



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS**

PEDRO HELTON MAGALHÃES PINHEIRO

**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**

FORTALEZA

2017

PEDRO HELTON MAGALHÃES PINHEIRO

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.

Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciências de Materiais. Área de concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de
Miranda

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pinheiro, Pedro Helton Magalhães.

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 / Pedro Helton Magalhães Pinheiro. – 2017.

302 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.

1. Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada. 2. Soldagem de Reparo. 3. Aço CrMo. 4. Aço CrMoV. I. Título.

CDD 620.11

PEDRO HELTON MAGALHÃES PINHEIRO

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.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciências de Materiais. Área de concentração: Propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Aprovada em: 01/12/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cleiton Carvalho Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Temístocles de Sousa Luz
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

AGRADECIMENTOS

Primeiro de tudo, gostaria de agradecer a Deus pelas bênçãos derramadas sobre mim, por me iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente e não desanimar com as dificuldades. Toda honra e toda glória pertence a Deus.

Agradeço ao meu pai, Neles, por todos os sacrifícios e dedicação em proporcionar-me as melhores condições para chegar até aqui. Nunca conseguirei agradecer o suficiente todo o apoio, incentivo e amor.

Agradeço à minha mãe, Lúcia, pelo amor incondicional e pelas orações proferidas no grupo “Mães de Joelhos, Filhos de Pé”.

Agradeço à minha namorada, Flaviana, pelo seu amor, pela sua paciência, pela compreensão na minha ausência, pelo seu incentivo e principalmente pela ajuda nas soldagens aos sábados e aos domingos (não foram poucas).

Agradeço à toda minha família, em especial as minhas irmãs Lélia e Lucianna, meu cunhado Abinadabi, aos sobrinhos Nicolás e a Mariana, e a minha prima lara, pelo carinho e apoio.

Agradeço ao Prof. Hélio, por mais uma vez confiar em mim para realização deste trabalho, pela orientação e pela ajuda ao longo dos anos de Engesolda/LPTS. Para mim, é uma imensa honra e orgulho tê-lo como orientador.

Agradeço especialmente aos bolsistas do HDT, Ana Maria, Victor Leão, Felipe Wendrio, Joel, Yuri, Aglailton, Rinaldo, Yanka, Carlos Eduardo e Amaral. Sem a dedicação de vocês, não teria conseguido alcançar os objetivos deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Willys, ao Prof. Cleiton e ao Prof. Marcelo pelas imensuráveis contribuições, pelas orientações, pelos conhecimentos repassados e acima de tudo pela amizade.

Agradeço ao técnico de soldagem, David, pela ajuda na realização das soldagens.

Agradeço à Rafaella pelo carinho, pela ajuda, pelos valorosos conselhos e principalmente pela sua amizade ao longo da graduação e pós-graduação.

Agradeço à Marília, pela ajuda e dedicação nas soldagens, pela amizade e pelo apoio.

Agradeço à Marcela e à Nathália Figueiredo, pela amizade e incentivo.

Agradeço à Nathalia Cavalcante e à Tathiane, pela ajuda no início do projeto HDT.

Agradeço aos amigos da graduação, Adroaldo, João Victor e Felipe, pela amizade.

Agradeço aos amigos da pós-graduação, Davi Aires, Carol, Kamilla, Salvador, Miná, Daut, Yuri e Gebson.

Agradeço à Edleusa e ao Roger, pelo apoio e pela amizade.

Agradeço a todos os integrantes do Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem–LPTS-UFC.

Agradeço à Petrobras/Cenpes, em especial, ao Diego Garcia pelas orientações e apoio na pesquisa.

“Mas os que esperam no Senhor renovarão as forças, subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão”.

Isaías 40:31

RESUMO

Os aços CrMo e CrMoV são amplamente utilizados em equipamentos destinados ao refino do petróleo e tratamento dos seus derivados. O ciclo de operação ocorre em condições severas de operação, como temperatura e pressão elevadas, além da presença de hidrogênio. Os tambores de coque e os reatores de hidrotreatamento são exemplos destes equipamentos. Os tambores de coque são normalmente fabricados com o aço ASTM A387 Gr.11 (aço CrMo) e os reatores de hidrotreatamento são exemplos de equipamentos fabricados com aço ASTM A387 Gr22 (aço CrMo) e com o aço ASTM A542 Tipo D (aço CrMoV). Problemas degenerativos exigem, em determinados momentos da vida útil de um equipamento, intervenções para realização de reparos por soldagem para recompor sua condição de funcionamento, garantir a segurança operacional e manter a qualidade do produto desejado. Contudo, tais paradas representam um alto custo de execução, visto que os procedimentos utilizados atualmente envolvem o tratamento térmico pós-soldagem (TTPS), de acordo com exigências nacionais e internacionais. A aplicação de técnicas especiais de soldagem que proporcionam a adequada seleção de parâmetros para a soldagem de duas camadas sem a necessidade de tratamento térmico pós-soldagem é de grande importância no contexto científico e tecnológico, com grande aplicação industrial. No entanto, a aplicação de técnicas especiais alternativas com o intuito de se evitar o TTPS para aplicações de reparos não é simples e, de uma forma geral, sem critérios baseados em amplo estudo exploratório para as condições industriais. Desta forma, o objetivo geral é estudar o efeito da soldagem MIG/MAG de aços CrMo e CrMoV com a aplicação da técnica de deposição controlada com dupla camada (TDC-DC) para reparo similar (Parede) e dissimilar (Revestimento), considerando as principais transformações metalúrgicas e alterações de propriedade. Para viabilizar este objetivo, foi utilizada a Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada (TDC-DC) de forma a obter as melhores combinações de parâmetros e técnicas de soldagem visando a redução de dureza e refinamento dos grãos da ZAC da dupla camada. A escolha das combinações foi por meio do Diagrama de Decisão construído a partir dos critérios de microdureza e de microestrutura. As amostras soldadas com dupla camada aprovadas apresentaram satisfatórios níveis de dureza e de

refinamento de grãos. As ZAC's das amostras reprovadas pelos diagramas de decisão apresentaram valores de dureza elevados e crescimento de grão exagerado. O eletrodo protótipo (CrMoV) apresentou boas características operacionais na soldagem, entretanto, as propriedades da zona fundida não atenderam aos requisitos de tenacidade. As soldagens simulando reparo apresentaram excelentes resultados nas ZAC's dos aços ASTM A387 Gr11 e Gr22, tornando bastante promissora a aplicação destes procedimentos em reparo de equipamentos. Para o reparo do aço ASTM A542 Tipo D, são necessários novos estudos a fim de melhorar as propriedades obtidas na soldagem dissimilar. E para a soldagem similar, faz-se necessário o desenvolvimento de novos consumíveis que proporcionem propriedades mecânicas adequadas às normas vigentes.

Palavras-chave: Aço CrMo. Aço CrMoV. Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada, Soldagem de Reparo.

ABSTRACT

CrMo and CrMoV alloys steels are widely used for manufacturing of equipment for oil refining and by-products. Operation cycles for those equipment (coke vessels and hydrotreatment reactors, for example) occur in severe conditions, such as high temperature and pressure levels, as well as the presence of hydrogen. Coke vessels are usually produced with ASTM A387 Gr11 steel (CrMo steel) while hydrotreatment reactors are composed by ASTM A387 Gr22 (CrMo steel) along with ASTM A542 Type D (CrMoV steel). Due to wear problems caused by continuous exposure to those conditions, at certain moments of a given equipment's lifetime, welding repair procedures are required, in order to recover dimensions and restore important properties such as corrosion resistance, assure operational safety and guarantee product quality. However, maintenance interventions represent significant costs, provided specially due to the post weld heat treatment (PWHT) requested in international standards. The application of special welding techniques to provide final microstructure and properties/mechanical properties are very interesting and have a great attractiveness an adequate parameter selection for the welding of two layers with no need for PWHT is of great importance not only from a scientific and technological point of view but also because of its industrial applications. However, the use of alternatives techniques in order to avoid PWHT in repair applications is not simple and not always follow some defined criteria, being based on preliminary experimentation which simulate industrial conditions. Therefore, the main objective of this study is to evaluate the effect of GMAW welding of CrMo and CrMoV steels using the Controlled Deposition Technique with Double Layer for similar (base metal) and dissimilar (coating) repair welding considering the main metallurgical transformations and property changes. The Controlled Deposition Technique with Double Layer was used to obtain the best combinations of welding parameters and techniques in order to reduce hardness and produce the CGHAZ of the first layer grain refinement. The choice of heat input combinations was based on the Decision Diagram built from microstructure and micro hardness criteria. The approved samples welded with double layer presented acceptable hardness and grain refinement levels. Disapproved samples presented high hardness levels in the HAZ together with grain growth.

The prototype electrode (CrMoV) has shown good operational characteristics in welding, although the weld metal's properties did not meet the toughness requirements. The welds simulating ASTM A387 Gr11 and Gr22 repair achieved excellent results in the HAZ, which means the procedure actually has potential for industrial repair application. Further investigation is required in order to improve the properties obtained for dissimilar welding repair of the ASTM A542 Type D steel. The improvement of the similar welding would be allowed by the development of new consumables, able to provide adequate mechanical properties, according to the current standards.

Keywords: CrMo steel. CrMoV steel. Controlled Deposition Technique with Double Layer, Repair Welding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama TRC - Aço 2,25Cr-1,0Mo.	39
Figura 2 - Microestrutura típica do aço 2,25Cr-1,0Mo.	39
Figura 3 - Desenho esquemático do fenômeno de ataque por hidrogênio.	46
Figura 4 - Curva de Nelson.	47
Figura 5 - Trinca de descolamento do revestimento de aço inoxidável 309L soldado por arco submerso.	50
Figura 6 - Aparência de trinca de reaquecimento.	54
Figura 7 – Desenho esquemático representando o fenômeno da trinca de reaquecimento.	56
Figura 8 - Identificação de zona dura e zona macia.	59
Figura 9 - Critério Microdureza - Sobreposição de camadas.	59
Figura 10 - Critério Microestrutura - Sobreposição de camadas.	61
Figura 11 - Microestrutura da ZAC-GG: (a) cordão isolado (b) corpo de prova com dupla camada.	64
Figura 12 - Comparativo de energia de impacto Charpy para o eletrodo AWS E7018.	65
Figura 13 - Exemplo de Diagrama de Decisão.	66
Figura 14 – Perfil de microdureza. a) Cordão simples, b) Dupla camada.	67
Figura 15 - Análise de variância do efeito técnica de amantecimento na dureza da ZAC (até 1mm da linha de fusão).	68
Figura 16 - Microestruturas encontradas nas ZAC's de duas amostras do aço ASTM A182 F22. a) Amostra aprovada e b) amostra reprovada..	68
Figura 17 - Fluxograma da metodologia geral.	73
Figura 18 – Fluxograma Etapa 2.	75
Figura 19 – Planejamento da TDC.	76
Figura 20 – Bancada de Soldagem.	77
Figura 21 - Formato do tecimento da tocha.	78

Figura 22 - Bloco soldado nas quatro faces e cortado.	83
Figura 23 - Desenho esquemático das medidas de geometria.	86
Figura 24 - Desenho esquemático dos perfis de microdureza.	87
Figura 25 - Microdurômetro automático.	88
Figura 26 - Histograma de microdureza.	89
Figura 27 - Perfil de microdureza.	90
Figura 28 - Microscópio Ótico.....	90
Figura 29 - Limite da ZAC-GG.....	91
Figura 30 - Microestrutura característica da ZAC GF.....	92
Figura 31 - Microestrutura apresentando a transição da ZAC-GF e ZAC-IC....	92
Figura 32 - Montagem da microestrutura da ZAC.	93
Figura 33 - Desenho esquemático das extensões de zona dura e macia.	95
Figura 34 - Desenho esquemático das extensões da ZAC.	96
Figura 35 – Exemplo diagrama de decisão, a) Condição Reprovada, b) condição Aprovada e c) Condição Reprovada.....	98
Figura 36 - Fluxograma da etapa 3.	101
Figura 37 - Durômetro Vickers.	104
Figura 38 - Representação esquemática das regiões onde foram realizadas as medidas de dureza, conforme norma Petrobras N-133.....	105
Figura 39 - Procedimento de medida de dureza.	105
Figura 40 - Exemplo de região de medida de dureza.....	106
Figura 41 - Forno mufla utilizado para realização dos tratamentos térmicos.	109
Figura 42 - Diagrama esquemático do tratamento de "step cooling".....	110
Figura 43 - Amostra soldada para avaliação do envelhecimento.	110
Figura 44 - Desenho ilustrativo destacando as direções onde foram realizadas as impressões de microdureza.....	111
Figura 45 - Perfil de microdureza da ZAC do aço ASTM A182 Gr F22 normalizado e revenido. (E=2,6 kJ/mm, direção 1).....	112

Figura 46 - Histograma com a distribuição de frequências de dureza para a energia de 2,6 kJ/mm na condição de sem “step cooling”.....	113
Figura 47 - Identificação das extensões das zonas duras e macias no perfil de microdureza com base no histograma.....	113
Figura 48 - Montagem da ZAC do aço ASTM A182 Gr F22 normalizado e revenido com “Step Cooling” soldado com energia de 2,6 kJ/mm.	114
Figura 49 - Geometria da junta soldada.	115
Figura 50 - Retirada dos corpos de prova.	116
Figura 51 - Dimensões do corpo de prova de tração.	117
Figura 52 – Desenho esquemático das regiões de reparo.....	119
Figura 53 - Geometria do chanfro simulando o Reparo 1.	120
Figura 54 - Local de retirada de amostras no corpo de prova da soldagem de reparo de parede.	122
Figura 55 - Local de retirada de amostras no corpo de prova da soldagem de reparo de revestimento.....	123
Figura 56 - Formato e dimensões do corpo de prova de dobramento do reparo de parede.	124
Figura 57 - Formato e dimensões do corpo de prova de dobramento do reparo de revestimento.....	125
Figura 58 - Dimensões do suporte para o ensaio de dobramento.....	126
Figura 59 - Máquina e mecanismo de dobramento.	127
Figura 60 - Formato e dimensões do corpo de prova de tração.....	128
Figura 61 – Máquina de tração.....	129
Figura 62 - Dimensões corpo de prova de tenacidade Charpy.	130
Figura 63 - a) Máquina entalhadora e b) Projetor de perfil.....	131
Figura 64 - Extensão do revestimento para retirada de cp's de Charpy.....	132
Figura 65 – Máquina de ensaio de impacto.	133
Figura 66 - Micrografia do metal base ASTM A387 Gr.11 com aumento de 500x.	135

Figura 67 - Micrografia do metal base ASTM A387 Gr.22 com Aumento de 500X.	135
Figura 68 - Micrografia do metal base ASTM A542 Tipo D com aumento de 500x.	136
Figura 69 - Oscilogramas de tensão e de corrente. a) Eletrodo AWS ER80S-B2 e E=0,8 kJ/mm; b) Eletrodo AWS ER80S-B2 e E=2,0 kJ/mm.	139
Figura 70 - Oscilogramas de tensão e de corrente. a) Eletrodo AWS ERNiCrMo-3 e E=0,8 kJ/mm; b) AWS ERNiCrMo-3 e E=1,6 kJ/mm.	139
Figura 71 - Soldagem Similar: Imagens dos cordões de solda.	140
Figura 72 - Soldagem Dissimilar: Imagens dos cordões de solda.....	141
Figura 73 – Cordão de solda com eletrodo protótipo mostrando presença de fina escória.....	142
Figura 74 - Soldagem similar: macrografias das seções transversais dos cordões de solda.....	144
Figura 75 - Soldagem dissimilar: macrografias das seções transversais dos cordões de solda.	146
Figura 76 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.	150
Figura 77 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da técnica de alteração da energia de soldagem na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.	152
Figura 78 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da temperatura de preaquecimento na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.	154
Figura 79 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.	155
Figura 80 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da técnica da energia na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.	156
Figura 81 - – Soldagem similar - Exemplos de perfis de microdureza. a) Amostra C6; b) Amostra C20; c) Amostra S16; d) Amostr S20; e) Amostra MC 11 e f) Amostra MC20.	158

Figura 82 – Soldagem dissimilar - Exemplos de perfis de microdureza. a) Amostra L5; b) Amostra L8; c) Amostra D6; d) Amostra D10; e) Amostra DV6 e f) Amostra DV10.....	159
Figura 83 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.	162
Figura 84 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da técnica de energia na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.	163
Figura 85 – Eficiência de fusão. a) Baixa eficiência de fusão ($E=0,38$ kJ/mm) e b) Alta eficiência de fusão ($E=0,39$ kJ/mm).	164
Figura 86 - Eficiência de fusão - Soldagem Dissimilar - ASTM A387 Gr 11 - Energia de soldagem de 2,0 kJ/mm. a) Tipo V e b) Tipo I.....	164
Figura 87 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da temperatura de preaquecimento na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.....	165
Figura 88 - Ciclo térmicos no centro do cordão para a soldagem de chapa grossa com diferentes temperaturas de pré-aquecimento.	166
Figura 89 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.	167
Figura 90 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da técnica de energia na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.	167
Figura 91 – Micrografia da ZAC GG – Aumento de 500X.	172
Figura 92 - Micrografia da ZAC GF – Aumento de 500X.....	173
Figura 93 - Soldagem Similar - Montagem da ZAC. a) Amostra C1, b) Amostra S1 e c) Amostra MC1.	174
Figura 94 – Soldagem Dissimilar - Montagem da ZAC. a) Amostra L1 b) Amostra D1 e c) Amostra DV1.....	175
Figura 95 - Soldagem similar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF.	176
Figura 96 - Soldagem similar - Análise de variância do efeito da técnica da energia nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF.....	177
Figura 97 - Soldagem similar - Análise de variância do efeito da temperatura de preaquecimento nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF.....	178

Figura 98 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF	179
Figura 99 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da técnica da energia nas extensões da ZAC. a) GG, b) GF e c) IC	179
Figura 100 – Soldagem Similar - Diagrama de decisão – Aço ASTM A387 Gr11 a) Amostra C6 na 1° Camada, b) Amostra C16 na 1° Camada..	181
Figura 101 – Soldagem Similar - Diagrama de decisão – Aço ASTM A387 Gr22 a) Amostra S1 na 1° Camada, b) Amostra S16 na 1° Camada..	182
Figura 102 – Soldagem Similar - Diagrama de decisão – Aço ASTM A542 Tipo D a) Amostra MC6 na 1° Camada e b) Amostra MC16 na 1° Camada.....	183
Figura 103 – Soldagem Dissimilar - Diagrama de decisão. Aço ASTM A387 Gr11 Amostra L5 na 1° Camada.	184
Figura 104 – Soldagem Dissimilar - Diagrama de decisão. Aço ASTM A387 Gr22 Amostra D6 na 1° Camada.....	185
Figura 105 – Soldagem Dissimilar - Diagrama de decisão. Aço ASTM A542 Tipo D Amostra DV6 na 1° Camada.....	185
Figura 106 - Comparativo do efeito do tecimento no perfil de penetração da solda. a) Sem tecimento (E=0,8 kJ/mm) e b) Com tecimento triangular (E=0,8 kJ/mm).	187
Figura 107 - Região de sobreposição de ZACs. a) Dupla camada soldada sem tecimento e b) Micrografia da região com sobreposição de ZAC GG.	189
Figura 108 - Soldagem Similar - a) Acabamento superficial e b) Seção transversal.....	191
Figura 109 – Soldagem Similar – Macrografias das TDC-DC. a) Aprovada (DC-C6-C8); b) Aprovada (DC C16-C18); c) Não aprovada (DC C6-C6); d) Não aprovada + TTPS (DC C6-C6-TTPS).	192
Figura 110 - a) Aprovada (DC-S6-S9); b) Aprovada (DC S16-S18); c) Não aprovada (DC S6-S6); d) Não aprovada + TTPS (DC S6-S6-TTPS)	193
Figura 111 – a) Aprovada (DC-MC6-MC10); b) Aprovada (DC MC16-MC20); c) Não aprovada (DC MC6-MC6); d) Não aprovada + TTPS (DC MC6-MC6-TTPS)	194

Figura 112 - Aquisição de temperatura do TTPS nas duplas camadas soldadas. Aço ASTM A387 Gr11.....	196
Figura 113 - Aquisição de temperatura do TTPS nas duplas camadas soldadas. Aços ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D.....	196
Figura 114 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ER80S-B2. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.....	199
Figura 115 - Efeito do molibdênio sobre o revenimento de um aço com 0,1 %C temperado; b) efeito do cromo sobre o revenimento de um aço com 0,2%C.....	200
Figura 116 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ER80S-B2. a) Aprovada (T ₀ =200°C), b) Aprovada (T ₀ =300°C), c) Não aprovada e d) Não aprovada com TTPS....	201
Figura 117 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER90S-B3. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.....	203
Figura 118 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER90S-B3. a) Aprovada (T ₀ =250°C), b) Aprovada (T ₀ =350°C), c) Não aprovada e d) Não aprovada com TTPS.....	205
Figura 119 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com eletrodo protótipo. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.....	206
Figura 120 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com eletrodo protótipo. a) Aprovada (T ₀ =250°C), b) Aprovada (T ₀ =350°C), c) Não aprovada e d) Não aprovada com TTPS....	207
Figura 121 – Microestrutura da ZAC – Amostra aprovada (DC C6-C8) – 500X.	210
Figura 122 - Microestrutura da ZAC – Amostra aprovada (DC C16-C18) – 500X.	211
Figura 123 - Microestrutura da ZAC – Amostra Reprovada (DC C6-C6) – 500X.	212
Figura 124 - Microestrutura da ZAC – Amostra Reprovada (DC C6-C6-TTPS) – 500X.	213
Figura 125 – Aspecto da seção transversal da dupla camada.....	216

Figura 126 – Dupla camada soldada em metal de base de ASTM A387 Gr11 - AWS ERNiCrMo-3. a) Aprovada (DC-L5-L7) e b) Não aprovada (DC-L5-L5).....	216
Figura 127 – Dupla camada soldada em metal de base ASTM A387 Gr22 - AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada (DC-D6-D18) e b) Não aprovada (DC-D1-D11).	217
Figura 128 – Dupla camada soldada em metal de base ASTM A542 Tipo D - AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada (DC-DV6-DV20) e b) Não aprovada (DC-DV1-DV11).....	218
Figura 129 – Soldagem Dissimilar – Macrografias das TDC-DC. a) Aprovada (DC-L5-L7); b) Não aprovada (DC L5-L5); c) Não aprovada + TTPS (DC L5-L5-TTPS); d) Aprovada (DC D6-D18); e) Não aprovada (DC D1-D11); f) Não aprovada com TTPS (DC D1-D11-TTPS); g) Aprovada (DC DV6-DV20); h) Não aprovada (DC DV1-DV11) e i) Não aprovada com TTPS (DC DV1-Dv11-TTPS).....	219
Figura 130 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ERNiCrMo-3. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.....	220
Figura 131 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ERNiCrMo-3. a) Aprovada, b) Não aprovada e c) Não aprovada com TTPS.....	222
Figura 132 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER309L e AWS ER347. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.....	223
Figura 133 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada, b) Não aprovada e c) Não aprovada com TTPS.....	225
Figura 134 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com AWS ER309L e AWS ER347. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.....	226
Figura 135 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada, b) Não aprovada e c) Não aprovada com TTPS.	227
Figura 136 - Soldagem Dissimilar–ASTM A387 Gr11 - a) Aprovada (DC L5-L7).	229
Figura 137 - Região descarbonetada da amostra DC DV6-DV20. (aumento 500X).....	231

