	,869
	G1 ZF1	-12,7000	9,1766	,997		G1 ZF1	-13,6889	9,1766	,993
	G1 ZAC-RG2	7,2000	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG2	6,2111	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG2	4,9111	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG2	3,9222	9,1766	1,000
	G1 ZF2	8,7000	9,1766	1,000		G1 ZF2	7,7111	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG3	8,8667	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG3	7,8778	9,1766	1,000
	G1 ZF3	,9889	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG3	-,9889	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG1	40,3111*	9,1766	,003		G5 ZAC-RG1	39,3222*	9,1766	,004
	G5 ZAC-GG1	22,7333	9,1766	,578		G5 ZAC-GG1	21,7444	9,1766	,658
	G5 ZF1	10,6333	9,1766	1,000		G5 ZF1	9,6444	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG2	7,6333	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG2	6,6444	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG2	28,5000	9,1766	,180		G5 ZAC-GG2	27,5111	9,1766	,231
	G5 ZF2	8,3222	9,1766	1,000		G5 ZF2	7,3333	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG3	16,2000	9,1766	,959		G5 ZAC-RG3	15,2111	9,1766	,977
	G5 ZAC-GG3	10,6111	9,1766	1,000		G5 ZAC-GG3	9,6222	9,1766	1,000
	G5 ZF3	-10,4667	9,1766	1,000		G5 ZF3	-11,4556	9,1766	,999

G5 ZAC-RG1	MB	-51,8667*	9,1766	,000	G5 ZAC-GG1	MB	-34,2889*	9,1766	,031
	G1 ZAC-RG1	-46,9778*	9,1766	,000		G1 ZAC-RG1	-29,4000	9,1766	,142
	G1 ZAC-GG1	-57,9333*	9,1766	,000		G1 ZAC-GG1	-40,3556*	9,1766	,003
	G1 ZF1	-53,0111*	9,1766	,000		G1 ZF1	-35,4333*	9,1766	,020
	G1 ZAC-RG2	-33,1111*	9,1766	,046		G1 ZAC-RG2	-15,5333	9,1766	,972
	G1 ZAC-GG2	-35,4000*	9,1766	,021		G1 ZAC-GG2	-17,8222	9,1766	,906
	G1 ZF2	-31,6111	9,1766	,074		G1 ZF2	-14,0333	9,1766	,990
	G1 ZAC-RG3	-31,4444	9,1766	,078		G1 ZAC-RG3	-13,8667	9,1766	,991
	G1 ZAC-GG3	-40,3111*	9,1766	,003		G1 ZAC-GG3	-22,7333	9,1766	,578
	G1 ZF3	-39,3222*	9,1766	,004		G1 ZF3	-21,7444	9,1766	,658
	G5 ZAC-GG1	-17,5778	9,1766	,916		G5 ZAC-RG1	17,5778	9,1766	,916
	G5 ZF1	-29,6778	9,1766	,131		G5 ZF1	-12,1000	9,1766	,998
	G5 ZAC-RG2	-32,6778	9,1766	,053		G5 ZAC-RG2	-15,1000	9,1766	,979
	G5 ZAC-GG2	-11,8111	9,1766	,999		G5 ZAC-GG2	5,7667	9,1766	1,000
	G5 ZF2	-31,9889	9,1766	,066		G5 ZF2	-14,4111	9,1766	,987
	G5 ZAC-RG3	-24,1111	9,1766	,465		G5 ZAC-RG3	-6,5333	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG3	-29,7000	9,1766	,131		G5 ZAC-GG3	-12,1222	9,1766	,998
	G5 ZF3	-50,7778*	9,1766	,000		G5 ZF3	-33,2000*	9,1766	,044

