

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica**

LEANDRO MACEDO COZZA

**ESTUDO DA TÉCNICA DA DUPLA CAMADA NA SOLDAGEM DO AÇO
A131 GRAU AH36**

Rio Grande
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica

LEANDRO MACEDO COZZA

ESTUDO DA TÉCNICA DA DUPLA CAMADA NA SOLDAGEM DO AÇO
A131 GRAU AH36

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.
Área de Concentração: Engenharia de Fabricação. Linha de Pesquisa: Engenharia de Soldagem e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

Rio Grande
2018

Ficha catalográfica

C882e Cozza, Leandro Macedo.

Estudo da técnica da dupla camada na soldagem do aço A131 grau AH36 / Leandro Macedo Cozza. – 2018.
101f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2018.

Orientador: Dr. Jorge Luis Braz Medeiros.

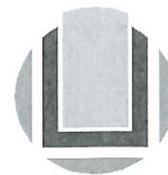
1. Soldagem 2. ASTM A131 grau AH36 3. Dupla camada I.
Medeiros, Jorge Luis Braz II. Título.

CDU 621.791

Catálogo na Fonte: Bibliotecária Vanessa Ceiglinski Nunes CRB 10/2174



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 15/2018 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte dias do mês de dezembro de dois mil e dezoito, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dez horas no Mini auditório do prédio da Fabricação Mecânica no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu o mestrando Leandro Macedo Cozza, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **ESTUDO DA TÉCNICA DA DUPLA CAMADA NA SOLDAGEM DO AÇO A131 GRAU AH36**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl e Ederson Bitencourt das Neves, sob a presidência do Professor Jorge Luis Braz Medeiros. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Jorge Luis Braz Medeiros: Aprovado
2. Luciano Volcanoglo Biehl: Aprovado
3. Ederson Bitencourt das Neves: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. Jorge Luis Braz Medeiros
CPF: 588.871.210-87
2. Luciano Volcanoglo Biehl
CPF: 575.195.100-00
3. Ederson Bitencourt das Neves
CPF: 966.872.230-20

Leandro Macedo Cozza: Leandro Macedo Cozza

À Deus

À minha esposa

Aos meus pais (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

- Aos professores M.Sc. Carlos Lima (FURG), Dr. Rogério Royer (UFPEL) e Dr. Antônio Brasil (FURG) pela contribuição na candidatura ao mestrado com as respectivas cartas de referências;
- Ao Professor e Orientador Dr. Jorge Luiz Braz Medeiros pela confiança e incentivo durante a realização deste trabalho;
- Ao professor Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, Coordenador do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, pela dedicação ao Programa e pelo apoio e incentivo para a realização deste trabalho;
- Aos professores do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica, pela dedicação e amizade para com o Programa e os Mestrados;
- Aos técnicos do Laboratório de Usinagem, Laboratório de Metalografia e Laboratório de Pesquisa em Engenharia da Soldagem - LAPES, pela ajuda tanto técnica como pessoal;
- Aos colegas do mestrado pela ajuda, amizade e companheirismo;
- A CAPES/FAPERGS pelo auxílio financeiro através da bolsa de apoio a pesquisa.

RESUMO

O aço ASTM A131 Grau AH36 pode apresentar, em juntas soldadas, defeitos oriundos dos ciclos térmicos. No controle e eliminação destas anomalias normalmente se utiliza do procedimento de reparo. Este é um processo que requer adequações para que o material tenham as características mecânicas e metalúrgicas similares. Para alcançar estes objetivos se utiliza o tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) que visa diminuir a dureza e garantir uma condição metalúrgica satisfatória na região recuperada. O TTPS pode ser uma alternativa inviável por questões relativas a tempo, custo e processo. Uma alternativa que tem sido estudada como uma forma de contornar esta questão é a técnica da dupla camada que se baseia na sobreposição controlada dos efeitos térmicos dos passes e da relação de energia de soldagem de tal forma que ocorra então o auto-revenimento e o refino microestrutural na zona afetada pelo calor. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da técnica da dupla camada em substituição ao tratamento térmico convencional e comparando os mesmos sob a ótica do comportamento microestrutural e propriedades mecânicas. A metodologia deste trabalho se baseou na realização da soldagem preliminar com intuito de encontrar uma relação entre as energias da primeira e segunda camada através da utilização dos critérios de microdureza e microestrutura e posterior soldagem das juntas com chanfro em meio V sem TTPS, com aplicação de tratamento térmico e com a técnica da dupla camada. Para todas as juntas foram avaliados os perfis de dureza, microdureza e a microestrutura. Os resultados na soldagem preliminar mostraram que a relação de energia que se mostrou mais adequada é a relação 5/14 kJ/cm. Identificou-se aumento não significativo no tamanho de grão com o método da dupla camada, mantendo-se dentro da classificação como grãos finos - extrafinos, resultando em valores de dureza e microdureza compatíveis com um revenimento da zona afetada pelo calor da primeira camada, o que contribui para que técnica da dupla camada possa ser utilizada satisfatoriamente.

Palavras Chave: Soldagem, ASTM A131 Grau AH36, Dupla Camada.

ABSTRACT

ASTM A131 Grade AH36 steel may have defects from thermal cycles in welded joints. In the control and elimination of these anomalies the repair procedure is usually used. This is a process that requires adjustments so that the material has similar mechanical and metallurgical characteristics. To achieve these objectives, the post-weld heat treatment (PWHT) is used to reduce hardness and ensure a satisfactory metallurgical condition in the recovered region. PWHT may be an impracticable alternative due to time, cost and process issues. An alternative that has been studied as a way to solve this question is the double-layer technique that relies on the controlled overlap of the thermal effects of the passes and the welding energy ratio in such a way that self-tempering and refining microstructure in the heat affected zone. In this way, the present work has as objective to evaluate the effect of the double layer technique in substitution to the conventional thermal treatment and comparing them under the microstructural behavior and mechanical properties. The methodology of this work was based on preliminary welding in order to find a relation between the energies of the first and second layers through the use of the microhardness and microstructure criteria and subsequent welding of the joints with chamfer half V without PWHT, with application of heat treatment and double layer technique. For all joints the profiles of hardness, microhardness and microstructure were evaluated. The preliminary welding results showed that the energy ratio that was most adequate was the ratio of 5/14 kJ / cm. It was identified a non-significant increase in grain size with the double layer method, remaining within the classification as fine and extrafine grains, resulting in values of hardness and microhardness compatible with a tempering of the zone affected by the heat of the first layer, the which contributes to the satisfactory use of the double layer techniques.

Keywords: Welding, ASTM A 131 grade AH36, Double Layer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Soldagem convencional: a) Preparação para a soldagem na bancada de soldagem. b) Macrografia da junta com chanfro em semi V. c) Macrografia da junta com chanfro em K.	23
Figura 2 – Diagrama esquemático do tratamento térmico com austenitização a 1200 °C, 20% de deformação na fase austenita a 1050 °C e 850 °C, isoterma a 650 °C a 3 min e 180 min.....	26
Figura 3 - Esquema de aplicação da técnica da dupla camada. F – penetração da segunda camada, A – penetração da primeira camada, H – altura média da primeira camada, R – profundidade refinada pela segunda camada	28
Figura 4 – Diagrama de decisão	31
Figura 5 – Microestrutura do metal de base. Reagente Nital 2 %; b) Reagente <i>Klemm</i>	32
Figura 6 – Caracterização microestrutural óptica da ZAC-GG. a) Reagente Nital 2 %; b) Reagente <i>Klemm</i>	33
Figura 7 – Comparação do tamanho de grão entre as regiões da solda, antes e após o tratamento térmico.....	33
Figura 8 – Corpo de prova dupla camada AVT 5/10/10. a) Regiões do corpo de prova, 13 X; b) Região ampliada. ZAC-GG pouco refinada, 100 X. Ataque: nital 2 %	34
Figura 9 – Microscopia das regiões da ZAC: a, b) amostra soldada com 5/5 kJ/cm com TTPS c, d) amostra soldada com 15/5 com TTPS.....	35
Figura 10 – Macrografia de diferentes porcentagens de camadas de sobreposição	39
Figura 11 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho	42
Figura 12 – Representação esquemática dos corpos de prova – soldagem preliminar.....	43
Figura 13 – Retirada das amostras: a) Transversal ao corpo de prova; b) Detalhe das amostras com as linhas de direção para medição de microdureza.....	45
Figura 14 – Detalhe do corpo de prova da solda em dupla camada para medição dos perfis de microdureza.....	48
Figura 15 – Croqui da junta chanfrada – vista lateral	49
Figura 16 – Sequência de soldagem para as juntas chanfradas.....	50
Figura 17 – Desenho esquemático da localização da amostra para caracterização metalúrgica – vista superior sem escala	51
Figura 18 – Desenho esquemático da localização das amostras para medição das propriedades mecânicas na junta soldada – vista superior sem escala.....	52
Figura 19 – Representação esquemática da localização das medições de dureza na amostra retirada da junta soldada – vista lateral.....	52
Figura 20 – Representação esquemática da localização das medições de microdureza na amostra retirado da junta soldada – vista lateral	53
Figura 21 – Microestrutura do aço ASTM A 131 Grau AH36.....	54
Figura 22 – Aspecto visual dos cordões de solda de acordo com a energia de soldagem: a) 5 kJ/cm b) 9 kJ/cm c) 14 kJ/cm e d) 17 kJ/cm	57
Figura 23 - Perfil de microdureza para a energia de 5 kJ/cm	58

Figura 24 - Perfil de microdureza para a energia de 9 kJ/cm	58
Figura 25 - Perfil de microdureza para a energia de 14 kJ/cm	59
Figura 26 - Perfil de microdureza para a energia de 17 kJ/cm	59
Figura 27 – Macrografias com as regiões de soldagem: a) 5 kJ/cm b) 9 kJ/cm c) 14 kJ/cm e d) 17 kJ/cm	60
Figura 28 – Diagrama de decisão para a dupla camada com 5 kJ/cm na primeira camada.....	62
Figura 29 – Diagrama de decisão para a dupla camada com 9 kJ/cm na primeira camada.....	64
Figura 30 - Diagrama de decisão para a dupla camada com 14 kJ/cm na primeira camada.....	65
Figura 31 – Diagrama de decisão para a dupla camada com 17 kJ/cm na primeira camada.....	66
Figura 32 – Aspecto visual do cordão de solda para ensaio em dupla camada para a relação de energia de soldagem 5/14 kJ/cm: a) Vista superior e b) Vista lateral.....	67
Figura 33 – Macrografia do cordão de solda para ensaio em dupla camada para a relação de energia de soldagem 5/14 kJ/cm	68
Figura 34 – Comparação entre os perfis de microdurezas da dupla camada com a soldagem preliminar.....	69
Figura 35 – Etapas do processo de soldagem do chanfro reto na soldagem da junta: a) 1° Camada b) 2° Camada e c) Chanfro usinado pronto para a soldagem.....	70
Figura 36 – Montagem da junta para soldagem com chanfro preparado pela técnica da dupla camada	71
Figura 37 – Corpos de prova soldados	72
Figura 38 – Macro e micrografia da região ZAC-GG próxima a linha de fusão na junta de referência	73
Figura 39 – Macro e micrografia da região ZAC-GG próxima a linha de fusão da amostra da junta com TTPS	75
Figura 40 – Macro e microestrutura da amostra retirada da junta com dupla camada	77
Figura 41 – Microestrutura do corpo de prova: a) amostra de referência b) com TTPS e c) dupla camada.....	79
Figura 42 – Perfis de dureza para a amostra da junta de referência para as três regiões: superior, meio e inferior.....	81
Figura 43 – Perfil de dureza média para a amostra da junta de referência.....	82
Figura 44 – Perfis de dureza para a amostra da junta com TTPS para as três regiões: superior, meio e inferior.....	83
Figura 45 – Perfis de dureza média para a amostra da junta com TTPS.....	84
Figura 46 – Perfis de dureza para a amostra da junta com DC para as três regiões: superior, meio e inferior.....	85
Figura 47 – Perfis de dureza média para a amostra da junta com DC.....	86
Figura 48 – Comparação dos perfis de dureza média para a amostra da junta de referência, TTPS e com DC.....	87
Figura 49 – Perfis de microdureza para a amostra da junta de referência para as regiões entre passes e centro do cordão	88
Figura 50 – Perfis de microdureza média para a amostra da junta de referência	89

Figura 51 – Perfis de microdureza para a amostra com TTPS para as regiões entre passes e centro do cordão.....	90
Figura 52 – Perfis de microdureza média para a amostra da junta com TTPS.....	91
Figura 53 – Perfis de microdureza para a amostra da junta com DC.....	92
Figura 54 – Perfis de microdureza média para a amostra da junta com DC.....	93
Figura 55 – Comparação dos perfis de microdureza média para a amostra da junta de referência, TTPS e com DC	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas encontradas de acordo com a simulação da energia de soldagem	21
Tabela 2 – Parâmetros de soldagem e tamanho de grão	22
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem para o enchimento das juntas	23
Tabela 4 – Processos de tratamento térmico.....	25
Tabela 5 - Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem preliminar	44
Tabela 6 - Parâmetros de soldagem para o enchimento das juntas	50
Tabela 7 – Composição química do material	55
Tabela 8 – Medições de microdureza do metal de base.....	56
Tabela 9 - Extensões das zonas da solda para a microdureza.....	61
Tabela 10 - Extensões das zonas da solda para a microestrutura.....	61
Tabela 11 – Quadro do critério de escolha das energias de soldagem.....	63
Tabela 12 – Tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG para a junta de referência.....	74
Tabela 13 – Tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG para a amostra com TTPS.....	76
Tabela 14 – Tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG ₁ para a amostra com dupla camada	78
Tabela 15 – Quadro resumo do tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG para as amostras.....	79
Tabela 16 – Quadro resumo do pico de dureza média da ZAC-GG para as amostras.....	87
Tabela 17 – Quadro resumo do pico da microdureza média da ZAC-GG para as amostras	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASTM	American Standard for Testing and Materials
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TTPS	Tratamento Térmico Pós Soldagem
ZAC	Zona afetada pelo calor
GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG/MAG	Metal Inert Gas/Metal Active Gas
ZAC-GG	Zona afetada pelo calor com granulação grossa
kJ/mm	Kilojoules por milímetro
HV	Dureza / Microdureza em Vickers
FCAW	Flux-cored Arc Welding
ZAC-GF	Zona afetada pelo calor com granulação fina
A	Ampere
V	Volts
mm/s	Milímetros por segundo
µm	Micrometro
SAW	Submerged Arc Welding
mm	Milímetros
cm/min	Centímetros por minuto
FA	Ferrita acicular
MA	Martensita-austenita
°C	Graus Celsius

TMCP	Thermo-mechanical controlled processing
TTAT	Tratamento térmico para alívio de tensões
min	Minutos
C_{eq}	Carbono equivalente
h	Horas
API	American Petroleum Institute
CST	Corrosão sob tensão
F	Penetração da segunda camada
A	Penetração da primeira camada
H	Altura média da primeira camada
R	Profundidade refinada pela segunda camada
JIS	Japanese Industrial Standards
kJ/cm	Kilojoules por centímetro
H₂S	Ácido sulfídrico
AISI	American iron and steel institute
ZF	Zona fundida
AWS	American Welding Society
CO₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
m/min	Metros por minuto
Hz	Hertz
J/cm	Joules por centímetro

l/min	Litros por minuto
E_{sol}	Energia de soldagem
U	Tensão de soldagem
I	Corrente de soldagem
V_{sol}	Velocidade de soldagem
DBCP	Distância de bico de contato-peça
g	Gramas
R	Altura do reforço da solda
P	Profundidade de penetração da solda
ZE	Zona endurecida
ZNE	Zona não endurecida
PZNE₂	Profundidade da zona não endurecida na segunda camada
PZE₁	Profundidade da zona endurecida na primeira camada
R₁	Altura do reforço na primeira camada
P₁	Profundidade de penetração na primeira camada
PZE₂	Profundidade da zona endurecida na segunda camada
P₂	Profundidade de penetração na segunda camada
ZE₂	Zona endurecida na segunda camada
ZNE₂	Zona não endurecida na segunda camada
ZE₁	Zona endurecida na primeira camada
PZAC-GF₂	Profundidade da zona afetada pelo calor com granulação fina na segunda camada
PZAC-GG₁	Profundidade da zona afetada pelo calor com granulação grosseira na primeira camada
ZF₁	Zona fundida na primeira camada
PZAC-GG₂	Profundidade da zona afetada pelo calor com granulação grosseira na segunda camada

ZAC-GG₂	Zona afetada pelo calor com granulação grosseira na segunda camada
ZAC-GF₂	Zona afetada pelo calor com granulação fina na segunda camada
ZAC-GG₁	Zona afetada pelo calor com granulação grosseira na primeira camada
R₂	Segundo passe de raiz
R₁	Primeiro passe de raiz
DC	Corpo de prova dupla camada
Kg	Kilograma
MB	Metal de base
HV0,1	Dureza em Vickers com carga aplicada de 100 grama
E1	Energia de soldagem da primeira camada
E2	Energia de soldagem da segunda camada
ZAC-IC	Zona afetada pelo calor da região intercrítica
LF	Linha de fusão
FS(A)	Ferrita alinhada com carbonetos
FS(NA)	Ferrita desalinhada com carbonetos
FC	Ferrita com carbonetos agregados
DP	Desvio padrão
HV2	Dureza em Vickers com carga aplicada de 2 Kilogramas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	ESTADO DA ARTE	21
2.1	SOLDAGEM DOS AÇOS MICROLIGADOS	21
2.1.1	Influência dos Parâmetros de Soldagem e do Aporte Térmico	21
2.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS PÓS-SOLDAGEM (TTPS)	23
2.3	TÉCNICA DA DUPLA CAMADA	27
2.1.2	Critérios para Aplicação da Técnica da Dupla Camada	30
2.2	COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL	32
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS APLICADAS A TÉCNICA DA DUPLA CAMADA	36
2.3.1	Dureza	36
2.3.2	Microdureza	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	40
3.1.1	Metal de Base	40
3.1.2	Metal de Adição	40
3.1.3	Gases de Proteção	40
3.1.4	Equipamentos	41
3.2	METODOLOGIA	41
3.2.1	Caracterização do Metal de Base	43
3.2.2	Preparação dos Corpos de Prova	43
3.2.3	Soldagem Preliminar	43
3.2.4	Critérios de Análise para os Diagramas de Decisão	45
3.2.5	Soldagem com Dupla Camada	47
3.2.6	Soldagem das Juntas Chanfradas	48
3.2.6.1	<i>Preparação do Chanfro Reto da Junta com Dupla Camada</i>	48
3.2.6.2	<i>Soldagem Final dos Corpos de Provas</i>	48
3.2.7	Tratamento Térmico Pós-soldagem	50
3.2.8	Caracterização Metalúrgica	51
3.2.9	Análise das Propriedades Mecânicas	51
3.2.9.1	<i>Dureza</i>	52
3.2.9.2	<i>Microdureza</i>	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO METAL DE BASE	54
4.1.1	Análise Microestrutural	54
4.1.2	Análise Química	54
4.1.3	Medição de Microdureza	56
4.2	SOLDAGEM PRELIMINAR	56
4.3	SOLDAGEM COM DUPLA CAMADA	67
4.4	SOLDAGEM DAS JUNTAS CHANFRADAS	70
4.4.1	Preparação do Chanfro Reto da Junta com Dupla Camada	70

4.4.2	Soldagem Final dos Corpos de Prova.....	71
4.5	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	72
4.5.1	Junta de Referência	72
4.5.2	Junta com TTPS.....	74
4.5.3	Junta com Dupla Camada.....	76
4.5.4	Comparação entre a Junta de Referência, TTPS e com DC.....	78
4.6	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	80
4.6.1	Dureza	80
4.6.1.1	<i>Junta de Referência</i>	80
4.6.1.2	<i>Junta com TTPS</i>	82
4.6.1.3	<i>Junta com Dupla Camada</i>	84
4.6.1.4	<i>Comparação entre a Junta de Referência, TTPS e DC</i>	86
4.6.2	Microdureza.....	88
4.6.2.1	<i>Junta de Referência</i>	88
4.6.2.2	<i>Junta com TTPS</i>	89
4.6.2.3	<i>Junta com Dupla Camada</i>	91
4.6.2.4	<i>Comparação entre a Junta de Referência, TTPS e DC</i>	93
5	CONCLUSÕES	95
6	TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem utilizados na Indústria de petróleo e gás possuem extrema importância na integralidade estrutural de componentes que utilizam este tipo de união. Neste contexto a comunidade de soldagem deve estar ciente das dificuldades e limitações que este processo estabelece na união de estruturas e equipamentos. Desta forma a fabricação/reparo de uniões soldadas apresenta um desafio, sobretudo no que diz respeito ao estudo dos ciclos térmicos e estado de tensões que podem diminuir a vida útil da estrutura.

Atualmente empregado na indústria mecânica como estruturas metálicas para cascos de plataformas de petróleo, o aço *American Society for Testing and Materials* (ASTM) A131 Grau AH36 pode apresentar, em juntas soldadas, defeitos ou descontinuidades oriundas dos ciclos térmicos, processo de soldagem aplicado e/ou habilidades operacionais que realiza a soldagem (principalmente em processos manuais como *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), por exemplo). No controle e eliminação destas descontinuidades normalmente se utiliza do procedimento de reparo da junta soldada. Este é um processo que requer uma série de providências e adequações para que o material de base, zona afetada pelo calor e o metal de solda tenham as características mecânicas e metalúrgicas similares. Para alcançar estes objetivos são utilizados alguns processos, dentre eles o tratamento térmico pós soldagem (TTPS) que visa, sobretudo diminuir a dureza, reduzir as tensões residuais e garantir uma boa tenacidade na região recuperada.

O TTPS muitas vezes pode ser uma alternativa onerosa e até mesmo inviável por comprometer questões relativas a tempo, custo e processo, pois nem sempre podem ser realizados devido às questões operacionais desta operação, além das dimensões destas estruturas.

Uma alternativa que tem sido estudada como uma forma de contornar esta questão é a possibilidade da utilização de técnicas especiais de soldagem sem tratamento térmico posterior. Dentre elas se destaca a técnica da dupla camada que se baseia na sobreposição controlada dos efeitos térmicos dos passes e da relação de energia de soldagem de tal forma que ocorra então o auto-revenimento e o refino microestrutural na zona afetada pelo calor (ZAC).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo geral contribuir para o entendimento dos ciclos térmicos das juntas soldadas procurando avaliar o efeito da técnica da dupla camada para aplicação em uma chapa do aço ASTM A131 Grau AH36 em substituição ao tratamento térmico convencional empregando o processo de soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e comparando os mesmos sob a ótica do comportamento microestrutural e propriedades mecânicas.

A partir disto se buscará atingir os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver soldagem preliminar pelo processo de soldagem GMAW para escolha das energias de soldagem;
- Produzir soldagem em dupla camada pelo processo de soldagem GMAW com a energia previamente escolhida;
- Gerar soldagem para as juntas de topo penetração total chanfro em meio V pelo processo de soldagem GMAW sem TTPS, com TTPS e utilizando a técnica da dupla camada;
- Comparar a metalurgia das microestruturas resultantes sem TTPS, com TTPS e dupla camada;
- Verificar as propriedades mecânicas resultantes sem TTPS, com TTPS e dupla camada.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 SOLDAGEM DOS AÇOS MICROLIGADOS

2.1.1 Influência dos Parâmetros de Soldagem e do Aporte Térmico

Machado (1996) verificou a influência dos parâmetros de soldagem para solda *Metal Inert Gas/Metal Active Gas* (MIG/MAG). No seu trabalho foi destacado o ajuste dos parâmetros de tensão, corrente e velocidade de soldagem. Neste caso a intensidade de corrente tem influência sobre a taxa de fusão principalmente em altas correntes, já a tensão regula a largura do cordão e influencia o modo de transferência. A velocidade de soldagem exerce influência sobre a distorção da estrutura, largura da ZAC, refino de grãos do metal de solda e ainda sobre as dimensões do cordão.

Hu *et al.* (2013) analisaram os efeitos do aporte térmico na microestrutura e propriedades mecânicas na zona afetada pelo calor de grãos grosseiros (ZAC-GG) de um aço microligado. Os resultados indicaram que a dureza diminuiu com o aumento do aporte térmico (Tabela 1) e coincidiu com a do metal de base.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas encontradas de acordo com a simulação da energia de soldagem

Aporte Térmico (kJ/mm)	Dureza (HV)
1,75	302
2,48	245
4,29	231
6,07	222

Fonte: adaptado de Hu *et al.* (2013)

Marconi *et al.* (2015) avaliaram a influência do aporte térmico e do metal de adição na soldagem em passe simples e múltiplo de um aço microligado pelo processo *Flux-cored arc welding* (FCAW). No trabalho se observou um aumento no tamanho do grão na ZAC-GG acentuado pelo alto aporte térmico e uma diminuição de dureza na zona afetada pelo calor de grão fino (ZAC-GF). A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados e o tamanho de grão resultante para o processo estudado no seu artigo.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem e tamanho de grão

Amostra	Número de passes	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia de soldagem (kJ/mm)	ZAC-GG (µm)	ZAC-GF (µm)
1U	1	256	29,2	3,5	2,12	148	5,8
3U	3	170	25,2	4,6	0,95	48	4,3
1M	1	260	30,0	3,1	2,48	145	5,9
3M	3	170	25,2	4,7	0,93	60	4,1

Fonte: adaptado de Marconi *et al.* (2015)

Jorge *et al.* (2015) evidenciou em seu estudo com aço microligado semelhante ao utilizado neste trabalho que é possível realizar as soldagem com este tipo de aço em sistemas de ancoragem de plataformas de petróleo com aporte térmico de até 14 kJ/mm. O metal de solda foi a região da junta soldada que apresentou a menor tenacidade, devendo ser uma preocupação o desenvolvimento de consumíveis para esta aplicação. O aumento do aporte térmico e alteração do processo de soldagem permitiram ganhos significativos de produtividade, reduzindo o tempo de fabricação de estruturas de ancoragem em 50%.

O aço ASTM A131 Grau AH36, soldado com processo FCAW e *Submerged arc welding* (SAW) (simples e tandem) apresentou microdureza variando conforme o aporte térmico. Na ZAC-GG a soldagem SAW-tandem apresentou dureza maior que no mesmo processo com apenas um arame. O metal de solda para ambas as condições apresentou 63% de energia de impacto mais baixa do que nas regiões de grão refinado e no metal de base (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Cruz (2006) na soldagem de aços microligados verificou que o tipo de chanfro demonstrou ter efeito na dureza das amostras soldadas com a dupla camada. Com chanfro em semi V apresentou extensões maiores registrando dureza acima dos 220 HV, contudo, teve efeito diferenciado nas amostras da junta com chanfro em K, proporcionando durezas mais baixas junto na ZAC-GG. Na Figura 1 é apresentada uma macrografia das soldagens realizadas.

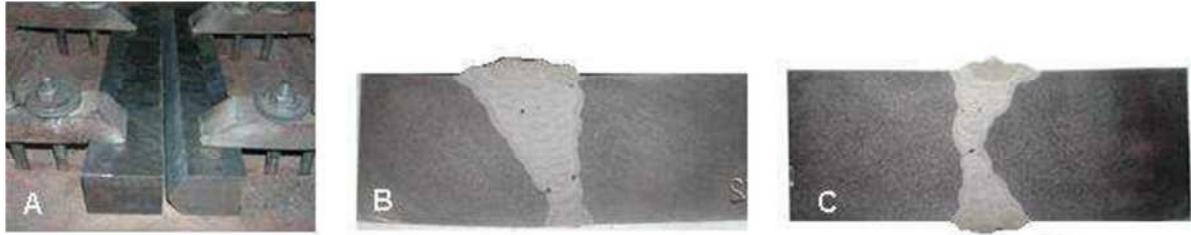


Figura 1 – Soldagem convencional: a) Preparação para a soldagem na bancada de soldagem. b) Macrografia da junta com chanfro em semi V. c) Macrografia da junta com chanfro em K.