Figura 138 - Soldagem Dissimilar–ASTM A542 Tipo D - Não aprovada (DC DV1-DV11).	232
Figura 139 - Soldagem Dissimilar–ASTM A542 Tipo D - Não aprovada (DC DV1-DV11-TTPS).	233
Figura 140 - Perfis de microdureza da ZAC para amostras sem “step cooling” para energias de soldagem de a) 0,8 kJ/mm, b) 1,4 kJ/mm, c) 2,0 kJ/mm e d) 2,6 kJ/mm.	234
Figura 141 - Perfis de microdureza da ZAC para seções do meio do cordão na condição normalizado e revenido com tratamento de “Step Cooling” para energias de soldagem de a) 0,8 kJ/mm, b) 1,4 kJ/mm, c) 2,0 kJ/mm e d) 2,6 kJ/mm.	235
Figura 142 - Efeito da condição do material sobre a extensão da zona dura da ZAC.	237
Figura 143 - Efeito da condição do material sobre a extensão da zona macia da ZAC.	237
Figura 144 - Montagem da ZAC do aço ASTM A182 F22 normalizado e revenido com “Step Cooling” soldado com energia de 2,6 kJ/mm.	238
Figura 145 - Efeito da condição do material sobre a extensão da ZACGG.	240
Figura 146 - Efeito da condição do material sobre a extensão da ZACGF. ...	240
Figura 147 - Deslocamento na temperatura de transição em 55J.	241
Figura 148 - Junta soldada.	242
Figura 149 - Macrografia da junta na condição como soldada.	243
Figura 150 - Microestrutura da zona fundida na condição como soldada. De uma maneira geral observa-se a predominância de martensita 500X.	243
Figura 151 - Microestrutura da zona fundida na condição com TTPS constituída basicamente de martensita com uma rede de precipitados nos contornos dos grãos.	244
Figura 152 - Aquisição de tempo e temperatura durante o TTPS.	246
Figura 153 - Aspecto frágil da fratura do material como soldado. Observa-se facetas de clivagem, bem como regiões com “dimples”.	247
Figura 154 - Ampliação da Figura 153	248

Figura 155 - Aspecto da fratura intergranular de uma região de grãos colunares do material com TTPS.....	249
Figura 156 - Outra região da fratura do material com TTPS. Fratura intergranular com “dimples” nas superfícies de alguns grãos.....	249
Figura 157. Ampliação da superfície de um grão do material com TTPS mostrando uma fina precipitação.....	250
Figura 158 - Diagrama tensão x deslocamento das cruzetas da máquina de ensaio do material na condição como soldado e com TTPS.....	251
Figura 159 - Desenho representando regiões de reparo.....	254
Figura 160 - Reparo de parede – Corpo de prova soldado.	256
Figura 161 – a) Simulação de reparo no tambor de coque e b) Macrografia do Reparo de Parede.	257
Figura 162 - Reparo de revestimento – Corpo de prova soldado.....	258
Figura 163 – Revestimento produzido simulando reparo no reator de HDT (ASTM A387 Gr22).....	258
Figura 164 - Macrografia do reparo de revestimento do tambor de coque.....	259
Figura 165 – Reparo de parede - Regiões de análise de dureza.	260
Figura 166 – Reparo de Parede - Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 das três regiões. a) Perfil de dureza vertical e b) Perfil de dureza horizontal.	261
Figura 167 - Perfil de dureza conforme procedimento proposto. a) Região 1; b) Região 2 e c) Região 3.	262
Figura 168 - Ajuste da tocha na soldagem simulando reparo de parede do tambor de coque.....	263
Figura 169 – Reparo de revestimento tambor de coque - Perfil de dureza na região central, conforme norma Petrobras N133. a) Reparo 2 Perfil Vertical, b) Reparo 2 Perfil Horizontal.	264
Figura 170 – Reparo de revestimento do reator de HDT em aço ASTM A387 Gr22- Perfil de dureza na região central, conforme norma Petrobras N133. a) Reparo 3 Perfil Vertical, b) Reparo 3 Perfil Horizontal.	264
Figura 171 – Reparo de revestimento em reator de HDT do Aço ASTM A542 Tipo D - Perfil de dureza na região central, conforme norma Petrobras N133. a) Reparo 4 Perfil Vertical, b) Reparo 4 Perfil Horizontal.	265

Figura 172 - Desenho da sobreposição da 2ª Camada com alta energia.	266
Figura 173 – Reparo de revestimento - Perfil de dureza na região central, conforme procedimento proposto. a) Reparo 2, b) Reparo 3 e c) Reparo 4.....	267
Figura 174 - Corpos de prova após dobramentos reparos em Tambor de coque e reator HDT.....	269
Figura 175 – Reparo de Parede do tambor de coque - Gráfico dos ensaios de tração.	270
Figura 176 – Corpos de prova de tração ensaiados. a) R2-3 e b) R2-15.....	271
Figura 177 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr11 - Eletrodo AWS ER80S-B2.....	288
Figura 178 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr22 - Eletrodo AWS ER90S-B3.....	291
Figura 179 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A542 Tipo D - Eletrodo Protótipo	294
Figura 180 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr11 - Eletrodo AWS ERNiCrMo-3	298
Figura 181 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr22 - Eletrodo AWS ER309L e ER347.....	299
Figura 182 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A542 Tipo D - Eletrodo AWS ER309L e ER347.....	301

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química requerida para os aços CrMo e CrMoV.	37
Tabela 2 - Dureza máxima na zona fundida e zona afetada pelo calor.....	40
Tabela 3 - Propriedades mecânicas requeridas. [2; 3].....	41
Tabela 4 - As Reações de HDT e seus Efeitos sobre os Derivados.	43
Tabela 5 – Faixa de composição química do metal de base.[2; 3].....	69
Tabela 6 – Faixa de composição química do metal de base.[51].....	69
Tabela 7 – Faixa de composição química dos metais de adição similares. [52]	70
Tabela 8 - Composição química metais de adição dissimilares. [53; 54]	71
Tabela 9 - Composição química dos gases de proteção.....	72
Tabela 10 - Dureza máxima permitida para metal base.....	74
Tabela 11 - Valores do tecimento da tocha.....	78
Tabela 12 - Planejamento de soldagem similar.....	79
Tabela 13 - Planejamento de soldagem dissimilar.	79
Tabela 14 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ER80S-B2.	80
Tabela 15 - Parâmetros de soldagem para o eletrodo AWS ER90S-B3.	81
Tabela 16 - Parâmetros de soldagem para o eletrodo protótipo.	81
Tabela 17 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ERNiCrMo-3.	81
Tabela 18 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ER309L. ...	82
Tabela 19 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ER347.	82
Tabela 20 - Temperatura de preaquecimento e interpasse para cada material e tipo de reparo.	83
Tabela 21 - Nomenclatura das amostras de soldagem eletrodos similares.	84
Tabela 22 - Nomenclatura das amostras de soldagem eletrodos dissimilares.	85

Tabela 23 - Planejamento de experimental para a soldagem dissimilar com TDC-DC.	102
Tabela 24 - Planejamento de experimental para a soldagem similar com TDC-DC.	103
Tabela 25 - Parâmetros do tratamento térmico pós-soldagem.....	103
Tabela 26 – Parâmetros do tratamento de envelhecimento por “Step Cooling.	109
Tabela 27 - Parâmetros de soldagem do eletrodo protótipo.	115
Tabela 28 - Planejamento experimental da soldagem simulando reparo.	120
Tabela 29 - Quantidade de ensaios e corpos de prova.....	121
Tabela 30 - Composição química do metal de base medido por espectrometria de emissão ótica.....	134
Tabela 31 - Valores medidos e médios das durezas obtidas do aço na condição como recebido.	137
Tabela 32 - Soldagem similar: medidas de geometria dos cordões.	148
Tabela 33 - Soldagem dissimilar: medidas de geometria dos cordões.	149
Tabela 34 - Soldagem similar: Extensões de zona dura e zona macia.	160
Tabela 35 - Soldagem dissimilar: Extensões de zona dura e zona macia.	161
Tabela 36 - Soldagem similar: medidas de ZACGG e ZACGF.....	169
Tabela 37 - Soldagem dissimilar: medidas de ZACGG, ZACGF e ZACIC.	170
Tabela 38 - Valores das extensões duras e macias da ZAC para cada ensaio do planejamento experimental.	236
Tabela 39 - Valores das extensões das ZAC's GG e GF para cada ensaio... ..	238
Tabela 40 - Dureza Vickers da zona fundida na condição como soldado.	245
Tabela 41 - Dureza Vickers da zona fundida na condição com TTPS.	245
Tabela 42 - Energia absorvida.	246
Tabela 43 - Limite de resistência à tração.....	251
Tabela 44. Valores do limite de resistência à tração dos corpos de prova.....	270

Tabela 45 – Reparo 1 – Reparo de Parede - Tambor de coque - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.	272
Tabela 46 – Reparo 2 – Reparo de Revestimento - Tambor de coque - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.	273
Tabela 47 - Reparo 3 – Reparo de Revestimento – Reator de HDT ASTM A387 Gr22 - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.	274
Tabela 48 - Reparo 4 – Reparo de Revestimento – Reator de HDT ASTM A542 Tipo D - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.....	275

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CE	Carbono Equivalente
HA	Hidrogenação de aromáticos
HDN	Hidrodesnitrogenação
HDR	Hidrorrefino
HDS	Hidrodessulfurização
HDT	Hidrotratamento
HO	Hidrogenação de olefinas
IIW	international Institute of Welding
LPTS	Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem
P1	Extensão da penetração da primeira camada,
PZD1	Profundidade da zona dura da primeira camada
PZD2	Profundidade da zona dura da segunda camada
PZM2	Profundidade da zona macia da segunda camada
R1	Extensão do reforço da primeira camada
TDC-DC	Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada
TRC	Transformação com resfriamento contínuo
TTPS	Tratamento Térmico Pós-Soldagem
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZAC-GF	Extensão da zona afetada pelo calor de grãos refinados
ZAC-GG	Extensão da zona afetada pelo calor de grãos grosseiros
ZD	Zona dura
ZF	Zona fundida
ZM	Zona macia

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	31
2.	OBJETIVOS	36
2.1	Objetivo geral.....	36
2.2	Objetivos específicos.....	36
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
3.1	Aço cromo-molibdênio e aço cromo-molibdênio-vanádio.....	37
3.1.1.	<i>Características gerais</i>	37
3.1.2.	<i>Temperabilidade</i>	38
3.1.3.	<i>Propriedades mecânica</i>	40
3.2	Aplicação dos aços Cr-Mo e Cr-Mo-V	42
3.2.1.	<i>Processo de Refino de Petróleo.....</i>	42
3.2.2.	<i>Principais mecanismos de deterioração</i>	44
3.2.2.1.	<i>Ataque pelo hidrogênio.....</i>	45
3.2.2.2.	<i>Fragilização pelo hidrogênio.....</i>	48
3.2.2.3.	<i>Descolamento dos revestimentos (Disbonding)</i>	49
3.2.2.4.	<i>Fragilização pelo revenido.....</i>	51
3.2.2.5.	<i>Trinca de reaquecimento</i>	53
3.3	Soldagem de reparo	57
3.3.2.	<i>Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada (TDC-DC)</i>	57
3.3.3.	<i>Critérios de microdureza e microestrutura</i>	58
3.3.3.1.	<i>Critério de microdureza</i>	58
3.3.3.2.	<i>Critério de Microestrutura.</i>	61
3.3.4.	<i>Avaliação da TDC-DC.....</i>	63
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	69
4.1	Materiais	69

4.1.1.	<i>Metais de base</i>	69
4.1.2.	<i>Metais de adição</i>	70
4.1.3.	<i>Gases de proteção</i>	72
4.2	<i>Metodologia</i>	73
4.3	<i>Etapa 1 – Caracterização dos materiais de base</i>	74
4.4	<i>Etapa 2 –Técnica de deposição controlada</i>	75
4.4.1.	<i>Planejamento experimental da Etapa 2</i>	76
4.4.2.	<i>Parâmetros de soldagem da Etapa 2</i>	77
4.4.3.	<i>Análise da Geometria dos cordões – Etapa 2</i>	86
4.4.4.	<i>Determinação das Extensões de zona dura e zona macia – Etapa 2</i> 87	
4.4.5.	<i>Determinação das Extensões de ZAC – Etapa 2</i>	90
4.4.6.	<i>Construção dos Diagramas de Decisão – Etapa 2</i>	94
4.5	<i>Etapa 3 – Soldagem da técnica de deposição controlada com dupla camada (tdc-dc)</i>	101
4.5.1.	<i>Planejamento experimental TDC-DC – Etapa 3</i>	102
4.5.2.	<i>Avaliação de dureza Vickers – Etapa 3</i>	104
4.6	<i>Etapa 4 – Estudo preliminar de soldagem de reparo</i>	107
4.6.1.	<i>PARTE 1 - Efeito do envelhecimento por “Step cooling” – Etapa 4</i> 107	
4.6.2.	<i>PARTE 2- Soldagem de Qualificação do Eletrodo Protótipo- Etapa 4</i> 114	
4.6.3.	<i>Soldagem da junta com eletrodo protótipo CrMoV– Etapa 4</i>	115
4.6.4.	<i>Avaliação e Caracterização da Soldagem com eletrodo protótipo – Etapa 4</i> 116	
4.6.5.	<i>Ensaio de Charpy – Eletrodo Protótipo – Etapa 4</i>	117
4.6.6.	<i>Ensaio de Tração – Eletrodo Protótipo – Etapa 4</i>	117
4.7	<i>Etapa 5 - Soldagem simulando caso prático de reparo horizontal</i>	118
4.7.1.	<i>Ensaio Mecânicos - Etapa 5</i>	121

4.7.1.1.	<i>Ensaio de dureza – Etapa 5.....</i>	124
4.7.1.2.	<i>Ensaio de dobramento – Etapa 5</i>	124
4.7.1.3.	<i>Ensaio de tração – Etapa 5.....</i>	128
4.7.1.4.	<i>Ensaio de tenacidade Charpy – Etapa 5.....</i>	129
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	134
5.1	Etapa 1 - Caracterização dos metais de base	134
5.2	Etapa 2 – Técnica de deposição controlada	138
5.2.1.	<i>Soldagem de simples deposição – Etapa 2.....</i>	138
5.2.2.	<i>Avaliação da Geometria dos cordões de solda – Etapa 2.....</i>	143
5.2.2.1.	<i>Soldagens com Eletrodos Similares – Etapa 2.....</i>	150
5.2.2.2.	<i>Soldagens com Eletrodos Dissimilares – Etapa 2</i>	155
5.2.3.	<i>Microdureza – Zona Dura e Zona Macia – Etapa 2.....</i>	157
5.2.4.	<i>Microestrutura – ZACGG e ZACGF – Etapa 2.....</i>	169
5.2.5.	<i>Diagrama de Decisão – Etapa 2.....</i>	180
5.3	Etapa 3 – Técnica de deposição controlada com dupla camada	187
5.3.1.	<i>Considerações iniciais da TDC-DC – Etapa 3</i>	187
5.3.2.	<i>Soldagem Similar da TDC-DC – Etapa 3.....</i>	190
5.3.2.1.	<i>Aspecto gerais da soldagem – Etapa 3.....</i>	190
5.3.2.2.	<i>Tratamento Térmico Pós-Soldagem (TTPS) – Etapa 3.....</i>	195
5.3.2.3.	<i>Análise de Dureza das Soldagens Similares das Duplas Camadas – Etapa 3</i>	198
5.3.2.4.	<i>Análise Microestrutural da ZAC nas Soldagens Similares das Duplas Camadas</i>	209
5.3.3.	<i>Soldagem Dissimilar da TDC-DC – Etapa 3.....</i>	215
5.3.3.1.	<i>Aspecto gerais da soldagem – Etapa 3.....</i>	215
5.3.3.2.	<i>Análise de Dureza das Soldas Dissimilares com Dupla Camada – Etapa 3</i>	220
5.3.3.3.	<i>Análise Microestrutural da ZAC nas Soldagens Dissimilares da Técnica Deposição Controlada com Duplas Camadas – Etapa 3.....</i>	229

5.4	Etapa 4 - Estudos preliminares para a soldagem de reparo	234
5.4.1.	<i>Parte 1 – Efeito da soldagem em chapas envelhecidas por “Step cooling” – Etapa 4</i>	234
5.4.2.	<i>Parte 2 – Avaliação de Soldagem de Qualificação do Eletrodo Protótipo – Etapa 4</i>	242
5.4.3.	<i>Microdureza e Dureza - Eletrodo Protótipo – Etapa 4</i>	244
5.4.4.	<i>Ensaio Charpy-V - Eletrodo Protótipo – Etapa 4.....</i>	245
5.4.5.	<i>Ensaio de tração</i>	251
5.5	Etapa 5 – Soldagem simulando caso prático de reparo horizontal	253
5.5.1.	<i>Aspectos gerais da soldagem de reparo – Etapa 5.....</i>	255
5.5.2.	<i>Ensaio de dureza Vickers – Etapa 5.....</i>	259
5.5.2.1.	<i>Reparo de parede – Reparo 1 – Etapa 5.....</i>	259
5.5.2.2.	<i>Reparo de revestimento- Reparo 2, Reparo 3 e Reparo 4 – Etapa 5</i>	263
5.5.3.	<i>Ensaio de dobramento – Etapa 5</i>	268
5.5.4.	<i>Ensaio de tração – Etapa 5</i>	270
5.5.5.	<i>Ensaio de tenacidade Charpy-V – Etapa 5</i>	271
5.5.5.1.	<i>Reparo 1 - Reparo de Parede – Tambor de coque.....</i>	272
5.5.5.2.	<i>Reparo 2, Reparo 3 e Reparo 4 - Reparo de revestimento em Reator de HDT</i>	273
5.6	Considerações finais da TDC-DC.....	276
6.	CONCLUSÃO.....	278
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	280
	REFERÊNCIAS.....	281
	APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE DECISÃO	288

1. INTRODUÇÃO

Os aços de baixa liga do tipo cromo-molibdênio, são frequentemente utilizados em estruturas e tubulações na construção de plataformas de petróleo, nas refinarias e em equipamentos para indústria do petróleo e gás de uma forma geral. Os aços da família CrMo, usados na construção de equipamentos possuem boa resistência em temperaturas elevadas, boa resistência ao ataque por hidrogênio, boa resistência à fluência e à oxidação, destacando-se os aços ASTM A387 Gr.11 (1,25Cr-0,5Mo) e o aço ASTM A387 Gr.22 (2,25Cr-1,0Mo).

O principal motivo para escolha destes aços decorre do fato da produção e do beneficiamento de petróleo ocorrerem em condições extremamente adversas, com alta temperatura e alta pressão, presença de hidrogênio (H₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) e cloretos, exigindo equipamentos fabricados com materiais de maior resistência. Esses aços destacam-se principalmente pelo emprego em elevadas temperaturas. Todavia, por possuírem elevada temperabilidade, tais aços exigem procedimentos, técnicas e cuidados específicos na soldagem para que sejam obtidas boas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, manter a integridade do material/equipamento.

Por sua vez, o aço ASTM A542 Tipo D (CrMoV) foi introduzido no sistema da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) como uma alternativa ao aço 2,25%Cr-1%Mo na fabricação de reatores de HDT. Devido a adição de vanádio (0,25%), esse novo aço apresenta alta resistência e deformação com baixa sensibilidade à fragilização pelo hidrogênio. Devido à alta resistência à fragilização por hidrogênio as reações podem ocorrer em maiores temperaturas de operação, o que acarreta em maior rendimento operacional. Além disso, os reatores podem ser fabricados com espessura de parede menor reduzindo assim o custo do equipamento.

Além disso, a utilização do aço CrMoV torna os equipamentos menos suscetíveis à vários mecanismos de falhas, tais como: a fragilização ao revenido na faixa de temperatura de operação, ataque por hidrogênio a altas temperaturas, fragilização pelo hidrogênio em baixas temperaturas (durante as paradas dos reatores) e, de alta importância, a maior resistência ao

descolamento (induzido por hidrogênio) do revestimento produzido por soldagem. Contudo, todo potencial desse aço só pode ser considerado se as propriedades pós-soldagem forem satisfeitas.

Determinados equipamentos fabricados com os aços CrMo e CrMoV, operando por muito tempo e na presença de hidrogênio, podem sofrer degradação em temperaturas baixas e em temperaturas elevadas. Para a faixa de temperatura de 350 a 650°C e pressões de 15 a 35 MPa, os aços CrMo e CrMoV podem sofrer o fenômeno chamado ataque pelo hidrogênio. Por sua vez, o fenômeno de fragilização pelo hidrogênio ocorre a temperaturas de -33 a +150°C e pressões relativamente baixas, de 0,1 a 16 MPa, limites inferiores aos de ataque pelo hidrogênio. Outros problemas metalúrgicos associados aos aços em estudo são a fragilização ao revenido, a trinca de reaquecimento, a trinca a quente e a corrosão intergranular.

Estes equipamentos exigem atenção especial durante e após a soldagem, tanto para operações de fabricação, quanto para reparos. Para situações de reparos, é comum que intervenções por soldagem sejam realizadas para recompor a condição de funcionamento, garantir a segurança operacional e manter a qualidade do produto desejado. O material, após a soldagem, deve apresentar suas propriedades de acordo com os requisitos de normas nacionais e internacionais. Atualmente, o procedimento de soldagem que permite alcançar as propriedades mecânicas estipuladas pelas normas é seguido de tratamento térmico pós-soldagem (TTPS). O TTPS por sua vez pode ser responsável pela precipitação de fases indesejáveis nos materiais utilizados nos revestimentos e pela difusão de carbono para interface do revestimento com o aço. Neste sentido, o TTPS pode ocasionar a fragilização do material do equipamento. Além disso, o TTPS aumenta o custo total de parada da planta de produção, gerando um custo diário bastante elevado. Sendo assim, a possibilidade de se realizar uma parada para reparo de equipamento com um tempo menor se torna bastante atrativa no aspecto financeiro.

Uma das alternativas ao TTPS, para reduzir dureza e obter microestrutura adequada, é a aplicação da Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada (TDC-DC). Entretanto, esta técnica é bastante sensível às

alterações dos parâmetros e condições de soldagem definidas inicialmente, necessitando de rigoroso controle e cuidado durante o procedimento de soldagem.

O Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem – (LPTS) vem realizando, ao longo dos últimos 17 anos, diversos trabalhos de pesquisa aplicando a TDC-DC, em diferentes combinações de materiais e para diferentes aplicações, visando selecionar as melhores combinações de parâmetros de soldagem, de forma que a segunda camada depositada promova a formação de uma microestrutura adequada e o revenimento da zona afetada pelo calor das camadas soldadas anteriormente.

Com o surgimento de novos materiais para aplicações de maior responsabilidade, fez-se necessária a realização de novos estudos de soldagem que proporcionassem a adequada seleção de parâmetros para a soldagem da TDC-DC e avaliassem a possibilidade ou não da aplicação desta técnica em determinados tipos de materiais/equipamentos, considerando suas características operacionais e seus problemas.

Dentro deste contexto, foi identificada a necessidade de realizar uma abordagem geral para a soldagem da TDC-DC dos aços CrMo e CrMoV, com foco nos equipamentos utilizados nas refinarias para tratamento do petróleo e seus derivados. Em função da complexidade de fenômenos envolvidos e dos maiores desafios de estudo, foram escolhidos os tambores de coque e os reatores de hidrotreatamento.