G5 ZF1	MB	-22,1889	9,1766	,622	G5 ZAC-RG2	MB	-19,1889	9,1766	,838
	G1 ZAC-RG1	-17,3000	9,1766	,926		G1 ZAC-RG1	-14,3000	9,1766	,988
	G1 ZAC-GG1	-28,2556	9,1766	,192		G1 ZAC-GG1	-25,2556	9,1766	,377
	G1 ZF1	-23,3333	9,1766	,528		G1 ZF1	-20,3333	9,1766	,764
	G1 ZAC-RG2	-3,4333	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG2	-,4333	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG2	-5,7222	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG2	-2,7222	9,1766	1,000
	G1 ZF2	-1,9333	9,1766	1,000		G1 ZF2	1,0667	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG3	-1,7667	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG3	1,2333	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG3	-10,6333	9,1766	1,000		G1 ZAC-GG3	-7,6333	9,1766	1,000
	G1 ZF3	-9,6444	9,1766	1,000		G1 ZF3	-6,6444	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG1	29,6778	9,1766	,131		G5 ZAC-RG1	32,6778	9,1766	,053
	G5 ZAC-GG1	12,1000	9,1766	,998		G5 ZAC-GG1	15,1000	9,1766	,979
	G5 ZAC-RG2	-3,0000	9,1766	1,000		G5 ZF1	3,0000	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG2	17,8667	9,1766	,904		G5 ZAC-GG2	20,8667	9,1766	,726
	G5 ZF2	-2,3111	9,1766	1,000		G5 ZF2	,6889	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG3	5,5667	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG3	8,5667	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG3	-,0222	9,1766	1,000		G5 ZAC-GG3	2,9778	9,1766	1,000
	G5 ZF3	-21,1000	9,1766	,708		G5 ZF3	-18,1000	9,1766	,894

G5 ZAC-GG2	MB	-40,0556*	9,1766	,003	G5 ZF2	MB	-19,8778	9,1766	,795
	G1 ZAC-RG1	-35,1667*	9,1766	,022		G1 ZAC-RG1	-14,9889	9,1766	,981
	G1 ZAC-GG1	-46,1222*	9,1766	,000		G1 ZAC-GG1	-25,9444	9,1766	,328
	G1 ZF1	-41,2000*	9,1766	,002		G1 ZF1	-21,0222	9,1766	,714
	G1 ZAC-RG2	-21,3000	9,1766	,693		G1 ZAC-RG2	-1,1222	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG2	-23,5889	9,1766	,508		G1 ZAC-GG2	-3,4111	9,1766	1,000
	G1 ZF2	-19,8000	9,1766	,800		G1 ZF2	,3778	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG3	-19,6333	9,1766	,811		G1 ZAC-RG3	,5444	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG3	-28,5000	9,1766	,180		G1 ZAC-GG3	-8,3222	9,1766	1,000
	G1 ZF3	-27,5111	9,1766	,231		G1 ZF3	-7,3333	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG1	11,8111	9,1766	,999		G5 ZAC-RG1	31,9889	9,1766	,066
	G5 ZAC-GG1	-5,7667	9,1766	1,000		G5 ZAC-GG1	14,4111	9,1766	,987
	G5 ZF1	-17,8667	9,1766	,904		G5 ZF1	2,3111	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG2	-20,8667	9,1766	,726		G5 ZAC-RG2	-,6889	9,1766	1,000
	G5 ZF2	-20,1778	9,1766	,775		G5 ZAC-GG2	20,1778	9,1766	,775
	G5 ZAC-RG3	-12,3000	9,1766	,998		G5 ZAC-RG3	7,8778	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG3	-17,8889	9,1766	,903		G5 ZAC-GG3	2,2889	9,1766	1,000
	G5 ZF3	-38,9667*	9,1766	,005		G5 ZF3	-18,7889	9,1766	,860