Fonte: Cruz (2006)

Cruz (2006) na soldagem da técnica da dupla camada com aço microligado logrou êxito em substituição ao tratamento térmico convencional utilizando parâmetros de soldagem para o enchimento das juntas (Tabela 3) compatíveis com a especificação de procedimento de soldagem para o material utilizado ASTM A 516 Grau 60.

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem para o enchimento das juntas

Passes	Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
Raiz	2,5	100	23 a 27	12
2º Passe	2,5	100	23 a 27	12
Enchimento	3,25	120	23 a 27	16
Acabamento	3,25	120	23 a 27	25

Fonte: Cruz (2006)

2.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS PÓS-SOLDAGEM (TTPS)

Estudos a respeito de tratamentos térmicos pós-soldagem (reaquecimento e revenimento) investigaram as microestruturas, tenacidade e dureza de dois metais de soldagem com diferentes teores de Níquel (Ni). Os resultados indicaram que um alto teor de Ni diminuiu a temperatura de transformação da ferrita e aumentou a proporção de ferrita acicular (FA) além da formação de martensita/austenita (MA) após o reaquecimento. A formação de MA aumentou o número de partículas de cementita e acelerou sua formação durante o revenimento. A densidade do limite de grão de FA melhorou a tenacidade ao impacto, apesar do efeito negativo da cementita. O alto teor de Ni diminuiu o tamanho de grão aumentando assim a contribuição do refinamento (WU *et al.*, 2015).

Sisi e Mirsalehi (2015) analisaram as influências do tratamento térmico de normalização sobre propriedades microestruturais e mecânicas na soldagem do aço microligado X52. Com base nos resultados, a normalização de 800 a 1050 °C fez com que o tamanho do grão aumentasse; mas em virtude da conversão em microestrutura dúctil e da formação de fase de FA com aumento da temperatura de austenização ocorreu um aumento da tenacidade a fratura. No entanto, com normalização mais severa a resistência à tração, a tensão de escoamento e a dureza foram reduzidas. A 1050 °C, os carbonetos e/ou nitritos foram dissolvidos e ocorreu um excessivo crescimento de grãos. Assim, a temperatura máxima permitida para a normalização foi de 1000 °C.

Os aços fabricados por *thermo-mechanical controlled processing* (TMCP) não são indicados a serem tratados termicamente para normalização, para normalização seguida por revenimento, ou por têmpera e revenimento. Esses tratamentos térmicos poderão deteriorar as propriedades de tração e/ou tenacidade. Se o TTAT é requerido pelas normas de fabricação de equipamentos, ele deve ser realizado com o único propósito de relaxamento de tensões residuais e não para modificar as propriedades mecânicas como frequentemente se faz com os aços convencionais devido as temperaturas aplicadas (DE MEESTER, 1997).

Cozza *et al.* (2018) compararam a influência do tratamento térmico de alívio de tensões em um aço microligado. Os resultados encontrados verificaram que o tamanho de grão e a microestrutura do material não foram alterados significativamente após a aplicação do referido tratamento.

Lu *et al.* (2010) compararam a influência do tratamento térmico (Tabela 4) nas propriedades mecânicas de um aço microligado com e sem adição de Nióbio (Nb) na soldagem pelo processo GMAW. No metal com Nb verificou-se que com alívio de tensões houve melhora na resistência e diminuição do alongamento e da tenacidade ao impacto. Com o aumento da temperatura de normalização, a resistência aumentou, enquanto o alongamento e tenacidade ao impacto diminuíram. A alteração das propriedades mecânicas não foi alterada significadamente com aumento do tempo de espera.

Tabela 4 – Processos de tratamento térmico

Número	Tratamento Térmico
0	Amostra soldada sem nenhum tratamento
1	Recozimento com alívio de tensões a 590 °C por 3 horas
2	Normalização a 920 °C por 0,5 horas
3	Normalização a 920 °C por 2 horas
4	Normalização a 920 °C por 3,5 horas
5	Normalização a 920 °C por 5 horas
6	Normalização a 1020 °C por 2 horas
7	Normalização a 1120 °C por 2 horas
8	Normalização a 1200 °C por 2 horas

Fonte: adaptado de Lu *et al.* (2010)

Chen, Chen e Yang (2014) avaliaram a influência de elementos de liga e o tratamento térmico na morfologia da precipitação dos aços Ti-Nb e Ti-Nb-Mo. Os respectivos carbeto precipitaram em grãos de ferrita poligonal quando os aços Ti-Nb-Mo e Ti-Nb foram tratados isotermicamente a 650 °C durante 3 min e 180 min (Figura 2). A dureza inicial do grão de ferrita no aço Ti-Nb-Mo foi ligeiramente maior do que no aço Ti-Nb devido à adição de mais elementos de liga. Por outro lado, a dureza diminuiu à medida que aumentaram os tempos de retenção isotérmica (de 250 HV a 235 HV para Ti-Nb-Mo e de 220 HV para 185 HV para Ti-Nb). A diminuição da microdureza foi um resultado esperado devido ao aumento do tamanho dos precipitados de carboneto na matriz ferrítica.

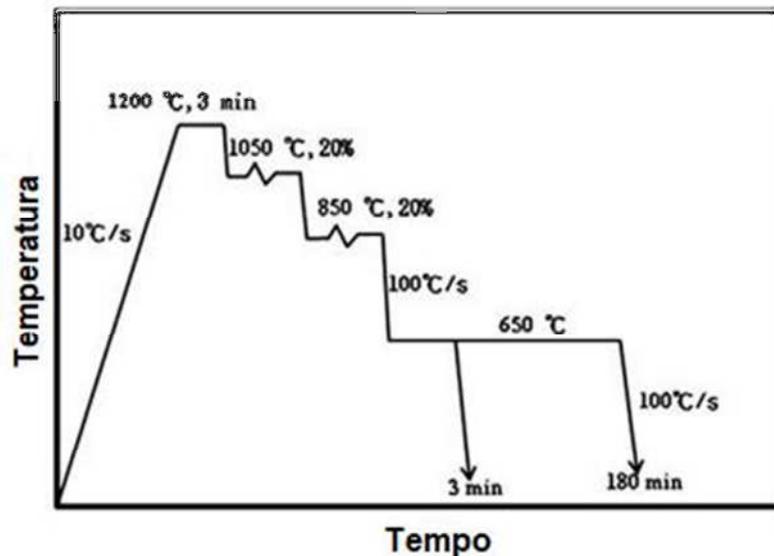


Figura 2 – Diagrama esquemático do tratamento térmico com austenitização a 1200 °C, 20% de deformação na fase austenita a 1050 °C e 850 °C, isoterma a 650 °C a 3 min e 180 min

Fonte: adaptado de Chen, Chen e Yang (2014)

Tsay *et al.* (1999) trabalharam com um aço TMCP, com carbono equivalente (C_{eq}) de 0,38, e relatam que, o Tratamento Térmico para Alívio de Tensões (TTAT) (600 °C/2 h) não melhorou significativamente a microdureza e a tenacidade na ZAC e no metal de base, e que esses resultados são consistentes com as observações metalográficas que demonstraram que a microestrutura não foi significativamente alterada.

Conforme Lima (2011) apontou em seu trabalho o TTAT não afetou significativamente a tenacidade da ZAC e do metal de base. O TTAT reduziu ligeiramente as microdurezas do metal de base provavelmente devido ao fato do mesmo não ter promovido variações significativas em termos de tipo, volume, forma e distribuição de fases e tamanho de grão e existência de precipitados grosseiros na microestrutura.

Por outro lado, Araújo *et al.* (2015) estudaram a influência do tratamento térmico (600 °C por 1 h) a soldagem dos aços *American Petroleum Institute* (API) 5L, com características de composição química e microconstituintes semelhantes ao um aço microligado com resultados que mostraram aumento na tenacidade ao impacto na ZAC e diminuição no limite de resistência mecânica especificado, porém o mesmo manteve-se no mínimo exigido pelo grau do respectivo aço.

O TTPS com a finalidade de promover o alívio de tensões e redução na dureza da ZAC, fator crítico no que diz respeito a corrosão sob tensão (CST) para o aço ASTM A516 Grau 60, demonstrou ser, extremamente eficiente no que diz respeito a redução das tensões trativas e compressivas residuais, ao longo da junta, para os dois diferentes tipos chanfros. Fato devido principalmente a relaxação do material pela redução da sua tensão de escoamento no tempo de permanência na temperatura de tratamento térmico (610 °C por 1,5 h) (CRUZ, 2006).

2.3 TÉCNICA DA DUPLA CAMADA

A técnica da dupla camada consiste em promover uma adequada sobreposição dos ciclos térmicos, de tal forma que a segunda camada promova o refino e o revenimento da ZAC-GG da primeira. As energias de soldagem selecionadas são escolhidas em função das propriedades finais das regiões da solda, obtidas por ensaios preliminares. O sucesso desta técnica se deve a um fator de extrema relevância que é a adequação entre as energias de soldagem do primeiro e do segundo passe, bem como o controle da temperatura inicial e de interpasses (CRUZ, 2006 e BRITO, 2014).

Lant *et al.* (2001) recomendam a observação de alguns parâmetros para que a técnica seja bem sucedida, sendo eles a altura média da primeira camada, a profundidade da região de grãos com menor refino e a profundidade refinada pela segunda camada (Figura 3). Melhores resultados são alcançados com mínimo aporte de calor na primeira camada e percentual de sobreposição de 30 a 50 %. Com 50 % de sobreposição pode-se obter refino de até 80 % na ZAC-GG.

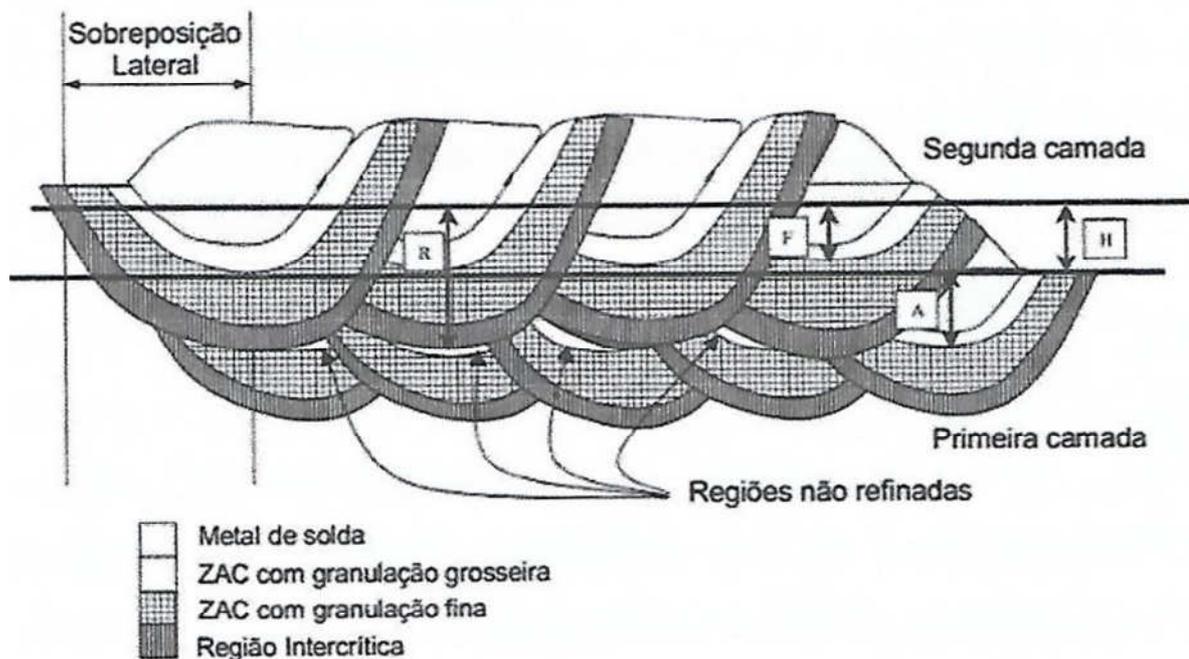


Figura 3 - Esquema de aplicação da técnica da dupla camada. F – penetração da segunda camada, A – penetração da primeira camada, H – altura média da primeira camada, R – profundidade refinada pela segunda camada

Fonte: adaptado de Lant *et al.* (2001)

O tratamento térmico, muitas vezes, torna-se impraticável devido a fatores como tamanho da peça, reparo e no campo e custo. A técnica da dupla camada tem sido pesquisada com intuito de evitar este tratamento térmico e garantir boas propriedades mecânicas da peça soldada. Os resultados deste trabalho mostraram que o grau de refino da ZAC-GG foi satisfatório e os melhores resultados foram obtidos com baixos aportes de energia na primeira camada, onde as relações de energia de 1/1 e 1/2 entre as camadas foram utilizadas; uma vez que o uso de uma elevada energia na deposição da primeira camada promoveria um maior crescimento de grão, o que por sua vez, implicaria em dificuldade de refino pela segunda camada prejudicando a tenacidade da mesma (FARIAS e AGUIAR, 2003).

Bueno (1999) já citava em seu trabalho que a técnica de deposição controlada de dupla camada necessitava da rigorosa atenção nos parâmetros de dimensões do cordão da primeira camada, relação adequada de energias de soldagem e controle das temperaturas de preaquecimento e interpasse para obtenção do sucesso desta técnica.

A técnica da dupla camada se mostrou eficaz na melhora das propriedades da microestrutura da ZAC-GG e refino de grão na soldagem de revestimento da liga de Níquel Inconel 625 no aço estrutural ASTM A387 Grau 11 pelo processo de soldagem MIG/MAG. Houve também redução nas medidas de dureza e ficou comprovado que quanto maior a energia da primeira camada maior a tendência de reprovação nos diagramas de decisão dos critérios de microdureza e microestrutura, pois maior será a zona dura ou a ZAC-GG (CAVALCANTE *et al.*, 2016).

Aloraier *et al.* (2014) compararam os efeitos do TTPS e da camada de revenimento sobre dureza, microestrutura e tensões residuais na soldagem multicamada. Verificou-se que o TTPS apresentou dureza mais baixa, porém com valores em ambas as técnicas aceitáveis. A análise microscópica mostrou que a técnica da camada foi mais efetiva no revenimento ZAC, bem como o tamanho do grão diminuiu ligeiramente na linha de fusão, apesar da maior temperatura.

Ling *et al.* (2015) investigaram o perfil de solda, microdureza e microestrutura de um aço *Japanese Industrial Standards* (JIS) SS400 pelo processo FCAW. Eles examinaram os efeitos da soldagem realizada com dois diferentes processos de soldagem: 4 Camadas 4 Passes (4L4P) e 4 Camadas 10 Passes (4L10P). O processo 4L4P melhorou foi mais efetivo no revenimento da ZAC, porém produziu uma dureza mais baixa do que o processo 4L10P.

Oliveira (2013) e Brito (2014) buscaram avaliar a influência da técnica da dupla camada nas propriedades dos componentes soldados. De acordo com resultados, controlando adequadamente os parâmetros de soldagem, a própria energia do segundo passe é capaz de revenir e refinar a ZAC-GG do primeiro. Sabe-se desses estudos que baixos aportes de energia na primeira camada mostram-se, em geral, satisfatórios, uma vez que uma elevada energia de soldagem na primeira camada poderia acarretar crescimento de grão ocasionando em dificuldade de refino pela segunda camada.

Cruz (2006) não encontrou indícios de que a aplicação da técnica da dupla camada pudesse ter alguma influência sobre as tensões residuais geradas, enquanto, Oliveira *et al.* (2010) encontrou que a técnica da dupla camada adicionou tensões residuais compressivas em amostras de aço estrutural ASTM A516 Grau 50 soldadas com multipasse. Estes resultados apontam a técnica como uma boa opção para o controle macroestrutural e microestrutural de uma junta soldada, uma vez que a mesma atuaria de forma benéfica em duas das três condições mostradas anteriormente e necessárias para que ocorra fragilização por hidrogênio.

Na soldagem MIG/MAG dos aços CrMo e CrMoV utilizando a técnica da dupla camada apresentou um revenimento satisfatório da ZAC e um elevado grau de refinamento dos grãos. A dupla camada mostrou-se bastante eficaz na soldagem dos materiais envolvido, proporcionando ZAC com regiões menos endurecidas e sem crescimento exagerado de grãos e não induziu a formação de zona dura localizada na interface das soldagens dissimilares submetidas ao TTPS (PINHEIRO, 2017).

2.1.2 Critérios para Aplicação da Técnica da Dupla Camada

Os testes preliminares, com soldagem por simples deposição, foram avaliados pela combinação dos critérios de dureza e de microestrutura com a representação gráfica em Diagramas de Decisão (Figura 4). Esses critérios têm como objetivo conhecer a extensão de zonas duras e macias na ZAC, com base no critério de dureza, e de extensão de ZAC-GG e ZAC-GF com base no critério de microestrutura. Como consequência da aplicação desses critérios, tem-se a definição das melhores combinações de parâmetros de soldagem na primeira e na segunda camada para as quais se têm os melhores resultados de dureza e microestrutura (ANDRADE, 2016).

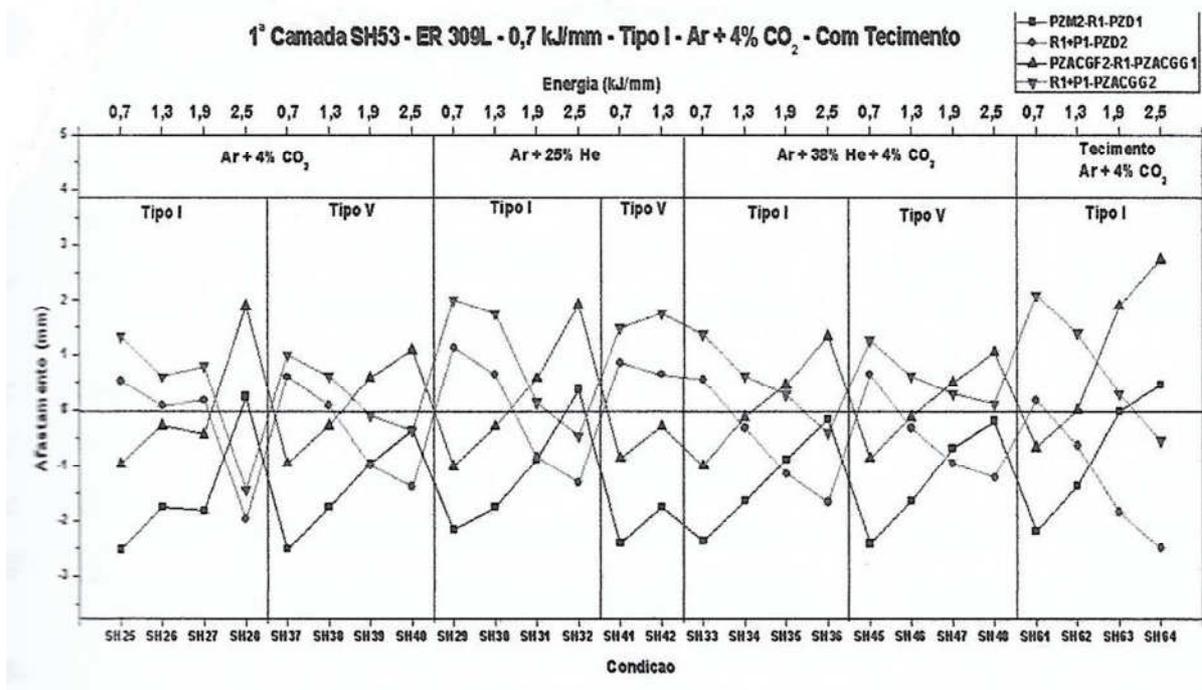


Figura 4 – Diagrama de decisão

Fonte: Andrade (2016)

Cruz (2006) encontrou (através dos diagramas de decisão) a melhor relação de energia em 6/10 kJ/cm. Embora, possa afirmar-se que a primeira camada deve ser aplicada com uma energia baixa, na faixa dos 6 kJ/cm, a segunda camada poderá ser realizada com uma faixa maior (6, 10 ou 14 kJ/cm). Este fato possibilita a aplicação da dupla camada em campo, devido a dificuldade de se manter a energia de soldagem controlada no processo de soldagem manual.

Cavalcante *et al.* (2016) analisaram através dos diagramas de decisão a melhor relação de energia fornecendo uma análise concisa e bastante útil. Ficou claro para o autor que quanto maior a energia da primeira camada, maior a tendência de afastamentos negativos e consequentemente reprovação nos critérios, pois maior será a zona dura e a ZAC-GG. As relações de energia apontadas nos diagramas e selecionadas para a soldagem proporcionaram a obtenção de microestruturas com significativa redução de valores de dureza e microdureza da ZAC-GG em comparação as regiões onde não houve atuação da técnica da dupla camada.

2.2 COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL

Sob a condição de deformação de austenita, os aços TMCP tem um grande número de pequenos grãos de ferrita quase-poligonal. A medida que a taxa de resfriamento aumenta a mudança na microestrutura com formação de ferrita acicular ao invés de bainita e ripas de martensita (LAN *et al.*, 2017).

Hu *et al.* (2013) analisaram os efeitos do aporte térmico na microestrutura e propriedades mecânicas na zona afetada pelo calor de grãos grosseiros (ZAC-GG) de um aço microligado. Os resultados indicaram o aporte térmico moderado foi considerado o ideal com microestrutura formada por ferrita poligonal fina, bainita granular e ferrita acicular com precipitados de carbonitreto de Vanádio.

Na Figura 5 é apresentada a estrutura típica do metal de base com presença ferrita e perlita (b) e com fenômeno de bandeamento devido ao processo de fabricação do material (a).

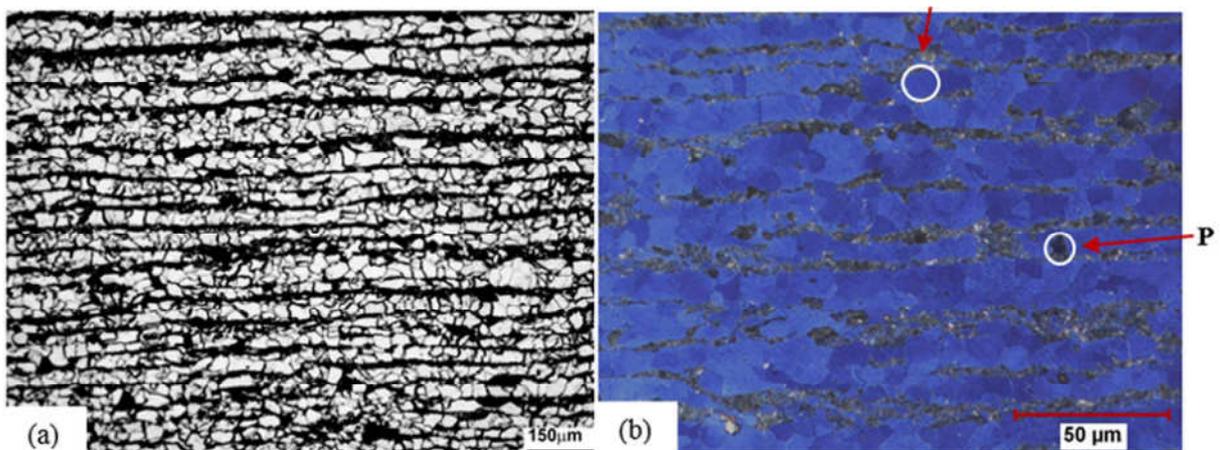


Figura 5 – Microestrutura do metal de base. Reagente Nital 2 %; b) Reagente *Klemm*

Fonte: Ribeiro *et al.* (2016)

Na Figura 6 é verificada a estrutura da zona afetada pelo calor – grão grosso com seus principais constituintes (ferrita com presença de carbonetos, ferrita poligonal, ferrita de segunda fase alinhada e ferrita de *Widmstätten* e ainda presença de martensita/austenita residual).

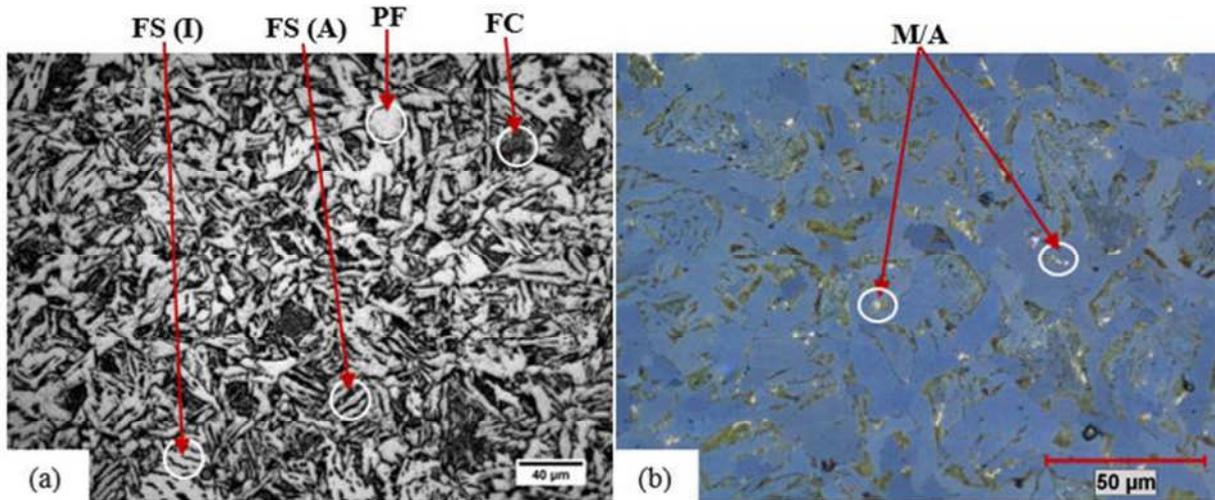


Figura 6 – Caracterização microestrutural óptica da ZAC-GG. a) Reagente Nital 2 %; b) Reagente *Klemm*

Fonte: Ribeiro *et al.* (2016)

Cozza *et al.* (2018) compararam a influência do tratamento térmico de alívio de tensões em um aço microligado. Os resultados encontrados (Figura 7) verificaram que o tamanho de grão não foi alterado significativamente após a aplicação do referido tratamento.

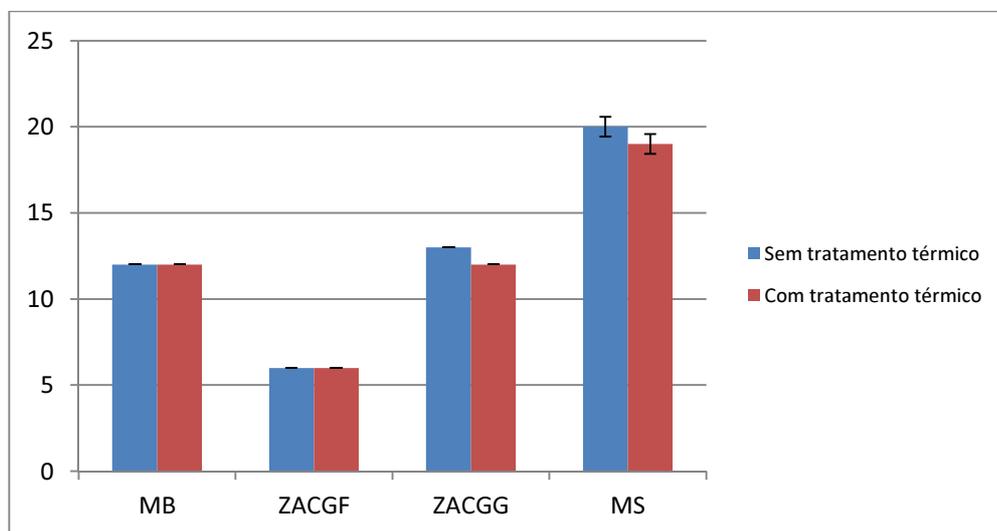


Figura 7 – Comparação do tamanho de grão entre as regiões da solda, antes e após o tratamento térmico

Fonte: Cozza *et al.* (2018)

Azevedo (2002) verificou a melhor relação de energias (5/10/10 kJ/cm) para um aço baixo carbono comum, onde foi observado um elevado grau de refino na ZAC-GG, não sendo observada a presença de grãos pouco refinados na região entre passes. Observando a Figura 8, onde a dureza se manteve abaixo de 250 HV, percebe-se que o ciclo térmico da segunda camada refinou o a ZAC-GG da primeira camada e a terceira camada realizou o revenimento.