O tambor de coque é um exemplo de equipamento fabricado com o aço (CrMo) ASTM A387 Grau 11, também denominado de aço 1,25Cr-0,5Mo, responsável pela operação de coqueamento, na qual é produzido um carvão relativamente puro. Obtido a partir dos resíduos da destilação do petróleo, o coque pode ser utilizado na alimentação de altos-fornos de siderúrgicas, por exemplo.

A estrutura de um tambor de coque é constituída por um casco cilíndrico, construído por meio de união de anéis com espessuras variadas, unidos por meio de soldas circunferenciais. Os tambores de coque precisam de

proteção interna devido ação corrosiva em altas temperaturas e ação do hidrogênio. Esta proteção normalmente é realizada por revestimento com ligas resistentes à corrosão ou com aços inoxidáveis, uma vez que seria, no mínimo, economicamente proibitiva a construção integral destes equipamentos com materiais nobres. Usualmente, a superfície interna do tambor de coque é revestida com o aço inoxidável ferrítico AISI 410S.

As unidades de hidrotreatamento (reatores de HDT) são bem abrangentes e podem ser empregadas para todas as frações do petróleo com o intuito de remover os contaminantes, tais como os compostos de enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais pesados.

Além da importância econômica, o hidrotreatamento exerce papel fundamental para ajustar o produto à legislação ambiental e para atender parte das exigências atuais da sociedade na diminuição da poluição gerada pela utilização de combustíveis e produtos mais limpos, tais como o diesel, a nafta e o querosene. Os reatores de hidrotreatamento (HDT) são exemplos de equipamentos fabricados com os aços ASTM A387 Gr. 22 (CrMo) e ASTM A542 Tipo D (CrMoV). A superfície interna do reator de HDT é comumente revestida com uma camada de aço inoxidável austenítico AWS ER309L e com a segunda camada com o aço inoxidável AWS ER347, para regiões de alta solicitação mecânica.

Com a complexidade metalúrgica e os fenômenos de fragilização envolvidos, as indústrias químicas e petroquímicas têm buscado serviços de soldagem que sejam realizados em menor tempo possível, evitando os elevados custos e perda de rendimento.

Portanto, a soldagem interna e externa do equipamento deve considerar dois eixos principais: aumento da produtividade na recuperação do material e a redução de operações intermediárias durante e após a realização das soldagens.

Considerando o aumento da produtividade, destaca-se a utilização de processos automatizados que permitam intervenções com menor tempo operacional, tal como o MIG/MAG, que proporciona uma alta produtividade,

baixa diluição e alta qualidade dos depósitos, quando comparado, por exemplo, ao processo eletrodo revestido.

Outro fator de fundamental importância é a escolha ou até mesmo o desenvolvimento de metais de adição aptos para os desafios de fabricação e manutenção. Atualmente existe uma grande variedade de consumíveis para soldagem similar e dissimilar desses equipamentos. Um fabricante de consumíveis de soldagem desenvolveu, por demanda da Petrobras S.A., uma bobina de arame-eletrodo protótipo possibilitando o estudo da soldagem similar do aço ASTM A542 Tipo D (CrMoV), para qual não existe disponível no mercado arame eletrodo utilizando-se o processo MIG/MAG. Sabe-se que a soldagem deste aço é complexa, por apresentar menor tenacidade da ZAC e ZF, além de alta sensibilidade à trinca de reaquecimento.

Em função do que foi exposto, fica evidente que é possível contribuir bastante com o estudo de técnicas de soldagem de reparo de componentes e equipamentos fabricados de aços CrMo e CrMoV considerando a metodologia de execução da soldagem e seus efeitos na ZAC e ZF, sobre as transformações metalúrgicas e alterações de propriedades mecânicas. Desta forma, é possível contribuir decisivamente para avanços na aplicação da técnica de deposição controlada com dupla camada (TDC-DC) para reparo similar (parede) e dissimilar (revestimento).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Estudar o efeito da soldagem MIG/MAG de aços CrMo e CrMoV com a aplicação da técnica de deposição controlada com dupla camada (TDC-DC) para reparo similar (Parede) e dissimilar (Revestimento), considerando as principais transformações metalúrgicas e alterações de propriedades mecânicas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar e analisar os fenômenos que alteram as propriedades mecânicas e metalúrgicas decorrentes da soldagem TDC-DC.
- Definir a melhor combinação de parâmetros de soldagem entre a primeira e a segunda camada para realização de soldagem que resulte em uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC) mais macia e sem crescimento exagerado de grãos, sem a aplicação de TTPS, por meio da utilização dos diagramas de decisão.
- Avaliar o efeito da soldagem em metal de base envelhecido por “Step Cooling”.
- Avaliar as características operacionais e propriedades mecânicas da soldagem com arame protótipo CrMoV.
- Aplicar e avaliar os melhores parâmetros de soldagem para aplicação de reparo de parede e de revestimento em equipamentos fabricados em aço ASTM A387 Gr.11, ASTM A387 Gr.22 e ASTM A542 Tipo D.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço cromo-molibdênio e aço cromo-molibdênio-vanádio

3.1.1. Características gerais

Os aços de baixa-liga do tipo CrMo e CrMoV devem cumprir requisitos básicos do código ASME, conforme sua especificação. Os aços cromo-molibdênio são aços contendo até 1% de molibdênio e até 9% de cromo como elementos de liga. Esses materiais são aplicados principalmente em temperaturas elevadas. [1]

Estes materiais devem ter suas composições químicas controlada de acordo com as normas ASTM A387 e ASTM A542 para materiais laminados. [2; 3]

Tabela 1 - Composição química requerida para os aços CrMo e CrMoV.

Elemento	Composição (%)		
	ASTM A387 Gr11	ASTM A387 Gr22	ASTM A542 Tipo D
Carbono	0,04-0,17	0,04-0,15	0,09-0,18
Manganês	0,35-0,73	0,25-0,66	0,25-0,66
Fósforo	0,035 máx	0,035 máx	0,020
Enxofre	0,035 máx	0,035 máx	0,015
Silício	0,44-0,86	0,50 máx	0,13
Cromo	0,94-1,56	1,88-2,62	1,88-2,62
Molibdênio	0,40-0,70	0,85-1,15	0,85-1,15
Vanádio	-	-	0,23-0,37

Fonte: ASTM A387 e ASTM A542

3.1.2. *Temperabilidade*

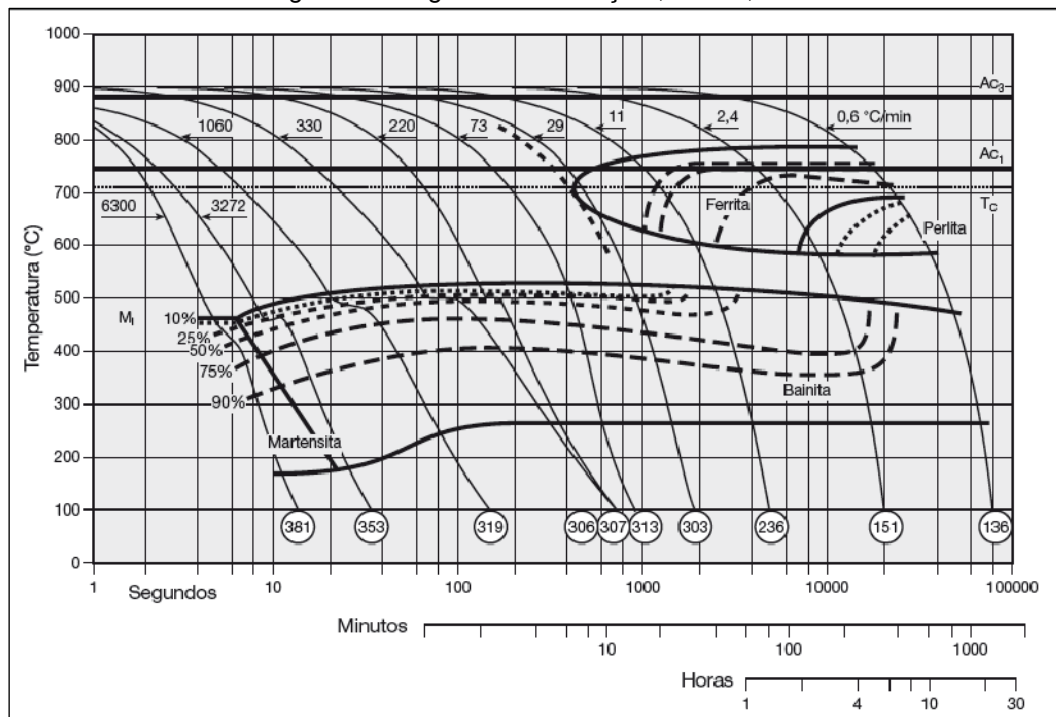
Aços com alta temperabilidade proporcionam uma elevada fração volumétrica de martensita na zona fundida (ZF) e na ZAC. Como se sabe, dependendo do seu teor de carbono, essa microestrutura é altamente susceptível a trincas induzidas por hidrogênio. As microestruturas dos aços em estudo variam com a composição química e com os ciclos térmicos ao qual o aço é submetido e conseqüentemente, suas propriedades mecânicas são alteradas.

O diagrama de transformação com resfriamento contínuo (TRC) é uma ferramenta importante para avaliar a temperabilidade dos aços, pois, a presença de certas fases na microestrutura final de uma solda pode ser explicada por meio dele. [4; 5] Vale ressaltar que o diagrama indicado para prever a microestrutura promovida pela soldagem é o TRC para soldagem, cujas condições de austenitização e resfriamento são bem diferentes das utilizadas na construção do TRC normal. Entretanto, o TRC para soldagem é de difícil obtenção, justificando, assim, o uso do TRC normal para ajudar no entendimento das microestruturas geradas durante o resfriamento de uma soldagem.

O diagrama TRC é uma importante fonte de informação sobre o efeito dos ciclos térmicos de soldagem na microestrutura e propriedades dos aços soldados e, por isso, são úteis no desenvolvimento de tecnologias de soldagem. Sabe-se que a soldagem afeta a microestrutura dos aços. Os ciclos térmicos impostos pela soldagem fazem com que a solidificação ocorra em condições fora do equilíbrio, resultando em microestruturas compostas por bainita e martensita, sendo comumente encontradas na ZAC de aços CrMo e CrMoV.

Na Figura 1 está apresentado o diagrama TRC para o aço 2,25Cr-1Mo. Como pode ser observado pelo diagrama existe uma ampla faixa de velocidade de resfriamento (40°C/min a 3200°C/min) nas quais pode-se obter uma estrutura bainítica. Além disso, apresenta uma faixa de dureza (300 a 350HV) relativamente alta para aplicações deste material.

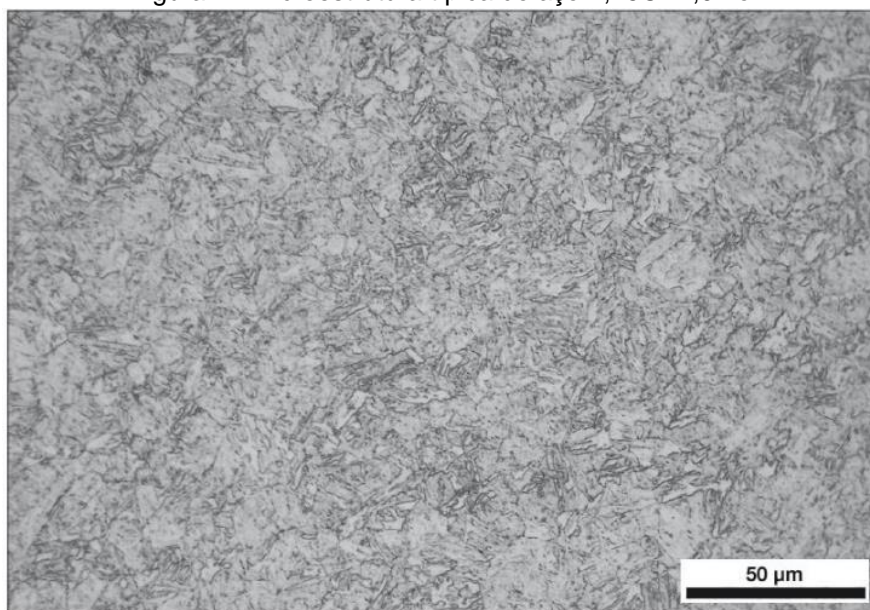
Figura 1 - Diagrama TRC - Aço 2,25Cr-1,0Mo.



Fonte: Colpaert [2008]

A Figura 2 apresenta uma microestrutura típica do aço 2,25Cr-1,0Mo na condição de temperado e revenido.

Figura 2 - Microestrutura típica do aço 2,25Cr-1,0Mo.



Fonte: Colpaert [2008]

3.1.3. Propriedades mecânica

O material deve garantir ao equipamento, após construção, propriedades mínimas especificadas pela norma ASME VIII Divisão 1 e 2. As propriedades mecânicas desses aços podem variar bastante, conforme o tratamento térmico realizado. Esses materiais são normalmente temperados e revenidos ou normalizados e revenidos.[1]

Os principais ensaios requeridos para os materiais de base e para a condição soldada são dureza, tenacidade, dobramento e resistência à tração.

Normas nacionais e internacionais estabelecem que a dureza no metal de base, na zona fundida e na zona afetada pelo calor após TTPS não deve exceder os limites da Tabela 2. [7; 8; 9]

Tabela 2 - Dureza máxima na zona fundida e zona afetada pelo calor.

Material	Dureza
ASTM A387 Gr11	237 HV10
ASTM A387 Gr22	250 HV10
ASTM A542 Tipo D	

Fonte: [9]

Os ensaios de tenacidade são normalmente realizados por meio do impacto Charpy de acordo com a norma ASTM A370. As normas de aplicação para esses materiais exigem que o ensaio Charpy seja realizado a temperatura de (-18 °C) para aço 1,25Cr-0,5Mo e (-30 °C) para aço 2,25Cr-1,0Mo e 2,25Cr-1,0Mo-0,25V. Os materiais testados deverão apresentar como valor médio dos 3 testes, uma energia absorvida maior ou igual a 54 J, não podendo apresentar nenhum resultado individual inferior a 47 J. [7; 8; 9]

O ensaio de tração deve ser realizado na temperatura ambiente de acordo com a norma ASTM A370. Os valores obtidos devem estar de acordo com o especificado pelo código ASME Seção VIII Divisão II. A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas requeridas para os aços 1,25Cr-0,5Mo,

2,25Cr-1,0Mo e 2,25Cr-1,0Mo-0,25V, com dados obtidos por meio do ensaio de tração em temperatura ambiente. [7; 8; 9; 10]

Tabela 3 - Propriedades mecânicas requeridas. [2; 3]

Propriedade	Materiais		
	1,25Cr-0,5Mo	2,25Cr-1,0Mo	2,25Cr-1,0Mo-0,25V
	ASTM A387 Gr11	ASTM A387 Gr22	ASTM A542 Tipo D
Limite de resistência (MPa)	450-585	515-690	585-760
Limite de escoamento (MPa)	275 mín	310 mín	380 mín
Alongamento em 50 mm (%)	22	18	20

Fonte: ASTM A387 e ASTM A542.

3.2 Aplicação dos aços Cr-Mo e Cr-Mo-V

3.2.1. *Processo de Refino de Petróleo*

O processo de Hidrorrefino (HDR), também conhecido como Hidroprocessamento, consiste na mistura de frações de petróleo com hidrogênio em presença de um catalisador, sob certas condições operacionais determinadas em função do objetivo que se tem com esta etapa do refino. As unidades de hidrogenação são classificadas na literatura de acordo com a sua finalidade em: [11]

- Unidades de hidrotreatamento;
- Unidades de hidroconversão.

O processo de Hidrorrefino (HDR) é de grande importância no mundo inteiro e principalmente no Brasil. Este processo catalítico de hidrogenação trabalha com cargas em condições severas de operação (temperaturas e pressões elevadas) e consome um insumo de alto custo de produção como o hidrogênio. As vantagens alcançadas com esta etapa do refino estão ligadas ao melhor aproveitamento de cargas pesadas, melhoria da qualidade do produto e proteção ambiental, através de remoção de poluentes como enxofre e nitrogênio. Assim, a resistência criada ao processo de HDR, por este possuir elevados custos de investimentos e operacionais, vem sendo superada pelos benefícios obtidos. [11]

Os processos de hidrotreatamento (HDT) têm por finalidade principal eliminar as impurezas que, estando presentes nas frações, possam comprometer suas qualidades finais; garantindo, assim, estabilidade química ao produto acabado. Dentre as impurezas, os compostos de enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais, por exemplo, conferem às frações propriedades indesejáveis, tais como, corrosividade, acidez, odor desagradável, formação de compostos poluentes, alteração de cor, etc. A estabilização e a remoção desses compostos ocorrem através de uma reação catalítica de hidrogenação, sob pressão e temperatura adequadas. Este processo tornou-se extremamente importante para atender à crescente demanda de combustíveis com baixo teor de

impurezas, que vem sendo criada pelo desejo da sociedade em melhorar a qualidade do meio ambiente e obter produtos satisfatórios.[12; 13]

A indústria de refino realiza o hidrotratamento de cargas basicamente por dois motivos: [11; 12; 13; 14]

- Obter a especificação de produtos, através de reações de hidrodessulfurização (HDS), hidrodessnitrogenação (HDN), hidrogenação de aromáticos (HA) e de olefinas (HO), dependendo das características da corrente a ser hidrogenada. A Tabela 4 mostra um resumo dos efeitos de diversas destas reações sobre os derivados de petróleo;
- Obter a proteção de catalisadores de diversos processos através do pré-tratamento da carga. O nitrogênio envenena catalisadores que possuem centros ácidos como os de Reforma Catalítica, Craqueamento Catalítico Fluido (FCC) e Hidrocraqueamento (HCC). O enxofre é veneno para o catalisador de Reforma Catalítica e os metais como Ni e V envenenam catalisadores de FCC.

Tabela 4 - As Reações de HDT e seus Efeitos sobre os Derivados.

Reações	Derivados	Efeitos
Hidrodessulfurização (HDS)	Nafta para Reforma Catalítica	Remoção de N e S que envenenam catalisadores de reforma catalítica
	Querosene de Aviação (QAV)	Especificação quanto a teor de S e corrosividade.
	Diesel	Especificação quanto a teor de S e corrosividade.
	Lubrificantes	Especificação quanto a teor de S e corrosividade.
Hidrodessnitrogenação (HDN)	Querosene de Aviação (QAV)	Melhora a especificação quanto a cor e aumenta a estabilidade à oxidação.
	Diesel	Melhora a especificação quanto a cor e aumenta a estabilidade à oxidação.
	Lubrificantes	Melhora a especificação quanto a cor e aumenta a estabilidade à oxidação.
Hidrogenação de aromáticos (HDA)	Querosene de Aviação (QAV)	Melhora o ponto de fuligem.
	Diesel	Aumenta o ponto de anilina, densidade API e índice de cetano.
	Lubrificantes	Aumenta o índice de viscosidade de óleos lubrificantes básicos.

Hidrogenação de Olefinas (HO)	Nafta de Coque	Aumenta a estabilidade à oxidação.
	Diesel	Aumenta a estabilidade à oxidação.

Fonte: [14]

3.2.2. Principais mecanismos de deterioração

Os mecanismos de danos em unidades de hidrotratamento decorrentes dos produtos gerados através da hidrogenação (H_2S , HCl , NH_3), presença de hidrogênio, severidade do processo (temperatura e pressão elevadas), ciclos térmicos sofridos, e do ataque eletroquímico em paradas, são extremamente críticos.

Os equipamentos das refinarias de petróleo submetidos a ciclos térmicos de operação provocados por parada e partida de equipamentos e mudanças nas condições de operação, principalmente quando envolvendo elevada taxa de resfriamento ou aquecimento, possibilitam o aparecimento de altos níveis de tensões, devido aos gradientes térmicos e diferentes coeficientes de dilatação dos materiais. Conseqüentemente, são geradas deformações que, em função da tenacidade do material, podem provocar danos na estrutura do equipamento. Esses altos níveis de tensão decorrentes dos ciclos térmicos podem acarretar no processo de fadiga térmica de baixo ciclo, uma vez que a fadiga térmica é causada pelo estado de tensão-deformação resultante da variação de temperatura (ΔT). Quanto maior a deformação plástica resultante, mais trincas térmicas ocorrerão. O processo de fadiga térmica é agravado pela existência dos mecanismos de danos que interferem na ductilidade do material e ou promovem defeitos internos, tais como: fragilização ao revenido, fragilização pelo hidrogênio, ataque pelo hidrogênio etc.

Esses mecanismos levam a um progressivo dano em serviço, requerendo procedimentos reparo e manutenção. Os mecanismos mais frequentes são apresentados a seguir.

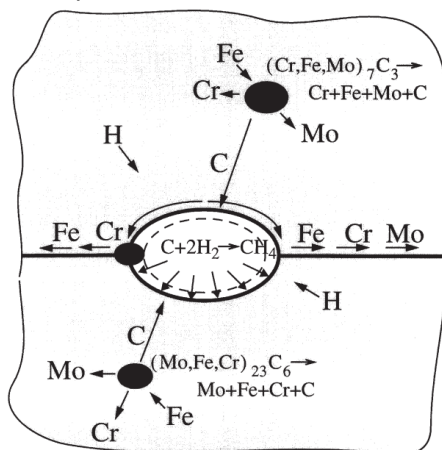
3.2.2.1. Ataque pelo hidrogênio

Os aços CrMo e CrMoV usados na construção de reatores de hidroprocessamento e tambores de coque, podem sofrer de um fenômeno de degradação em alta temperatura denominado ataque pelo hidrogênio. Devido a elevada temperatura e pressão de hidrogênio no interior do equipamento, os átomos de hidrogênio entram no aço e reagem com o carbono do aço e é produzido o gás metano. Estas moléculas de gás ficam presas em vazios (*microvoids*) nos contornos dos grãos, e o aumento na pressão do metano é responsável pela abertura de uma trinca. [15; 16]

O fenômeno de ataque por hidrogênio tem sido observado em refinarias de petróleo e equipamentos da indústria petroquímica que operam em elevada temperatura e pressão de hidrogênio, na faixa de temperatura de 350 a 650°C e pressões de 15 a 35 MPa. [17]

A Figura 3 apresenta um desenho esquemático do fenômeno de ataque pelo hidrogênio. A ilustração inicia com a nucleação de uma cavidade. O hidrogênio entra no material e difunde na matriz ferrítica para a cavidade onde fica aprisionado. Os átomos de carbono, os quais são dissolvidos na matriz, também difundem para a cavidade, onde reagem com o hidrogênio, produzindo moléculas de metano. Devido ao seu tamanho relativamente grande, as moléculas de metano permanecem presas na cavidade e os átomos de hidrogênio e os átomos de carbono continuam a difundir para a cavidade formando ainda mais moléculas de metano. A pressão de gás na cavidade aumenta e esta pressão interna proporciona o crescimento da cavidade. A difusão e o deslocamento por fluência são os mecanismos responsáveis pelo crescimento da cavidade. [15]

Figura 3 - Desenho esquemático do fenômeno de ataque por hidrogênio.