G5 ZAC-RG3	MB	-27,7556	9,1766	,217	G5 ZAC-GG3	MB	-22,1667	9,1766	,624
	G1 ZAC-RG1	-22,8667	9,1766	,567		G1 ZAC-RG1	-17,2778	9,1766	,927
	G1 ZAC-GG1	-33,8222*	9,1766	,036		G1 ZAC-GG1	-28,2333	9,1766	,193
	G1 ZF1	-28,9000	9,1766	,162		G1 ZF1	-23,3111	9,1766	,530
	G1 ZAC-RG2	-9,0000	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG2	-3,4111	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG2	-11,2889	9,1766	,999		G1 ZAC-GG2	-5,7000	9,1766	1,000
	G1 ZF2	-7,5000	9,1766	1,000		G1 ZF2	-1,9111	9,1766	1,000
	G1 ZAC-RG3	-7,3333	9,1766	1,000		G1 ZAC-RG3	-1,7444	9,1766	1,000
	G1 ZAC-GG3	-16,2000	9,1766	,959		G1 ZAC-GG3	-10,6111	9,1766	1,000
	G1 ZF3	-15,2111	9,1766	,977		G1 ZF3	-9,6222	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG1	24,1111	9,1766	,465		G5 ZAC-RG1	29,7000	9,1766	,131
	G5 ZAC-GG1	6,5333	9,1766	1,000		G5 ZAC-GG1	12,1222	9,1766	,998
	G5 ZF1	-5,5667	9,1766	1,000		G5 ZF1	,0222	9,1766	1,000
	G5 ZAC-RG2	-8,5667	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG2	-2,9778	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG2	12,3000	9,1766	,998		G5 ZAC-GG2	17,8889	9,1766	,903
	G5 ZF2	-7,8778	9,1766	1,000		G5 ZF2	-2,2889	9,1766	1,000
	G5 ZAC-GG3	-5,5889	9,1766	1,000		G5 ZAC-RG3	5,5889	9,1766	1,000
	G5 ZF3	-26,6667	9,1766	,281		G5 ZF3	-21,0778	9,1766	,710

\*. A diferença média é significativa no nível 0.05.

## APÊNDICE I

Neste apêndice são apresentados os dados obtidos no ensaio de tração nos corpos de prova com goivagem de 1,5 mm (G1) e goivagem de 5,0 mm (G5) de profundidade, no sentido longitudinal e transversal do cordão de solda.

Tabela 4 - Dados medidos no ensaio de tração nos corpos de prova (G1) e (G5).

<b>Goivagem 5,00 mm Longitudinal</b>				<b>Goivagem 1,50 mm Longitudinal</b>			
<b>CP</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>CP</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração</b>	<b>Alongamento (%)</b>
1	423,745	517,987	29,96	1	428,844	549,466	29,42
2	424,824	542,994	28,93	2	426,981	557,606	29,33
3	432,669	538,09	30,81	3	433,159	551,329	31,12
<b>Goivagem 5,00 mm Transversal</b>				<b>Goivagem 1,50 mm Transversal</b>			
<b>CP</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>CP</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Limite de Resistência à Tração (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
1	286,452	443,358	21,80	1	294,395	443,75	23,91
2	289,001	439,926	19,70	2	290,472	441,985	23,82
3	289,394	438,847	27,10	3	288,511	438,749	22,60

## APÊNDICE J

Resumo da análise estatística do limite de resistência à tração no ensaio de tração nos corpos de prova, para goivagem com profundidade de 1,50 mm na posição longitudinal (G1L) e transversal (G1T), para goivagem com profundidade de 5,00 mm na posição longitudinal (G5L) e transversal (G5T).

ONEWAY Limite De Resistência À Tração BY Grupo

/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05).

Um fato

### **Estatística Descritivas**

Limite de Resistência à Tração

	N	Média	Estatística do teste Desvio	Estatística do teste Padrão
G1L	3	552,80033	4,264800	2,462283
G5L	3	533,02367	13,250974	7,650453
G1T	3	441,49467	2,536301	1,464334
G5T	3	440,71033	2,355560	1,359983
Total	12	492,00725	54,015686	15,592985

### **ANOVA**

Limite de Resistência à Tração

	Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	31683,120	3	10561,040	205,310	,000
Nos grupos	411,517	8	51,440		
Total	32094,637	11			

Testes Posteriores

### Comparações múltiplas

Variável dependente: Limite de Resistência à Tração

Tukey HSD

(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.
G1L	G5L	19,776667*	5,856027	,039
	G1T	111,305667*	5,856027	,000
	G5T	112,090000*	5,856027	,000
G5L	G1L	-19,776667*	5,856027	,039
	G1T	91,529000*	5,856027	,000
	G5T	92,313333*	5,856027	,000
G1T	G1L	-111,305667*	5,856027	,000
	G5L	-91,529000*	5,856027	,000
	G5T	,784333	5,856027	,999
G5T	G1L	-112,090000*	5,856027	,000
	G5L	-92,313333*	5,856027	,000
	G1T	-,784333	5,856027	,999

\*. A diferença média é significativa no nível 0.05.