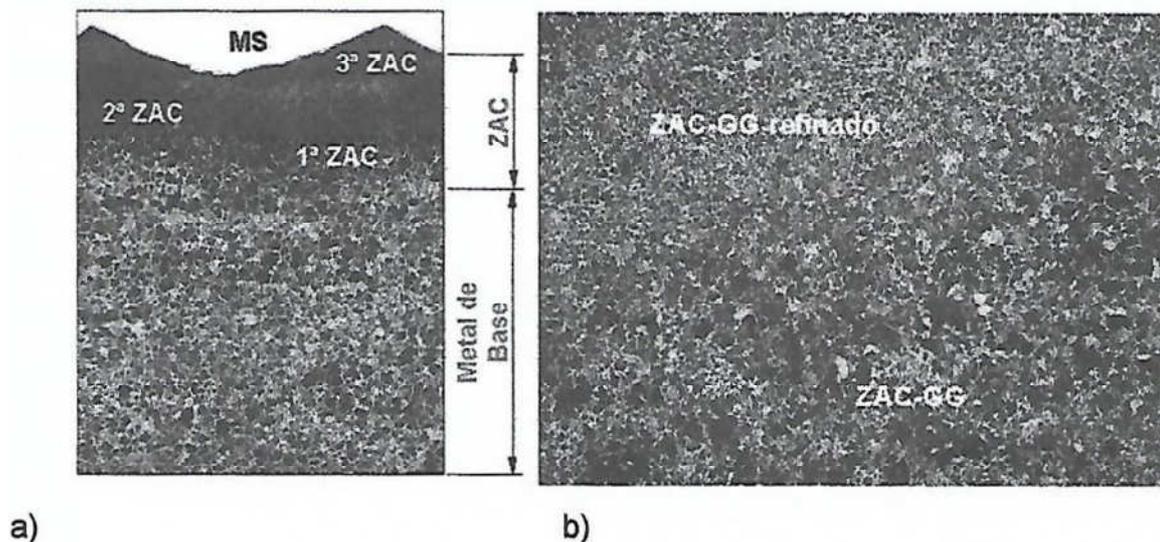


Figura 8 – Corpo de prova dupla camada AVT 5/10/10. a) Regiões do corpo de prova, 13 X; b) Região ampliada. ZAC-GG pouco refinada, 100 X. Ataque: nital 2 %

Fonte: Azevedo (2002)

Cruz (2006) verificou que a técnica da dupla camada foi eficaz na melhoria a dupla camada promoveu modificação microestrutural na zona afetada pelo calor da primeira camada, estabelecendo estruturas mais macias, que proporcionaram maior ductilidade nesta região em comparação a soldagem convencional sem TTPS. As amostras de referência apresentaram predominância de microestrutura grosseira na região da ZAC junto a LF, com martensita e bainita. Também é possível perceber áreas com algum refinamento, correspondentes a sobreposição de passes laterais durante o enchimento. Prevalece a martensita, de caráter não revenido o que, de certa forma, explica a elevada dureza previamente registrada nessas regiões.

A aplicação da técnica da dupla camada para o aço AISI 4140 obteve microestruturas avaliadas por microscopia eletrônica de varredura. Para a relação de energia de 5/5 kJ/cm, há formação de grãos de bainita juntamente com a presença de placas de martensita temperadas (Figura 9 a e b). Na região de refino de grãos, há uma presença de martensita e grãos de ferrita com carbonetos. Para a relação 15/5 kJ/cm entre o primeiro e a segunda camada sem TTPS, há um ineficiente refinação de grãos. Na Figura 9 (c), as bandas escuras (faixas brilhantes) são constituídas por uma mistura de bainita e martensita. Analisando o interior da martensita blocos nas faixas brilhantes (escuro) em detalhe agulhas de bainita inferior (Figura 9 d) podem ser vistas (SILVA *et al.*, 2009).

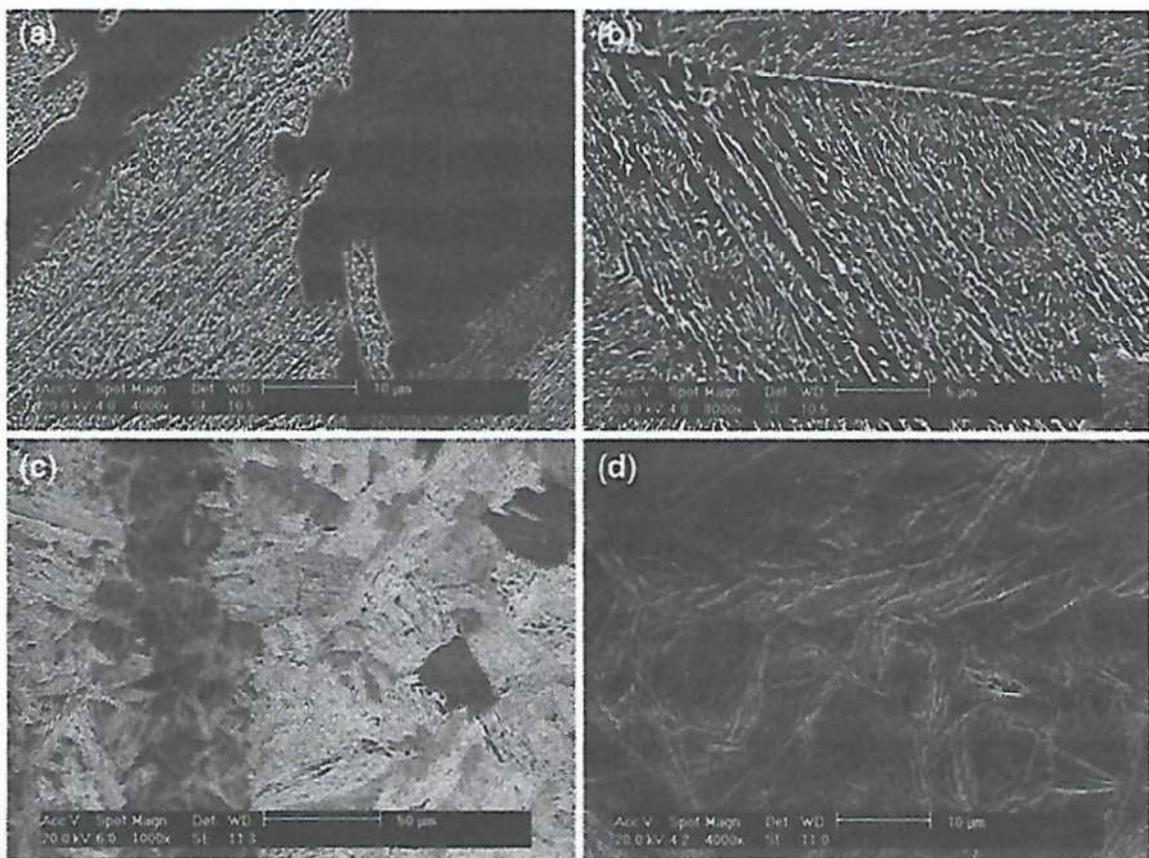


Figura 9 – Microscopia das regiões da ZAC: a, b) amostra soldada com 5/5 kJ/cm com TTPS c, d) amostra soldada com 15/5 com TTPS

Fonte: Silva *et al.* (2009)

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS APLICADAS A TÉCNICA DA DUPLA CAMADA

2.3.1 Dureza

A análise da ZAC por meio de ensaios de dureza é de suma importância para avaliação das propriedades em nível macroestrutural e, assim, analisar a relação resistência/fragilidade da ZAC como um todo, além disso, esse ensaio se faz necessário para verificação do procedimento de soldagem empregando às principais normas vigentes, uma vez que a dureza é um dos principais critérios (BRITO, 2014).

Niño, Buschinelli e Ribeiro (2003) citam que a dureza deve ser mantida em um patamar abaixo dos 248 HV para aços ao carbono e suas regiões soldadas que estiverem em contato direto com o ambiente de serviço em uma pressão parcial de 435 MPa, para que a estrutura apresente resistência a corrosão sob tensão (CST) tratativas em ambiente contendo ácido sulfídrico (H₂S).

A eficiência da técnica de deposição de duas camadas para o aço *American and Iron Steels Institute* (AISI) 4140 obteve o valor de dureza da ZAC sem TTPS reduzido para valores inferiores a 300 HV e semelhantes às amostras de teste submetidas ao tratamento térmico. Nas regiões entre passes e as extremidades da junta, havia regiões com granulação grosseira, mas sem altos níveis de dureza (SILVA *et al.*, 2009).

Na aplicação de revestimentos de aço AISI 317L em substratos de aço ASTM A516 Grau 60, com GMAW constatou-se que para uma energia de soldagem de 11,70 kJ/cm, 32,53 % das impressões na interface revestimento/substrato apresentaram valores de dureza acima de 250 HV. Já para o valor de 15,30 kJ/cm este percentual subiu para 74,07 %. Entretanto, apesar destas reduções, ainda ocorreram pontos de dureza acima de 300 HV para ambos os níveis de energia de soldagem devido ao fato das zonas parcialmente diluídas, que contêm microestruturas frágeis e susceptíveis a ataques corrosivos, não terem sido eliminadas completamente (SILVA *et al.*, 2010).

Para o aço AISI 8630M, foi observado pico de dureza no valor máximo de 564 HV, enquanto que para o aço ASTM A182 F22, o valor máximo foi de 416 HV, ambos próximos a linha de fusão na ZAC. Nota-se que, mesmo usando pré-

aquecimento (de 230 a 280 °C), o aumento na dureza do material, em função dos ciclos térmicos da soldagem, foi considerável. (BRITO, 2014).

Andrade (2016) encontrou para o aço 2,25Cr-1Mo a dureza a 0,5 mm de distância da interface com a zona fundida (ZF) valores próximos a 250 HV, condição aprovada por norma. Para o material com adição de vanádio, apesar da microestrutura mais refinada a dureza chegou a valores próximos de 280 HV.

O tipo de chanfro demonstrou ter efeito na dureza das amostras soldadas com a dupla camada. Com chanfro em semi V apresentou extensões maiores registrando dureza acima dos 220 HV, contudo, teve efeito diferenciado nas amostras da junta com chanfro em K, proporcionando durezas mais baixas junto na ZAC-GG (CRUZ, 2006).

Aloraier, Ibrahim e Ghojel (2004) demonstraram em seu trabalho utilizando a soldagem com FCAW em dupla camada que ocorreu uma melhora na microestrutura, diminuição da dureza e do tamanho da ZAC em 15 % após a deposição da segunda camada.

Considerando os resultados dos perfis das amostras de referência, das amostras com TTPS e das amostras soldadas com a técnica da dupla camada, foi observada uma pequena redução sobre a dureza do material na ZAC, a partir da linha de fusão da primeira camada para as amostras soldadas com a técnica da dupla camada, quando comparadas as amostras da junta de referência, mas superiores aos valores obtidos nas amostras com TTPS. Observa-se que o tipo de chanfro tem efeito significativo sobre a dureza na ZAC, e este fato vem demonstrar que a energia de soldagem da segunda camada sobre a primeira, atua sobre a ZAC-GG (CRUZ, 2006).

2.3.2 Microdureza

Uma análise da microdureza em uma escala microscópica se torna interessante para identificar de forma mais criteriosa os efeitos do tipo de aço e do procedimento de soldagem utilizados nesse trabalho, principalmente quando se há um estudo relacionado a interface dissimilar (BRITO, 2014).

Na análise de microdureza, fatores como bandeamento ficam mais evidenciados, devido as impressões serem mais localizadas e sensíveis as diferenças de microestruturas. Além desse comportamento, pode-se observar que os pontos mais críticos da ZAC estão localizados nas regiões entre passes, onde são encontrados os maiores valores de microdureza próximo a interface. Esse efeito pode estar associado a dificuldade de uma eficiente sobreposição dos ciclos térmicos nessas regiões. O efeito do bandeamento no aço AISI 8630M torna-se evidente. Na região com perfil no centro do passe, com maior bandeamento, é observado um pico de microdureza de 360 HV, enquanto que para junta de menor bandeamento a ZAC não atinge 320 HV (BRITO, 2014).

Embora não tenha sido uma variação significativa, o valor médio da microdureza da ZAC para energia de soldagem de 11,70 kJ/cm foi 6 HV maior que a microdureza média da ZAC para 15,30 kJ/cm. Apesar de a energia menor resultar em taxas de resfriamento mais altas e, conseqüentemente, uma microdureza mais elevada na ZAC de aços ferríticos, neste trabalho, quando se reduziu a energia de soldagem de 15,30 kJ/cm para 11,70 kJ/cm não foram observadas variações significativas de microdureza na ZAC (SILVA et al., 2010).

Aloraier, Ibrahim e Thomson (2006) estudaram em seu trabalho utilizando a soldagem com FCAW em dupla camada o quanto a taxa da sobreposição entre a primeira e a segunda camada pode variar em relação a microdureza (Figura 10). Os resultados mostram que os valores de dureza mais baixos foram obtidos com 50 a 70 % de sobreposição foi utilizado.

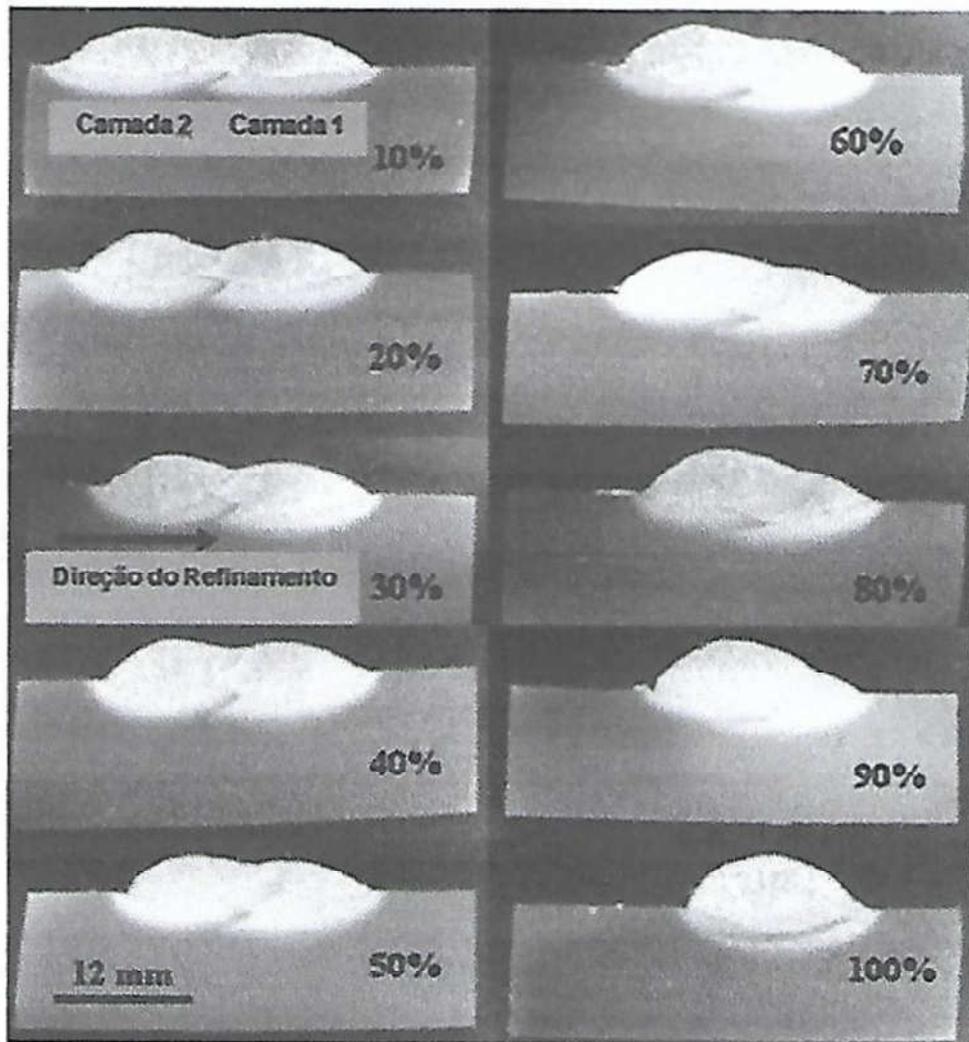


Figura 10 – Macrografia de diferentes porcentagens de camadas de sobreposição

Fonte: adaptado de Aloraier, Ibrahim e Thomson (2006)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1 Metal de Base

O metal de base utilizado neste trabalho foi o aço ASTM A131 Grau AH36, fornecido sob a forma de chapa laminada de 750 x 1300 x 12,5 (mm). Este material tem, sob esta forma, grande aplicação como material estrutural para a indústria petrolífera, sendo intensamente utilizado nas estruturas que compõe os cascos de plataformas de extração e processamento de petróleo.

3.1.2 Metal de Adição

O critério para a seleção dos metais de adição é baseado no catálogo do fabricante para aços de baixo e médio teor de carbono e na semelhança de composição química com o metal de base. Com isso foram escolhidos dois tipos de eletrodos conforme designação a seguir:

- Processo Eletrodo revestido: *American Welding Society* (AWS) E7018 de 2,5 mm de diâmetro para raiz e 3,25 mm para enchimento e acabamento;
- Processo MIG/MAG: AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro.

A fim de obter o controle das variáveis de soldagem o que pode ser considerado crucial nesta pesquisa optou-se por escolher o processo de soldagem MAG.

3.1.3 Gases de Proteção

Para o estudo desenvolvido neste trabalho foi utilizado gás de proteção com a proporção conforme definido pelo fabricante para a vareta ER 70S-6:

- a) 100 % CO₂

3.1.4 Equipamentos

Como suporte as atividades desenvolvidas durante o trabalho de pesquisa, foram utilizados diferentes equipamentos, listados a seguir:

- Mesa de corte para plasma e oxicorte;
- Dispositivo para deslocamento retilíneo de corte para plasma e oxicorte;
- Fonte de Plasma - Hypertherm Powermax 1650;
- Fonte controlada de soldagem;
- Dispositivo para deslocamento retilíneo de soldagem;
- Sistema de aquisição de dados;
- Fornos elétricos a resistência;
- Usinagem dos corpos de prova: plaina limadora, fresadora e serra alternativa;
- Preparação metalográfica: cortadeira metalográfica, lixadeira metalográfica e politriz metalográfica;
- Caracterização metalúrgica: microscópio ótico de luz refletida com sistema de análise de imagens - Olympus GX 51S e espectrômetro de emissão óptica para análise de ligas Oxford Foundry Master-Pro;
- Caracterização de propriedades mecânicas: microdurômetro Vickers Shimadzu HMV 2T;
- Outros: Microcomputador e ferramentas manuais diversas.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho pode ser visualizada com o auxílio do fluxograma constante na Figura 11.

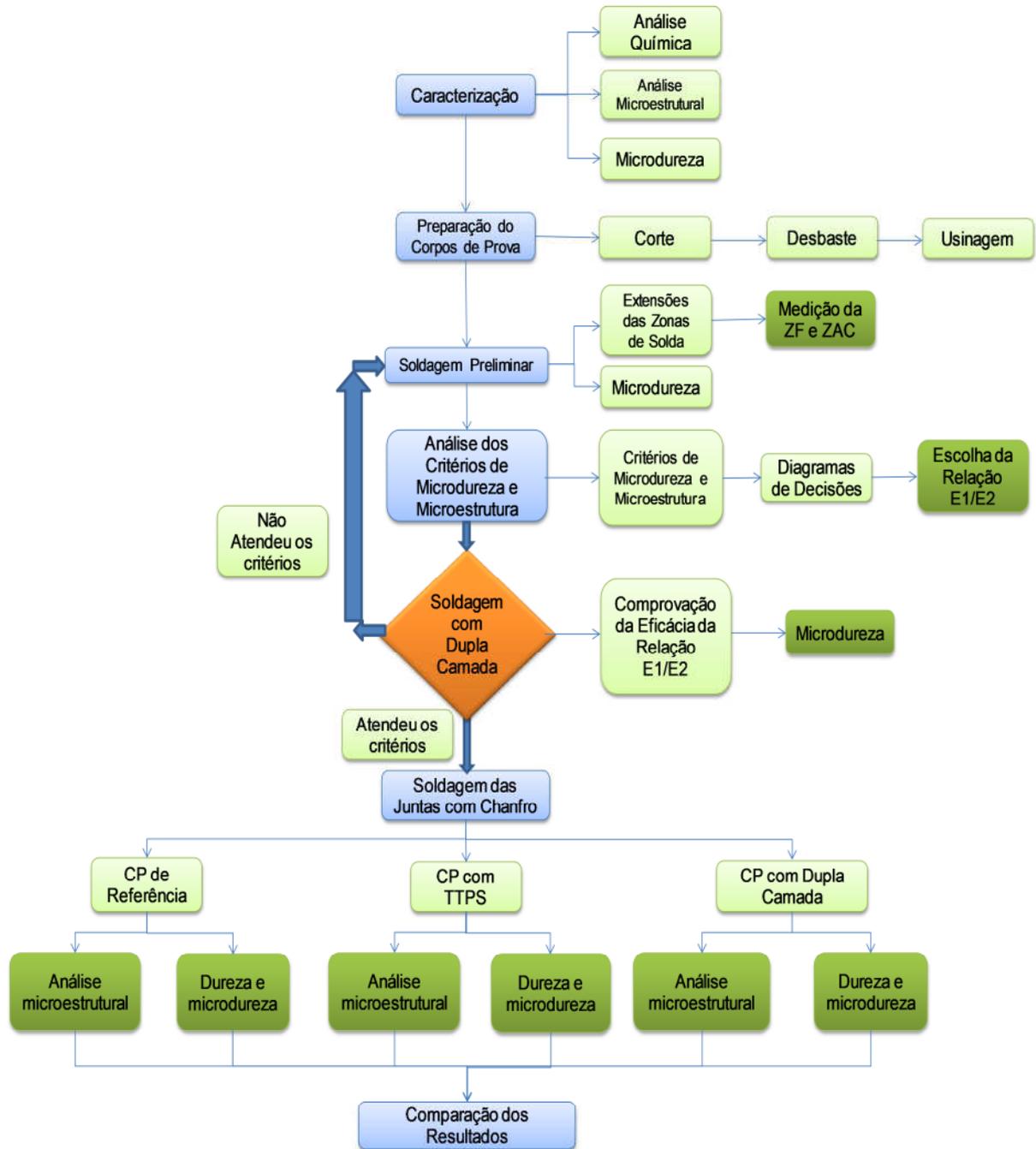


Figura 11 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho

Fonte: Autoria própria

A seguir serão detalhadas as etapas presente na metodologia deste trabalho.

3.2.1 Caracterização do Metal de Base

Nesta etapa objetivou-se caracterizar o metal de base (como recebido) para comprovar as reais condições do material. Assim, amostras foram cortadas e submetidas à preparação metalográfica para caracterização microestrutural através do microscópio ótico de luz refletida com sistema de análise de imagens e medição de composição química com espectrômetro ótico. Também foram realizados ensaios de microdureza com um microdurômetro Vickers.

3.2.2 Preparação dos Corpos de Prova

A preparação (corte e usinagens dos corpos de prova) para confecção do chanfro em meio V realizou-se nas instalações do Laboratório de Usinagem da Escola e Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Os corpos de prova (CP) cortados e usinados foram então confeccionados segundo as características geométricas descritas a seguir:

- Caracterização do metal de base: 1 CP de 150 x 80 x 12,5 (mm);
- Soldagem preliminar: 4 CPs de 150 x 80 x 12,5 (mm);
- Soldagem da dupla camada: 1 CP de 200 x 80 x 12,5 (mm);
- Soldagem das juntas chanfradas: 6 CPs de 200 x 80 x 12,5 (mm).

3.2.3 Soldagem Preliminar

Nesta etapa foi produzido um cordão de solda com deposição sobre a chapa em cada CP na posição plana conforme a Figura 12.

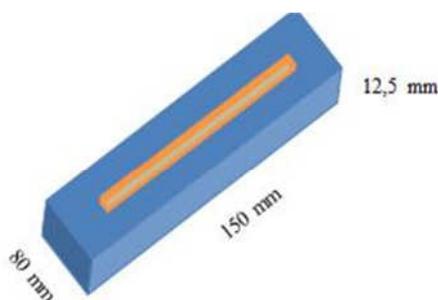


Figura 12 – Representação esquemática dos corpos de prova – soldagem preliminar

Fonte: Autoria própria

O objetivo da aplicação desta técnica é encontrar uma relação entre as energias da primeira e segunda camada. Neste quesito foram testados quatro níveis de energias de soldagem utilizando a variação da velocidade de soldagem como parâmetro variável no cálculo das energias.

A fim de parametrizar os valores de corrente e tensão médios foi necessário regular a fonte de soldagem semiautomática com velocidade de alimentação de 4 m/min e tensão de 25 V. Foi utilizada uma chapa-teste semelhante a Figura 12 e conectado com um sistema de aquisição de dados com frequência de 2000 Hz.

A Tabela 5 apresenta os valores de tensão e corrente encontrados, as velocidades de soldagem reguladas e as energias de soldagem calculadas.

Tabela 5 - Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem preliminar

Corpo de Prova	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Energia de Soldagem (kJ/cm)
1	24,3	125	39,6	5
2	25,0	124	21,6	9
3	24,4	128	13,2	14
4	24,2	126	10,7	17

Fonte: Autoria própria

A energia de soldagem constante da Tabela 5 pode ser calculada pela equação 1:

$$E_{sol} = \frac{U \cdot I}{V_{sol}} \quad (1)$$

onde:

E_{sol} - energia de soldagem [J/cm]

U – tensão [V]

I - corrente [A]

V_{sol} - velocidade de soldagem [cm/min]

Os corpos de prova foram soldados com diâmetro do eletrodo de 1,2 mm, distância bico de contato-peça (DBCP) padrão de 12 mm e vazão de CO₂ de 16 l/min.

Após a soldagem cada corpo de prova forneceu material para as medidas de microdureza conforme apresentado na Figura 13 (a). As medições de microdureza foram realizadas conforme as direções apresentadas na Figura 13 (b). Os ensaios percorreram transversalmente as regiões da solda, desde a ZF até o metal de base, com um afastamento de 0,2 mm para uma carga de 100 g aplicada durante 10 segundos. Os valores de microdureza média foram empregados para avaliar os tamanhos da zona endurecida (ZE), zona não endurecida (ZNE).

Para as medições da ZAC-GG, ZAC-GF, reforço (R) e penetração (P) foi utilizado um microscópio óptico e realizada análise macrográfica das amostras de cada energia de soldagem e posterior medições com auxílio do aplicativo *Image J*.



Figura 13 – Retirada das amostras: a) Transversal ao corpo de prova; b) Detalhe das amostras com as linhas de direção para medição de microdureza

Fonte: Autoria própria

3.2.4 Critérios de Análise para os Diagramas de Decisão

Os perfis das zonas de microdureza (R, P, ZE e ZNE) bem como os perfis das regiões microestruturais (R, P, ZAC-GG e ZAC-GF) serviram de parâmetro para construção dos diagramas e submetidos aos critérios representados nas Equações 2 a 12 a seguir:

Critério da Microdureza

$$PZNE_2 > PZE_1 \quad (2)$$

$$R_1 + P_1 > PZE_2 \quad (3)$$

onde:

$PZNE_2$ - profundidade da zona não endurecida da segunda camada e pode ser calculada pela equação 4:

$$PZNE_2 = P_2 + ZE_2 + ZNE_2 \quad (4)$$

PZE_1 - profundidade da zona endurecida da 1ª camada e é calculada com auxílio da equação 5:

$$PZE_1 = R_1 + P_1 + ZE_1 \quad (5)$$

PZE_2 - profundidade da zona endurecida da 2ª camada calculada através da equação 6:

$$PZE_2 = P_2 + ZE_2 \quad (6)$$

R_1 - altura do reforço da primeira camada;

P_1 - profundidade de penetração da primeira camada.