Fonte: Schlögl [2001]

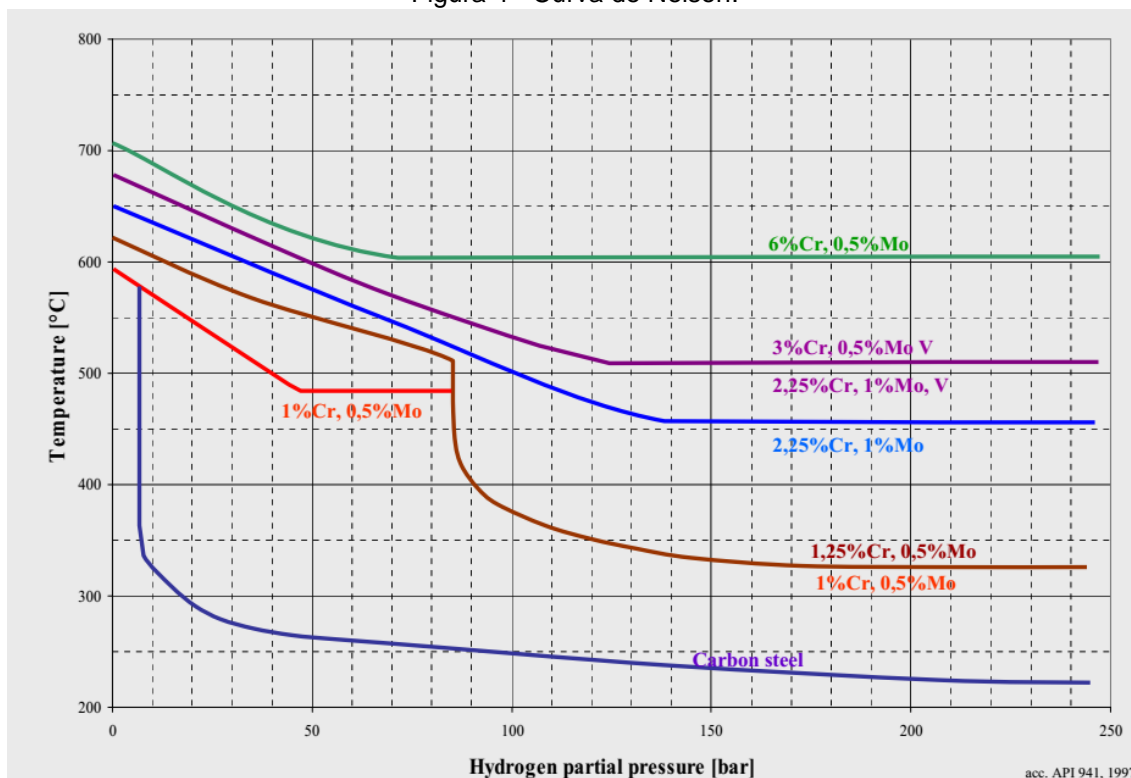
Em resumo, o ataque por hidrogênio é um fenômeno complexo de caráter físico-químico-mecânico. Todos os processos estão ligados uns aos outros, por exemplo: quanto maior a pressão do metano, mais rápido os vazios crescem. Por outro lado, o rápido crescimento da cavidade requer mais átomos de carbono por unidade de tempo, para reagir com o hidrogênio para manter esta pressão alta do metano. Se a cinética de dissolução, difusão ou reação química são muito lentos, a pressão de metano diminuirá e o crescimento da cavidade diminuirá. [15]

Adições de formadores de carbonetos estáveis tais como V e Ti resulta em um aumento substancial na resistência ao ataque pelo hidrogênio. [16] Este fenômeno de ataque por hidrogênio é caracterizado pelo fato de diminuir abruptamente a ductilidade, tenacidade e resistência depois de um longo período de operação. [18]

Tem sido bem conhecido que o limite operacional do ataque pelo hidrogênio em alta temperatura pode ser resumido usando dois parâmetros: temperatura e pressão de hidrogênio. Nelson investigou casos de ataque pelo hidrogênio e propôs as primeiras curvas Nelson em 1949. As curvas de Nelson são usadas para definir os limites de operação dos aços usados em operação com hidrogênio. As curvas de Nelson indicam os limites superiores de temperatura versus pressão parcial de hidrogênio para cada tipo de aço, conforme mostrado na Figura 4. Neste gráfico, pontos acima das linhas indicam

a possibilidade de ocorrer o ataque pelo hidrogênio e/ou decarbonetação superficial. [19; 20]

Figura 4 - Curva de Nelson.



Fonte: API RP941.

As Curvas de Nelson são comumente usados para selecionar os vários tipos de aços e os limites operacionais de segurança de temperatura e pressão parcial do hidrogênio. Estas curvas são periodicamente revisadas para novos materiais. [20; 21; 22]

É possível notar que, à medida que se aumenta o valor da porcentagem de cromo na liga, as curvas de Nelson são transladadas para cima, aumentando, assim, a possibilidade de operação a temperaturas mais elevadas. As ligas da família Cr-Mo, por possuírem carbonetos estáveis, como os carbonetos de cromo e de molibdênio, são menos susceptíveis ao ataque pelo hidrogênio. Observa-se que a adição de 0,25%V ao aço 2,25Cr1,0Mo a curva de Nelson apresenta um aumento nas temperaturas de operação, tal fato ocorre

devido à maior resistência dos carbonetos de vanádio ao ataque pelo hidrogênio.[16; 22]

3.2.2.2. *Fragilização pelo hidrogênio*

O fenômeno de fragilização pelo hidrogênio ocorre a temperaturas de -33 a +150 °C e pressões relativamente baixas, de 0,1 a 16 MPa, limites inferiores aos de ataque pelo hidrogênio.[17; 23; 24]

O hidrogênio interage com a maioria dos metais por uma série de mecanismos, resultando em modificações das propriedades mecânicas que levam a fraturas frágeis e altamente danosas.

Estas trincas surgem quando os seguintes fatores estão presentes simultaneamente:[17]

- Microestrutura susceptível (martensita/bainita);
- Tensões residuais elevadas;
- Hidrogênio difusível.
- A temperatura deve estar dentro da faixa sensível enquanto todos os outros fatores ocorrem.

A temperabilidade de um aço é governada pela sua composição química, e uma maneira usual de descrever a temperabilidade é avaliar a contribuição total dos elementos presentes. Isso é feita com uma fórmula empírica que define um valor de carbono equivalente (CE) e leva em consideração os elementos importantes que são conhecidos por afetarem a capacidade de endurecimento do aço. Em geral, quanto maior o valor de CE, mais suscetível é o aço para trinca induzida pelo hidrogênio. A Equação 1 apresenta a equação mais comum de cálculo de carbono equivalente, desenvolvida pelo *International Institute of Welding* (IIW), podendo ser aplicada, geralmente, à maioria dos aços.[24; 25]

$CE_{IIW} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$	Equação 1
--	--------------

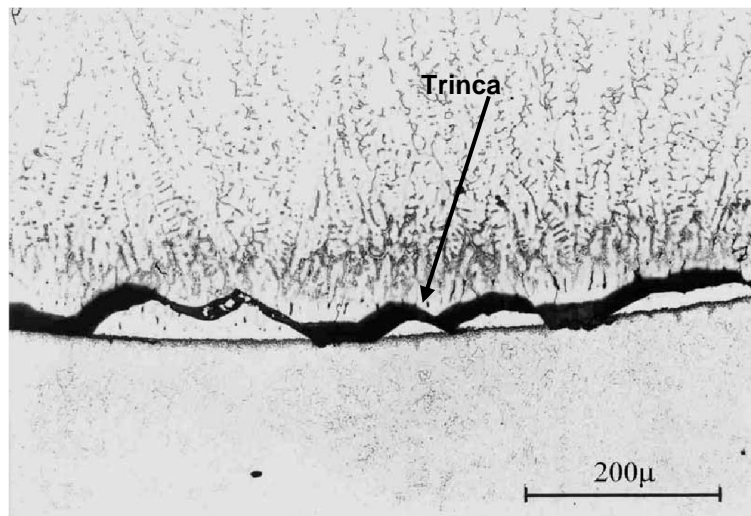
As taxas de resfriamento que produzem diferentes microestruturas e durezas diferentes são estabelecidas por estudos laboratoriais de cada tipo de aço, usando as taxas de resfriamento que o aço experimenta durante a soldagem. A martensita de um aço com CE elevado é dura, frágil e especialmente susceptível às trincas por hidrogênio. Como a temperatura de início da formação da martensita é relativamente baixa, as trincas tendem a ocorrer em baixas temperaturas. Por esta razão, elas geralmente são chamadas de trincas à frio. [17; 26]

3.2.2.3. *Descolamento dos revestimentos (Disbonding)*

O dano mais severo que a fragilização por hidrogênio pode causar ao equipamento é associado a trinca na interface do revestimento (Figura 5). Este tipo de falha é denominado de descolamento do revestimento ou *disbonding*.

O descolamento do revestimento pode ocorrer após o resfriamento dos reatores de hidrocessamento, que operam em altas temperaturas sob alta pressão parcial de hidrogênio. Este fenômeno tem sido observado durante o resfriamento do reator decorrente de uma parada. A tendência para descolamento pode aumentar com o aumento das pressões parciais de hidrogênio e as temperaturas de operação, bem como com o resfriamento rápido durante a parada. [27; 28; 29]

Figura 5 - Trinca de descolamento do revestimento de aço inoxidável 309L soldado por arco submerso.



Fonte: Gittos [1992].

A propagação da trinca ocorre ao longo da zona de precipitação de carboneto e ao longo dos contornos de grão na região de interface do revestimento. Esta propagação de trinca frequentemente está numa região estreita contendo entre 15 e 80% de cromo.[27; 28]

O fenômeno de descolamento de revestimento pode ser associado a quatro causas principais: [27; 28]

- Presença de alta concentração de hidrogênio na interface do revestimento após o resfriamento do equipamento;
- Presença de uma microestrutura susceptível na interface do revestimento;
- Precipitação de carbonetos ao longo dos contornos de grão do revestimento próximo a interface;
- Alta nível de tensão residual.

Um destes fatores que pode ser concentrado os estudos é a microestrutura obtida próximo a interface. Uma microestrutura típica na interface entre o material de base e o revestimento consiste de uma camada fina decarbonetada da ZAC e uma camada fina martensítica do lado do revestimento.

A solubilidade do hidrogênio é muito mais elevada no revestimento de aço inoxidável do que no metal de base do aço CrMo, já a difusividade de hidrogênio é muito mais baixa do que no metal de base. Deste modo, os tempos de difusão são inversamente proporcionais ao coeficiente de difusão. A permeabilidade do hidrogênio através do revestimento do aço inoxidável é de aproximadamente 100 vezes mais lenta do que no metal de base CrMo. Por esta razão, o hidrogênio se acumula e fica aprisionado na interface do revestimento de solda após o resfriamento do equipamento, eventualmente isso leva ao “disbonding”. [27; 28; 29]

3.2.2.4. *Fragilização pelo revenido*

Os aços Cr-Mo contendo até 2,5%Cr foram desenvolvidos, especificamente, para trabalhos em altas temperaturas, e em ambientes com baixa corrosividade, onde se necessita de elevada resistência mecânica. Por outro lado, para serviços em ambientes com corrosividade alta e que requeiram menor resistência mecânica, devem ser utilizados aços com teores de cromo acima dos 2,5%. São exemplos de equipamentos ou componentes do primeiro caso, as tubulações de vapor de alta temperatura e alta pressão, e do segundo caso, tubos de fornos.

Fragilização ao revenido refere-se à diminuição da ductilidade de aços quando aquecido/resfriado lentamente no intervalo de temperatura de 350°C a 600°C. Fragilização ao revenido também pode ocorrer como resultado da exposição térmica para esta faixa de temperatura. Na maioria dos casos, as propriedades de dureza e de tração do material não mostram qualquer alteração devido a fragilização, mas a temperatura de transição dúctil-frágil pode ser aumentada em 100°C. [4; 31; 32]

Os fatores mais críticos para a fragilização ao revenido são:[33]

- 1) Composição do aço, história térmica, temperatura do metal e tempo de exposição;
- 2) A susceptibilidade à fragilização ao revenido largamente determinada pela presença de elementos de liga, manganês e silício, e os elementos residuais de fósforo, estanho, antimônio e arsênio;
- 3) A fragilização pode ocorrer durante tratamentos térmicos de fabricação, mas a maioria dos danos ocorre ao longo de muitos anos de serviço na faixa de temperatura de fragilização.

A fragilização ao revenido causa a elevação da temperatura de transição dúctil-frágil. Diversas correlações têm sido realizadas com a composição química. No entanto, as mais aceitas são os fatores J (Watanabe) e X (Bruscato), apresentados nas Equação 2 e Equação 3.[33; 34]

$J = (Si + Mn) * (P + Sn) * 10^4$ (Metal base)	% peso	Equação 2
$X = \frac{(10P + 5Sb + 4Sn + As)}{100}$ (Zona fundida)	ppm	Equação 3

O fator J se aplica ao aço do metal de base, enquanto o fator X é aplicado a zona fundida. O modo mais comum de se evitar a fragilização ao revenido é limitando os teores dos elementos deletérios, de modo a se obter menores valores de J e X. Valores máximos usualmente adotados para o aço

2,25Cr-1,0Mo são de 100 para J e 15 para X segundo a norma API RP 571 (2003). Tratamentos térmicos de revenimento acima de 620°C, com rápido resfriamento, têm sido adotados para reverter os efeitos dessa fragilização. [33]

3.2.2.5. Trinca de reaquecimento

O fenômeno da trinca de reaquecimento é um problema que ocorre em aços que contêm cromo, molibdênio e vanádio, esses elementos são usados para aumentar a resistência à oxidação e resistência em alta temperatura de serviço. Quando os aços CrMo e CrMoV são reaquecidos, geralmente na faixa de 550-650°C, após a soldagem para aliviar tensões, podem ocorrer trincas na ZAC durante o reaquecimento.[26]

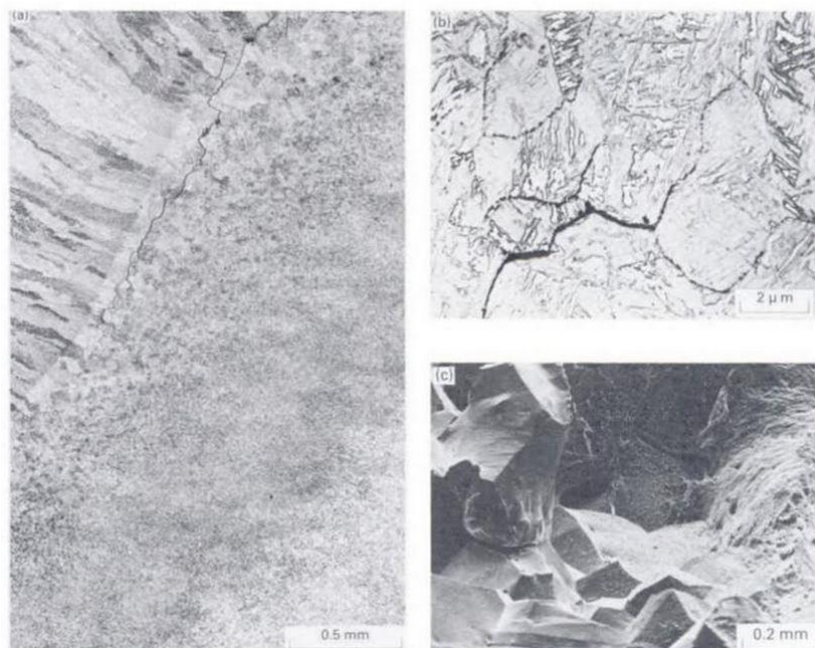
A Equação 4 foi proposta para avaliar a susceptibilidade à trinca de reaquecimento.

$$CS = \%Cr + 3,3 * (\%Mo) + 8,1 * (\%V) - 2$$

Equação 4

Quando o valor de CS é igual ou maior do que zero, o aço pode ser susceptível a trinca de reaquecimento. As trincas de reaquecimento são intergranulares seguindo os contornos dos grãos grosseiros da ZAC (Figura 6) de uma solda que foi submetida a elevadas temperaturas tanto por um TTPS, quanto em serviço. [26]

Figura 6 - Aparência de trinca de reaquescimento.



Fonte: Bailey [1994].

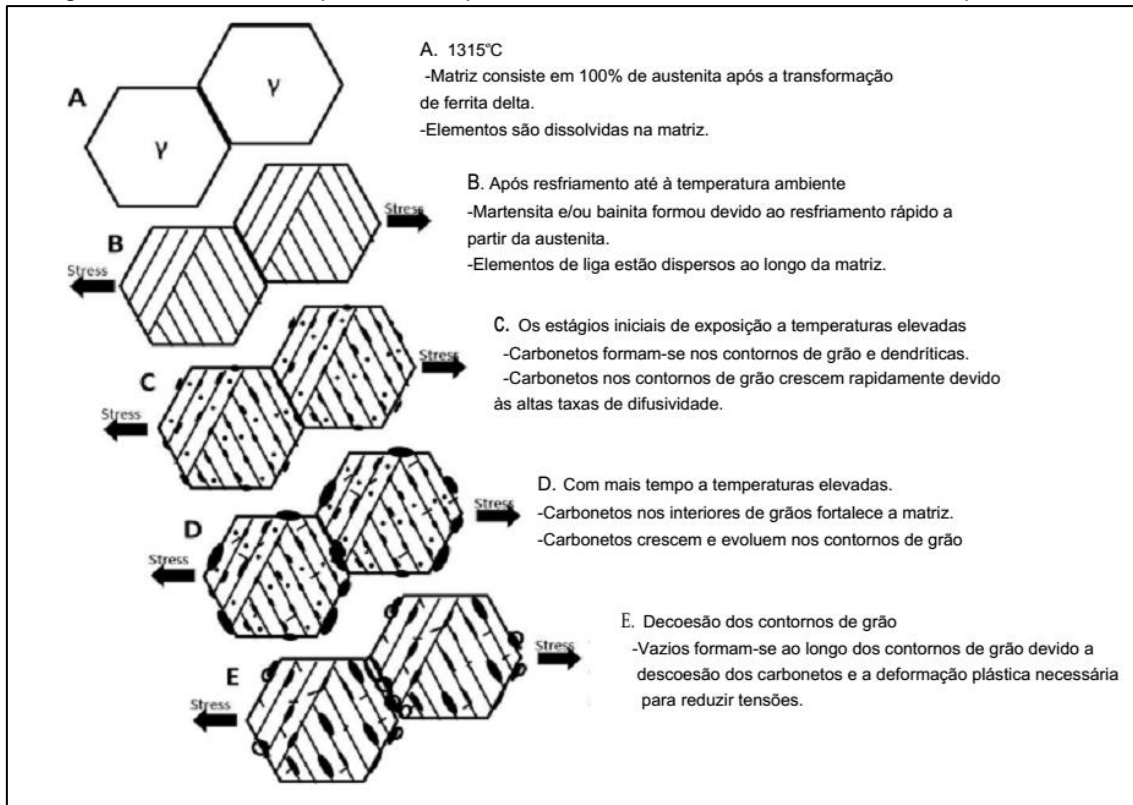
Um campo de estudo onde o fenômeno de trinca de reaquescimento tem recebido muita atenção é na construção de equipamentos para a geração de energia e tratamento de petróleo onde para a construção e manutenção deles são realizadas soldagens de união e revestimento dos aços CrMo e CrMoV. Nesses equipamentos pressurizados, o fenômeno se manifesta com pequenas trincas na ZAC dos revestimentos austeníticos ou, em algumas situações, como pequenas trincas na solda estrutural do equipamento. [35]

O mecanismo de trinca de reaquescimento é amplamente compreendido embora os detalhes dos parâmetros de controle e a sua interpretação do mecanismo continuem a ser objeto de discussão. Em termos gerais, a trinca resulta quando as tensões de relaxamento que ocorrem com alívio de tensões residuais durante o tratamento térmico pós-soldagem excedem a ductilidade local do material. Fatores que influenciam o nível de tensão residual resultante da soldagem ou o mecanismo de deformação envolvido no alívio são, portanto, significativos, sendo estes últimos particularmente sensíveis a pequenas alterações no teor de elementos de liga e impurezas e na microestrutura da ZAC. [26; 36]

Diversos pesquisadores descrevem teorias para explicar o mecanismo de trinca de reaquecimento. A Figura 7 apresenta um desenho esquemático do mecanismo de formação da trinca de reaquecimento. A forma mais comum de explicação do fenômeno é dada por:

- a) Durante a soldagem, os diversos carbonetos do material são dissolvidos na matriz quando a temperatura ultrapassa 1200 °C.
- b) Devido a elevada taxa de resfriamento, a precipitação desses carbonetos praticamente não ocorre, formando martensita e bainita a partir da austenita prévia;
- c) O TTAT realizado após a soldagem ou em condições de operação, podem precipitar como carbonetos os elementos que se encontram em solução sólida supersaturada. Esses precipitados provocam um enrijecimento considerável, aumentando a dureza (endurecimento secundário). Porém, os contornos de grão ficam geralmente isentos de carbonetos;
- d) O alívio de tensão pelo tratamento térmico será então limitado pela maior resistência no interior dos grãos e a deformação ocorrerá principalmente ao longo dos contornos. Embora a deformação global seja pequena, altas tensões de cisalhamento e de tração são envolvidas nos contornos.
- e) A deformação ocorrida nos contornos resultará em pequenos vazios, que aliados com outras descontinuidades, darão lugar a trinca de reaquecimento.

Figura 7 – Desenho esquemático representando o fenômeno da trinca de reaquescimento.



Fonte: Sind Kou.

3.3 Soldagem de reparo

Existem diversas técnicas de soldagem de reparo de aços. Dentre as principais podem ser citadas as seguintes:

1. Técnica da meia camada
2. Técnica da Dupla camada
3. Técnica da Tripla Camada
4. Soldagem seguida de TTPS.

Higuchi [1980], elaborou a primeira metodologia para selecionar condições adequadas para o reparo por soldagem com o método da meia camada aplicada a aços de baixa liga. Em seu trabalho foi avaliada a viabilidade da aplicação da técnica da meia camada para o aço utilizado, comparando as propriedades mecânicas das soldas que foram reparadas com o método convencional submetido ao tratamento térmico pós-soldagem e às de soldas não tratadas reparadas com o método de meia camada. [37]

3.3.2. Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada (TDC-DC)

A técnica de deposição controlada com dupla camada tem como objetivo promover a sobreposição de ciclos térmicos, de modo que a segunda camada depositada promova a formação de uma microestrutura adequada e que realize o revenimento da zona afetada pelo calor e da zona fundida das camadas soldadas.

Na soldagem com dupla camada, a energia de soldagem, temperatura de preaquecimento e interpasse, sobreposição de passes e ângulo do eletrodo devem ser rigorosamente controlados para que se tenha resultado satisfatório da técnica.[38] Alguns trabalhos mostram os principais fatores que devem ser observados para o desenvolvimento da técnica da dupla camada, são eles:[39]

- 1) Estimar as dimensões do reforço, da penetração e da largura do cordão de solda em função das condições de soldagem;
- 2) Determinar o grau de revenimento e de refino dos grãos e os fenômenos de precipitação e segregação, em função dos ciclos térmicos de soldagem;
- 3) Controlar a temperatura de preaquecimento e de interpasse durante a soldagem diminuindo a formação de martensita nas regiões da zona afetada pelo calor;
- 4) Definir com precisão os ciclos térmicos de soldagem e determinar a distribuição das temperaturas de pico na peça.

3.3.3. Critérios de microdureza e microestrutura

De forma geral, a Técnica de Deposição Controlada é avaliada por dois critérios:[40; 41; 42; 43]

- 1) Critério de Microdureza;
- 2) Critério de Microestrutura.