## APÊNDICE K

Resumo da análise estatística do limite de escoamento no ensaio de tração nos corpos de prova, para goivagem com profundidade de 1,50 mm na posição longitudinal (G1L) e transversal (G1T), para goivagem com profundidade de 5,00 mm na posição longitudinal (G5L) e transversal (G5T).

ONEWAY Limite De Escoamento BY Grupo

/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05).

Um fator

### **Estatística Descritivas**

Limite de Escoamento

	N	Média	Estatística do teste Desvio	Estatística do teste Padrão
G1L	3	429,66133	3,169061	1,829658
G5L	3	427,07933	4,870764	2,812137
G1T	3	291,12600	2,996023	1,729754
G5T	3	288,28233	1,597248	,922172
Total	12	359,03725	72,486761	20,925126

### **ANOVA**

Limite de Escoamento

	Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	57707,047	3	19235,682	1698,716	,000
Nos grupos	90,589	8	11,324		
Total	57797,636	11			

Testes Posteriores

### Comparações múltiplas

Variável dependente: Limite de Escoamento

Tukey HSD

(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.
G1L	G5L	2,582000	2,747564	,785
	G1T	138,535333*	2,747564	,000
	G5T	141,379000*	2,747564	,000
G5L	G1L	-2,582000	2,747564	,785
	G1T	135,953333*	2,747564	,000
	G5T	138,797000*	2,747564	,000
G1T	G1L	-138,535333*	2,747564	,000
	G5L	-135,953333*	2,747564	,000
	G5T	2,843667	2,747564	,735
G5T	G1L	-141,379000*	2,747564	,000
	G5L	-138,797000*	2,747564	,000
	G1T	-2,843667	2,747564	,735

\*. A diferença média é significativa no nível 0.05.

## APÊNDICE L

Resumo da análise estatística do alongamento no ensaio de tração nos corpos de prova, para goivagem com profundidade de 1,50 mm na posição longitudinal (G1L) e transversal (G1T), para goivagem com profundidade de 5,00 mm na posição longitudinal (G5L) e transversal (G5T).

ONEWAY Alongamento BY Grupo

/STATISTICS DESCRIPTIVES HOMOGENEITY

/MISSING ANALYSIS

/POSTHOC=TUKEY ALPHA(0.05).

Um fator

### **Estatística Descritivas**

Alongamento

	N	Média	Estatística do teste Desvio	Estatística do teste Padrão
G1L	3	29,9567	1,00848	,58225
G5L	3	29,9000	,94144	,54354
G1T	3	23,4433	,73173	,42247
G5T	3	22,8667	3,81357	2,20177
Total	12	26,5417	3,95546	1,14184

### **ANOVA**

Alongamento

	Soma dos Quadrados	Df	Quadrado Médio	Z	Sig.
Entre Grupos	138,138	3	46,046	10,846	,003
Nos grupos	33,964	8	4,246		
Total	172,102	11			

Testes Posteriores

**Comparações múltiplas**

Variável dependente: Alongamento

Tukey HSD

(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença média (I-J)	Estatística do teste Padrão	Sig.
G1L	G5L	,05667	1,68236	1,000
	G1T	6,51333*	1,68236	,020
	G5T	7,09000*	1,68236	,013
G5L	G1L	-,05667	1,68236	1,000
	G1T	6,45667*	1,68236	,021
	G5T	7,03333*	1,68236	,013
G1T	G1L	-6,51333*	1,68236	,020
	G5L	-6,45667*	1,68236	,021
	G5T	,57667	1,68236	,985
G5T	G1L	-7,09000*	1,68236	,013
	G5L	-7,03333*	1,68236	,013
	G1T	-,57667	1,68236	,985

\*. A diferença média é significativa no nível 0.05.

## APÊNDICE M

Imagens dos corpos de provas rompidos no ensaio de tração, para goivagem com profundidade de 1,50 mm na posição longitudinal (G1L) e transversal (G1T), para goivagem com profundidade de 5,00 mm na posição longitudinal (G5L) e transversal (G5T).

Figura 5 - Região onde as amostras de G5T romperam



Figura 6 - Região onde as amostras de G1T romperam.



Figura 7 - Região onde as amostras de G5L romperam.



Figura 8 - Região onde as amostras de G1L romperam.