Critério da Microestrutura

$$PZAC - GF_2 > PZAC - GG_1 \quad (7)$$

$$ZF_1 > PZAC - GG_2 \quad (8)$$

onde:

$PZAC-GF_2$ - profundidade da zona afetada pelo calor com granulação fina da segunda camada e pode ser calculada pela equação 9:

$$PZAC-GF_2 = P_2 + ZAC - GG_2 + ZAC - GF_2 \quad (9)$$

PZAC-GG₁ - profundidade da zona afetada pelo calor da granulação grosseira da 1ª camada e é calculada com auxílio da equação 10:

$$PZAC - GG_1 = P_1 + ZAC - GG_1 \quad (10)$$

PZAC-GG₂ - profundidade da zona afetada pelo calor da granulação grosseira da 2ª camada e calculada pela equação 11:

$$PZAC - GG_2 = P_2 + ZAC - GG_2 \quad (11)$$

ZF₁ - zona fundida da primeira camada, calculada pela equação 12:

$$ZF_1 = R_1 + P_1 \quad (12)$$

Depois de atendidos os critérios (equações 2, 3, 7 e 8) conjuntamente com todos os pontos positivos no diagrama de decisões fica estabelecida a relação de energias de soldagem que será aplicada na técnica da dupla camada.

A definição da relação entre as energias da primeira e da segunda camada, obedecendo aos critérios de microdureza e de microestrutura, foi realizada com o auxílio dos diagramas de decisão. Os afastamentos positivos (valores maiores que zero) indicam que o critério foi satisfeito, desde que todos os pontos para um mesmo critério e relação de energias estejam localizadas nos afastamentos positivos.

3.2.5 Soldagem com Dupla Camada

O ensaio da relação de energias consistiu em aplicar cordões (soldagem semiautomática) sobre uma chapa com a técnica da dupla camada, utilizando os parâmetros da Tabela 5 e verificar se o nível de revenimento atingido pela dupla camada está de acordo com os valores pré-estabelecidos de microdureza conforme a relação de energias estabelecida na soldagem preliminar. Para isso foram então depositados sete passes na primeira camada e três passes na segunda com uma sobreposição aproximada de 50% para ambas conforme definido por Lant *et al.* (2001).

Após a soldagem, três amostras foram retiradas transversalmente a linha de solda das camadas (conforme Figura 13) para medição dos perfis de microdurezas desde a linha de fusão da primeira camada até o metal de base com distância entre pontos novamente de 0,2 mm para uma carga de 100 g aplicada durante 10 segundos (Figura 14).

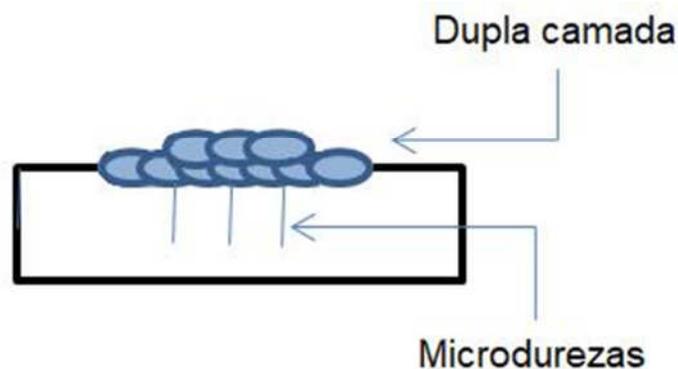


Figura 14 – Detalhe do corpo de prova da solda em dupla camada para medição dos perfis de microdureza

Fonte: Autoria própria

3.2.6 Soldagem das Juntas Chanfradas

3.2.6.1 Preparação do Chanfro Reto da Junta com Dupla Camada

Antes da soldagem das juntas foi realizada a preparação do chanfro reto da junta com a dupla camada. Para isto foram adicionados dois passes na primeira camada e um passe na segunda camada com as energias e soldagem previamente escolhidas conforme o procedimento citado no item 3.2.4. Após a soldagem o excesso de solda oriundo do processo passou pela etapa de usinagem.

3.2.6.2 Soldagem Final dos Corpos de Provas

A Figura 15 apresenta o croqui da junta chanfrada com suas dimensões.

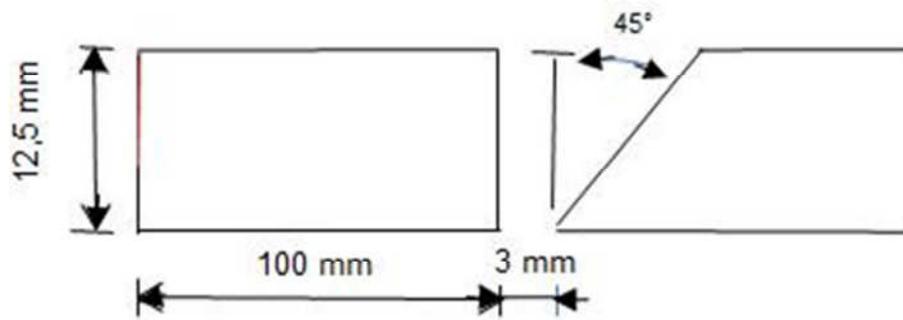


Figura 15 – Croqui da junta chanfrada – vista lateral

Fonte: Autoria própria

Para avaliar a viabilidade do procedimento de soldagem multipasses sem TTPS foram soldadas três juntas conforme disposto a seguir:

- Referência: soldada sem a aplicação de TTPS ou dupla camada;
- TTPS: soldada com os mesmos parâmetros da Referência, porém com posterior tratamento térmico de alívio de tensões;
- Dupla camada: antes do enchimento teve a face reta da junta preparada com a dupla camada.

Os parâmetros para a soldagem das juntas chanfradas são mostrados na Tabela 6. Para isso foram tomados como base os valores contidos no trabalho de Cruz (2006) com ajustes em virtude dos parâmetros específicos da soldagem utilizada nesta pesquisa.

Tabela 6 - Parâmetros de soldagem para o enchimento das juntas

PASSES	Diâmetro do Arame (mm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
R1	1,2	25	90	13
R2	1,2	25	90	16
2	1,2	25	130	16
3	1,2	25	130	16
4	1,2	25	130	16
5	1,2	25	130	25

Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram soldados com soldagem semiautomática, DBCP de 14 mm e vazão de gás de 16 l/min.

Na Figura 16 é apresentado um exemplo da sequência de soldagem utilizada neste trabalho. Após a realização do passe de acabamento a chapa foi virada para a realização de goivagem e posteriormente soldagem do segundo passe de raiz (R2).

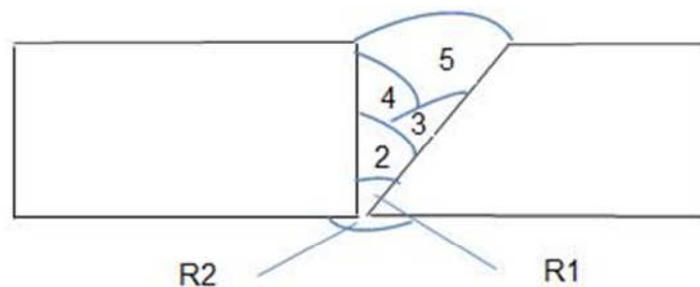


Figura 16 – Sequência de soldagem para as juntas chanfradas

Fonte: Autoria própria

3.2.7 Tratamento Térmico Pós-soldagem

Para possibilitar a avaliação do efeito de um tratamento térmico nas juntas soldadas sem a técnica da dupla camada foi executado o procedimento padrão de TTPS e posterior medição das propriedades finais na região da solda. Neste caso as amostras foram então tratadas em um forno, em ambiente não protegido por 90 minutos a uma temperatura de 650 °C.

3.2.8 Caracterização Metalúrgica

As amostras foram preparadas para caracterização metalúrgica e observadas por meio de microscopia ótica (Figura 17). Para a análise do tamanho de grãos ferríticos foi utilizado o método planimétrico que consistiu na contagem do número de grãos dentro de uma área conhecida em três regiões diferentes (superior, meio e inferior) da amostra. A região foco da observação foi a ZAC-GG, correspondente a região do chanfro reto da junta para três tipos de corpos de provas (Referência, TTPS e DC).

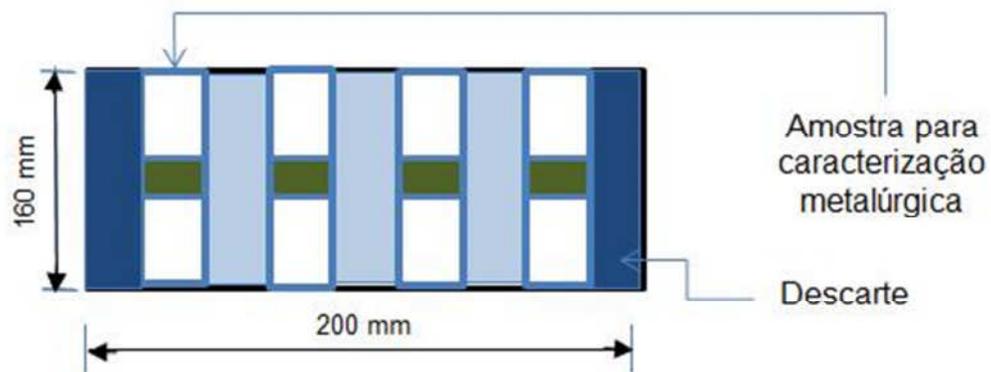


Figura 17 – Desenho esquemático da localização da amostra para caracterização metalúrgica – vista superior sem escala

Fonte: Autoria própria

3.2.9 Análise das Propriedades Mecânicas

Após a soldagem, três amostras (160 x 15 x 12,5) mm foram retiradas transversalmente a linha de solda para preparação aos ensaios de dureza e microdureza (Figura 18) com descarte de (160 x 10 x 12,5) mm de cada lado da junta.

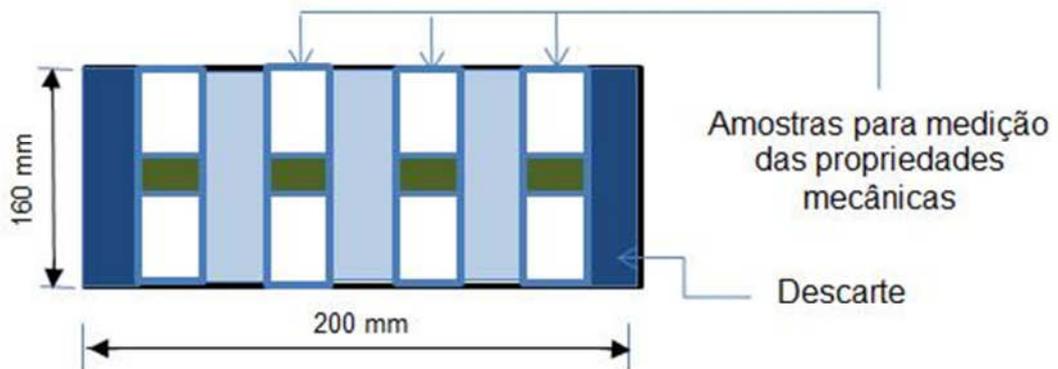


Figura 18 – Desenho esquemático da localização das amostras para medição das propriedades mecânicas na junta soldada – vista superior sem escala

Fonte: Autoria própria

3.2.9.1 Dureza

Para a medição de dureza foram realizadas impressões com cargas de 2 kg aplicadas durante 10 segundos e localizadas desde a linha de fusão até o metal de base distanciadas entre si de 0,5 mm. Os perfis de dureza foram realizados ao longo de três regiões da seção transversal da dupla camada: superior, meio e inferior do chanfro reto. A Figura 19 apresenta o desenho esquemático da localização das impressões na junta soldada. Foi realizada medição e posteriores comparações entre as durezas encontradas para as amostras sem TTPS, com TTPS e a com técnica da dupla camada.

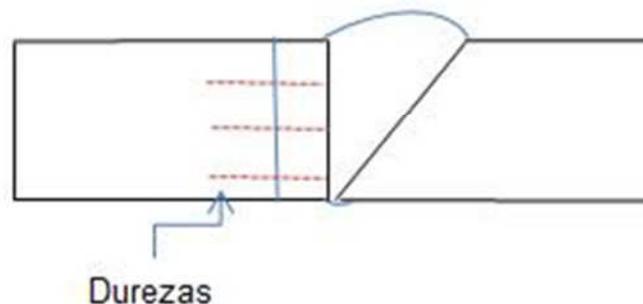


Figura 19 – Representação esquemática da localização das medições de dureza na amostra retirada da junta soldada – vista lateral

Fonte: Autoria própria

3.2.9.2 Microdureza

Para a medição de microdureza foram realizadas impressões desde a linha de fusão até o metal de base com distância entre pontos 0,2 mm para uma carga de 100 g aplicadas durante 10 segundos. Os perfis de microdureza foram realizados ao longo de duas regiões da seção transversal da dupla camada: correspondente ao centro do cordão e na região entre passes. A Figura 20 apresenta o desenho esquemático da localização das impressões na junta soldada. Foi realizada medição e posteriores comparações entre as microdurezas encontradas para as amostras sem TTPS, com TTPS e a com técnica da dupla camada.

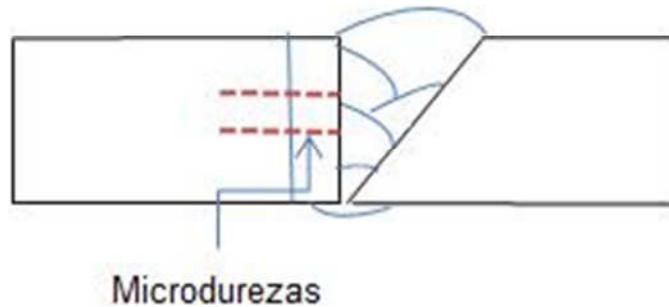


Figura 20 – Representação esquemática da localização das medições de microdureza na amostra retirado da junta soldada – vista lateral

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO METAL DE BASE

4.1.1 Análise Microestrutural

A verificação microestrutural no metal de base (MB) revelou a presença de estrutura bandeada indicando uma segregação preferencial da perlita ao longo do material, e que a microestrutura presente no MB é composta basicamente de ferrita e perlita em menor intensidade conforme verificado por Cruz (2006) e Ribeiro *et al.* (2016) em seus respectivos trabalhos sobre aços microligados. A Figura 21 mostra a presença de ferrita (grãos claros) e perlita (grãos escuros). Ainda na mesma é possível verificar a estrutura de bandas características do processo TMCP típico desses tipos de aço.

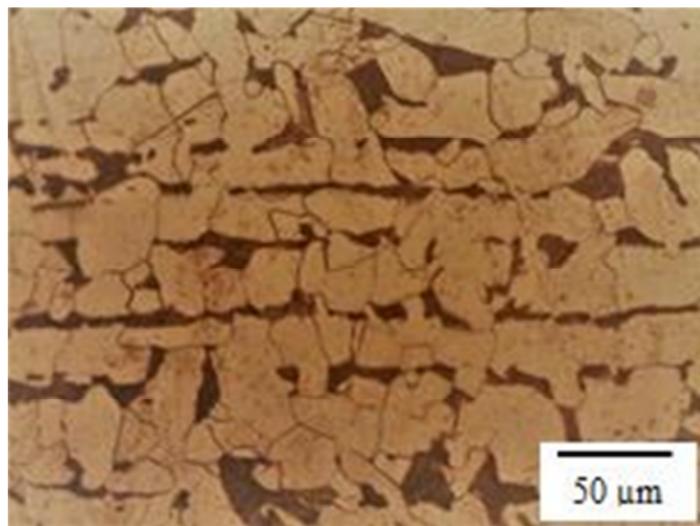


Figura 21 – Microestrutura do aço ASTM A 131 Grau AH36

Fonte: Autoria própria

4.1.2 Análise Química

A Tabela 7 mostra a composição química do AH36 analisado nesta pesquisa.

Tabela 7 – Composição química do material

Elemento	Análise 1 (%)	Análise 2 (%)	Análise 3 (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)
C	0,0961	0,0877	0,0949	0,0929	0,0037
Mn	1,4400	1,4300	1,4500	1,4400	0,0082
Si	0,2920	0,2790	0,3210	0,2973	0,0176
P	0,0065	0,0071	0,0078	0,0071	0,0005
S	0,0121	0,0113	0,0105	0,0113	0,0007
Al	0,0278	0,0338	0,0478	0,0365	0,0084
Cu	0,0119	0,0124	0,0139	0,0127	0,0008
Cr	0,0095	0,0088	0,0096	0,0093	0,0004
Ni	0,0108	0,0105	0,0110	0,0108	0,0002
Nb	0,0318	0,0317	0,0310	0,0315	0,0004
Ti	0,0146	0,0147	0,0145	0,0146	0,0001
V	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000
Mo	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000
Ceq	0,3399	0,3297	0,3405	0,3367	0,0050

Fonte: Autoria própria

O carbono equivalente constante da Tabela 7 pode ser calculado pela equação 13:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (13)$$

Todos os elementos encontrados assim como o carbono equivalente encontraram-se dentro dos valores estipulados pela Norma ASTM A131A/A131M (2001).

Cabe salientar a baixa quantidade de carbono característica dos aços microligados produzidos pelo processo TMCP e conseqüente baixo carbono equivalente possibilitando uma boa soldabilidade para estes aços inclusive omitindo o fator pré-aquecimento em suas soldagens.

Outro fator importante também deste tipo de aço são as quantidades significativas de Nióbio, Titânio e ainda traços de Vanádio e Molibdênio em sua composição. Estes elementos químicos associados ao processo de fabricação caracterizam excelentes propriedades mecânicas para este material apesar da quantidade de carbono limitada.

4.1.3 Medição de Microdureza

Na Tabela 8 é apresentada a faixa de valores de microdureza encontrados, média e o seu respectivo desvio padrão (DP).

Tabela 8 – Medições de microdureza do metal de base

Faixa (HV0,1)	Média (HV0,1)	Desvio Padrão (HV0,1)
190-215	200	8,47

Fonte: Autoria própria

A variância dos valores de microdureza deve-se principalmente ao ponto de indentação que de acordo com sua microestrutura (ferrita ou perlita) pode apresentar uma dureza com valores mais altos. Já o valor médio pode ser considerado dentro dos parâmetros de dureza para este tipo de aço. O valor encontrado apresentou valor muito próximo ao encontrado por Ribeiro *et al.* (2016) para o mesmo material (208 HV) em seu trabalho com aços microligados produzido pelo mesmo processo TMCP.

4.2 SOLDAGEM PRELIMINAR

A Figura 22 apresenta os aspectos visuais dos cordões de solda conforme a energia de soldagem.

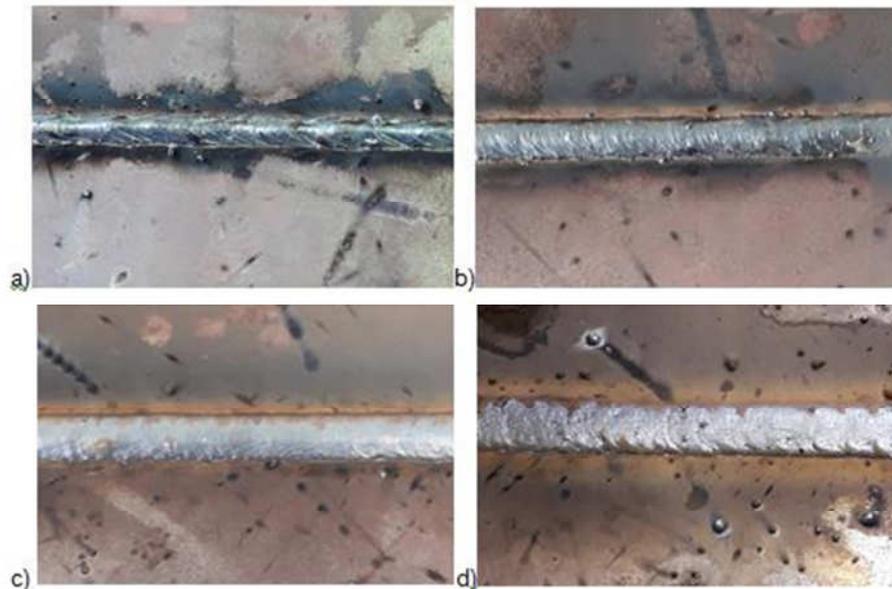


Figura 22 – Aspecto visual dos cordões de solda de acordo com a energia de soldagem: a) 5 kJ/cm b) 9 kJ/cm c) 14 kJ/cm e d) 17 kJ/cm

Fonte: Autoria própria

Os cordões de solda apresentam acabamento satisfatório e sem descontinuidades aparentes para todos os aportes térmicos, apesar da presença de respingos reparados com ferramenta manual.

Hu *et al.* (2013) em seu estudo para aços microligados encontrou as melhores propriedades mecânicas para o aporte similar de energia (neste caso 9 e 14 kJ/cm) identificando que, apesar de aumentar a produtividade, um aumento de energia pode não ser benéfico em termos de integralidade da junta soldada.

Uma vez que a tensão e corrente não sofreram variações significativas, o aumento na largura dos cordões pode ser atribuído a diminuição da velocidade de soldagem que está diretamente ligada à quantidade de energia cedida à peça; quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor por unidade de área e conseqüentemente menor largura do cordão. Velocidades mais baixas, além de elevar o custo da operação, podem causar alterações metalúrgicas na estrutura do material devido à concentração térmica e aumentam assim a dimensão do cordão o que é corroborado e destacado por Machado (1996) em seu trabalho.

Para as medições das extensões de zonas endurecidas e não endurecidas adotou-se o limite de 300 HV_{0,1} para o fim da ZE e começo da ZNE e 200 HV_{0,1} para o fim da ZNE, já que esta é a microdureza média do metal de base. Mesmo critério utilizado por Andrade (2016) e Cavalcante *et al.* (2016).

As Figuras 23 a 26 ilustram os perfis de microdureza encontrados para as energias 5, 9, 14 e 17 kJ/cm.