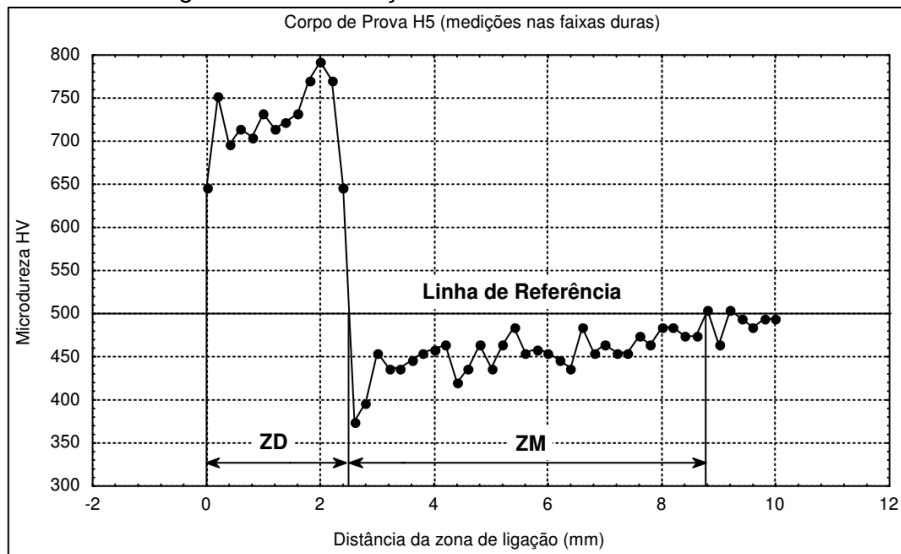
A seguir está apresentado um detalhamento dos critérios de microdureza e de microestrutura.

3.3.3.1. Critério de microdureza

O Critério de microdureza é utilizado para a determinação das extensões das zonas duras (ZD) e das zonas macias (ZM).

A zona dura vai da linha de fusão ($X = 0$) até a distância em que a microdureza corresponde ao valor limite entre ZD e ZM. A zona macia vai do final da zona dura até a distância em que a dureza se iguala a microdureza do metal de base. A Figura 8 apresenta um perfil de microdureza com a distinção entre zona dura e zona macia.

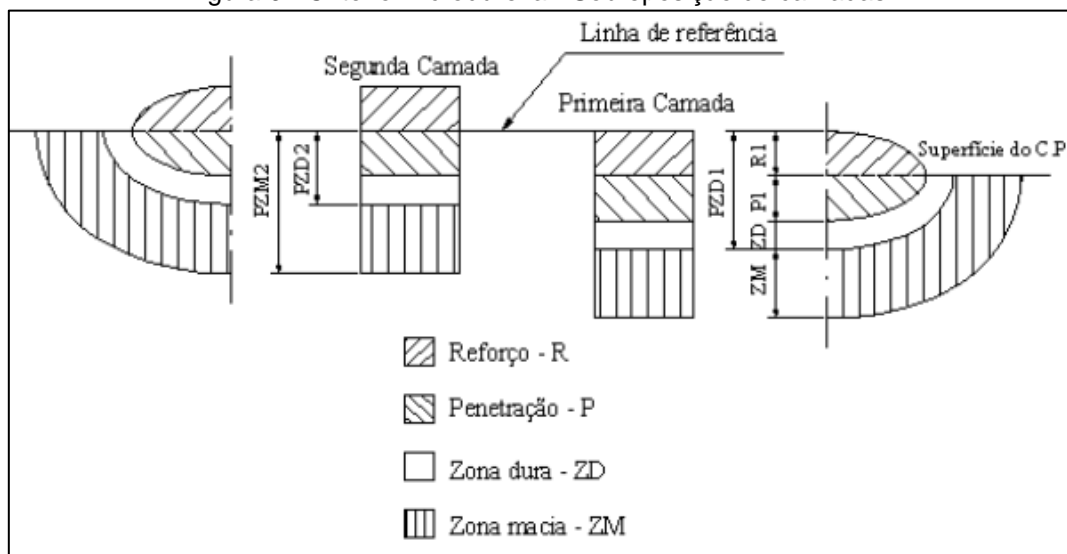
Figura 8 - Identificação de zona dura e zona macia.



Fonte: Aguiar [2010].

A escolha dos parâmetros que serão aplicados na primeira e na segunda camada deve obedecer aos seguintes critérios conforme a Figura 9.

Figura 9 - Critério Microdureza - Sobreposição de camadas.



Fonte: Aguiar [2010].

Para alcançar o revenimento da ZAC da primeira camada é adotado o critério de microdureza, conforme as relações apresentadas a seguir:[40; 45; 46]

$$R1 + P1 \geq PZD2$$

Equação 5

$$PZM2 \geq PZD1$$

Equação 6

Onde:

R1: extensão do reforço da primeira camada;

P1: extensão da penetração da primeira camada;

PZD1: profundidade da zona dura da primeira camada;

PZD2: profundidade da zona dura da segunda camada;

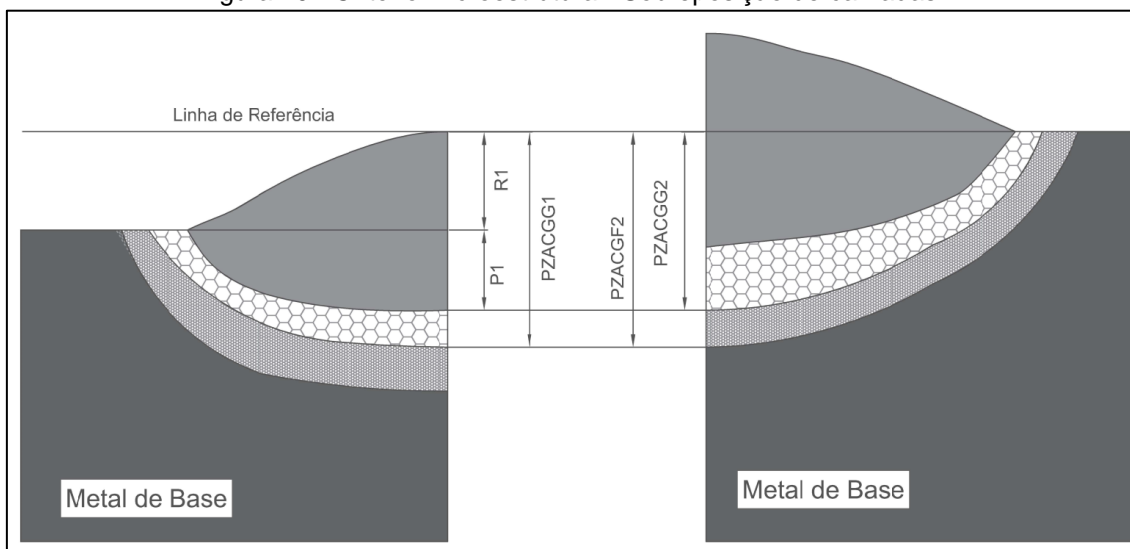
PZM2: profundidade da zona macia da segunda camada.

3.3.3.2. Critério de Microestrutura.

O Critério de Microestrutura é utilizado para a determinação das extensões das zonas afetadas pelo calor de grãos grosseiros (ZAC-GG) e de grãos refinados (ZAC-GF). Este critério foi proposto pelo Laboratório de Engenharia de Soldagem da Universidade Federal do Ceará, na realização de trabalho de pesquisa com aplicação da dupla camada na soldagem de aços ASTM A516 Gr. 70. [40]

O critério de microestrutura consiste em encontrar relações de parâmetros de soldagem em que a ZAC-GG formada na primeira camada de soldagem seja refinada pela sobreposição da ZAC-GF da segunda camada e que não haja sobreposição da ZAC-GG da segunda camada com a ZAC-GG da primeira camada. A Figura 10 representa um desenho esquemático das dimensões utilizadas para análise do critério de microestrutura.

Figura 10 - Critério Microestrutura - Sobreposição de camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para alcançar o refinamento da ZAC da primeira camada são adotadas as equações do critério de microestrutura, conforme as relações apresentadas a seguir:[40; 45]

$$R1 + P1 \geq PZACGG2$$

Equação 7

$$PZACGF2 \geq PZACGG1$$

Equação 8

Onde:

R1: extensão do reforço da primeira camada;

P1: extensão da penetração da primeira camada;

PZACGG1: profundidade da ZAC grão grosseiro da primeira camada;

PZACGG2: profundidade da ZAC grão grosseiro da segunda camada;

PZACGF2: profundidade da ZAC grão fino da segunda camada.

3.3.4. Avaliação da TDC-DC

Conforme normas nacionais e internacionais, é necessário determinar se o procedimento da TDC-DC produziu boas propriedades na ZF e na ZAC, com isso alguns ensaios são requeridos:[9; 47]

- 1) Caracterização microestrutural da zona fundida (ZF) e da zona afetada pelo calor (ZAC): Essa avaliação vai determinar a presença de martensita não revenida e regiões de crescimento de grão excessivo.
- 2) Ensaio de Dureza: uma avaliação sistemática nos valores de dureza da zona fundida e da zona termicamente afetada fornecerá informações globais sobre a microestrutura obtida. Uma avaliação de dureza vai fornecer uma boa indicação sobre se as microestruturas desejadas na ZAC foram alcançadas.
- 3) Ensaio de impacto Charpy: fornece informação sobre a tenacidade ao impacto da ZAC na condição de como soldado com dupla camada.
- 4) Ensaio de dobramento: fornece informação sobre a ductilidade e deformação da ZAC.
- 5) Ensaio de tração: fornece informações sobre a resistência do material.

Trabalhos de pesquisa foram realizados no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem-LPTS/UFC envolvendo a soldagem utilizando a técnica da dupla camada. Alguns deles são descritos a seguir.

Aguiar, realizou estudos sobre o efeito da soldagem com a técnica da dupla camada na microestrutura e tenacidade da ZAC do aço ABNT 4140. Os resultados obtidos em seu trabalho mostraram que o grau de refino da ZAC-GG proporcionado pela técnica da dupla-camada para o aço ABNT 4140 foi suficiente para promover o refino de grão adequado (Figura 11). A tenacidade

foi semelhante à obtida nos corpos de prova submetido ao TTPS e ainda, superior a do metal base temperado e revenido em três condições diferentes, podendo portanto, dispensar o TTPS.[46; 48]

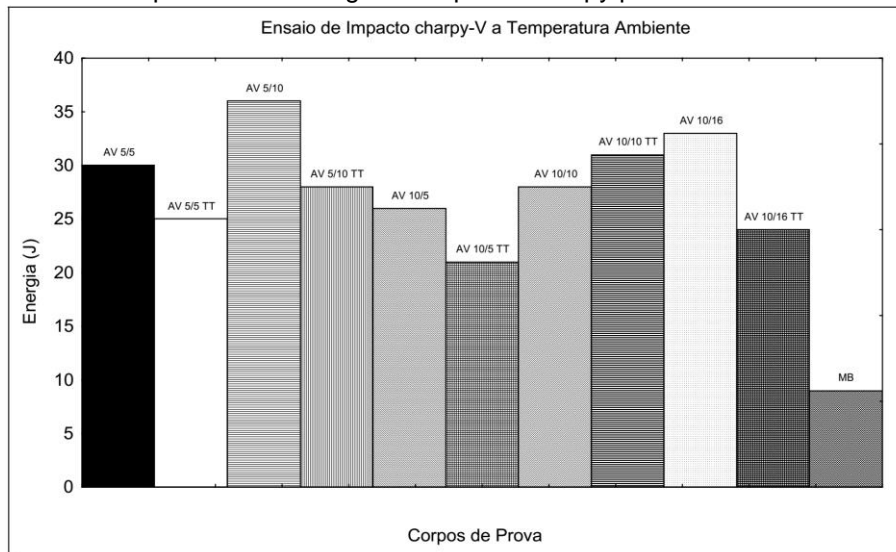
Figura 11 - Microestrutura da ZAC-GG: (a) cordão isolado (b) corpo de prova com dupla camada.



Fonte: [46] .

Azevedo, estudou em sua dissertação a aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045. Em seu trabalho foi realizado um comparativo do resultado de tenacidade Charpy entre amostras soldadas com dupla camada e as soldadas com dupla camada e tratadas termicamente. O resultado obtido foi que a técnica da dupla camada para o aço ABNT 1045 mostrou-se eficiente, pois para todos os níveis de energia empregados, alcançou-se tenacidade semelhante à obtida nos corpos de prova com tratamento térmico pós-soldagem – TTPS (Figura 12) e, muito superior à tenacidade alcançada pelo metal de base. [39; 49]

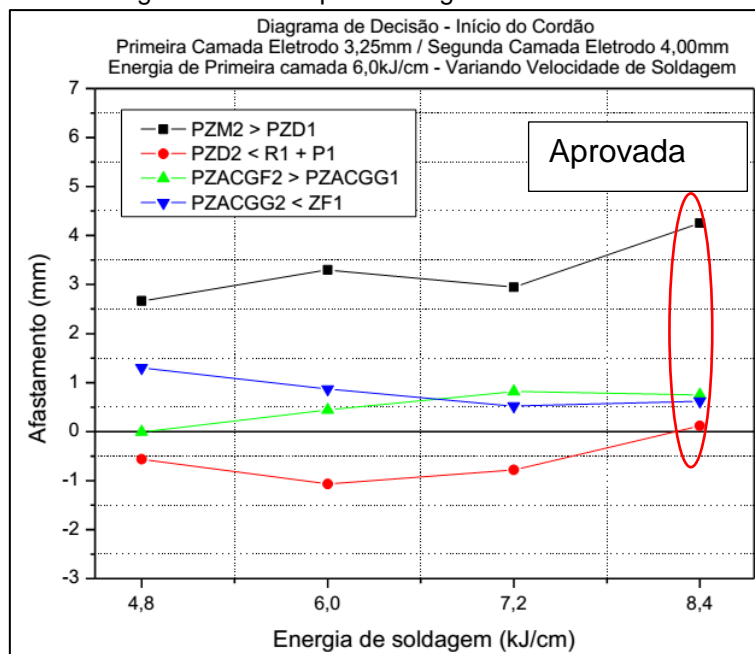
Figura 12 - Comparativo de energia de impacto Charpy para o eletrodo AWS E7018.



Fonte: [49]

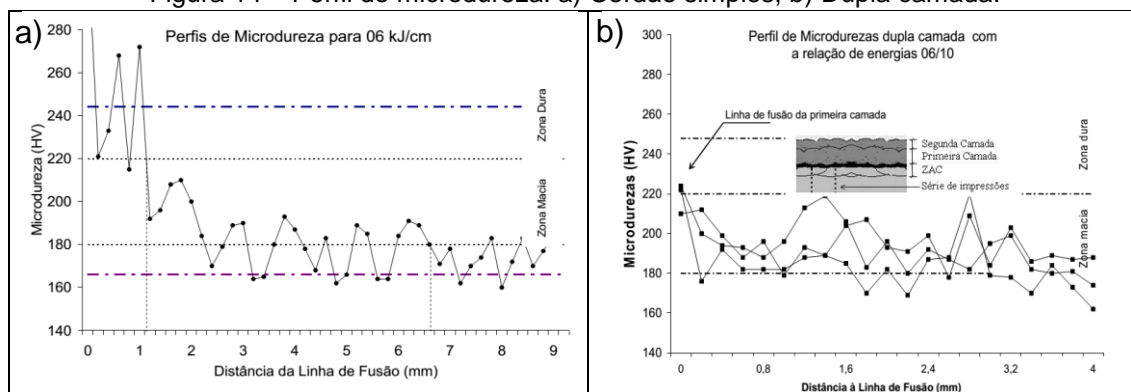
Miranda, desenvolveu o critério de microestrutura e elaborou a metodologia do Diagrama de Decisão em uma pesquisa realizada aplicando a dupla camada na soldagem do aço ASTM A516 Gr.70. Esse diagrama consolida em uma só análise o critério de microdureza e de microestrutura, considerando cada relação de parâmetros. Quando o afastamento, que corresponde ao valor da desigualdade da Equação 5, da Equação 6, da Equação 7 e da Equação 8 é igual ou maior que zero, significa aprovação e se for negativo, significa reprovação. A Figura 13 mostra um diagrama de decisão. No eixo da abcissa estão apresentadas as energias de soldagem e da ordenada o afastamento em milímetros.[40; 50]

Figura 13 - Exemplo de Diagrama de Decisão.



Cruz, estudou na sua dissertação os efeitos da técnica de dupla camada na soldagem do aço ASTM A516 Gr.60, fazendo uso do critério de microestrutura e dos diagramas de decisão. Uma das relações de energia de soldagem utilizada foi de 6 kJ/cm na primeira camada e 10 kJ/cm na segunda camada. Segundo o autor, a dureza obtida a partir da linha de fusão da primeira camada, ou seja, na região da ZAC, foi menor quando comparada com a dureza em cordões de simples deposição, caracterizando um revenimento efetivo promovido pela dupla camada, conforme apresentada na Figura 14.

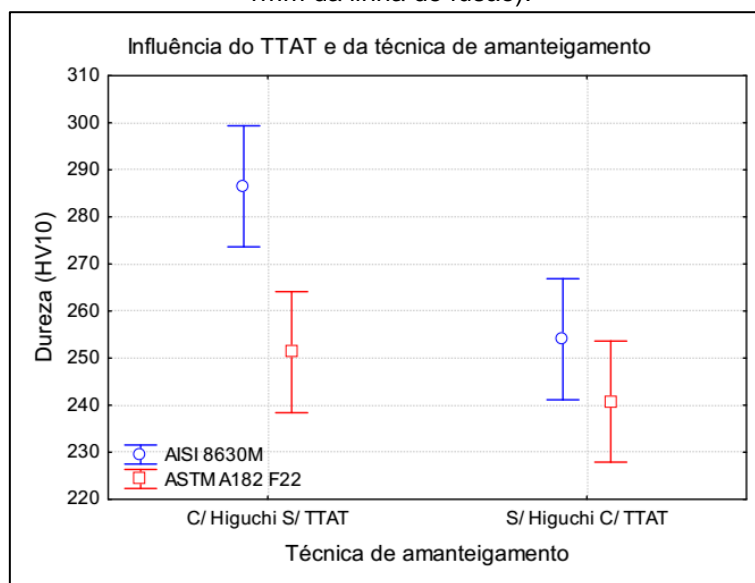
Figura 14 – Perfil de microdureza. a) Cordão simples, b) Dupla camada.



Fonte: [50]

Oliveira, avaliou a soldagem do aço AISI 8630M e no aço ASTM A182 F22 (2,25Cr-1,0Mo) com o eletrodo AWS ERNiCrMo-3 pelo processo MIG/MAG, por meio da técnica de deposição controlada com dupla camada. Especificamente o resultado de dureza mostrou que o procedimento de amateigamento, utilizando uma relação de parâmetros aprovada no diagrama de decisão para o aço ASTM A182 F22, apresentou menores valores de dureza que o aço AISI 8630M, esse resultado já era esperado em função do menor teor de carbono do aço ASTM A182 F22 (Figura 15). Já para um procedimento de amateigamento convencional, ou seja, deposição de camadas sem relação de parâmetros aprovada no diagrama de decisão seguida de TTAT, não foram observadas diferenças significativas entre os dois aços. Entretanto, comparando-se somente o aço ASTM A182 F22 foi observado que a dupla camada aprovada no diagrama de decisão não apresentou diferença significativa na dureza quando comparada com a dupla camada reprovada e tratada termicamente. Tais fatos, corroboram com resultados anteriores mostrando a eficácia da técnica de deposição controlada na redução de dureza na ZAC.[41]

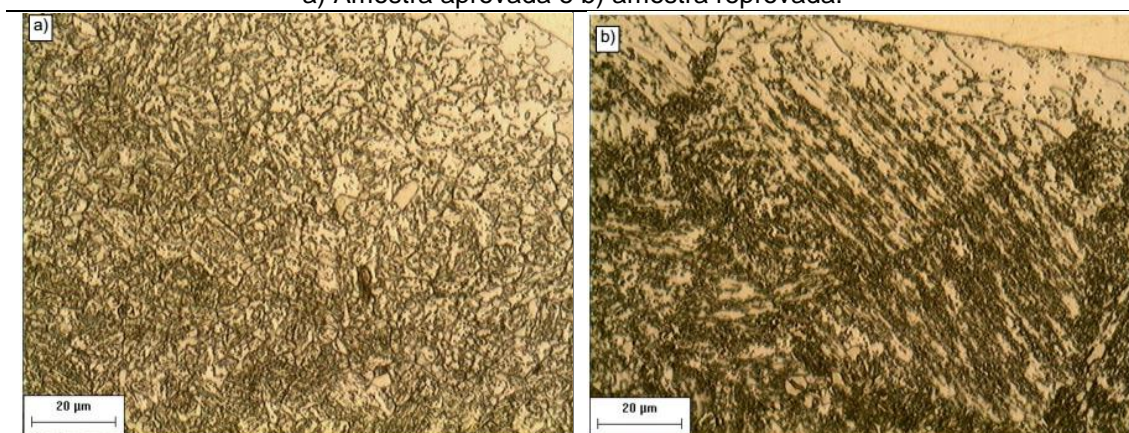
Figura 15 - Análise de variância do efeito técnica de amanteigamento na dureza da ZAC (até 1mm da linha de fusão).



Fonte: [41]

Com relação ao critério de microestrutura, Oliveira, observou no aço ASTM A182-F22 que a ZAC da dupla camada aprovada apresentou a microestrutura intensamente refinada quando comparada a uma amostra de dupla camada reprovada do mesmo aço. As microestruturas descritas podem ser observadas na Figura 16.

Figura 16 - Microestruturas encontradas nas ZAC's de duas amostras do aço ASTM A182 F22. a) Amostra aprovada e b) amostra reprovada.



Fonte: [41]

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os principais materiais utilizados e em seguida a descrição da metodologia adotada para a realização do trabalho.

4.1 Materiais

4.1.1. Metais de base

Os metais de base utilizados neste trabalho foram três aços de baixa liga classificados como aço cromo-molibdênio e aço cromo-molibdênio-vanádio. Na Tabela 5 está apresentada a faixa de valores de composição química permitida para cada elemento.

Tabela 5 – Faixa de composição química do metal de base.[2; 3]

Material	Composição (%)						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
ASTM A387-Gr11 (1,25Cr-0,5Mo)	0,04- 0,17	0,35- 0,73	0,025 máx	0,025 máx	0,44- 0,86	0,94- 1,56	0,40- 0,79
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
ASTM A387-Gr 22 (2,25Cr-1,0Mo)	0,04- 0,15	0,25- 0,66	0,025 máx	0,025 máx	0,50 máx	1,88- 2,62	0,85- 1,15
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
ASTM A542-Tipo D (2,25Cr-1,0Mo-0,25V)	0,09- 0,18	0,25- 0,66	0,020 máx	0,015 máx	0,13 máx	1,88- 2,62	0,85- 1,15
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
	V	Ni	Cu	Ti	Nb		
	0,23- 0,37	0,28 máx	0,23 máx	0,035 máx	0,08 máx		

Fonte: ASTM A387 e ASTM A542.

Foi utilizado o aço ASTM A182 F22 para estudos preliminares de soldagem. A composição do aço está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Faixa de composição química do metal de base.[51]

Material	Composição (%)						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
ASTM A182 F22 (2,25Cr-1,0Mo)	0,05- 0,15	0,30- 0,60	0,04 máx	0,04 máx	0,5 máx	2,00- 2,50	0,87- 1,13
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo

Fonte: ASTM A182.

4.1.2. Metais de adição

Foram utilizados seis metais de adição, distribuídos em eletrodos para soldagem similar e dissimilar.

Os metais de adição similares utilizados foram os arames AWS ER80S-B2 para soldagem do aço ASTM A387 Gr11, AWS ER90S-B3 para a soldagem do ASTM A387 Gr22, ambos com diâmetro de 1,2 mm.

Para a soldagem MIG/MAG do aço ASTM A542 Tipo D, não existe arame-eletrodo comercial com composição similar a esse material. Um fabricante de consumíveis de soldagem desenvolveu, por demanda da Petrobras S.A., uma bobina de arame-eletrodo protótipo do tipo “metal-cored” com diâmetros de 1,14 mm.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de composição química dos metais de adição similares utilizados. No entanto, para o eletrodo protótipo não há norma vigente com relação a composição química para arame eletrodo.

Tabela 7 – Faixa de composição química dos metais de adição similares. [52]

Material	Composição (%)				
	C	Mn	Si	P	S
AWS ER80S-B2 Ø=1,2 mm	0,07-0,12	0,40-0,70	0,40-0,70	0,025 máx	0,025 máx
	Ni	Cr	Mo	Cu	
	0,20 máx	1,20-1,50	0,40-0,65	0,35 máx	
AWS ER90S-B3 Ø=1,2 mm	C	Mn	Si	P	S
	0,07-0,12	0,40-0,70	0,40-0,70	0,025 máx	0,025 máx
	Ni	Cr	Mo	Cu	
	0,20 máx	2,30-2,70	0,90-1,20	0,35 máx	
Eletrodo protótipo Ø=1,14 mm	C	Mn	Si	P	S
	0,08	1,17	0,40	0,007	0,007
	Ni	Cr	Mo	Cu	V
	0,074	2,24	0,92	0,02	0,21

Fonte: AWS A5.28.

A liga de níquel AWS ERNiCrMo-3 é a liga recomendada para aplicação de reparo em revestimento de equipamentos fabricados com o aço ASTM A387 Gr11. Os eletrodos de aços inoxidáveis austeníticos AWS ER309L e AWS ER347 são os materiais recomendados para a soldagem de revestimento anticorrosivo nos aços ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D. Na Tabela 8 estão apresentados os valores de composição química dos materiais de adição dissimilares utilizados.

Tabela 8 - Composição química metais de adição dissimilares. [53; 54]

Material	Composição (%)					
	C	Mn	P	S	Si	Cr
AWS ERNiCrMo3 Ø=1,2 mm	0,10 máx	0,50 máx	0,02 máx	0,015 máx	0,50 máx	20,0-23,0
	Fe	Cu	Ti	Nb	Mo	Ni
	5,0 máx	0,50 máx	0,40 máx	3,15-4,15	8,0-10,0	Bal.
AWS ER309L Ø=1,2 mm	C	Mn	P	S	Si	Cr
	0,03 máx	1,0-2,5	0,03 máx	0,03 máx	0,30-0,65	23,0-25,0
	Fe	Cu	Ti	Nb	Mo	Ni
Bal.	0,75 máx	-	-	0,75 máx	12,0-14,0	
AWS ER347 Ø=1,2 mm	C	Mn	P	S	Si	Cr
	0,08 máx	1,0-2,5	0,03 máx	0,03 máx	0,30-0,65	19,0-21,5
	Fe	Cu	Ti	Nb	Mo	Ni
Bal.	0,75 máx	-	0,08 máx	0,75 máx	9,0-11,0	

Fonte: AWS A5.9 e A5.14.

4.1.3. Gases de proteção

Os gases de proteção utilizados para as soldagens foram misturas binária à base de argônio. As composições químicas dos gases utilizados estão listadas na Tabela 9.

O gás 1 (Ar+25%He) foi escolhido para a soldagem de revestimento utilizando-se o eletrodo AWS ERNiCrMo-3 (Liga 625) e o gás 2 (Ar+4%CO₂) foi utilizado para as soldagens dos demais eletrodos similares e dissimilares, estes gases foram escolhidos baseado em pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem – LPTS. [41; 42; 43; 44]

Tabela 9 - Composição química dos gases de proteção.

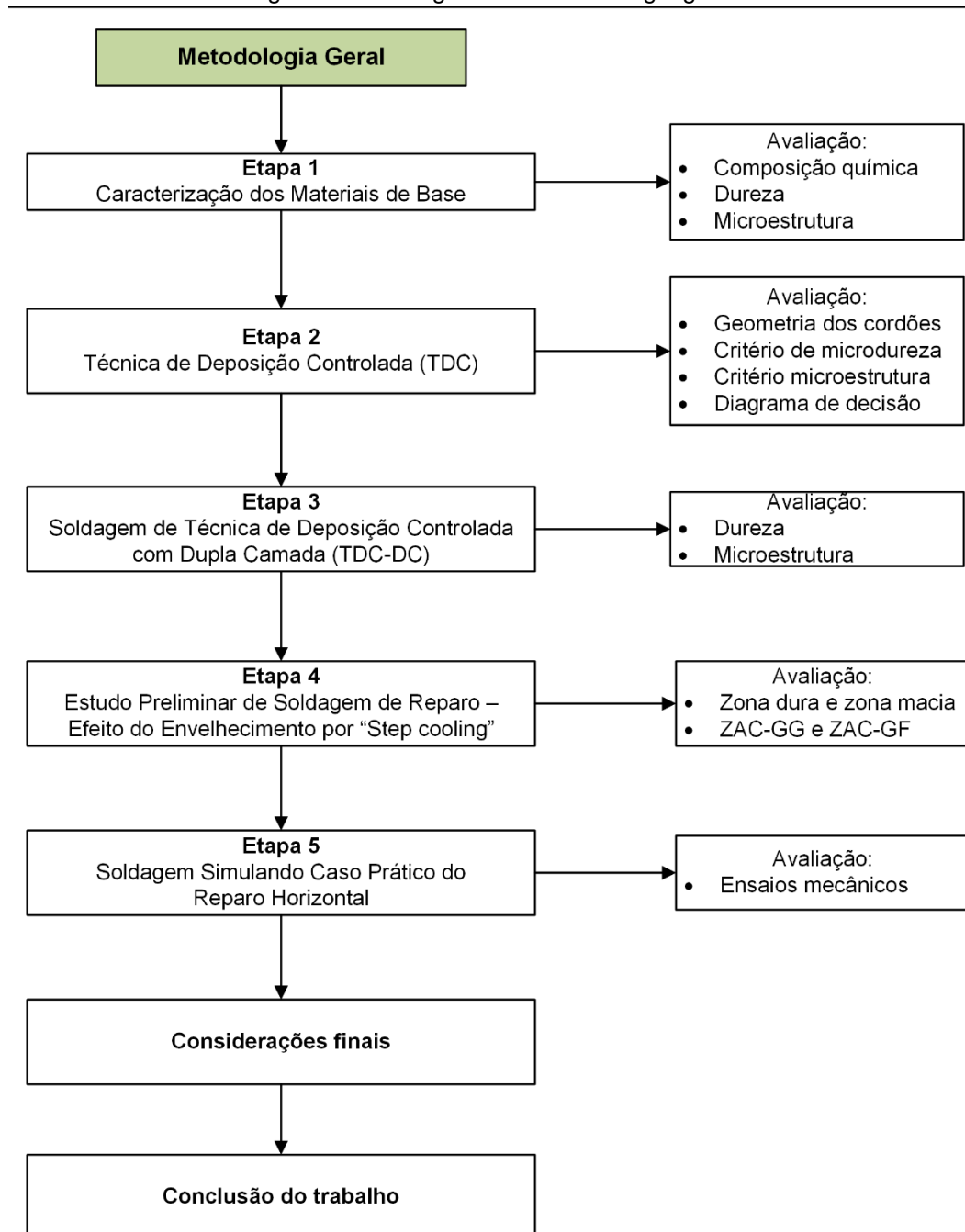
Gás de proteção	Composição		
	Argônio (%)	Hélio (%)	Dióxido de carbono (%)
Gás 1	75	25	-
Gás 2	96	-	4

Fonte: Própria do autor.

4.2 Metodologia

A seguir, serão apresentadas as etapas principais adotadas neste trabalho, posteriormente é descrita a metodologia utilizada para a realização de cada etapa. Na Figura 17 está apresentado o fluxograma geral.

Figura 17 - Fluxograma da metodologia geral.



4.3 Etapa 1 – Caracterização dos materiais de base

Inicialmente, foram realizadas análises de composição química dos metais de base através da técnica de espectrometria de emissão ótica. A caracterização microestrutural do material de base foi realizada na condição como recebido pelo fato do material ter sido adquirido já na condição de tratado termicamente.

O ensaio de dureza do material de base foi realizado para determinar se o material se encontrava com dureza aceitável para aplicação. A dureza máxima permitida para aplicação destes materiais na indústria do petróleo e gás está apresentada na Tabela 10, valores obtidos das normas Petrobras N133, API RP934A e API RP934C. [7; 8; 9]

Tabela 10 - Dureza máxima permitida para metal base.

Material	Dureza (HV10)
ASTM A387 Gr.11	237
ASTM A387 Gr.22	250
ASTM A542 Tipo D	250

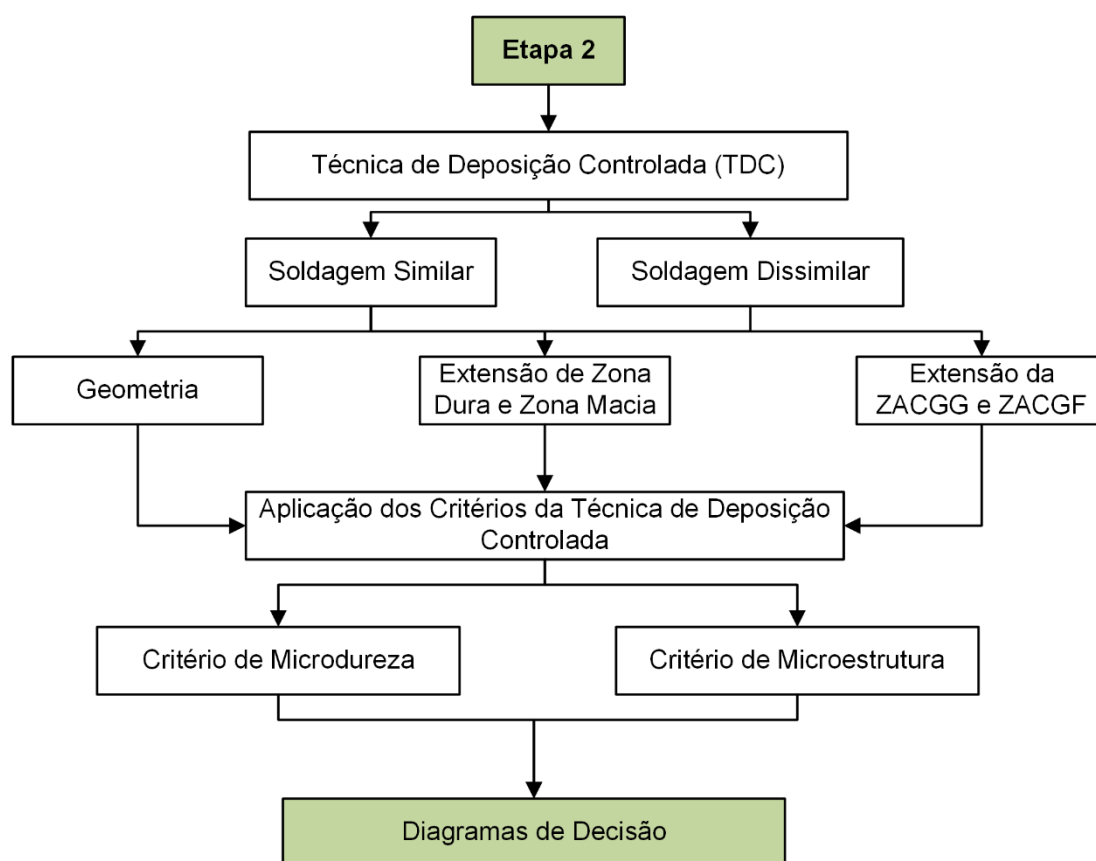
Fonte: Petrobras N133, API RP934A e API RP934C.

4.4 Etapa 2 –Técnica de deposição controlada

Nesta etapa foram realizadas soldagens robotizadas de simples deposição na posição plana, com objetivo de se obter condições de soldagem para primeira e para segunda camada que estejam aprovadas no diagrama de decisão. Na Figura 18 está apresentada um fluxograma geral para a aplicação da Técnica de Deposição Controlada.

Ao final desta etapa deve ser indicada a melhor combinação de parâmetros e de técnicas de soldagem para aplicação de Técnica de deposição Controlada com Dupla Camada para cada condição de soldagem similar e dissimilar (parede e revestimento).

Figura 18 – Fluxograma Etapa 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

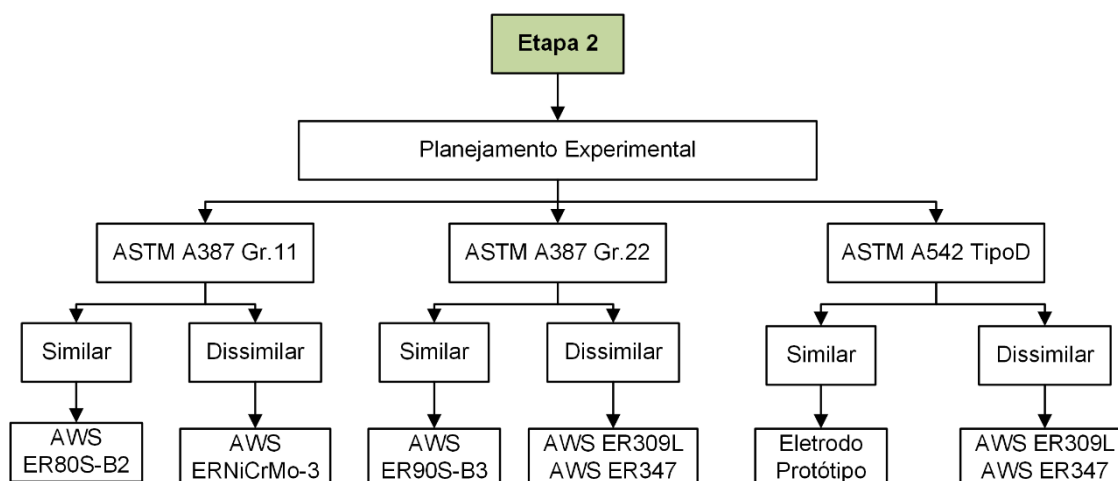
O estudo da Técnica de Deposição Controlada será dividido em duas partes:

- Soldagem Similar (Reparo de parede): envolve os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e Eletrodo Protótipo-CrMoV) utilizados na soldagem de reparo de parede dos componentes fabricados com os aços ASTM A387 Gr11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D.
- Soldagem Dissimilar (Reparo de revestimento): envolve os eletrodos dissimilares (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347) utilizados na soldagem de reparo de revestimentos dos componentes fabricados com os aços ASTM A387 Gr11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D.

4.4.1. Planejamento experimental da Etapa 2

No fluxograma da Figura 19 está apresentada a sequência de soldagem realizada para aplicação dos critérios da Técnica de Deposição Controlada.

Figura 19 – Planejamento da TDC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

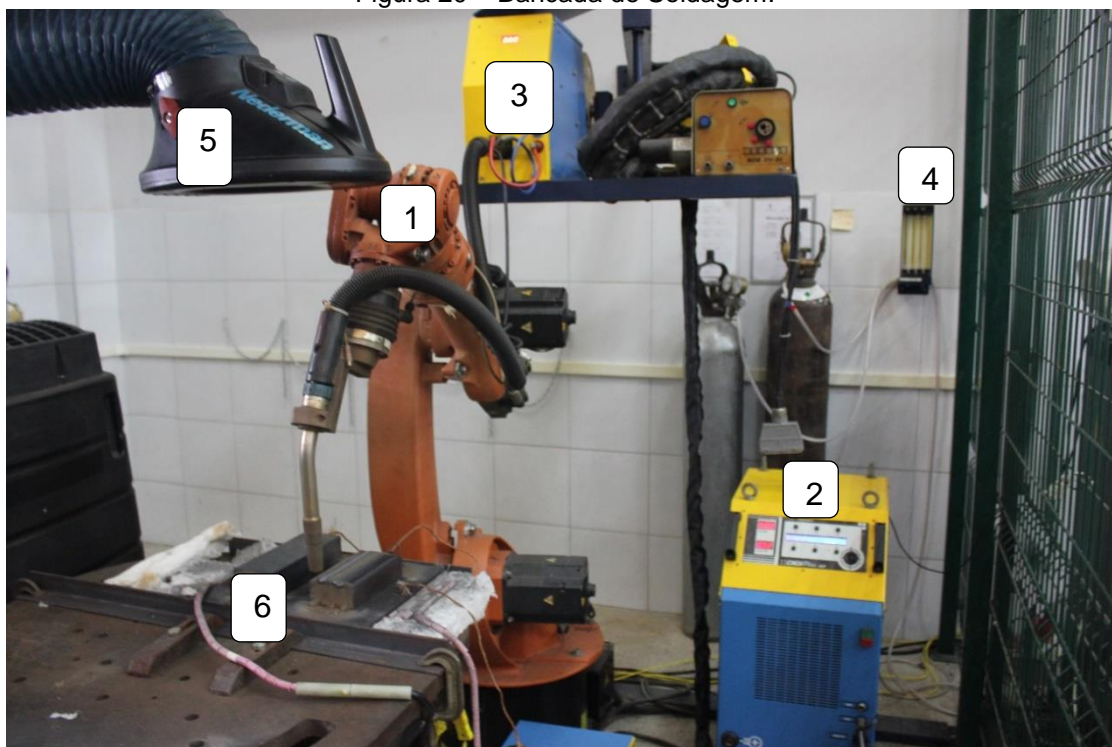
4.4.2. Parâmetros de soldagem da Etapa 2

As soldagens robotizadas foram realizadas com o processo MIG/MAG na posição plana em blocos do aço ASTM A387 Gr11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D com os respectivos eletrodos apresentados na Figura 19. Os aços foram soldados na condição de normalizados seguido de revenimento.

Na Figura 20 está apresentada a bancada utilizada para realização das soldagens dessa etapa. A bancada é composta por:

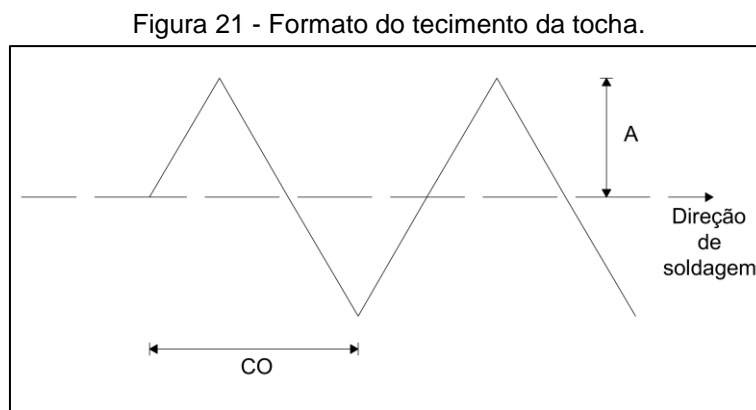
1. Robô industrial;
2. Fonte de soldagem multiprocesso;
3. Alimentador de arame;
4. Misturador de gases;
5. Exaustor de fumos;
6. Sistema de aquecimento da peça.

Figura 20 – Bancada de Soldagem.



Fonte: Própria do autor.

As soldagens foram realizadas com oscilação da tocha no formato triangular, denominado de tecimento triangular (Figura 21). Os valores da amplitude do tecimento (A) e do comprimento de onda (CO) estão apresentados na Tabela 11.



Fonte: Própria do autor.

Tabela 11 - Valores do tecimento da tocha.

Tipo de soldagem	Amplitude (mm)	Comprimento de onda (mm)
Soldagem Similar	2	2
Soldagem Dissimilar	4	2

Fonte: Própria do autor.

As soldagens foram realizadas com distância do bico de contato à peça (DBCP) de 20 mm e com a tocha a 90 graus da superfície da chapa.

Na Tabela 12 são apresentados os fatores de controle e os respectivos níveis para os materiais utilizados na soldagem similar e na Tabela 13 são apresentados os fatores de controle e os respectivos níveis para os materiais utilizados na soldagem dissimilar.

Um experimento fatorial completo foi realizado neste trabalho. Os fatores de controle e os respectivos níveis foram explorados em estudos exploratórios de parâmetros para cada material.

Tabela 12 - Planejamento de soldagem similar.

Metal de base	Metal de adição	Fatores de controle	Quantidade de níveis
ASTM A387 Gr.11	AWS ER80S-B2	Energia de soldagem	5 níveis
		Temperatura de preaquecimento	2 níveis
		Técnica da energia	2 níveis
ASTM A387 Gr.22	AWS ER90S-B3	Energia de soldagem	5 níveis
		Temperatura de preaquecimento	2 níveis
		Técnica da energia	2 níveis
ASTM A542 Tipo D	Eletrodo Protótipo	Energia de soldagem	5 níveis
		Temperatura de preaquecimento	2 níveis
		Técnica da energia	2 níveis

Fonte: Própria do autor.

Tabela 13 - Planejamento de soldagem dissimilar.

Metal de base	Metal de adição	Fator de controle	Quantidade de níveis
ASTM A387 Gr.11	AWS ERNiCrMo-3	Energia de soldagem	4 níveis
		Técnica da energia	2 níveis
ASTM A387 Gr.22	AWS ER309L AWS ER347	Energia de soldagem	5 níveis
		Técnica da energia	2 níveis
ASTM A542 Tipo D	AWS ER309L AWS ER347	Energia de soldagem	5 níveis
		Técnica da energia	2 níveis

Fonte: Própria do autor.

A faixa de energia de soldagem escolhida foi de 0,8 kJ/mm à 2,5 kJ/mm e os parâmetros de soldagem foram ajustados de forma a obter a transferência metálica do tipo goticular em todas as condições.

As energias de soldagem foram alteradas por duas formas (Técnica da Energia): pela corrente de soldagem e pela velocidade de soldagem, denominado de Tipo I e Tipo V, respectivamente. O fator de controle Técnica da Energia (níveis Tipo I e Tipo V) busca avaliar o efeito da alteração da energia de soldagem por meio da potência do arco (alterando a corrente e mantendo a velocidade de soldagem constante) no nível Tipo I e o efeito da alteração da energia de soldagem por meio da velocidade de soldagem (mantendo a potência do arco).

Foi adotada, para os parâmetros de soldagem da técnica da energia do tipo I, a utilização do modo de operação do tipo corrente constante contínua, todavia, para as energias de soldagens mais baixas (0,8 e 1,2 kJ/mm) os valores de corrente de soldagem explorados não resultavam em transferência metálica do tipo goticular, para isso foi necessário realizar a pulsação da corrente com objetivo de alcançar o modo de transferência goticular. Desta forma, algumas condições de soldagem com a alteração da energia dada pela corrente de soldagem (Tipo I) apresentaram parâmetro com pulsação da corrente.

Foi estabelecido que para todas as condições de soldagem o comprimento do arco permanecesse aproximadamente constante. Com isso, algumas condições de soldagem foram sujeitas a pequenas alterações na velocidade de alimentação do arame para as condições Tipo V.

Os parâmetros selecionados para cada arame utilizado nas soldagens estão listados na Tabela 14, na Tabela 15, na Tabela 16, na Tabela 17, na Tabela 18 e na Tabela 19.

Tabela 14 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ER80S-B2.