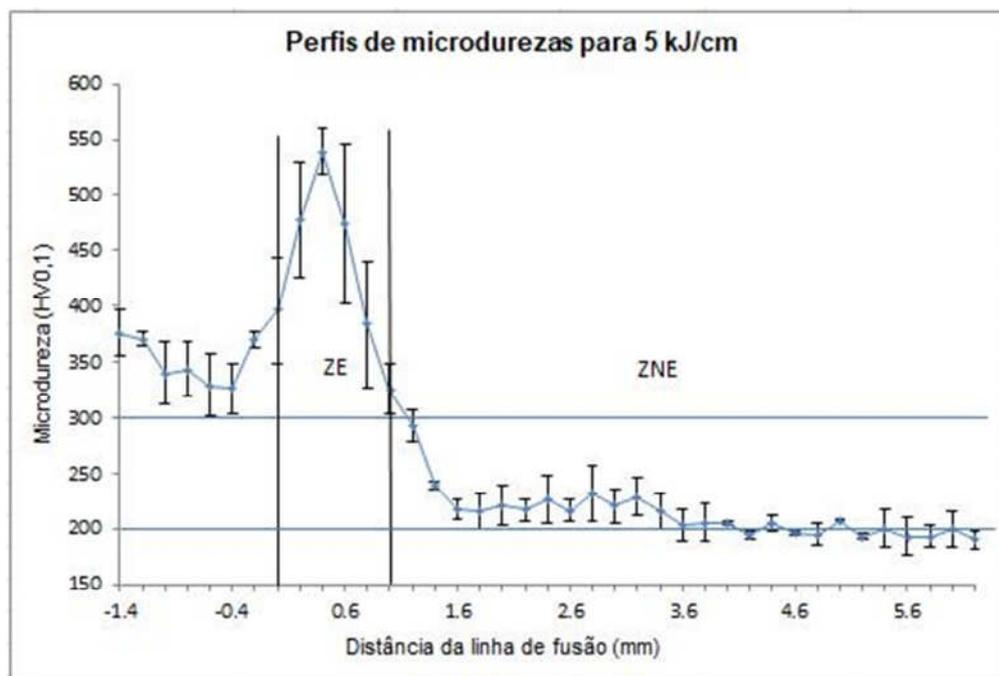


Figura 23 - Perfil de microdureza para a energia de 5 kJ/cm

Fonte: Autoria própria

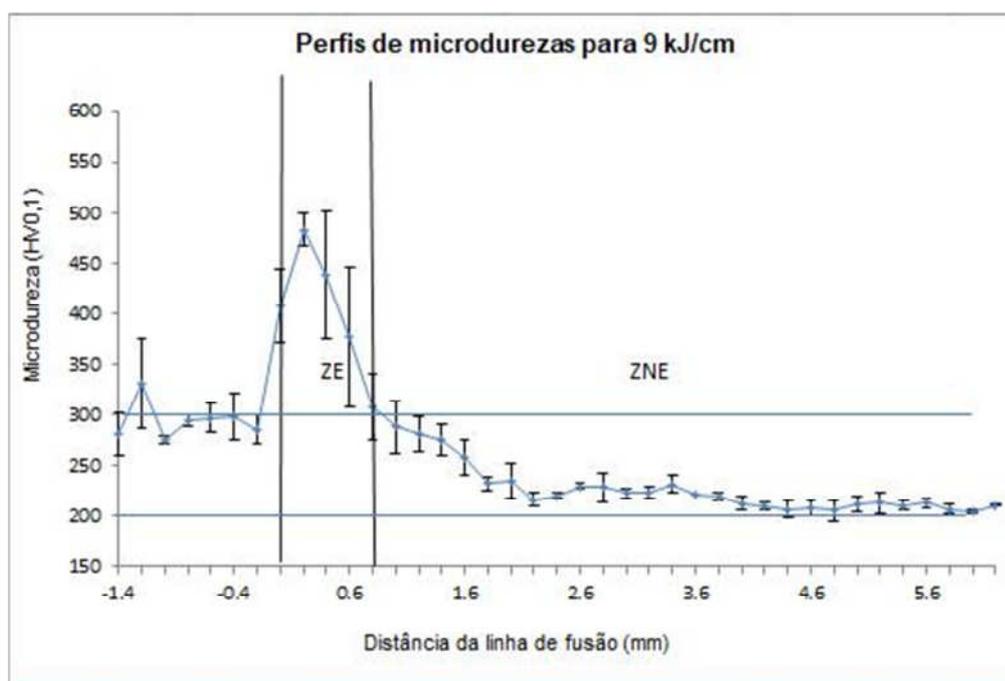


Figura 24 - Perfil de microdureza para a energia de 9 kJ/cm

Fonte: Autoria própria

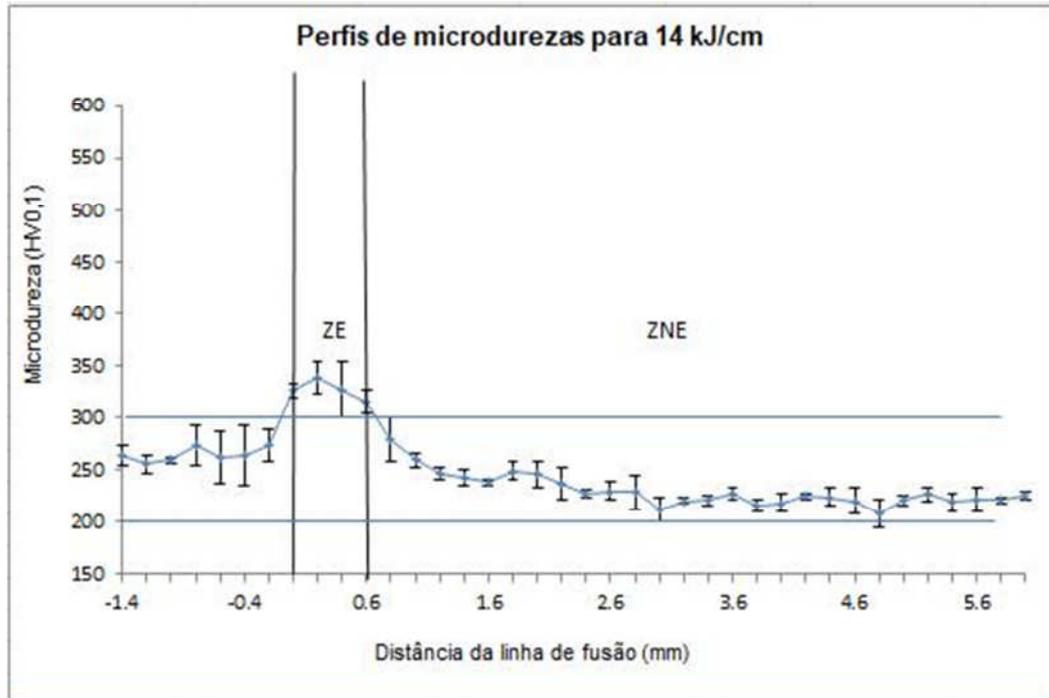


Figura 25 - Perfil de microdureza para a energia de 14 kJ/cm

Fonte: Autoria própria

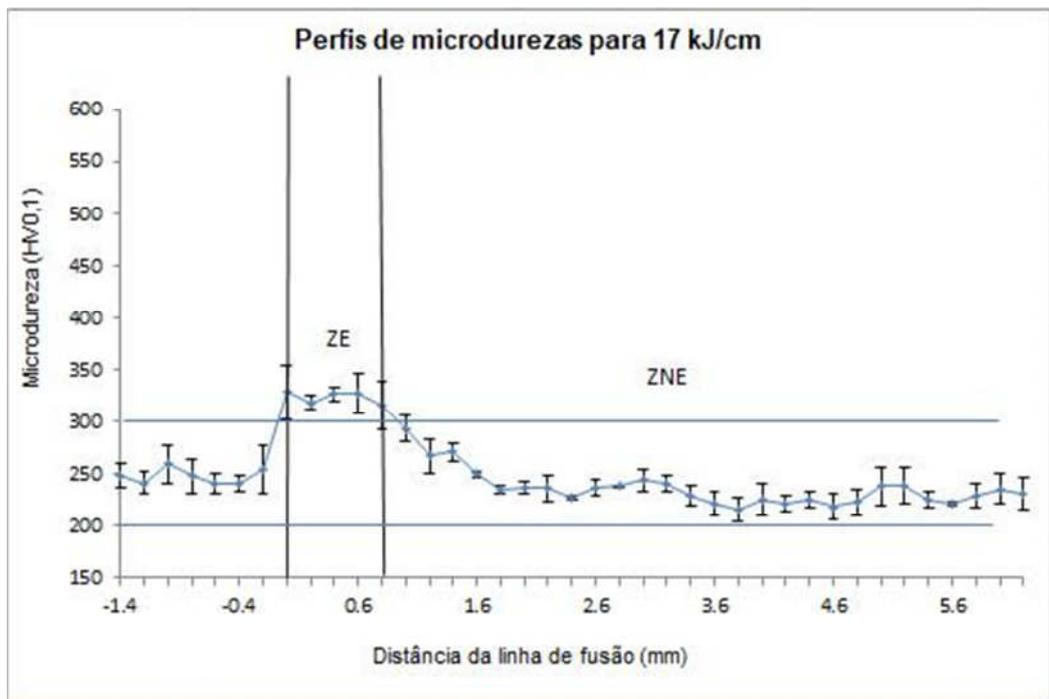


Figura 26 - Perfil de microdureza para a energia de 17 kJ/cm

Fonte: Autoria própria

Para as quatro energias de soldagem os menores valores de pico de microdureza ficaram em torno de 350 HV_{0,1} (Figura 25 e Figura 26) e os maiores valores de pico chegaram próximos de 500 HV_{0,1} (Figura 23 e Figura 24). Observa-se também por meio destes diagramas que a microdureza tende a reduzir a medida que se afasta da linha de fusão, com picos de microdureza máxima na zona com maior velocidade de resfriamento e uma diminuição da microdureza deste a ZE até o metal de base definindo a ZNE já com menores taxas de resfriamento.

Quanto maior a energia de soldagem, menor a microdureza máxima alcançada em virtude principalmente de que quanto maior a energia de soldagem, conseqüentemente tem-se uma menor velocidade de resfriamento e assim menores valores de microdureza. O fato principal para isto se deve a diminuição de martensita e austenita retida e aumento de formação bainítica para energias mais altas com tempos de resfriamento maiores. Estes resultados foram também encontrados em outros trabalhos (CRUZ, 2006, OLIVEIRA, 2013 e FARIAS e AGUIAR, 2003).

A Figura 27 apresenta o resultado do ensaio macrográfico de cada energia de soldagem com suas regiões de soldagem bem definidas respectivamente de cima para baixo: ZF, ZAC-GG, ZAG-GF e MB.

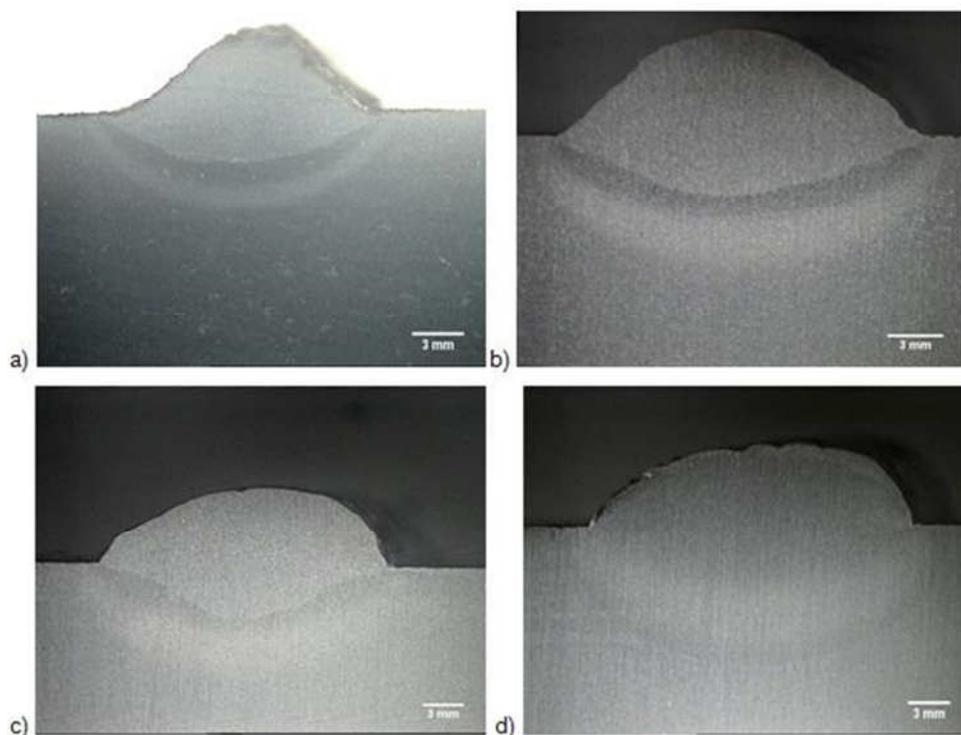


Figura 27 – Macrografias com as regiões de soldagem: a) 5 kJ/cm b) 9 kJ/cm c) 14 kJ/cm e d) 17 kJ/cm

Fonte: Autoria própria

A partir dos gráficos de microdureza constantes nas Figuras 23, 24, 25 e 26 e as macrografias apresentadas na Figura 27 são estabelecidas as extensões para as regiões endurecidas e não endurecidas mostradas na Tabela 9 e as extensões das zonas de solda para a microestrutura das amostras na Tabela 10.

Tabela 9 - Extensões das zonas da solda para a microdureza

Zonas de Microdureza (mm)								
Energia (kJ/cm)	5	DP	9	DP	14	DP	17	DP
Reforço	4,34	0,68	6,83	1,32	6,46	1,25	5,59	0,60
Penetração	3,05	0,46	2,90	0,73	4,17	0,82	4,04	0,29
ZE	1,00	0,16	0,93	0,25	0,67	0,09	0,80	0,16
ZNE	5,20	0,16	5,27	0,25	5,53	0,09	5,40	0,16

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 - Extensões das zonas da solda para a microestrutura

Zonas Microestruturais (mm)								
Energia (kJ/cm)	5	DP	9	DP	14	DP	17	DP
Reforço	4,34	0,68	6,83	1,32	6,46	1,25	5,59	0,60
Penetração	3,05	0,46	2,90	0,73	4,17	0,82	4,04	0,29
ZAC-GG	1,43	0,07	1,44	0,40	2,02	0,39	2,95	0,01
ZAC-GF	1,26	0,22	2,89	0,20	2,93	0,64	1,66	0,07

Fonte: Autoria própria

Verifica-se que a dimensão do reforço aumentou quando se variou a energia de 5 kJ/cm para 9 kJ/cm, e para os demais aumentos do aporte térmico não se observou uma variação significativa na dimensão do reforço. Já os valores de penetração não obtiveram variação significativa para as energias de 5 e 9 kJ/cm, porém observou-se um aumento do comprimento da penetração de 9 para 14 kJ/cm, que provavelmente ocorreu devido ao aumento do aporte térmico utilizado.

Verifica-se também uma redução na extensão da zona endurecida com o aumento da energia de soldagem ocasionada provavelmente pela menor taxa de resfriamento, ou seja, menor velocidade de resfriamento. No caso da redução na zona endurecida na energia correspondente a 14 kJ/cm, tem-se provavelmente uma redução na taxa de resfriamento vinculada ao calor armazenado junto a região da solda provocando um balanceamento térmico dificultando a presença de microestruturas que originam distorção no reticulado.

Outro fator observado foi que as diferentes energias de soldagem aplicadas não foram capazes de modificar significativamente a extensão da ZNE para os corpos de prova ensaiados.

Para este aço foram construídos quatro diagramas resultando em dezesseis combinações de relações de energia de soldagem:

- Relação E_1/E_2 com 5 kJ/cm na primeira camada

Com esta relação de energia temos as seguintes combinações: 5/5 kJ/cm, 5/9 kJ/cm, 5/14 kJ/cm e 5/17 kJ/cm conforme diagrama da Figura 28.

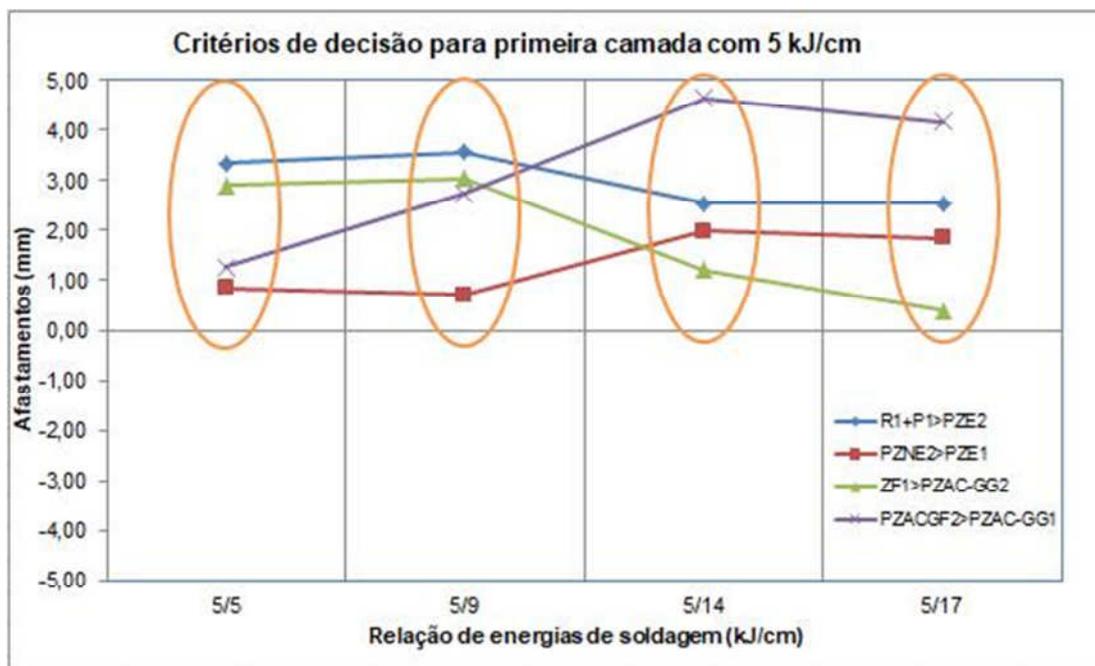


Figura 28 – Diagrama de decisão para a dupla camada com 5 kJ/cm na primeira camada

Fonte: Autoria própria

Constatam-se pelo diagrama que todas as combinações de energia apresentam afastamentos positivos para os quatro critérios apresentados.

Com mais de uma relação de energias aprovada utilizou-se o mesmo critério aplicado por CRUZ (2006) em seu trabalho que delimita o critério estabelecido na Equação 2 ($PZNE_2 > PZE_1$), como processo de desempate. Neste caso a relação de energia 5/14 kJ/cm apresentou o maior afastamento na condição indicando uma maior capacidade da zona não endurecida da segunda camada poder revenir a zona endurecida da primeira camada.

No caso deste trabalho adicionou-se também o critério estabelecido na Equação 7 ($PZAC-GF_2 > PZAC-GG_1$) como processo de desempate. Também para este caso a relação de energia 5/14 kJ/cm apresentou o maior afastamento na condição indicando uma maior capacidade de refino de grão da segunda camada em relação a primeira camada.

Na Tabela 11 são verificados os valores de afastamentos positivos para as relações de energia utilizadas para critério de desempate.

Tabela 11 – Quadro do critério de escolha das energias de soldagem

Relação de Energias	Resultado	Critério da Microdureza $PZNE_2 > PZE_1$ (mm)	Critério da Microestrutura $PZACGF_2 > PZAC-GG_1$ (mm)
5/5	Aprovado	0,86	1,26
5/9	Aprovado	0,71	2,75
5/14	Aprovado	1,98	4,64
5/17	Aprovado	1,85	4,17

Fonte: Autoria própria

- Relação E_1/E_2 com 9 kJ/cm na primeira camada

Com esta relação de energia temos as seguintes combinações: 9/9 kJ/cm, 9/14 kJ/cm, 9/17 kJ/cm e 9/5 kJ/cm conforme diagrama da Figura 29.

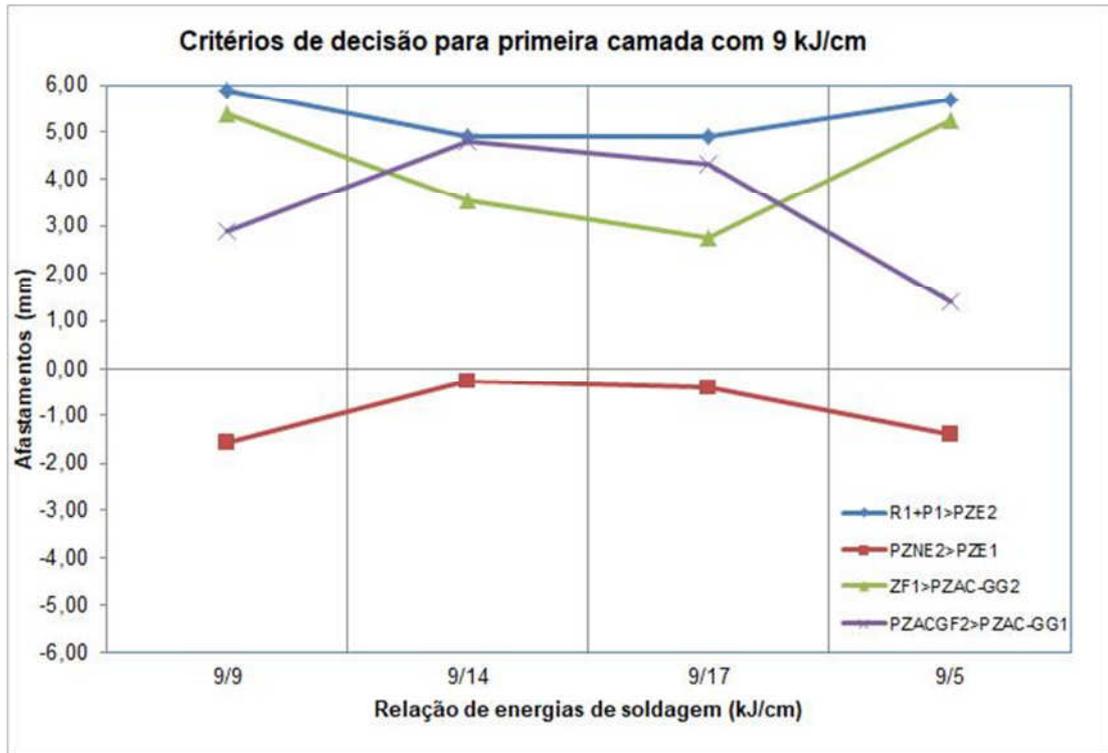


Figura 29 – Diagrama de decisão para a dupla camada com 9 kJ/cm na primeira camada

Fonte: Autoria própria

A Figura 29 mostra o comportamento do material quando aplicado 9 kJ/cm como energia da primeira camada verificando que a energia de 9 kJ/cm imposta na primeira camada resulta na aceitação nos critérios de microestrutura, porém apresenta afastamentos negativos para todas as relações de energia para o critério estabelecido na equação 2 ($PZNE_2 > PZE_1$) significando que pode não haver um revenimento satisfatório das zonas endurecidas.

Com este resultado esta relação de energias com a primeira camada com 9 kJ/cm está descartada para aplicação na técnica da dupla camada.

- Relação E_1/E_2 com 14 kJ/cm na primeira camada

Com esta relação de energia temos as seguintes combinações: 14/14 kJ/cm, 14/17 kJ/cm, 14/9 kJ/cm e 14/5 kJ/cm conforme Figura 30.

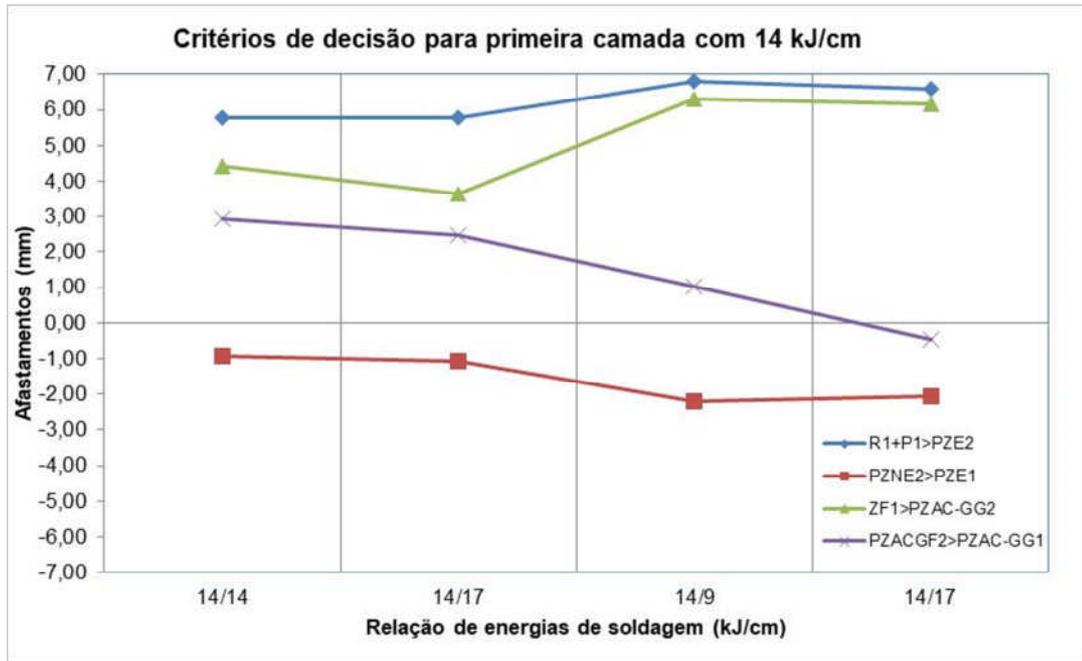


Figura 30 - Diagrama de decisão para a dupla camada com 14 kJ/cm na primeira camada

Fonte: Autoria própria

A Figura 30 indica que a aplicação de 14 kJ/cm na primeira camada, assim como no caso da energia de 9 kJ/cm, também provoca a rejeição por um critério de microdureza para todas as relações de energia. No entanto, somando-se a isto ocorre a rejeição pelo critério da microestrutura conforme a Equação 7 ($PZAC-GF_2 > PZAC-GG_1$) para a relação de energia 14/5 kJ/cm.

Com este resultado esta relação de energias com a primeira camada com 14 kJ/cm também está descartada para aplicação na técnica da dupla camada.

- Relação E_1/E_2 com 17 kJ/cm na primeira camada

Com esta relação de energia temos as seguintes combinações: 17/17 kJ/cm, 17/14 kJ/cm, 17/9 kJ/cm e 17/5 kJ/cm conforme Figura 31.

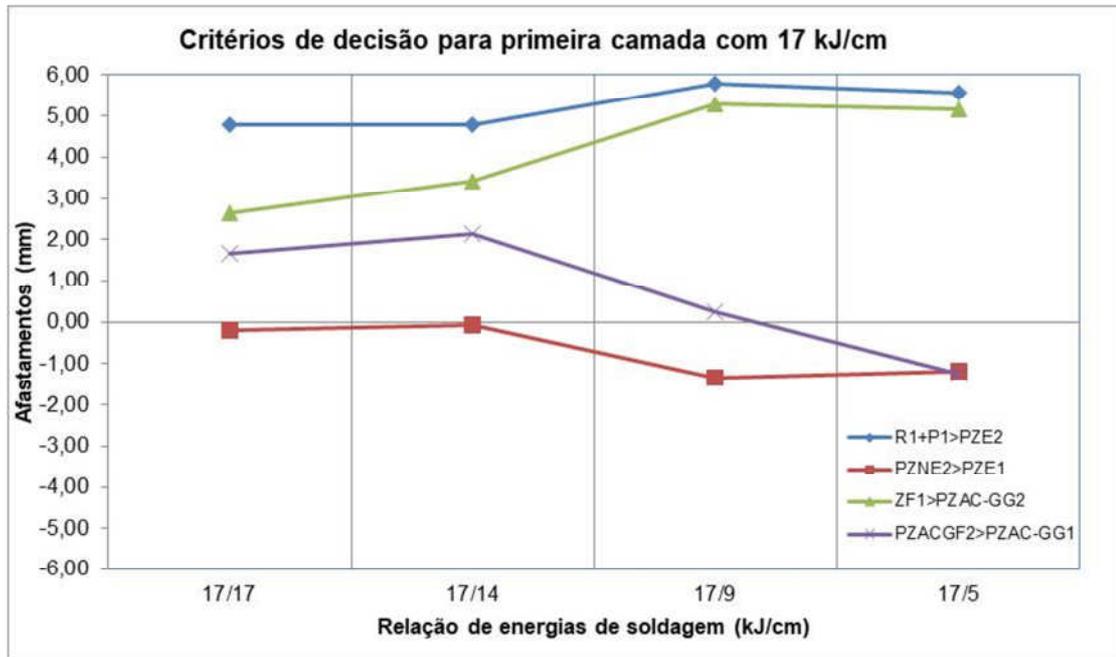


Figura 31 – Diagrama de decisão para a dupla camada com 17 kJ/cm na primeira camada

Fonte: Autoria própria

Verifica-se, através do diagrama da Figura 31, que os resultados se assemelham aos obtidos para a relação com 14 kJ/cm na primeira camada, ou seja, rejeição tanto no critério da microdureza quanto no critério da microestrutura.

Com este resultado esta relação de energias com a primeira camada com 17 kJ/cm está descartada para aplicação na técnica da dupla camada.

Conforme pode ser observado tem-se um decréscimo na condição de aprovação dos critérios quando se aumenta o aporte térmico da primeira camada confirmando o que outros trabalhos (CRUZ, 2006; OLIVEIRA, 2013 e FARIAS e AGUIAR, 2003), já apontavam em suas conclusões revelando a dificuldade em reaver e refinar a região de aumento de grão na zona afetada pelo calor, sobretudo pelo aumento das profundidades das zonas endurecidas.

Os resultados avaliados pelos diagramas de decisão mostram que para as condições avaliadas neste trabalho a relação de energia que se apresentou mais adequada é a 5/14 kJ/cm.

4.3 SOLDAGEM COM DUPLA CAMADA

Na Figura 32 é apresentado o aspecto visual do cordão de solda para o ensaio em dupla camada com para relação de energia de 5/14 kJ/cm.

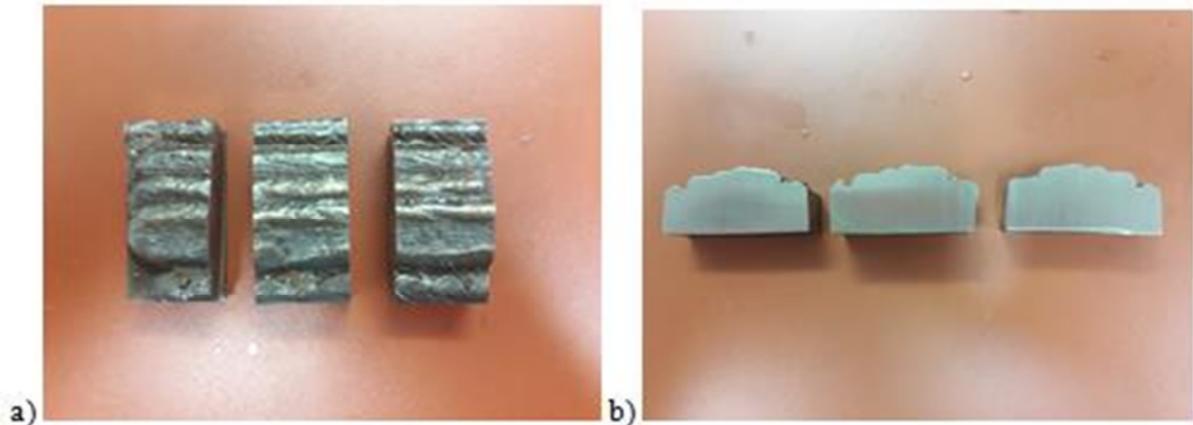


Figura 32 – Aspecto visual do cordão de solda para ensaio em dupla camada para a relação de energia de soldagem 5/14 kJ/cm: a) Vista superior e b) Vista lateral

Fonte: Autoria própria

O cordão de solda da relação de energia de 5/14 kJ/cm apresenta-se acabamento satisfatório semelhante ao encontrado na soldagem preliminar. Atingiu-se a sobreposição de aproximadamente 50 % a 70 % tanto na primeira como na segunda camada. Aloraier, Ibrahim e Thomson (2006), em condições similares as estudadas neste trabalho, alcançaram valores de microdureza mais baixos com estes valores de sobreposição de passes similares. Lant *et al.* (2001), também em condições similares a este trabalho, com 50 % de sobreposição na primeira camada e 40 a 60 % na segunda camada alcançou 80 % de refino de grão na ZAC-GG.

A Figura 33 apresenta a macrografia da amostra de dupla camada apresentando a região de possível refino de grão ocasionada pela dupla camada.

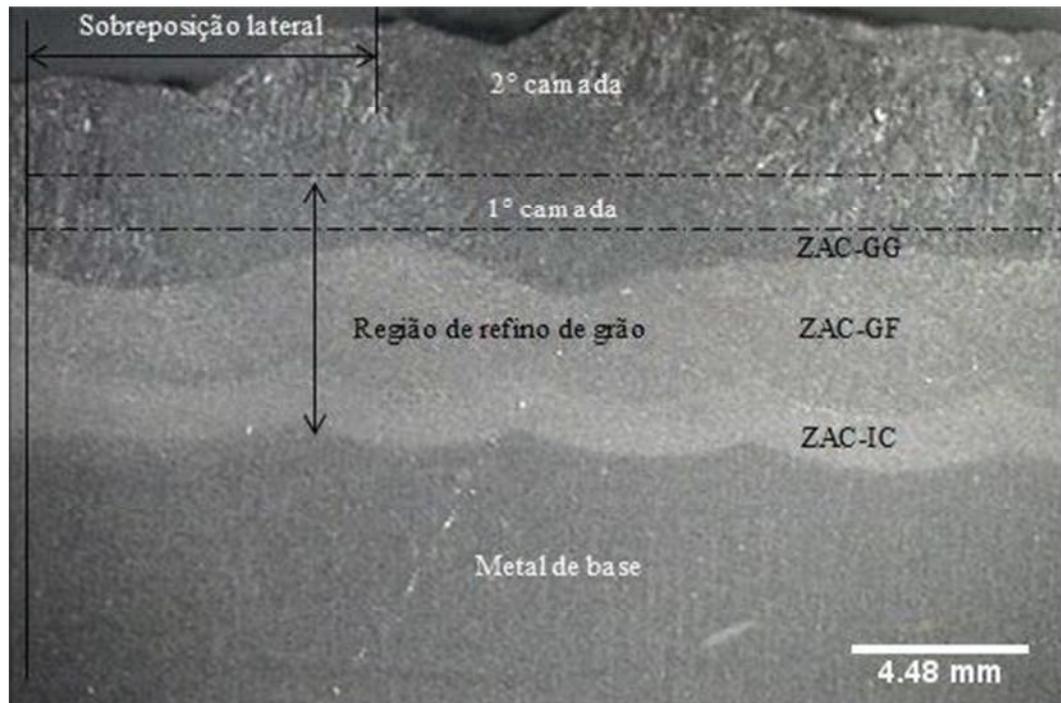


Figura 33 – Macrografia do cordão de solda para ensaio em dupla camada para a relação de energia de soldagem 5/14 kJ/cm

Fonte: Autoria própria

Neste caso a probabilidade de refinamento e o revenimento observado na ZAC da primeira camada se devem provavelmente a sobreposição dos passes laterais e adicionalmente a sobreposição da ZAC-GF da segunda camada sobre a região da ZAC-GG da primeira camada. Este resultado já era esperado em virtude desta relação de energia ter sido aprovada nos critérios dos diagramas de decisão.

A Figura 34 mostra os perfis de microdureza medidos a partir da linha de fusão (LF) no corpo de prova ensaiado com 5 kJ/cm na primeira camada e 14 kJ/cm na segunda camada e sua comparação com a soldagem preliminar.

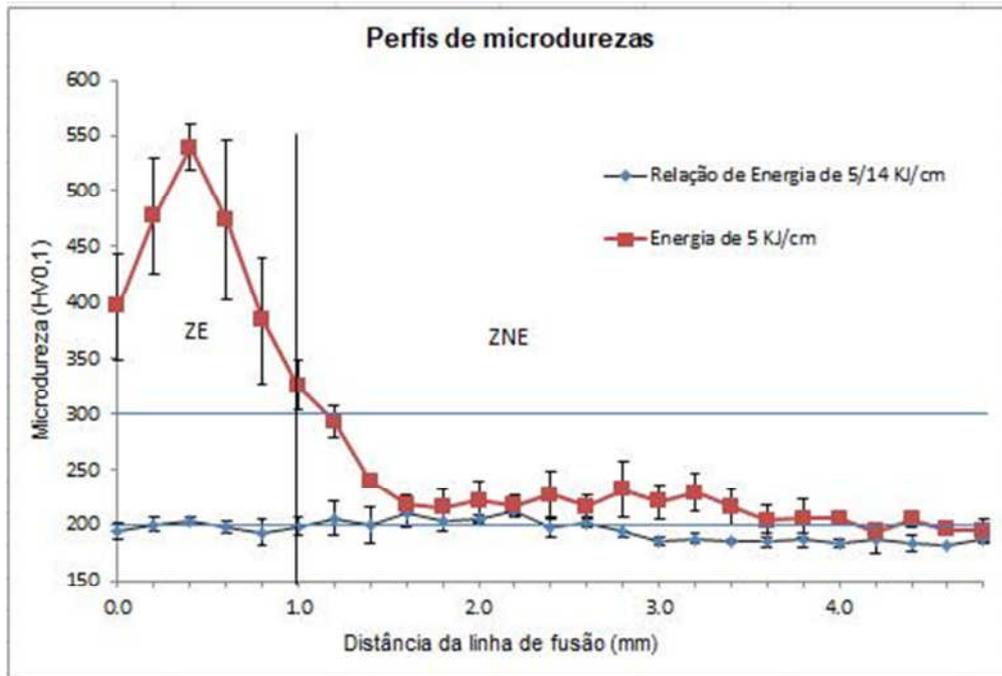


Figura 34 – Comparação entre os perfis de microdurezas da dupla camada com a soldagem preliminar

Fonte: Autoria própria

Observa-se que o perfil, junto a LF, apresentado pela relação de energia 5/14 KJ/cm apresenta uma microdureza que não atingiu os valores correspondentes (acima de 300 HV0,1) aos da ZE demonstrando a possibilidade de revenimento promovido pela dupla camada naquela região. A microdureza para esta região se estabeleceu na faixa de 200 HV0,1 bem abaixo do limite de 300 HV0,1 que foi estimado para a região da ZNE.

Os resultados ficaram dentro do esperado e confirmam a relação de energia escolhida como adequada para a técnica da dupla camada. Vários autores, tais quais: Cruz (2006), Azevedo (2002), Farias e Aguiar (2003) encontraram, em seus respectivos trabalhos, resultados semelhantes para esta técnica.

Com este resultado foi possível prosseguir a etapa seguinte onde foi realizada a soldagem das juntas chanfradas e posterior comparação das propriedades mecânicas para os corpos de prova com dupla camada.

4.4 SOLDAGEM DAS JUNTAS CHANFRADAS

4.4.1 Preparação do Chanfro Reto da Junta com Dupla Camada

Antes da soldagem do enchimento das juntas soldadas realizou-se a aplicação da técnica da dupla camada no chanfro reto da amostra (Figura 35).



Figura 35 – Etapas do processo de soldagem do chanfro reto na soldagem da junta: a) 1° Camada b) 2° Camada e c) Chanfro usinado pronto para a soldagem

Fonte: Autoria própria

Realizou-se na primeira etapa (Figura 35 a) a soldagem de dois passes com a energia de 5 kJ/cm. No passo seguinte foi depositado um passe com energia de 14 kJ/cm (Figura 35 b). Posteriormente efetuou-se a usinagem (desbaste) do excesso de solda (Figura 35 c).

Na Figura 36 verifica-se a montagem da junta com chanfro reto preparada com a técnica da dupla camada.

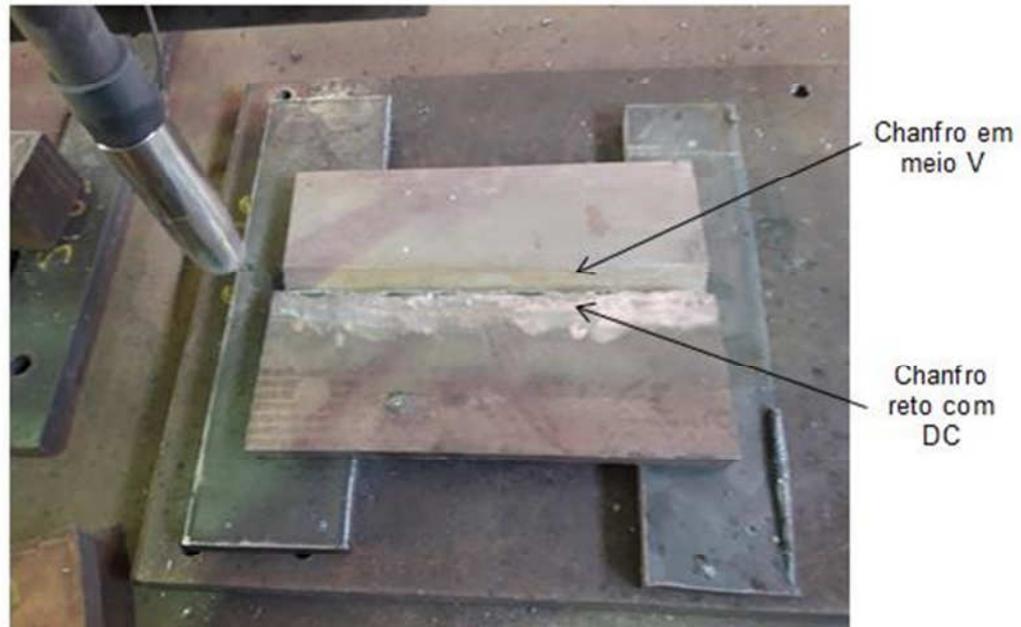


Figura 36 – Montagem da junta para soldagem com chanfro preparado pela técnica da dupla camada

Fonte: Autoria própria

Apesar da preparação do chanfro reto ter apresentado imperfeições como pode ser visualizado na Figura 35 c) a soldagem não apresentou nenhum defeito ou descontinuidade adicional em relação aos outros corpos de prova (referência e TTPS).

4.4.2 Soldagem Final dos Corpos de Prova

Na Figura 37 observa-se a soldagem final de cada um dos corpos de prova desenvolvidos neste trabalho: junta de referência soldada sem a aplicação de TTPS ou dupla camada, junta soldada com os mesmos parâmetros da referência, porém com posterior tratamento térmico de alívio de tensões e junta soldada com dupla camada que antes do enchimento teve a face reta da junta preparada com a esta técnica.



Figura 37 – Corpos de prova soldados

Fonte: Autoria própria

A soldagem dos corpos de prova apresentou superfície com alto índice de respingos (reparados com utilização de ferramenta manual) provenientes da alta taxa de corrente e da transferência por curto circuito aplicada neste processo.

A utilização do processo de goivagem (abertura da raiz) foi importante já que se analisou onde a raiz (R1) não obteve penetração e falta de fusão. Com intuito de evitar e também corrigir descontinuidades presentes realizou-se a soldagem da contra solda (R2) onde se depositou um passe de solda adicional com os mesmos parâmetros da soldagem de raiz inicial com resultado satisfatório.

4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

4.5.1 Junta de Referência

A Figura 38 apresenta a macrografia da amostra retirada da junta de referência com detalhe da micrografia da ZAC-GG próxima a linha de fusão com seus principais constituintes.

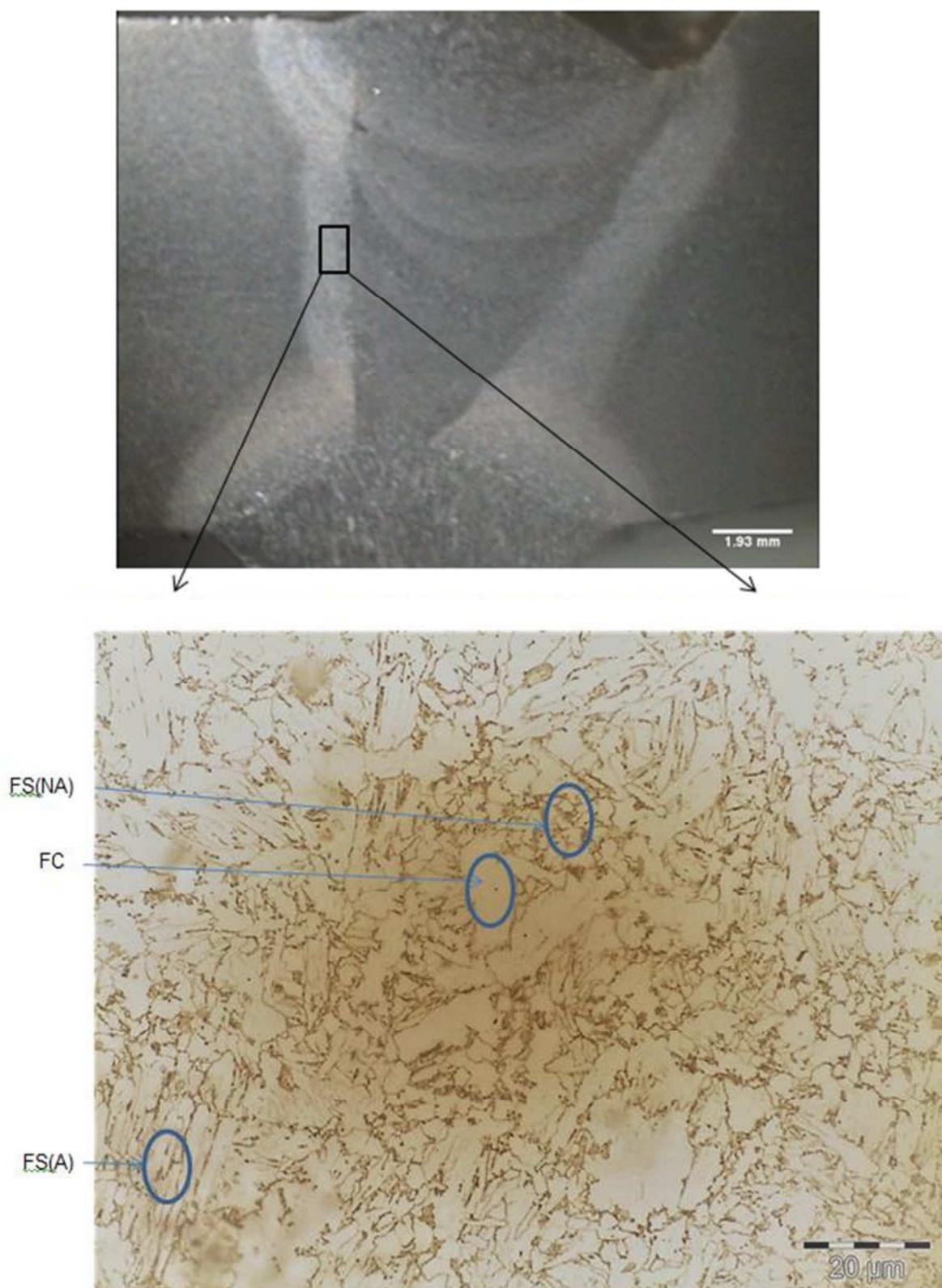


Figura 38 – Macro e micrografia da região ZAC-GG próxima a linha de fusão na junta de referência

Fonte: Autoria própria

As transformações microestruturais nessa região são afetadas pelo ciclo térmico e pelos passes subsequentes. Neste caso, o pico de temperatura do último passe excede a temperaturas da região intercrítica (regiões com as fases ferrita e austenita) e com o resfriamento a austenita resultante se decompõe em ferrita alinhada com carbonetos (FS (A)), ferrita desalinhada com carbonetos FS (NA), ferrita com carbonetos agregados (FC) e ainda um percentual de martensita com austenita residual (MA). Cozza *et al.* (2018) e Ribeiro *et al.* (2016) encontraram os mesmos microconstituintes para a soldagem deste mesmo tipo de aço.

A Tabela 12 indica o tamanho de grão ferrítico encontrado, média e o seu respectivo desvio padrão (DP).

Tabela 12 – Tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG para a junta de referência

Região	Medição 1 (µm)	Medição 2 (µm)	Medição 3 (µm)	Média (µm)	Desvio Padrão (µm)
ZAC-GG	12,71	11,65	12,44	12,27	0,45

Fonte: Autoria própria

4.5.2 Junta com TTPS

A Figura 39 demonstra a macrografia da amostra retirada da junta tratada termicamente (TTPS) com detalhe da micrografia da ZAC-GG próxima a linha de fusão com seus principais constituintes.

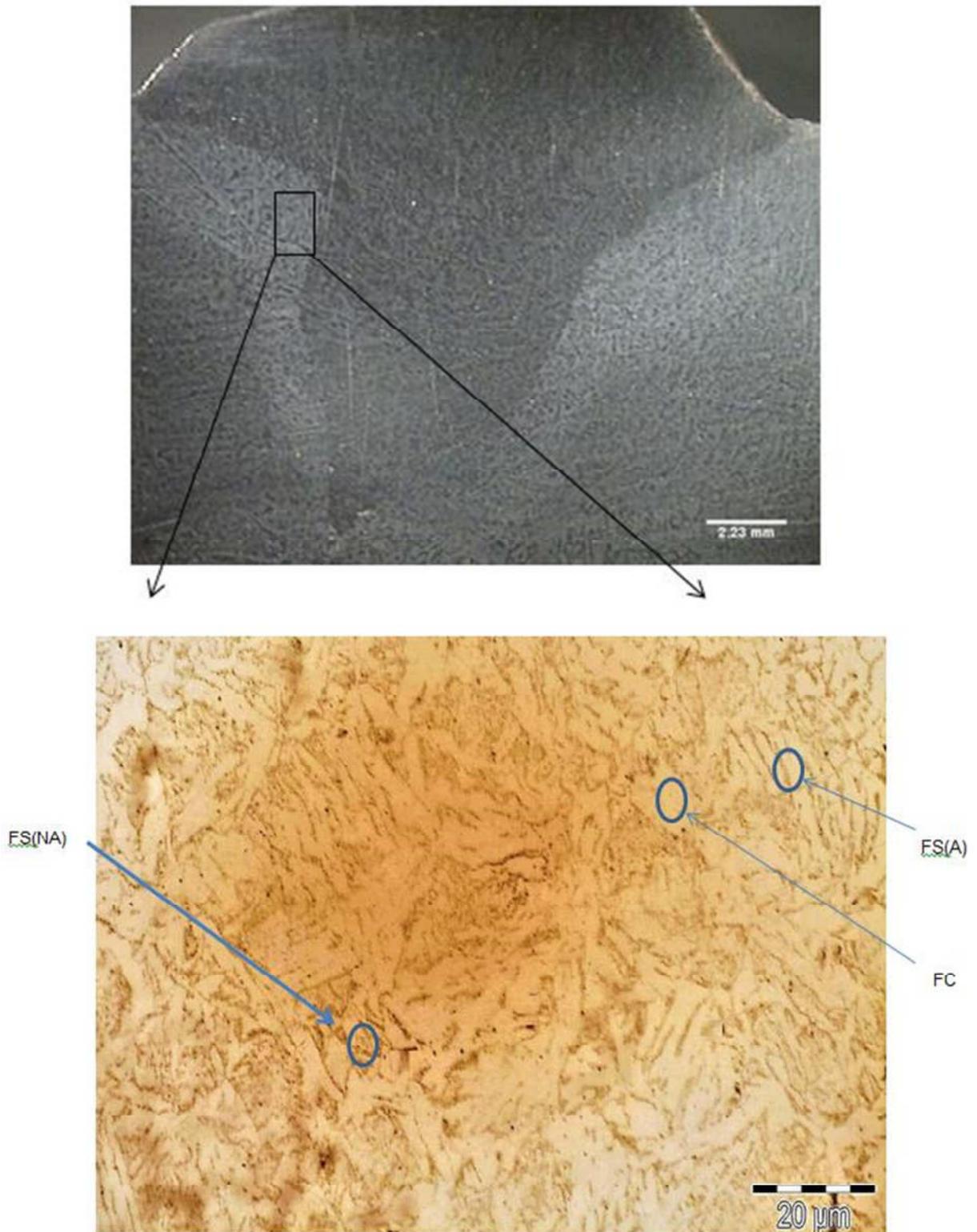


Figura 39 – Macro e micrografia da região ZAC-GG próxima a linha de fusão da amostra da junta com TTPS

Fonte: Autoria própria

Verificam-se os mesmos principais constituintes da ZAC próxima a linha de fusão das amostras de referência comprovando que o tratamento térmico pós-soldagem não altera o comportamento microestrutural do aço estudado no presente trabalho. Estes resultados são consistentes com as observações metalográficas de Tsay *et al.* (1999) que demonstraram que a microestrutura não foi significativamente alterada. Cozza *et al.* (2018) e Ribeiro *et al.* (2016) encontraram os mesmos resultados para a soldagem deste mesmo tipo de aço.

A Tabela 13 apresenta o tamanho de grão ferrítico encontrado, média e o seu respectivo desvio padrão (DP).

Tabela 13 – Tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG para a amostra com TTPS

Região	Medição 1 (µm)	Medição 2 (µm)	Medição 3 (µm)	Média (µm)	Desvio Padrão (µm)
ZAC-GG	12,25	12,71	12,68	12,55	0,21

Fonte: Autoria própria

4.5.3 Junta com Dupla Camada

Na Figura 40 é mostrada a macrografia da amostra retirada da junta com a técnica da dupla camada com detalhe da micrografia da ZAC na primeira camada (ZAC-GG₁) próxima a linha de fusão com a análise dos constituintes encontrados.

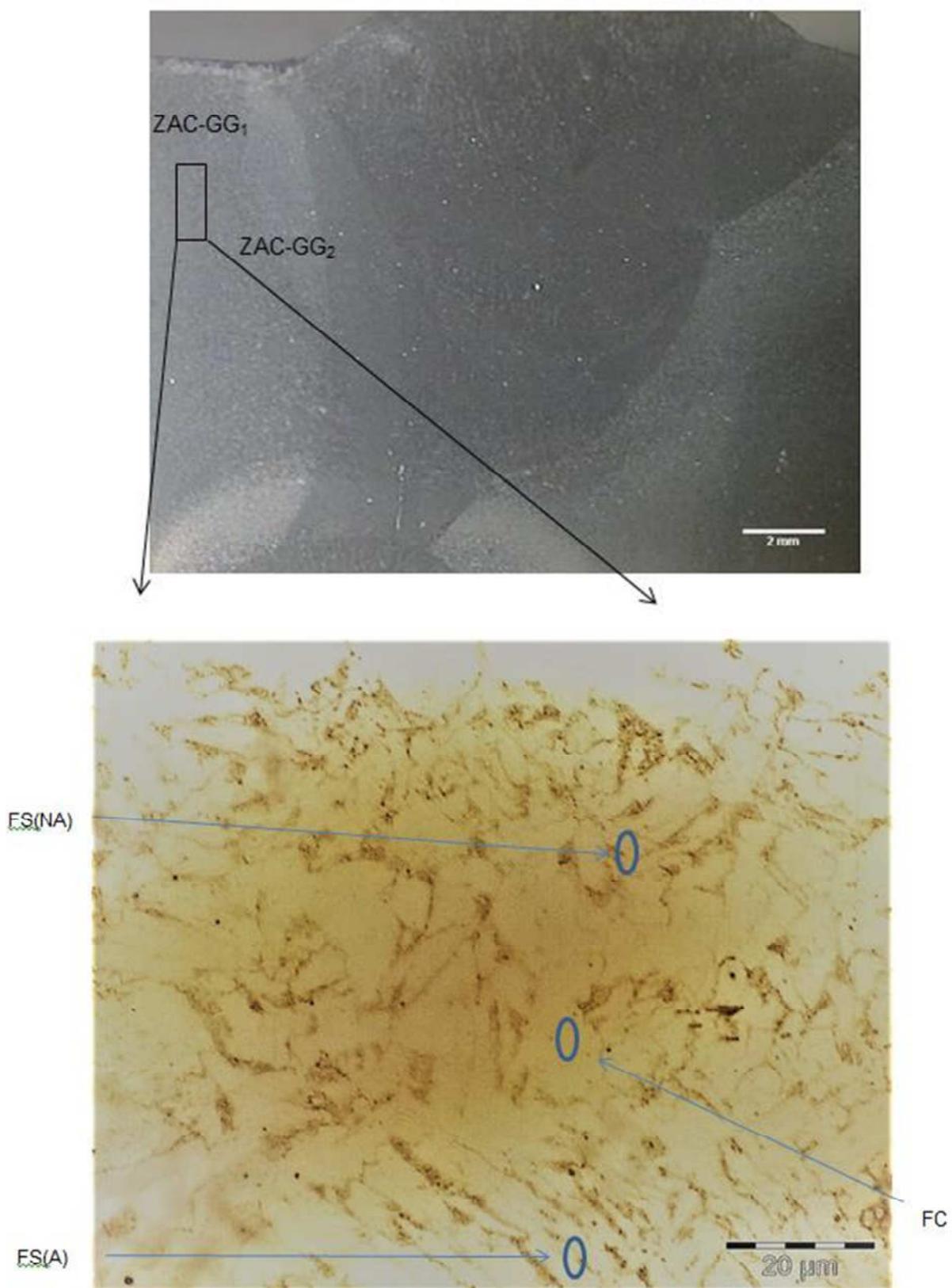


Figura 40 – Macro e microestrutura da amostra retirada da junta com dupla camada

Fonte: Autoria própria

Na ZAC-GG₁ encontram-se os mesmos principais constituintes daqueles verificados na soldagem da junta de referência e no tratamento térmico aplicado.

As microestruturas dos corpos de prova que foram soldadas com dupla camada apresentam transformações microestruturais junto a ZAC-GG da primeira camada; com o reaquecimento gerando regiões refinadas pela ZAC-GF da segunda camada e regiões não refinadas, mas que experimentaram transformações da ordem do TTPS (CRUZ, 2006).

A Tabela 14 indica o tamanho de grão ferrítico encontrado, média e o seu respectivo desvio padrão (DP).

Tabela 14 – Tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG₁ para a amostra com dupla camada

Região	Medição 1 (µm)	Medição 2 (µm)	Medição 3 (µm)	Média (µm)	Desvio Padrão (µm)
ZAC-GG ₁	15,24	16,82	15,96	16,01	0,65

Fonte: Autoria própria

4.5.4 Comparação entre a Junta de Referência, TTPS e com DC

Na Figura 41 é investigada uma comparação do comportamento microestrutural entre as amostras de referência, com tratamento térmico e na amostra com aplicação da técnica da dupla camada com as análises dos constituintes encontrados na região da ZAC próxima a linha de fusão.