Arame AWS ER80S-B2 - Gás: Ar+4%CO₂									
Técnica da energia	I_p (A)	t_p (ms)	I_b (A)	t_b (ms)	V alim (m/min)	V sold (m/min)	U_m (V)	I_m (A)	Ebruta (kJ/mm)
Corrente de soldagem	320	3,0	60	6,0	4,3	0,3	28,0	145	0,8
	380	3,0	120	6,0	6,0		29,0	200	1,2
	240 A - Corrente contínua				6,0		29,0	240	1,4
	260 A - Corrente contínua				7,2		32,0	260	1,6
	280 A - Corrente contínua				7,8		34,0	280	2,0
Velocidade de soldagem	350	3,0	100	6,0	5,3	0,4	27,5	180	0,8
					5,2	0,24	27,5	180	1,2
					5,1	0,21	27,5	180	1,4
					5,0	0,18	27,5	180	1,6
					4,9	0,15	27,5	180	2,0

Fonte: Própria do autor.

Tabela 15 - Parâmetros de soldagem para o eletrodo AWS ER90S-B3.

Arame AWS ER90S-B3 - Gás: Ar+4%CO₂									
Técnica da energia	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	V alim (m/min)	V sold (m/min)	Um (V)	Im (A)	Ebruta (kJ/mm)
Corrente de soldagem	320	3,0	80	6,0	4,2	0,30	26,9	160	0,8
	380	2,8	100	4,0	6,1		28,4	210	1,2
	240 A - Corrente contínua				6,0		29,0	240	1,4
	270 A - Corrente contínua				7,0		30,3	270	1,6
	310 A - Corrente contínua				8,4		32,1	310	2,0
Velocidade de soldagem	350	3,0	100	6,0	5,0	0,40	27,0	180	0,8
					4,9	0,24	27,0	180	1,2
					4,9	0,21	27,0	180	1,4
					4,9	0,18	27,0	180	1,6
					4,9	0,15	27,0	180	2,0

Fonte: Própria do autor.

Tabela 16 - Parâmetros de soldagem para o eletrodo protótipo.

Arame Eletrodo Protótipo - Gás: Ar+4%CO₂									
Técnica da energia	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	V alim (m/min)	V sold (m/min)	Um (V)	Im (A)	Ebruta (kJ/mm)
Corrente de soldagem	300	2,5	90	5,0	5,6	0,28	26,0	160	0,8
	190 A - Corrente contínua				5,8		30,0	190	1,2
	220 A - Corrente contínua				7,7		30,0	220	1,4
	240 A - Corrente contínua				8,6		31,0	240	1,6
	280 A - Corrente contínua				10,6		32,0	280	2,0
Velocidade de soldagem	300	2,5	90	5,0	5,3	0,30	26,5	160	0,8
					5,3	0,20	26,2	160	1,2
					5,3	0,17	26,0	160	1,4
					5,3	0,15	26,0	160	1,6
					5,3	0,12	25,8	160	2,0

Fonte: Própria do autor.

Tabela 17 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ERNiCrMo-3.

Arame AWS ERNiCrMo-3 - Gás: Ar+25%He									
Técnica da energia	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	V alim (m/min)	V sold (m/min)	Um (V)	Im (A)	Ebruta (kJ/mm)
Corrente de soldagem	380	2,5	100	5,0	8,0	0,38	28,2	190	0,8
	240 A - Corrente contínua				9,2		31,4	240	1,2
	280 A - Corrente contínua				10,9		35,0	280	1,6
	320 A - Corrente contínua				12,8		38,0	320	2,0
Velocidade de soldagem	380	2,5	100	5,0	8,0	0,42	28,5	190	0,8
					8,0	0,26	28,5	190	1,2
					7,6	0,21	31,0	190	1,6
					7,6	0,18	31,0	190	2,0

Tabela 18 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ER309L.

Arame AWS ER309L - Gás: Ar+4%CO₂									
Técnica da energia	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	V alim (m/min)	V sold (m/min)	Um (V)	Im (A)	Ebruta (kJ/mm)
Corrente de soldagem	320	2,0	60	6,0	4,2	0,25	27,0	130	0,8
	320	2,0	100	4,0	5,7		30,0	175	1,2
	220 A - Corrente contínua				7,2		30,0	220	1,6
	240 A - Corrente contínua				7,6		34,0	240	2,0
	300 A - Corrente contínua				9,0		35,0	300	2,5
Velocidade de soldagem	320	2,0	100	4,0	5,7	0,45	31,0	175	0,8
					5,7	0,25	31,0	175	1,2
					5,7	0,20	31,0	175	1,6
					5,7	0,16	31,0	175	2,0
					5,7	0,125	31,0	175	2,5

Fonte: Própria do autor.

Tabela 19 - Parâmetros de soldagem para o arame eletrodo AWS ER347.

Arame AWS ER347 - Gás: Ar+4%CO₂									
Técnica da energia	Ip (A)	tp (ms)	lb (A)	tb (ms)	V alim (m/min)	V sold (m/min)	Um (V)	Im (A)	Ebruta (kJ/mm)
Corrente de soldagem	320	2,0	60	6,0	3,8	0,25	27,0	130	0,8
	320	2,0	100	4,0	5,3		30,0	175	1,2
	220 A - Corrente contínua				6,5		30,0	220	1,6
	240 A - Corrente contínua				6,9		34,0	240	2,0
	300 A - Corrente contínua				8,9		35,0	300	2,5
Velocidade de soldagem	320	2,0	100	4,0	5,3	0,45	30,0	175	0,8
					5,3	0,25	30,0	175	1,2
					5,3	0,20	30,0	175	1,4
					5,3	0,16	30,0	175	1,6
					5,3	0,125	30,0	175	2,0

Fonte: Própria do autor.

A Tabela 20 apresenta as temperaturas de preaquecimento e de interpasse, de acordo com a norma Petrobras N133, para soldagem de similar e dissimilar para todos os metais de base.

Tabela 20 - Temperatura de preaquecimento e interpasse para cada material e tipo de reparo.

Material	Temperatura de preaquecimento T_0 (°C)		Temperatura de interpasse T_i (°C)	
	Soldagem Similar	Soldagem Dissimilar	Soldagem Similar	Soldagem Dissimilar
ASTM A387 Gr.11	200	150	300	175
ASTM A387 Gr.22	250	150	350	175
ASTM A542 Tipo D	250	150	350	175

Fonte: Petrobras N-133.

O preaquecimento foi realizado com maçarico e a temperatura foi controlada com termopar de contato.

As soldagens foram realizadas em blocos com as dimensões de 80 x 80 x 180 mm. Em seguida, foram cortadas ao meio e retirado um corpo de prova transversal (com medidas necessárias) para aplicação dos critérios de microdureza e de microestrutura, conforme pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Bloco soldado nas quatro faces e cortado.



Fonte: Própria do autor.

As combinações de todas as condições de soldagem de simples deposição estão apresentadas na Tabela 21 para a soldagem similar e na Tabela 22 para a soldagem dissimilar.

Tabela 21 - Nomenclatura das amostras de soldagem eletrodos similares.

ASTM A387 Gr11 - Eletrodo AWS ER80S-B2							
Amostra	T ₀ (°C)	Técnica de energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	T ₀ (°C)	Técnica de energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
C1	200	Corrente de soldagem	0,8	C11	300	Corrente de soldagem	0,8
C2			1,2	C12			1,2
C3			1,4	C13			1,4
C4			1,6	C14			1,6
C5			2,0	C15			2,0
C6		Velocidade de soldagem	0,8	C16		Velocidade de soldagem	0,8
C7			1,2	C17			1,2
C8			1,4	C18			1,4
C9			1,6	C19			1,6
C10			2,0	C20			2,0
ASTM A387 Gr22 - Eletrodo AWS ER90S-B3							
Amostra	T ₀ (°C)	Técnica de energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	T ₀ (°C)	Técnica de energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
S1	250	Corrente de soldagem	0,8	S11	350	Corrente de soldagem	0,8
S2			1,2	S12			1,2
S3			1,4	S13			1,4
S4			1,6	S14			1,6
S5			2,0	S15			2,0
S6		Velocidade de soldagem	0,8	S16		Velocidade de soldagem	0,8
S7			1,2	S17			1,2
S8			1,4	S18			1,4
S9			1,6	S19			1,6
S10			2,0	S20			2,0
ASTM A542 Tipo D - Eletrodo Protótipo							
Amostra	T ₀ (°C)	Técnica de energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	T ₀ (°C)	Técnica de energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
MC1	250	Corrente de soldagem	0,8	MC11	350	Corrente de soldagem	0,8
MC2			1,2	MC12			1,2
MC3			1,4	MC13			1,4
MC4			1,6	MC14			1,6
MC5			2,0	MC15			2,0
MC6		Velocidade de soldagem	0,8	MC16		Velocidade de soldagem	0,8
MC7			1,2	MC17			1,2
MC8			1,4	MC18			1,4
MC9			1,6	MC19			1,6
MC10			2,0	MC20			2,0

Tabela 22 - Nomenclatura das amostras de soldagem eletrodos dissimilares.

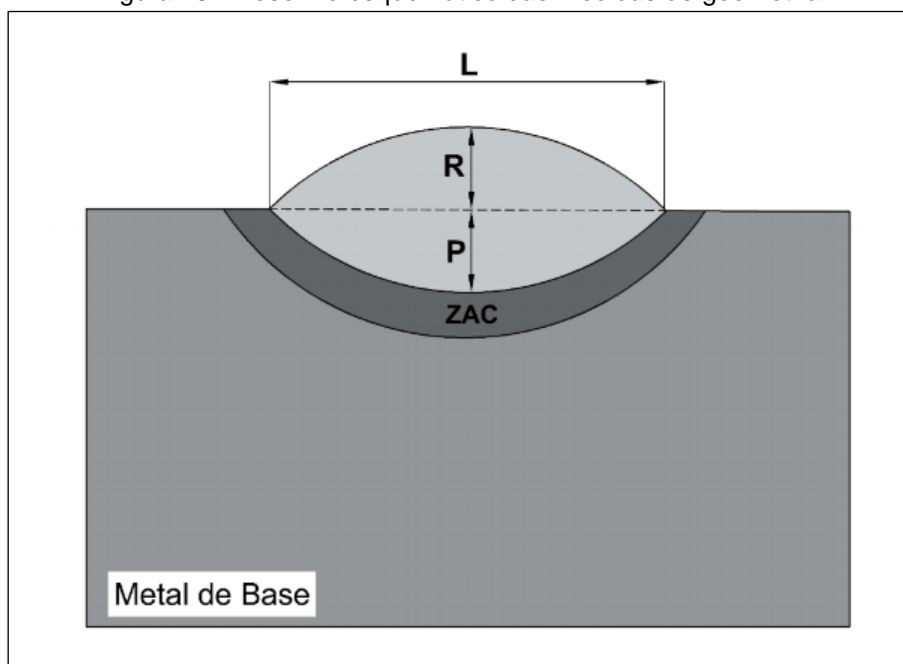
ASTM A387 Gr11 - Eletrodo AWS ERNiCrMo-3					
Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
L1	Corrente de soldagem	0,8	L5	Velocidade de soldagem	0,8
L2		1,2	L6		1,2
L3		1,6	L7		1,6
L4		2,0	L8		2,0
ASTM A387 Gr22 - Eletrodo AWS 309L					
Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
D1	Corrente de soldagem	0,8	D6	Velocidade de soldagem	0,8
D2		1,2	D7		1,2
D3		1,6	D8		1,6
D4		2,0	D9		2,0
D5		2,5	D10		2,5
ASTM A387 Gr22 - Eletrodo AWS 347					
Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
D11	Corrente de soldagem	0,8	D16	Velocidade de soldagem	0,8
D12		1,2	D17		1,2
D13		1,6	D18		1,6
D14		2,0	D19		2,0
D15		2,5	D20		2,5
ASTM A542 Tipo D - Eletrodo AWS 309L					
Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
DV1	Corrente de soldagem	0,8	DV6	Velocidade de soldagem	0,8
DV2		1,2	DV7		1,2
DV3		1,6	DV8		1,6
DV4		2,0	DV9		2,0
DV5		2,5	DV10		2,5
ASTM A542 Tipo D - Eletrodo AWS 347					
Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)	Amostra	Técnica da energia	Energia de soldagem (kJ/mm)
DV11	Corrente de soldagem	0,8	DV16	Velocidade de soldagem	0,8
DV12		1,2	DV17		1,2
DV13		1,6	DV18		1,6
DV14		2,0	DV19		2,0
DV15		2,5	DV20		2,5

4.4.3. Análise da Geometria dos cordões – Etapa 2

Na preparação metalográfica, as amostras foram lixadas utilizando uma lixadeira rotativa e lixas com granulação de 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, polidas com pasta de diamante de 3 μm e 1 μm e posteriormente atacadas quimicamente com o reagente Nital 2% (98% álcool e 2% ácido nítrico).

Após preparação da seção transversal dos corpos de prova, foram realizadas imagens com uma câmera fotográfica para em seguida medir o reforço (R), largura (L) e a penetração (P) dos cordões de solda conforme desenho esquemático da Figura 23.

Figura 23 - Desenho esquemático das medidas de geometria.

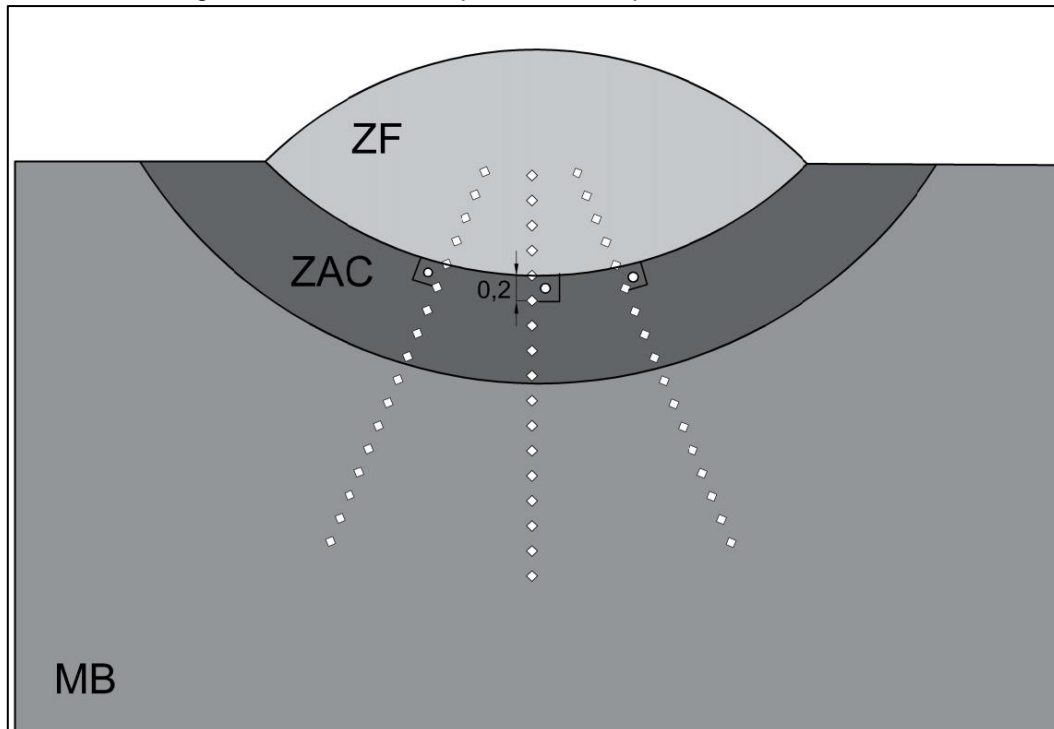


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.4. Determinação das Extensões de zona dura e zona macia – Etapa 2

As extensões de zona dura e zona macia foram obtidas por meio da construção do perfil de microdureza da seção transversal em três linhas conforme Figura 24.

Figura 24 - Desenho esquemático dos perfis de microdureza.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As microdurezas foram realizadas em microdurômetro automático (Figura 25) com carga de 100 gf e tempo de impressão entre 10 e 15 segundos conforme norma ASTM E384. [55]

Figura 25 - Microdurômetro automático.

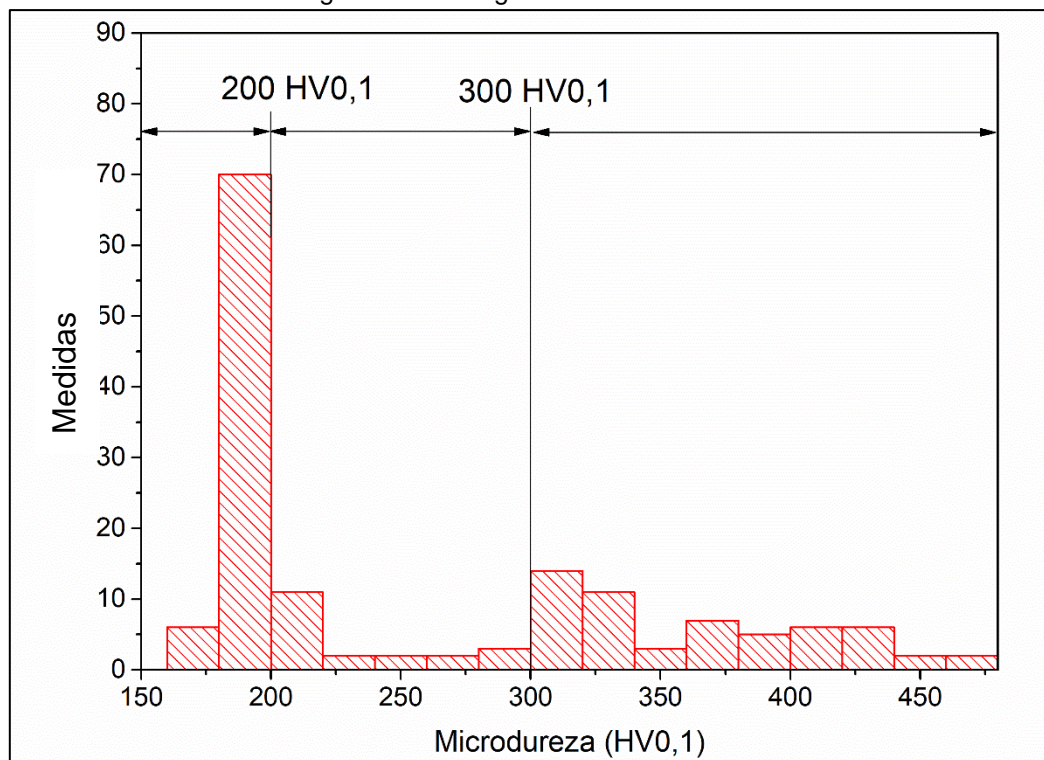


Fonte: Própria do autor.

Após o levantamento dos perfis de microdureza, para se determinar os limites das extensões das zonas dura e macia, foi estabelecido um critério baseado no histograma da distribuição das frequências das microdurezas da ZAC até o metal base.

Como pode ser visto no histograma (Figura 26), abaixo de 200 HV_{0,1} tem-se a dureza do metal base e acima de 300 HV_{0,1} concentram-se as durezas referentes a zona dura. Entre 200 HV_{0,1} e 300 HV_{0,1} tem-se, portanto, a zona macia para esta condição. Com base neste critério, foram identificadas as extensões das zonas duras e macias para todas as condições de soldagem.

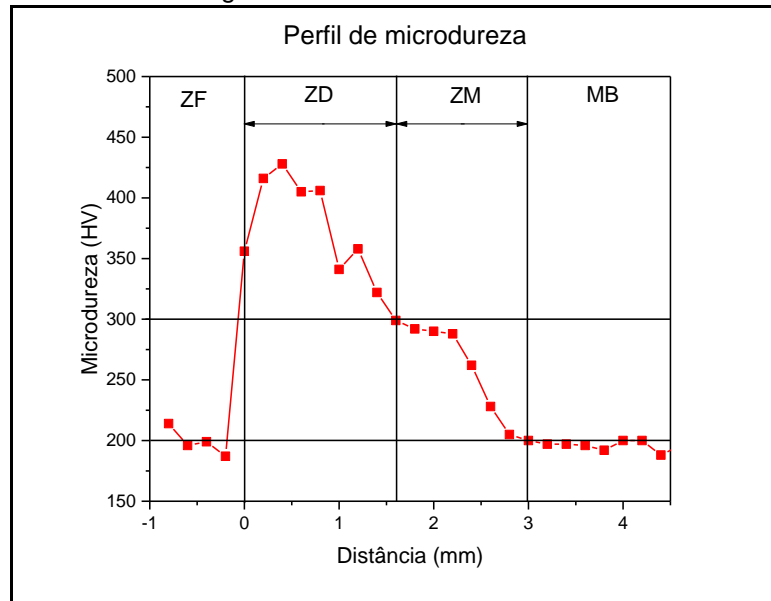
Figura 26 - Histograma de microdureza.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 27 está ilustrado um perfil de microdureza de uma linha. O critério utilizado para as determinações das extensões das zonas duras e macias, é o seguinte: a zona dura (ZD) se estende da linha de fusão ($X = 0$) até a distância em que a dureza corresponde a dureza limite da zona dura (300 HV0,1). A zona macia (ZM) se estende do final da zona dura até a distância em que a dureza se iguala a dureza do metal base (200 HV0,1).

Figura 27 - Perfil de microdureza.

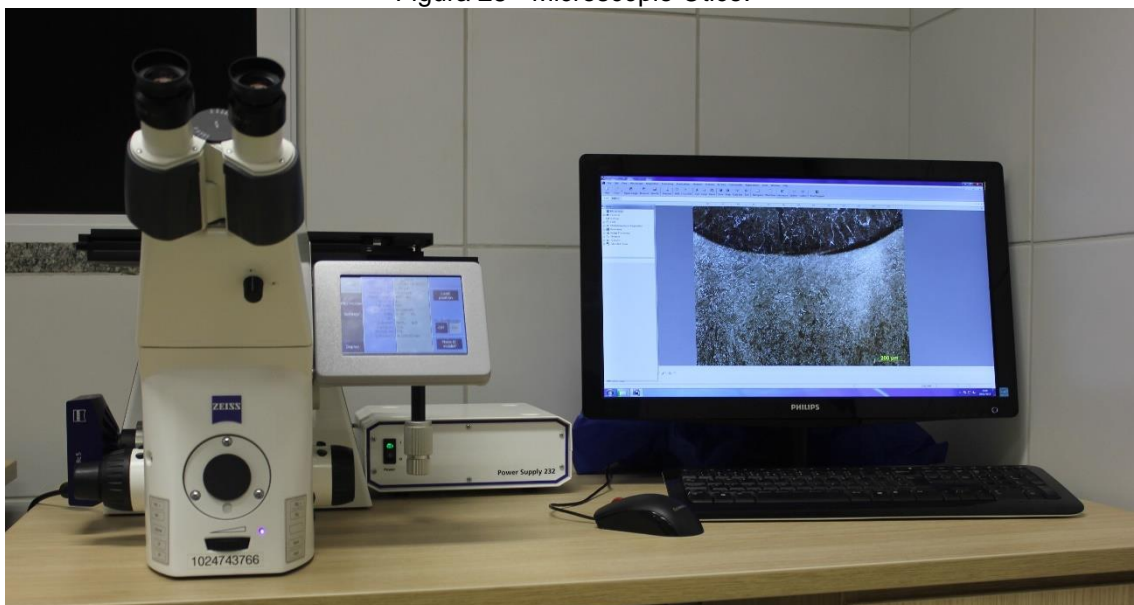


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.5. Determinação das Extensões de ZAC – Etapa 2

A extensão da ZACGG e ZACGF, para as condições ensaiadas, foi determinada utilizando-se uma montagem de uma sequência de fotos da ZAC com um aumento de 200X obtida no microscópio ótico (Figura 28).