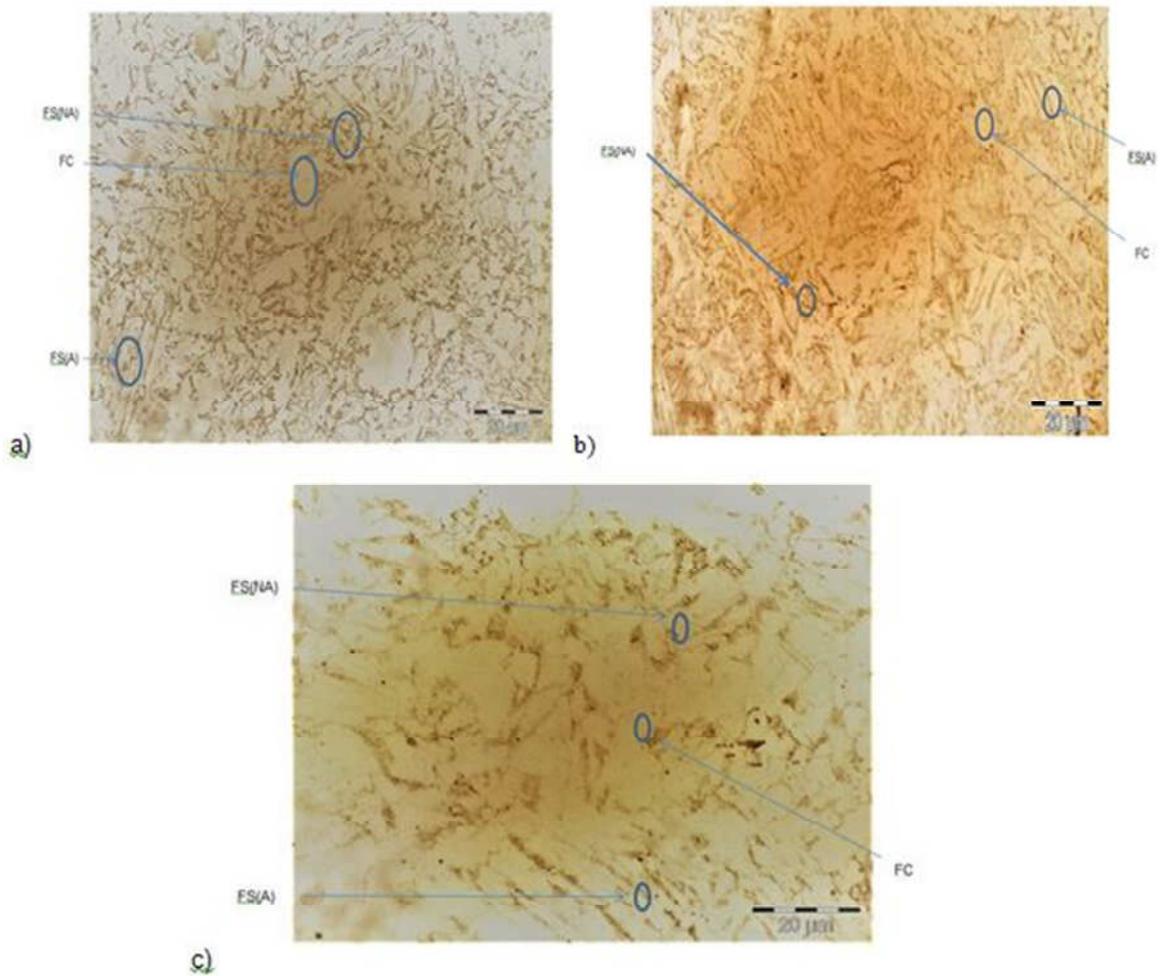


Figura 41 – Microestrutura do corpo de prova: a) amostra de referência b) com TTPS e c) dupla camada

Fonte: Autoria própria

A Tabela 15 retrata um quadro resumo da variação do tamanho de grão ferrítico encontrado entre as juntas analisadas.

Tabela 15 – Quadro resumo do tamanho de grão ferrítico da ZAC-GG para as amostras

Região	Junta de referência (µm)	Junta com TTPS (µm)	Junta com DC (µm)
ZAC-GG	12,27	12,55	16,01

Fonte: Autoria própria

Identificou-se aumento não significativo no tamanho de grão com o método da dupla camada, mantendo-se dentro da classificação como grãos finos - extrafinos, resultando em valores de dureza e microdureza compatíveis com um revenimento da zona afetada pelo calor da primeira camada, o que contribui para que técnica da dupla camada possa ser utilizada satisfatoriamente.

No estado da arte encontram-se estudos que indicam que apesar do aumento do grão a técnica da dupla camada pode ser aplicada satisfatoriamente desde que os resultados dos valores de dureza e microdureza estejam compatíveis com um provável revenimento da zona afetada pelo calor da primeira camada.

Farias e Aguiar (2003) e Silva *et al.* (2009) encontraram em seus respectivos trabalhos a respeito de dupla camada resultados semelhantes no que diz respeito a diminuição da dureza porém com regiões com granulação grosseira. O primeiro verificou que embora para as relações de energias 5/10 e 15/5 tenha havido o revenimento e consequente diminuição de dureza na zona dura, a granulação da ZAC-GG da primeira camada não foi suficientemente refinada. O segundo autor obteve o valor de dureza da ZAC sem TTPS reduzido para valores inferiores a 300 HV e semelhantes às amostras de teste submetidas ao tratamento térmico. Nas regiões entre passes e as extremidades da junta, havia regiões com granulação grosseira, mas sem altos níveis de dureza.

4.6 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.6.1 Dureza

4.6.1.1 Junta de Referência

Na Figura 42 são evidenciados os perfis de dureza levantados em três regiões distintas, topo, meio e raiz, da seção transversal das amostras da junta da referência desde a linha de fusão até o metal de base.

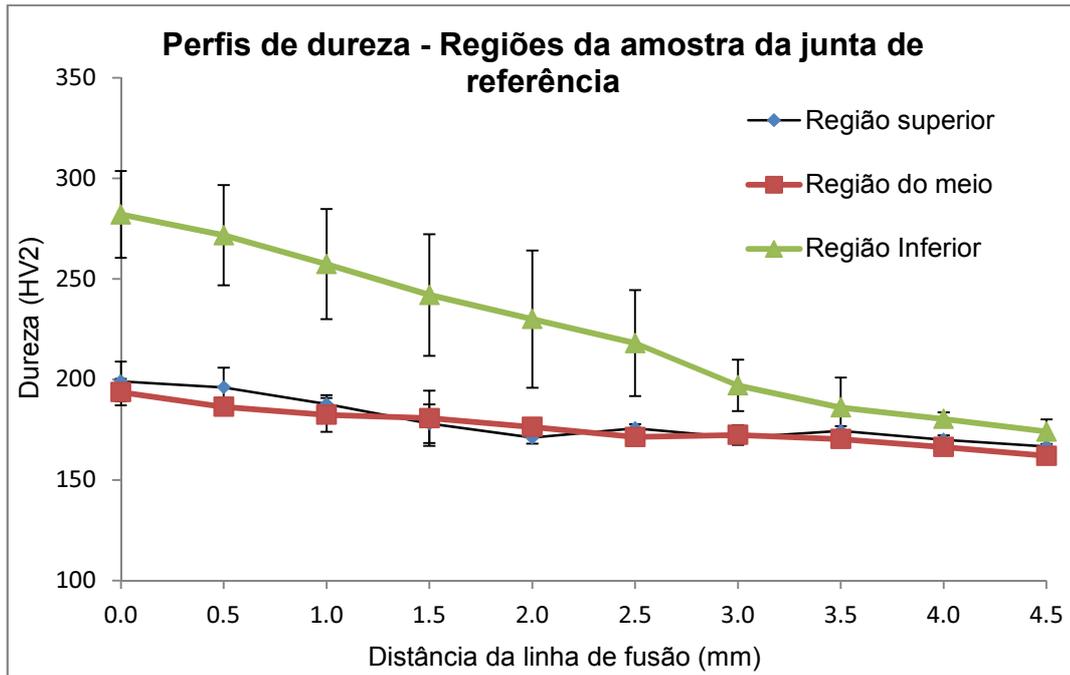


Figura 42 – Perfis de dureza para a amostra da junta de referência para as três regiões: superior, meio e inferior

Fonte: Autoria própria

Os valores de dureza obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 1,5 mm) na região superior e do meio da junta foram semelhantes. A região inferior apresenta uma dureza maior que as outras regiões provavelmente devido aos ciclos térmicos ocasionados pelo processo de goivagem e aplicação do passe de raiz adicional.

Para a região superior e meio da junta os menores valores de pico de dureza ficam em torno de 180 HV2 e os maiores valores de pico chegam próximos de 194 HV2. Já na região inferior da junta os menores valores de pico de dureza ficam em torno de 242 HV2 e os maiores valores na faixa de 282 HV2 mostrando a diferença em torno da dureza entre estas regiões.

Na Figura 43 são demonstrados os perfis de dureza média das três regiões analisadas da seção transversal das amostras da junta da referência desde a linha de fusão até o metal de base.

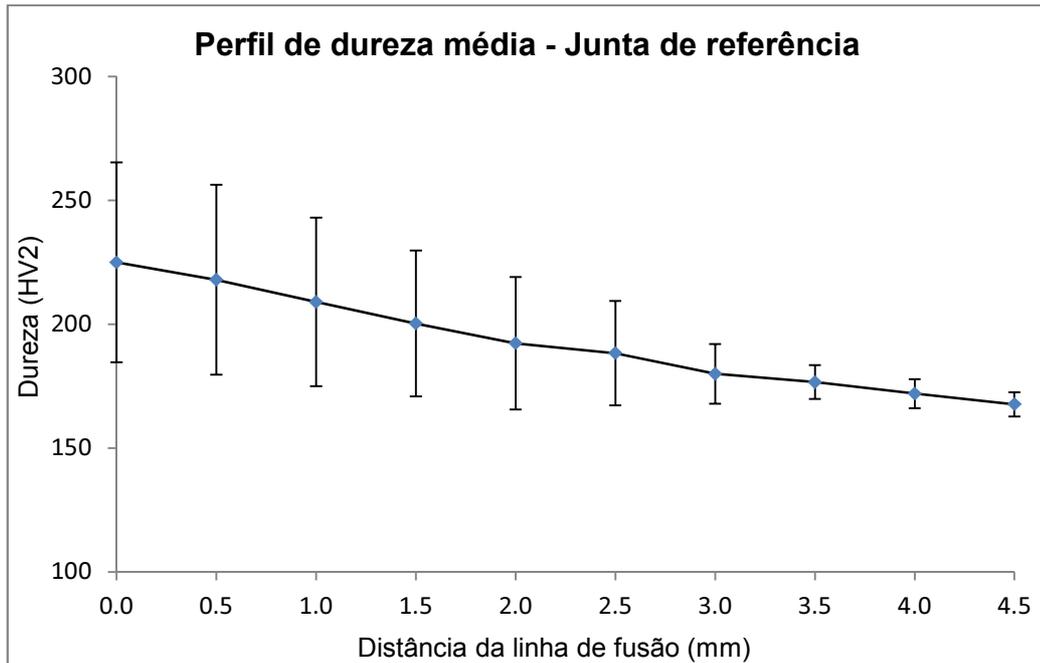


Figura 43 – Perfil de dureza média para a amostra da junta de referência

Fonte: Autoria própria

Os valores de dureza média obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 1,5 mm) para a amostra da junta de referência apresentam menores valores de pico de microdureza ficando em torno de 200 HV2 e os maiores valores de pico chegam próximos de 225 HV2 apresentando assim valores de dureza próximos sem mostrar grandes picos com valores muito elevados.

4.6.1.2 Junta com TTPS

Na Figura 44 são mostrados os perfis de dureza levantados em três regiões distintas: superior, meio e inferior da seção transversal das amostras da junta com tratamento térmico desde a linha de fusão até o metal de base.

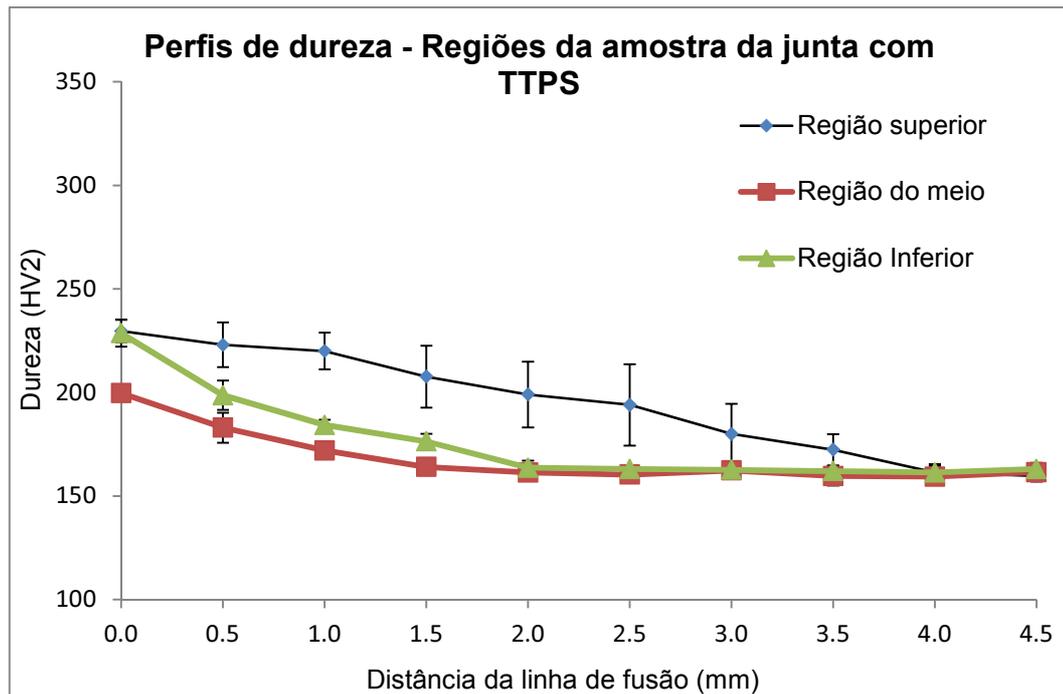


Figura 44 – Perfis de dureza para a amostra da junta com TTPS para as três regiões: superior, meio e inferior

Fonte: Autoria própria

Os valores de dureza obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 1,5 mm) na região superior e do meio da junta foram semelhantes. A região superior apresenta uma dureza maior que as outras regiões.

Para a região inferior da junta os menores valores de pico de dureza ficam em torno de 180 HV2 e os maiores valores na faixa de 230 HV2, já para o meio da junta os menores valores de pico de dureza ficam ao redor de 170 HV2 e os maiores valores de pico próximos de 200 HV2. Já na região superior da junta os menores valores de pico de dureza ficam em torno de 200 HV2 e os maiores valores em 230 HV2 mostrando a diferença em torno da dureza entre estas regiões.

Na Figura 45 são apresentados os perfis de dureza média das três regiões da seção transversal das amostras da junta com tratamento térmico desde a linha de fusão até o metal de base.

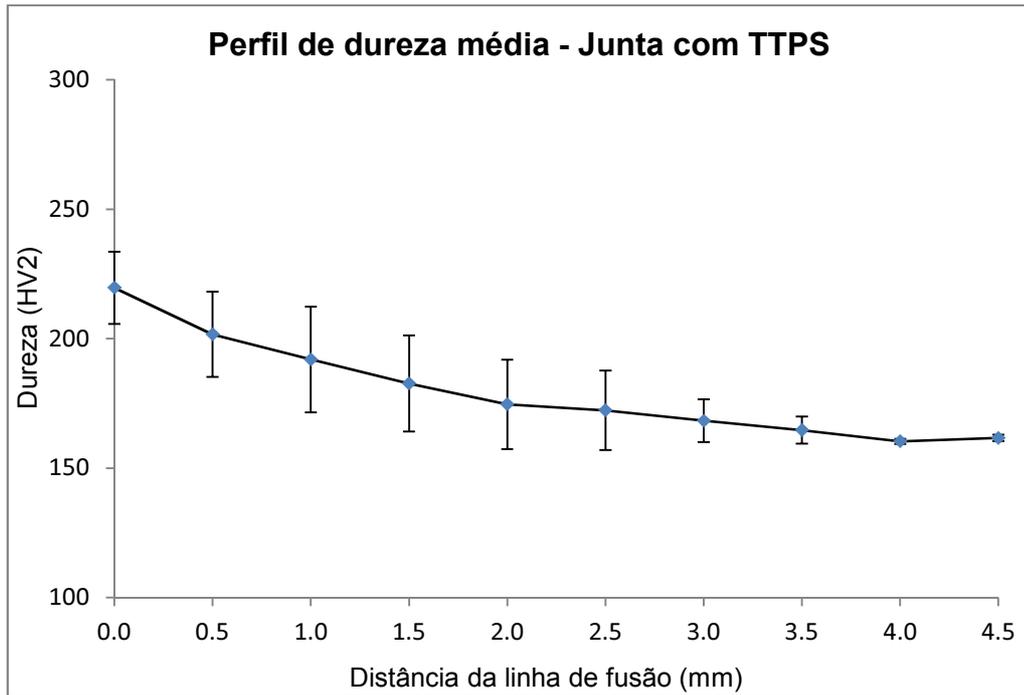


Figura 45 – Perfis de dureza média para a amostra da junta com TTPS

Fonte: Autoria própria

Os valores de dureza média obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 1,5 mm) para a amostra da junta de referência apresentam menores valores de pico de microdureza ficando ao redor de 183 HV2 e os maiores valores de pico próximos de 220 HV2 apresentando assim valores de dureza próximos sem mostrar grandes picos com valores muito elevados.

4.6.1.3 Junta com Dupla Camada

Na Figura 46 são exibidos os perfis de dureza levantados em três regiões distintas: superior, meio e inferior da seção transversal das amostras da junta com aplicação da dupla camada desde a linha de fusão da ZAC-GG₁ até o metal de base.

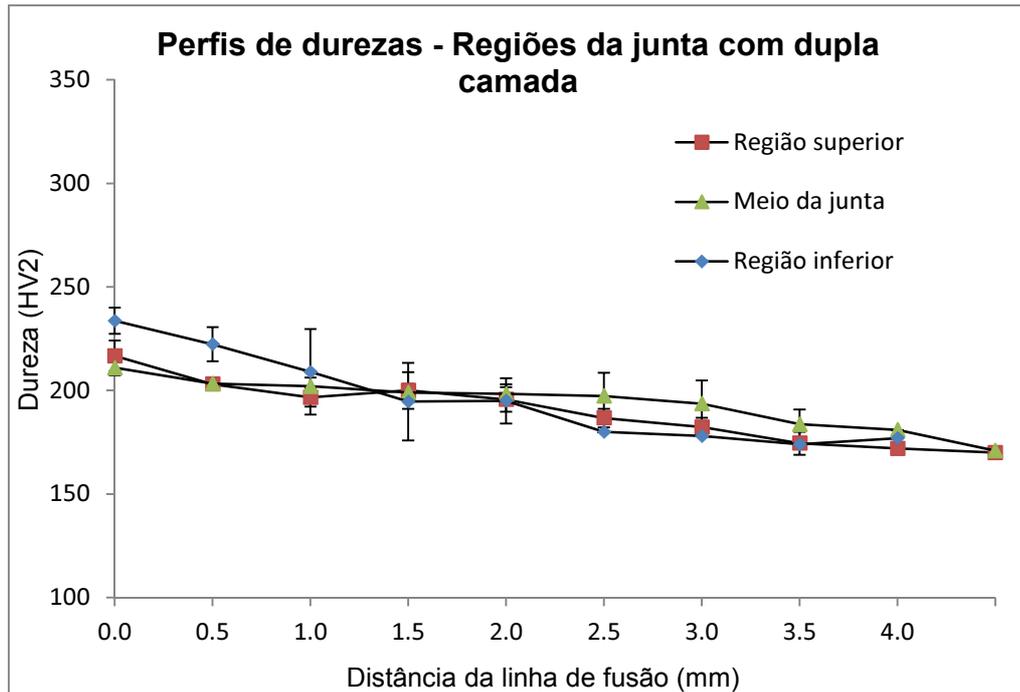


Figura 46 – Perfis de dureza para a amostra da junta com DC para as três regiões: superior, meio e inferior

Fonte: Autoria própria

Os valores de dureza obtida na região da ZAC-GG da primeira camada (de 0,0 até 1,5 mm) na região superior, meio e inferior da junta foram semelhantes.

Para a região inferior da junta os menores valores de pico de dureza ficam em torno de 195 HV2 e os maiores valores ao redor de 234 HV2, já para o meio da junta os menores valores de pico de dureza ficam na faixa de 200 HV2 e os maiores valores de pico próximos de 211 HV2. Já na região superior da junta os menores valores de pico de dureza ficam em torno de 200 HV2 e os maiores valores em 217 HV2.

Na Figura 47 são evidenciados os perfis de dureza média das três regiões da seção transversal das amostras da junta com aplicação da dupla camada desde a linha de fusão da ZAC da primeira camada até o metal de base.

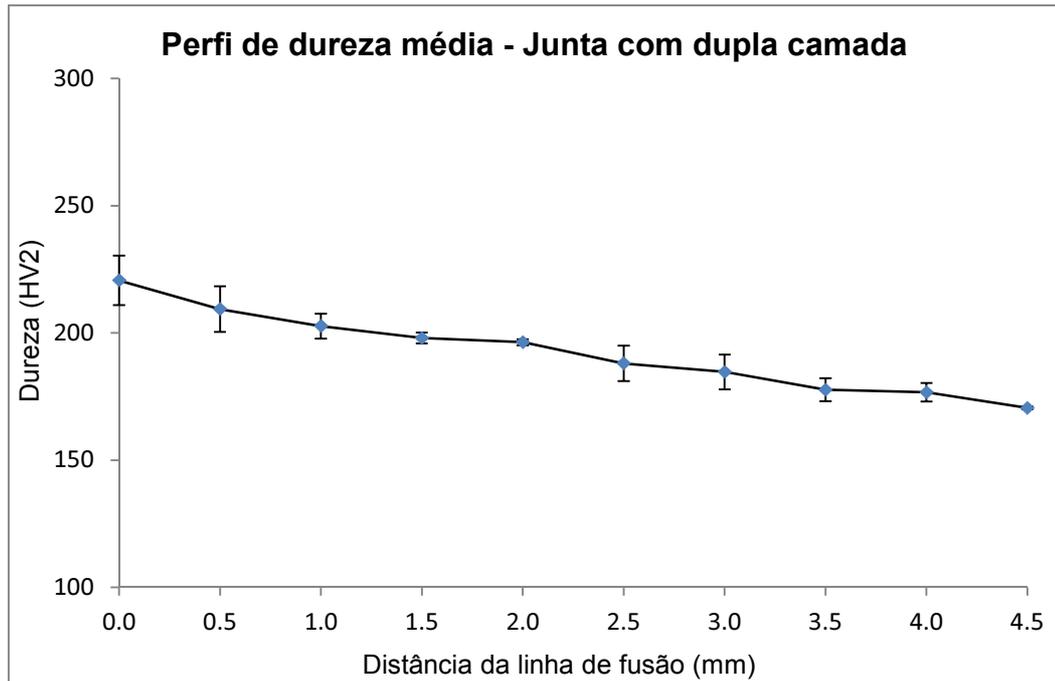


Figura 47 – Perfis de dureza média para a amostra da junta com DC

Fonte: Autoria própria

Os valores de dureza média obtidos na região da ZAC-GG da primeira camada (de 0,0 até 1,5 mm) para a amostra com dupla camada apresentam menores valores de pico de dureza ficaram em torno de 198 HV2 e os maiores valores de pico encontrados chegaram próximos de 221 HV2 apresentando assim valores de dureza próximos sem mostrar grandes picos com valores elevados.

4.6.1.4 Comparação entre a Junta de Referência, TTPS e DC

Na Figura 48 são apresentados os perfis de dureza média levantados na seção transversal das amostras da junta de referência, com TTPS e com aplicação da dupla camada desde a linha de fusão até o metal de base.

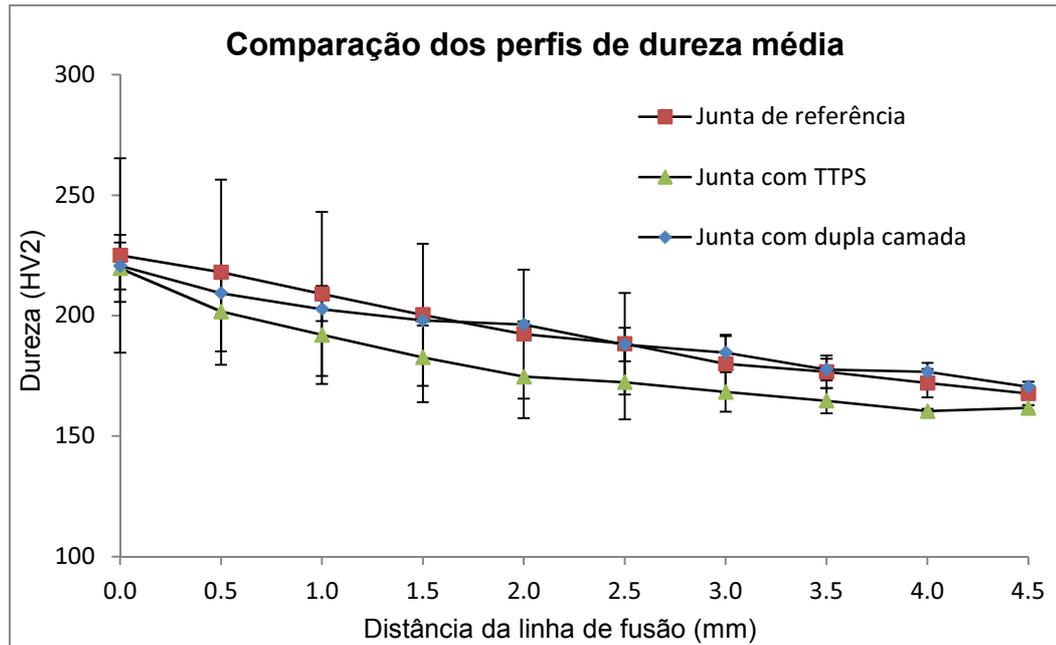


Figura 48 – Comparação dos perfis de dureza média para a amostra da junta de referência, TTPS e com DC

Fonte: Autoria própria

A Tabela 16 demonstra um quadro resumo do pico da dureza média encontrada entre as juntas analisadas.

Tabela 16 – Quadro resumo do pico de dureza média da ZAC-GG para as amostras

Região	Junta de referência (HV2)	Junta com TTPS (HV2)	Junta com DC (HV2)
ZAC-GG	225	220	221

Fonte: Autoria própria

O valor de pico de dureza média diminui nas propostas avaliadas tanto para a amostra com tratamento de alívio de tensões quanto na aplicação da dupla camada.

Os resultados são coerentes com os encontrados por Cavalcante *et al.* (2016) e Aloraier *et al.* (2014). Ambos os autores, utilizando a técnica da dupla camada, verificaram eficácia na redução nas medidas de dureza. As amostras com utilização do tratamento térmico convencional apresentaram dureza mais baixa, porém com valores em ambas as técnicas aceitáveis.

4.6.2 Microdureza

4.6.2.1 Junta de Referência

Na Figura 49 são apresentados os perfis de microdureza levantados em duas regiões distintas: entre passes e no centro do cordão da seção transversal das amostras da junta da referência desde a linha de fusão até o metal de base.

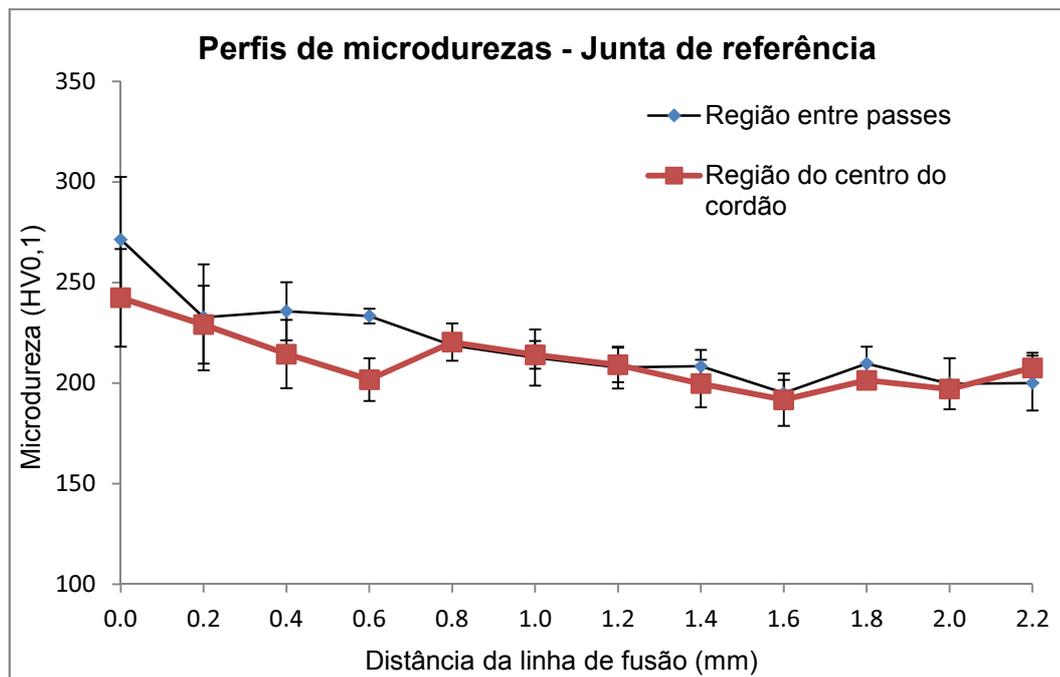


Figura 49 – Perfis de microdureza para a amostra da junta de referência para as regiões entre passes e centro do cordão

Fonte: Autoria própria

Observa-se que os pontos mais críticos da ZAC estão localizados nas regiões entre passes, onde são encontrados os maiores valores de microdureza. Este resultado é compatível com o encontrado por Brito (2014) em seu trabalho. Este mesmo autor avalia que esse efeito pode estar associado a dificuldade de uma eficiente sobreposição dos ciclos térmicos nessas regiões.

Os valores de microdureza obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 0,6 mm) para a amostra da junta de referência apresentam valores de 271 a 233 HV0,1 de microdureza para a região entre passes enquanto no centro de passes os valores ficaram entre 242 a 202 HV0,1.

Na Figura 50 são retratados os perfis de microdureza média levantados na seção transversal das amostras da junta da referência desde a linha de fusão até o metal de base.

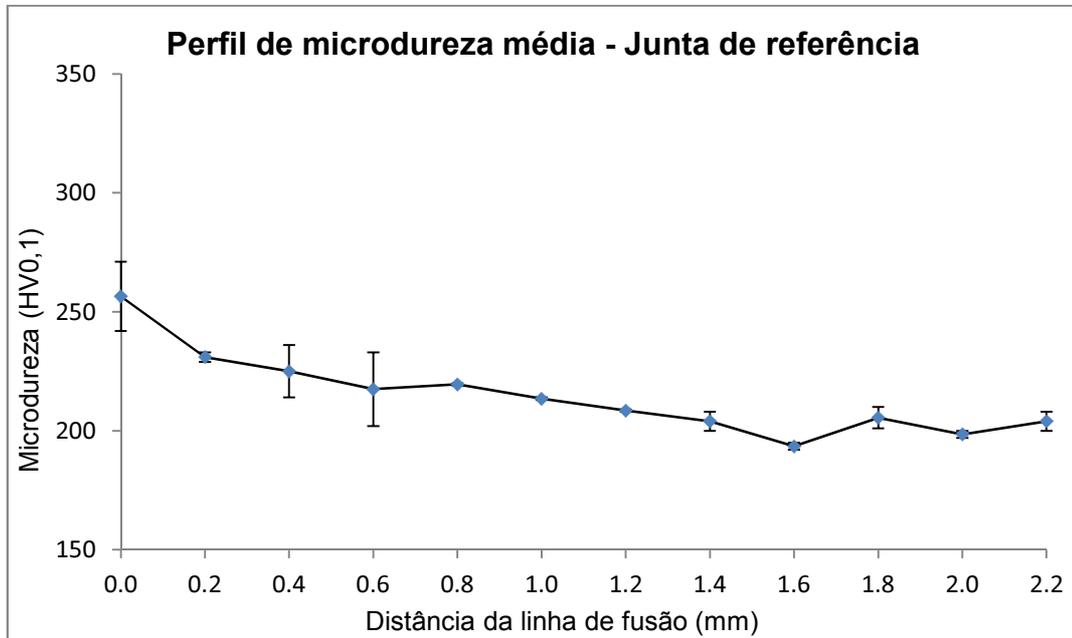


Figura 50 – Perfis de microdureza média para a amostra da junta de referência

Fonte: Autoria própria

Os valores de microdureza média obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 0,6 mm) para a amostra da junta de referência apresentam menores valores de pico de microdureza ficando na faixa de 218 HV0,1 enquanto os maiores valores de pico chegam próximos de 257 HV0,1.

4.6.2.2 Junta com TTPS

A Figura 51 demonstra os perfis de microdureza levantados em duas regiões distintas: entre passes e no centro do cordão da seção transversal das amostras da junta com tratamento térmico desde a linha de fusão até o metal de base.

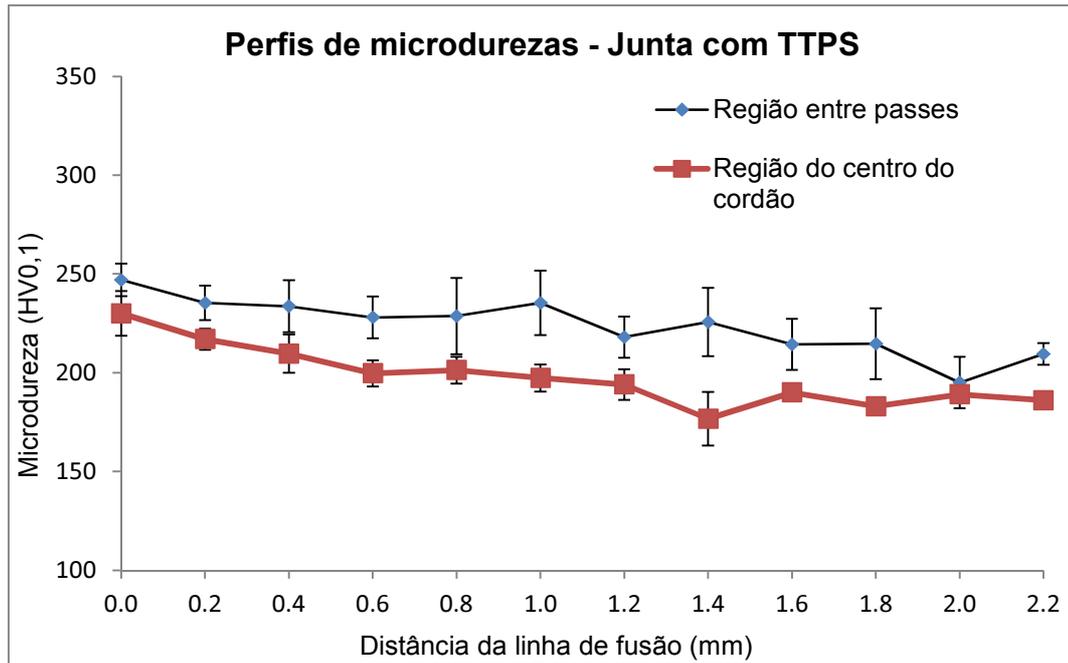


Figura 51 – Perfis de microdureza para a amostra com TTPS para as regiões entre passes e centro do cordão

Fonte: Autoria própria

Os valores de microdureza obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 0,6 mm) para a amostra da junta com TTPS apresentam valores de 247 a 228 HV_{0,1} de microdureza para a região entre passes enquanto no centro de passes os valores ficaram entre 230 a 200 HV_{0,1}.

Na Figura 52 são apresentados os perfis de microdureza média levantados na seção transversal das amostras da junta com TTPS desde a linha de fusão até o metal de base.

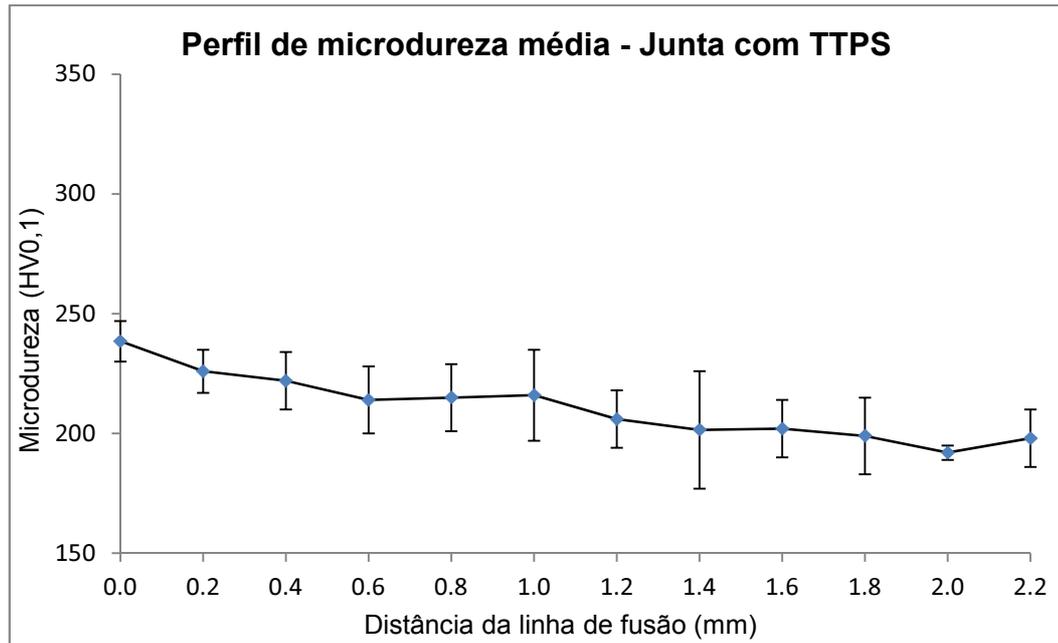


Figura 52 – Perfis de microdureza média para a amostra da junta com TTPS

Fonte: Autoria própria

Os valores de dureza média obtidos na região da ZAC-GG (de 0,0 até 0,6 mm) para a amostra da junta de referência apresentam menores valores de pico de microdureza ficaram em torno de 214 HV0,1 e os maiores valores de pico próximos de 240 HV0,1.

4.6.2.3 Junta com Dupla Camada

Na Figura 53 são retratados os perfis de microdureza levantados em duas regiões distintas: entre passes e no centro do cordão da seção transversal das amostras da junta com tratamento térmico desde a linha de fusão até o metal de base.

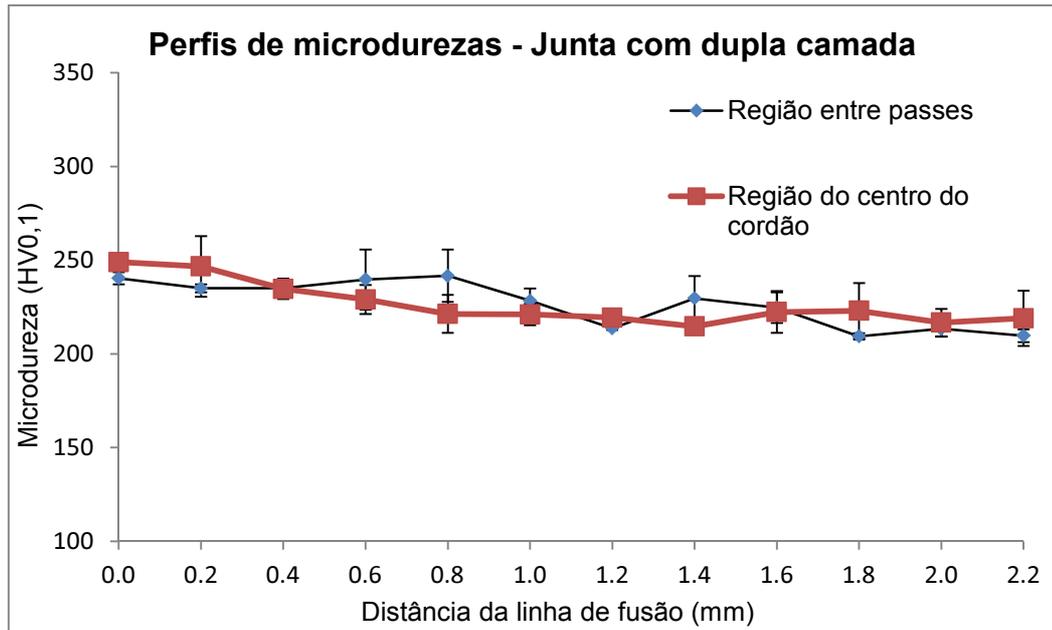


Figura 53 – Perfis de microdureza para a amostra da junta com DC

Fonte: Autoria própria

Os valores de microdureza obtidos na região correspondente a ZAC-GG₁ (de 0,0 até 0,6 mm) para a amostra com dupla camada apresentam valores de 240 a 235 HV0,1 de microdureza na região analisada entre passes de soldagem enquanto no centro de passes os valores ficam entre 249 a 229 HV0,1.

A Figura 54 exhibe os perfis de microdureza média levantados na seção transversal das amostras da junta da com dupla camada desde a linha de fusão ZAC da primeira camada até o metal de base.

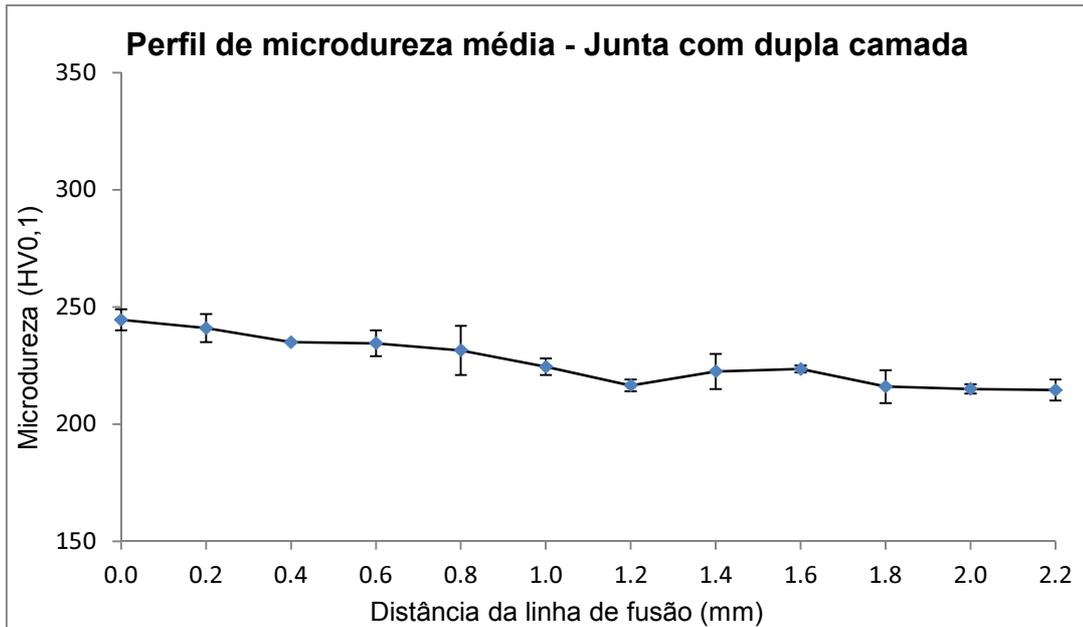


Figura 54 – Perfis de microdureza média para a amostra da junta com DC

Fonte: Autoria própria

Os valores de microdureza média obtidos na região da ZAC-GG₁ (de 0,0 até 0,6 mm) para a amostra com dupla camada apresentam menores valores de pico de microdureza ficando ao redor de 235 HV_{0,1} e os maiores valores de pico próximos de 245 HV_{0,1}.

4.6.2.4 Comparação entre a Junta de Referência, TTPS e DC

A Figura 55 indica os perfis de microdureza média levantados na seção transversal das amostras da junta da referência em comparação com as juntas com tratamento térmico e com dupla camada desde a linha de fusão até o metal de base.

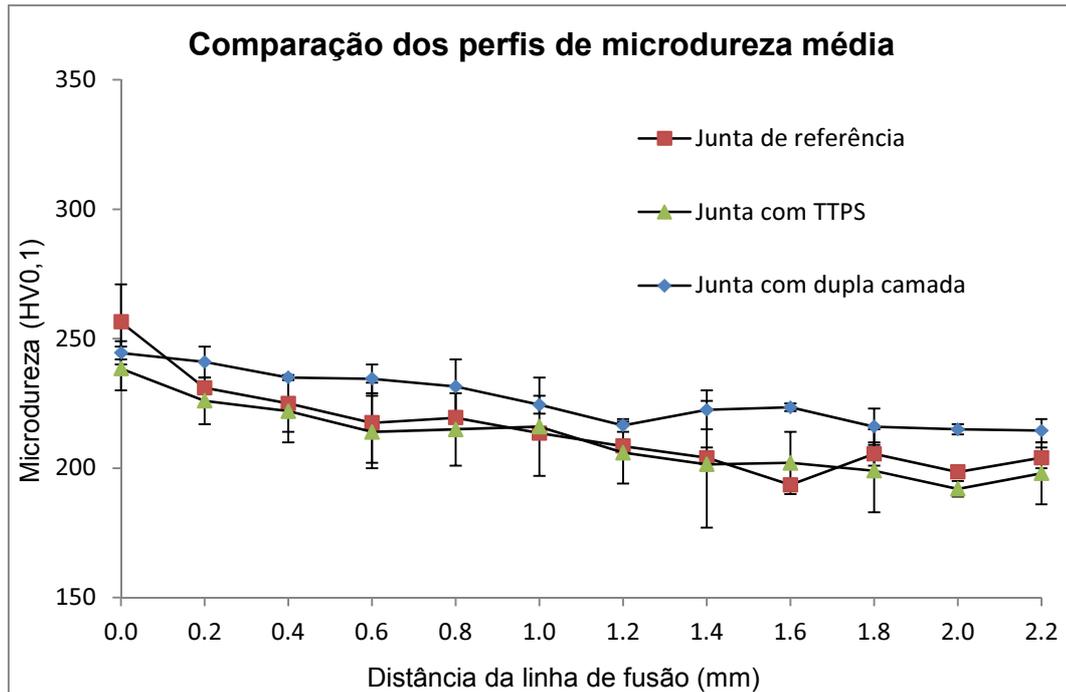


Figura 55 – Comparação dos perfis de microdureza média para a amostra da junta de referência, TTPS e com DC

Fonte: Autoria própria

A Tabela 17 mostra um quadro resumo do pico da microdureza média encontrada entre as juntas analisadas.

Tabela 17 – Quadro resumo do pico da microdureza média da ZAC-GG para as amostras

Região	Junta de referência (HV0,1)	Junta com TTPS (HV0,1)	Junta com DC (HV0,1)
ZAC-GG	257	239	245

Fonte: Autoria própria

O valor de pico de microdureza média encontrada confirma os resultados apresentados na medição de dureza avaliada tanto para a amostra com tratamento de alívio de tensões quanto na aplicação da dupla camada. Não havendo diferença significativa entre a junta com TTPS e a com dupla camada.

5 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados no aço ASTM A 131 Grau AH36 com espessura de 12,5 mm soldado pelo processo GMAW através da técnica da dupla camada em substituição ao tratamento térmico convencional pode-se relacionar os seguintes conclusões:

- Os resultados indicaram que a relação de energias de soldagem com 5/5, 5/9, 5/14 e 5/17 kJ/cm foram aprovadas através dos diagramas de decisão, porém a energia escolhida 5/14 kJ/cm foi a que apresentou o maior afastamento nos critérios de microdureza e microestrutura;
- Na soldagem com a dupla camada em uma amostra plana comprovou que a relação de energia escolhida apresentou ausência de zona endurecida na primeira camada através do revenimento ocasionado pela sobreposição dos passes;
- Verificou-se que apesar da preparação do chanfro reto ter apresentado imperfeições, posteriormente corrigidas, a soldagem da dupla camada não apresentou nenhum defeito ou descontinuidade adicional em relação aos outros corpos de prova (referência e TTPS);
- Identificou-se aumento não significativo no tamanho de grão com o método da dupla camada, mantendo-se dentro da classificação como grãos finos - extrafinos, resultando em valores de dureza e microdureza compatíveis com um revenimento da zona afetada pelo calor da primeira camada, o que contribui para que técnica da dupla camada possa ser utilizada satisfatoriamente;
- O valor de pico de dureza média encontrada diminuiu nas propostas avaliadas tanto para a amostra com tratamento de alívio de tensões quanto na aplicação da dupla camada. O valor de pico de microdureza média encontrada confirmou os resultados da dureza tanto para a amostra com tratamento de alívio de tensões quanto na aplicação da dupla camada;

- Considerando os resultados obtidos a substituição do tratamento térmico pela técnica da dupla camada pode ser realizada em casos que o tratamento térmico generalizado ou pela utilização de componentes de grande porte torna o processo oneroso ou ainda dificultado por questões técnicas.

6 TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de contribuir com a continuidade das pesquisas referentes ao uso de procedimento de soldagem com o uso da técnica da dupla camada estão listadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar os custos da substituição do tratamento térmico convencional pela técnica da dupla camada.
- Avaliar o efeito da aplicação da técnica da dupla camada em aços da classe ASTM A 131, com graus DH, EH e FH, aplicando diferentes combinações nos principais parâmetros de soldagem;
- Avaliar a influência do metal de adição nas propriedades mecânicas das juntas soldadas com a técnica da dupla camada;
- Avaliar a tenacidade ao impacto na aplicação da técnica da dupla camada;
- Avaliar os perfis das tensões residuais pela soldagem com a técnica da dupla camada;

REFERÊNCIAS

- ALORAIER, A. S.; IBRAHIM, R. N.; GHOJEL, J. Eliminating post-weld heat treatment in repair welding by temper bead technique: role bead sequence in metallurgical changes . **Journal of Materials Processing Technology**, Melbourne, n. 153-154. p. 392-400, 2004.
- ALORAIER, A. S.; IBRAHIM, R. N.; THOMSON, P. FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Melbourne, n. 83. p. 394-398, 2006.
- ALORAIER, A.; JOSHI, S.; PRICE, J. W. H.; ALAWADHI, K. Hardness, microstructure, and residual stresses in low carbon steel welding with post-weld heat treatment and temper bead welding . **Metallurgical and Materials Transactions A**, Melbourne, v. 45A, p. 2030-2037, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **A131A/A131M**: Standard specification for structural steels for ships. West Conshohocken, United States, 2001.
- ANDRADE, T. C. **Desenvolvimento e análise de técnicas de soldagem de reparos com deposição em dupla camada de aços inoxidáveis AWS ER309L e AWS ER347 aplicados sobre aços estruturais 2,25Cr-1Mo e 2,25Cr-1Mo-025V**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- ARAÚJO, L. C. S.; CÂNDIDO, L. C.; TRINDADE, V. B., PORCARO, R. R. Avaliação da influência de tratamentos térmicos pós-soldagem sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de juntas de um aço API 5L X70Q. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 2, p. 171-179. jul./set. 2015.
- AZEVEDO, A. G. L. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045**. 2002. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- BUENO, E. R. **Desenvolvimento do Procedimento de Soldagem do Aço AISI 4140 sem Tratamento Térmico Posterior**. 1999. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BRITO, F. F. G. **Avaliação da técnica da dupla camada na soldagem TIG considerando a tenacidade e características metalúrgicas de juntas de aço AISI 8630M e ASTM A182 F22**. 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- CAVALCANTE, N. E.; ANDRADE, T. C.; PINHEIRO, P. H. M.; MIRANDA, H. C.; MOTA, M. F.; AGUIAR, W. M. Estudo de procedimentos de soldagem MIG/MAG para aplicação de revestimento de liga de níquel inconel 625 em aço estrutural ASTM A387 gr.11. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 21, n. 1, p. 70-82. jan./mar. 2016.

CHEN, Y. C.; CHEN, C. C., YANG, J. Microstructure characterization of nanometer carbides heterogeneous precipitation in Ti–Nb and Ti–Nb–Mo steel. **Materials Characterization**, n. 88, p. 69-79, 2014.

COZZA, L. M.; SILVA JUNIOR, M. F.; MEDEIROS, J. L. B.; BIEHL, L. V.; MARTINS, C. O. D.; SOUZA, J. Efeito do tratamento térmico de alívio de tensões na microestrutura e tamanho de grão de um aço microligado. **Revista Liberato**, v. 19, n. 31, p. 01-134. jan./jun. 2018.

CRUZ, R. L. S. **Avaliação dos efeitos da técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM A 516 grau 60**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

DE MEESTER, B. The weldability of modern structural TMCP steels. **ISIJ International**, v. 37, n. 6, p. 537-551. 1997.

FARIAS, J. P.; AGUIAR, W. M. Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 24, n. 1, p. 26-36, jun. 2003.

HU, J.; DU, L.; WANG, J.; GAO, C. Effect of welding heat input on microstructures and toughness in simulated CGHAZ of V–N high strength steel. **Materials Science and Engineering A**, n. 577, p. 161-168. 2013.

JORGE, J. C. F.; SOUZA, L. F. G.; MAROUÇO, E. S.; SANTOS, O. R.; DINIZ, J. L. C. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 3, p. 347-358. Out./dez. 2015.

LAN, L.; CHANG, Z.; KONG, X.; QIU, C.; ZHAO, D. Phase transformation, microstructure, and mechanical properties of X100 pipelines steels based on TMCP and HTP concepts. **Journal of Materials Science**, n. 52, p. 1661-1678. 2017

LANT, T.; ROBINSON, D. L.; SPAFFORD, B.; STORESUND, J. Review of weld repair procedures for alloy steels designed to minimise the risk of future cracking. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, n. 78, p. 813-818, 2001.

LIMA, C. A. S. **Influência do tratamento térmico de alívio de tensões associado à elevada energia de soldagem na tenacidade da zona termicamente afetada de um aço TMCP microligado aplicado em estruturas off-Shore**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

LING, K. H.; FUH, Y. K.; KUO, T. C.; TU, S. X. Effect of welding sequence of a multi-pass temper bead in gas-shielded flux-cored arc welding process: hardness, microstructure, and impact toughness analysis. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, p. 1033-1046, 2015.

LU, S.; WEI, S.; LI, D.; LI, Y. Effects of heat treatment process and niobium addition on the microstructure and mechanical properties of low carbon steel weld metal. **Journal of Materials Science**, v. 45, p. 2390-2402, 2010.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas. Centro de Tecnologia. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

MARCONI, C.; CASTILLO, M. J.; BOCCANERA, L.; RAMINI, M. Influencia del calor aportado y metal de aporte sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de juntas soldadas por FCAW de acero microaleado de alta resistencia. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 2, p. 148-159. jul./set. 2015.

NIÑO, C. H.; BUSCHINELLI, A. J. A.; RIBEIRO, H. O. Reparo por soldagem de componentes em aços ferríticos sujeitos a corrosão sob tensão por H₂S. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, n. 2, 2003, Uberlândia.

OLIVEIRA, G. L. **Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas**. 2013. 228 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

OLIVEIRA, G. L., SILVA, T. F., MIRANDA, H. C., MOTTA, M. F. Avaliação do efeito da energia de soldagem sobre as tensões residuais resultantes em juntas soldadas com multipasse. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 3, p. 218-224. Jul./set. 2010.

PINHEIRO, P. H. M. **Estudo da soldagem MIG/MAG aplicada a reparo dos aços Cr-Mo e Cr-Mo-V utilizando a técnica de deposição controlada com dupla camada**. 2017. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

RIBEIRO, A. C. N.; HENEIN, H.; IVEY, D. G.; BRANDI, S. D. Evaluation of AH36 microalloyed steel welded joint by submerged arc welding process with one and two wires **Materials Research**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 143-152, 2016.

SILVA, M. M.; OLIVEIRA, W.C.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A.; MOTTA, M. F. Caracterização de solda de revestimento de AWS 317L depositados por GMAW duplo arame em aços ASTM A 516 Gr 60 para uso na indústria do petróleo. **Revista Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 3, p. 225-233. Jul./set. 2010.

SILVA, C. C.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; MOURA, C. R. O.; AGUIAR, W. M.; FARIAS, J.P. Evaluation of AISI 4140 steel repair without post-weld heat treatment. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 18, n. 3, p. 324-331, 2009.

SISI, A.; MIRSALEHI, S. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of X52 linepipe HFIW joints. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 24, n. 4, p. 1626-1633, 2015.

TSAY, L.; CHERN, T.; GAU, C.; YANG, J. Microstructures and fatigue crack growth of EH 36 TMCP steel weldments. **International Journal of Fatigue**, v. 21, n. 8, p. 857-864, 1999.

WU, D.; HAN, X.; TIAN, H.; LIAO, B.; XIAO, F. Microstructural characterization and mechanical properties analysis of weld metals with two Ni contents during post-weld heat treatments. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 46A, p. 1973-1984, 2015.