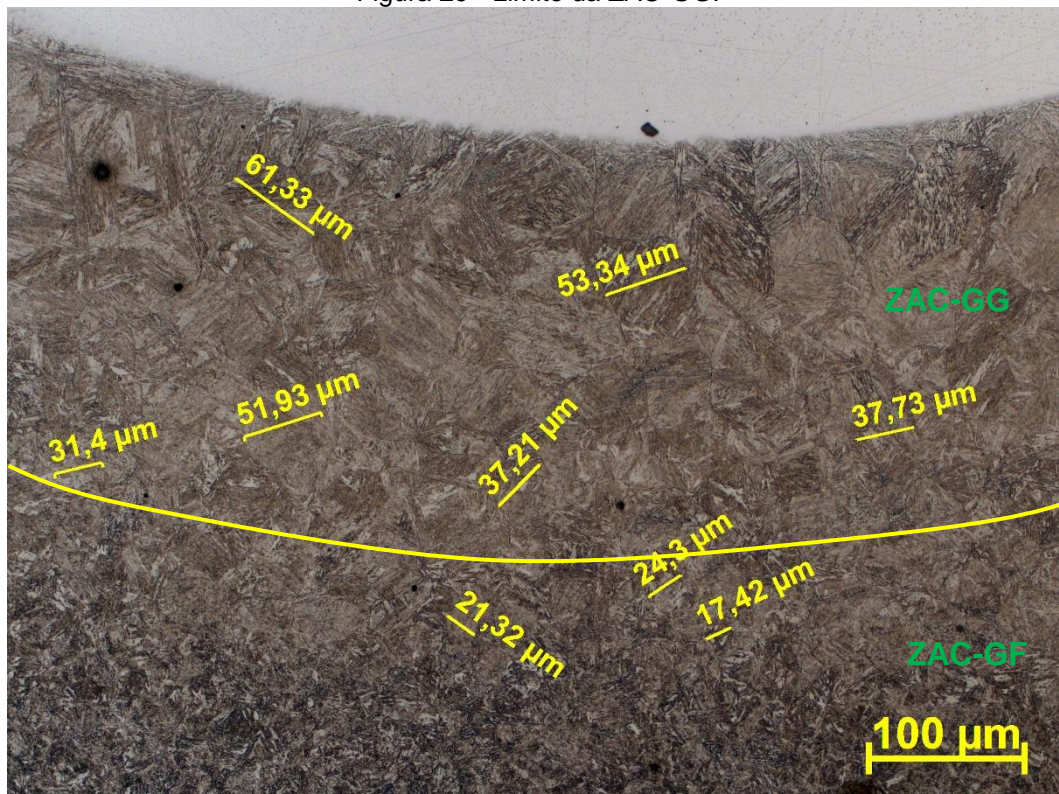
Figura 28 - Microscópio Ótico.



Fonte: Própria do autor.

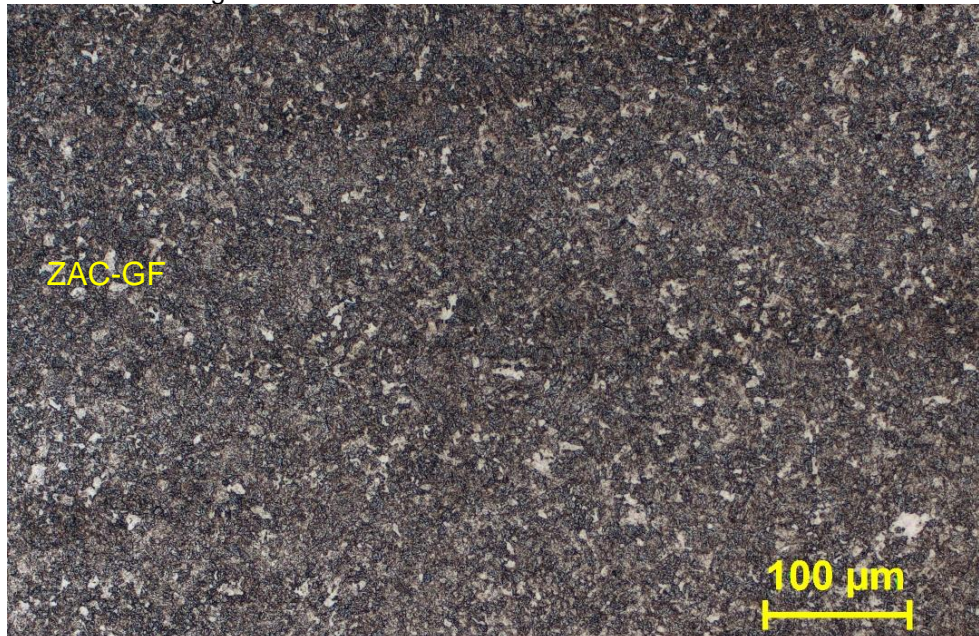
Foi estabelecido como critério de fim da ZACGG o tamanho de grão ASTM 7, equivalente a um diâmetro médio de grão de 31,8 μm , conforme pode ser visto na Figura 29 com algumas medidas de grãos. A partir desse valor de tamanho de grão a ZAC se apresenta com o mesmo padrão de microestrutura (grão pequenos) bem definidos, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 29 - Limite da ZAC-GG.



Fonte: Própria do autor.

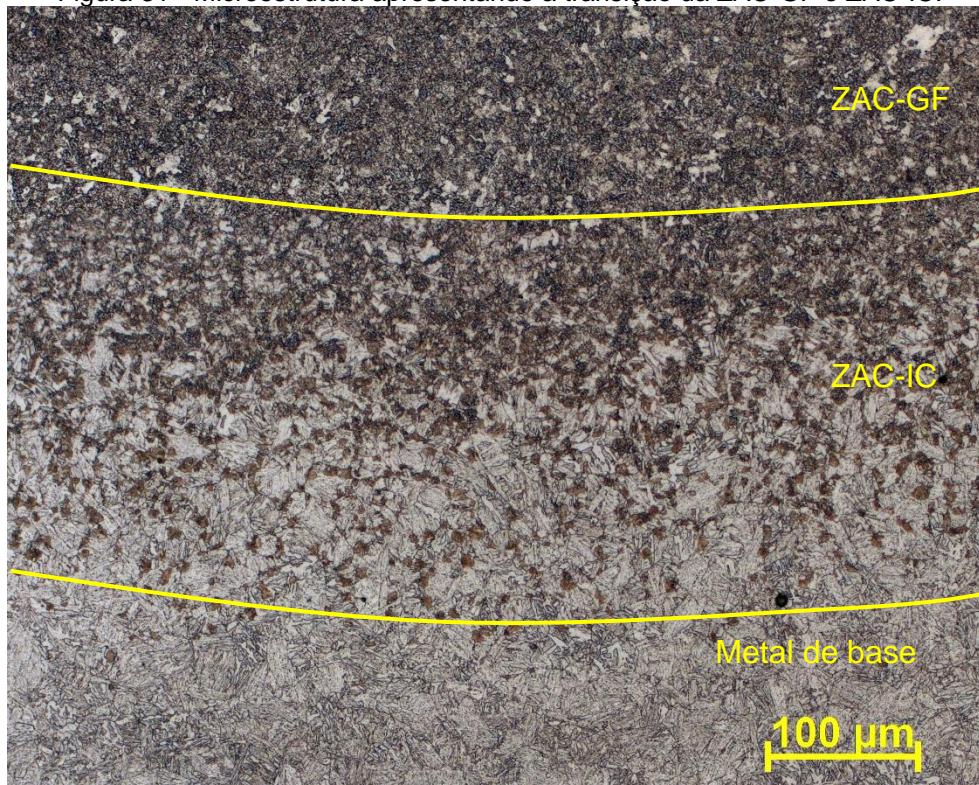
Figura 30 - Microestrutura característica da ZAC GF.



Fonte: Própria do autor.

Para o fim da ZACGF foi estabelecido como o início da ZAC intercrítica (ZACIC), como pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - Microestrutura apresentando a transição da ZAC-GF e ZAC-IC.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 32 mostra uma montagem de fotos com as dimensões de ZACGG e ZACGF.

Figura 32 - Montagem da microestrutura da ZAC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

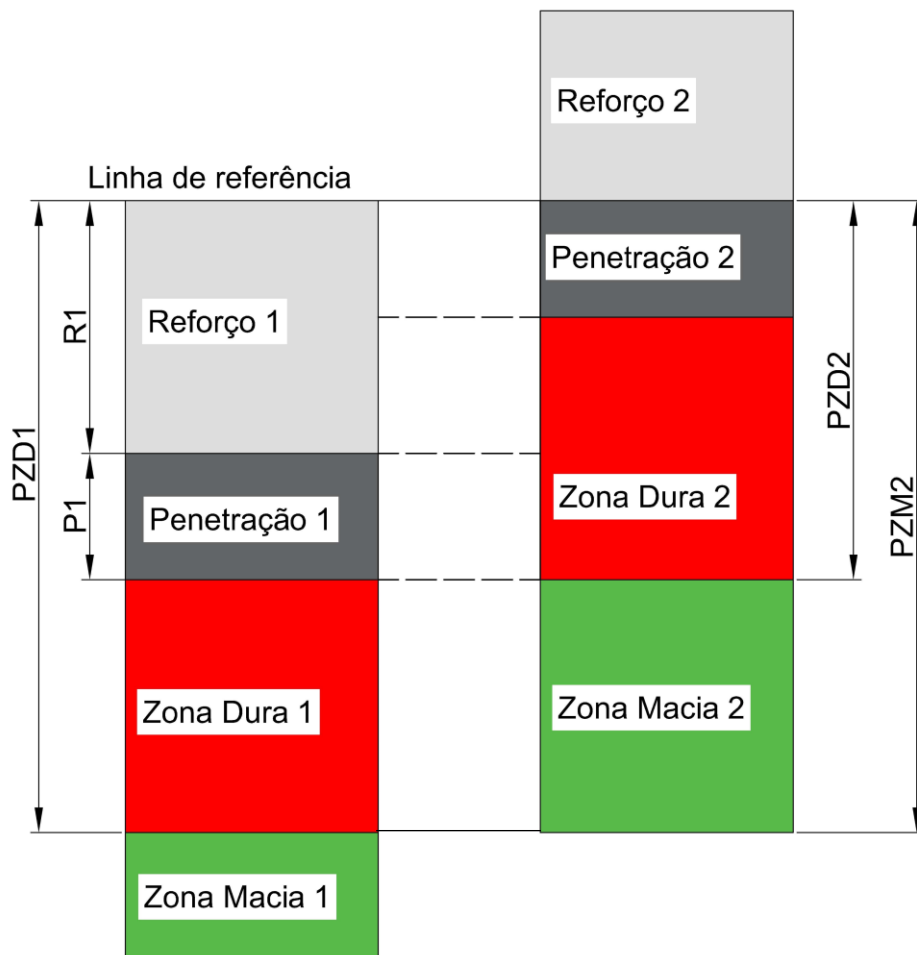
4.4.6. Construção dos Diagramas de Decisão – Etapa 2

Com as medidas obtidas acima, foram aplicadas nas equações dos dois critérios de aceitação para seguir com a construção dos diagramas de decisão (Equação 9 à Equação 12). Os critérios de microdureza e microestrutura da Técnica de Deposição Controlada são:

CRITÉRIO DE MICRODUREZA		
1)	<i>Afastamento 1 = $R1 + P1 - PZD2 \geq 0$</i>	Equação 9
	PZD2 – Profundidade de zona dura da segunda camada	
	R1 – Reforço da primeira camada	
	P1 – Penetração da primeira camada	
2)	<i>Afastamento 2 = $PZM2 - PZD1 \geq 0$</i>	Equação 10
	PZM2-Profundidade de zona macia da segunda camada	
	PZD1 – Profundidade de zona dura da primeira camada	
CRITÉRIO DE MICROESTRUTURA		
3)	<i>Afastamento 3 = $R1 + P1 - PZACGG2 \geq 0$</i>	Equação 11
	PZACGG1 – Profundidade da ZAC grão grosseiro da segunda camada	
4)	<i>Afastamento 4 = $PZACGF2 - PZACGG1 \geq 0$</i>	Equação 12
	PZAC_GF2 – Profundidade da ZAC grão fino da segunda camada	

Na Figura 33 está ilustrado um desenho com a sobreposição de camadas para o critério de microdureza. Neste critério é avaliado a sobreposição de zona dura e zona macia.

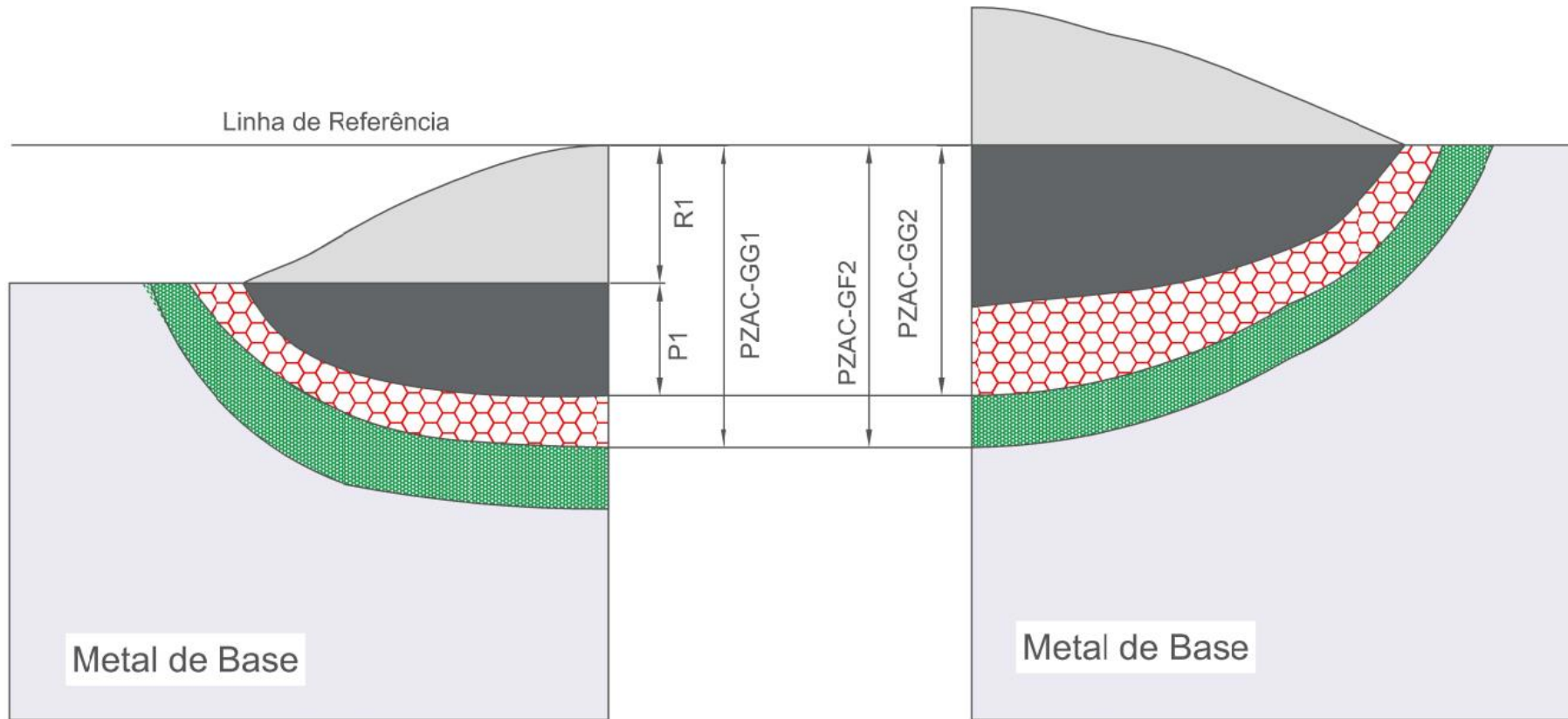
Figura 33 - Desenho esquemático das extensões de zona dura e macia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 34 está apresentado um desenho esquemático com a sobreposição de camada para o critério de microestrutura. Neste critério é avaliado a sobreposição de ZAC's.

Figura 34 - Desenho esquemático das extensões da ZAC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Baseado nos perfis de microdureza e na análise microestrutural foram traçados os diagramas de decisão, os quais estão relacionados com o desenvolvimento das quatro equações citadas (Equação 9 à Equação 12).

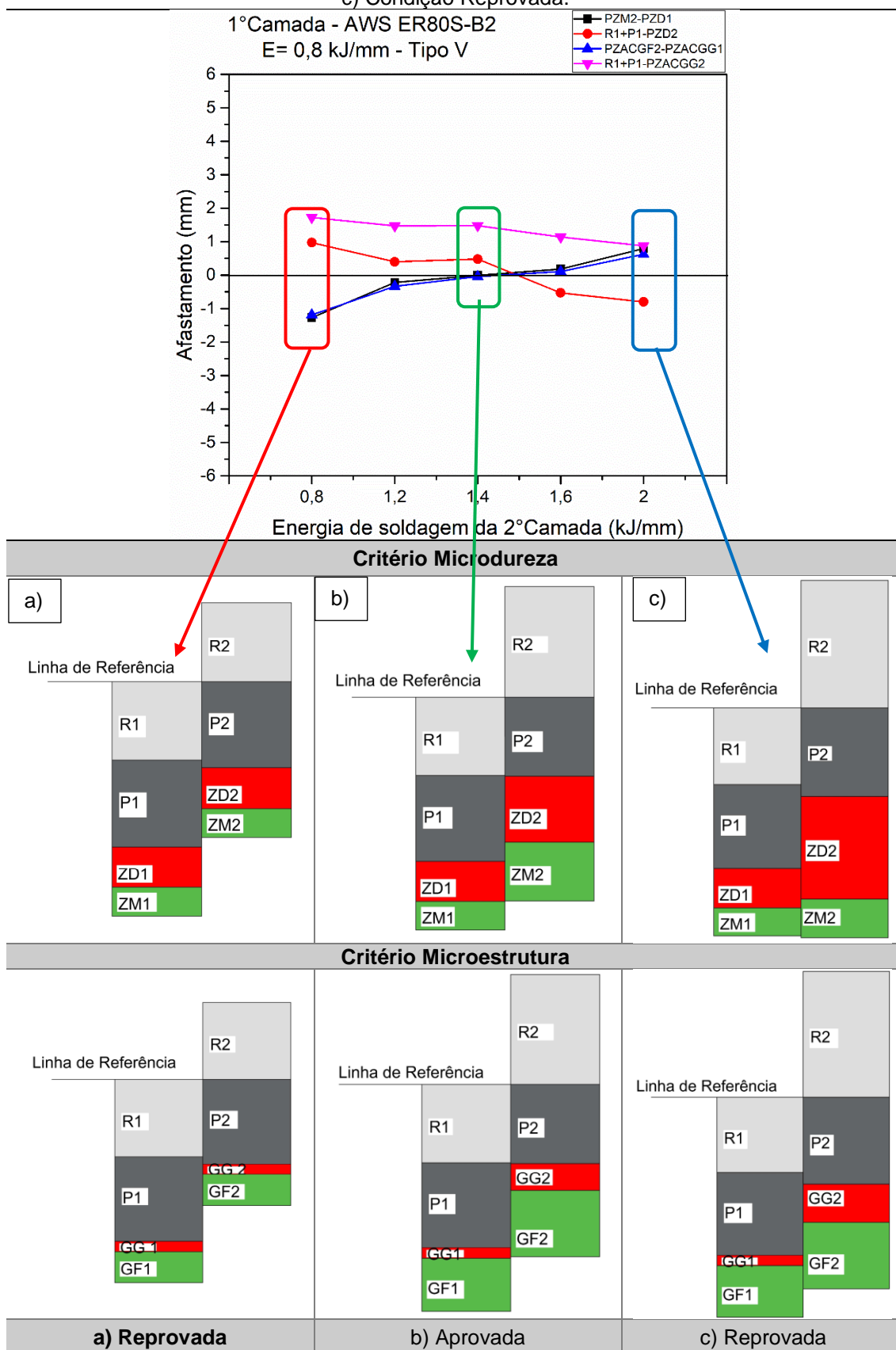
Ao todo, foram construídos 88 diagramas de decisão, combinando energia de soldagem, técnica de alteração da energia de soldagem e temperatura de preaquecimento. Resultando em 864 combinações de condições para realização da soldagem com dupla camada.

Por meio das análises dos diagramas de decisão, consegue-se ter uma estimativa das relações de energias da primeira e da segunda camada, por meio do parâmetro denominado de Afastamento (A1 até A4).

Neste contexto, os diagramas apresentam afastamentos (A1 até A4) positivos e negativos, de modo que os afastamentos positivos indicam aceitação do critério (quanto maior o valor positivo, melhor será atendimento do critério em questão) e os afastamentos negativos indicam rejeição do critério analisado (quanto menor o valor pior para o critério em questão). No caso do afastamento nulo ($A=0$) é considerado o aprovado, contudo $A=0$ é a transição entre aprovação e reprovação.

Os valores calculados em cada equação foram denominados de afastamento e de posse dos valores de afastamento foram construídos os diagramas de decisão. Na Figura 35 está apresentado um exemplo de diagrama de decisão, em que a condição aprovada é dada pela energia de soldagem de 0,8 kJ/mm para a primeira camada e 1,4 kJ/mm para a segunda camada.

Figura 35 – a) Exemplo diagrama de decisão, a) Condição Reprovada, b) condição Aprovada e c) Condição Reprovada.



A Figura 35 apresenta um desenho, com valores reais, combinando o diagrama de decisão com as sobreposições dos critérios de microdureza e de microestrutura, cujo objetivo é apresentar uma melhor visualização e posterior apresentação da ordem de prioridade dos critérios.

Analisando a combinação de primeira camada com 0,8 kJ/mm e a segunda camada com 0,8 kJ/mm (Figura 35a), observa-se que o critério de microdureza é atendido somente no Afastamento 1 ($R1+P1 > PZD2$). De forma análoga, para o critério de microestrutura por meio do Afastamento 3 ($R1+P1 > PZACGG2$). Os Afastamentos 2 e 4 apresentaram valores negativos, indicando que não ocorrerá revenimento, tão pouco refinamento.

Analisando a combinação de primeira camada com 0,8 kJ/mm e a segunda camada com 1,4 kJ/mm (Figura 35b), observa-se que o critério de microdureza é atendido pelas duas equações, Afastamento 1 ($R1+P1 > PZD2$) e Afastamento 2 ($PZM2 > PZD1$). De forma análoga, para o critério de microestrutura por meio do Afastamento 3 ($R1+P1 > PZACGG2$) e Afastamento 4 ($PZACGF2 > PZACGG1$). Assim esta relação de energia torna-se a condição aprovada e mais favorável a cumprir os objetivos da TDC.

Analisando a combinação de primeira camada com 0,8 kJ/mm e a segunda camada com 2,0 kJ/mm (Figura 35c), observa-se que o critério de microdureza dado pelo Afastamento 1 ($R1+P1 > PZD2$) apresenta valor negativo, indicando ocorrer sobreposição de zonas duras. O Afastamento 2 ($PZM2 > PZD1$) apresenta valor positivo, entretanto promove revenimento em uma pequena parcela de zona dura da primeira camada. Para o critério de microestrutura o Afastamento 3 ($R1+P1 > PZACGG2$) e o Afastamento 4 ($PZACGF2 > PZACGG1$) são atendidos plenamente, indicando que haverá refinamento da ZACGG1.

É importante destacar que, nem sempre são obtidas relações onde os quatro afastamentos encontram-se positivos, sendo necessário fazer uma escolha mais atenta para a melhor combinação possível de parâmetros.

No contexto do trabalho, a prioridade principal é para o atendimento do critério de revenimento, sendo:

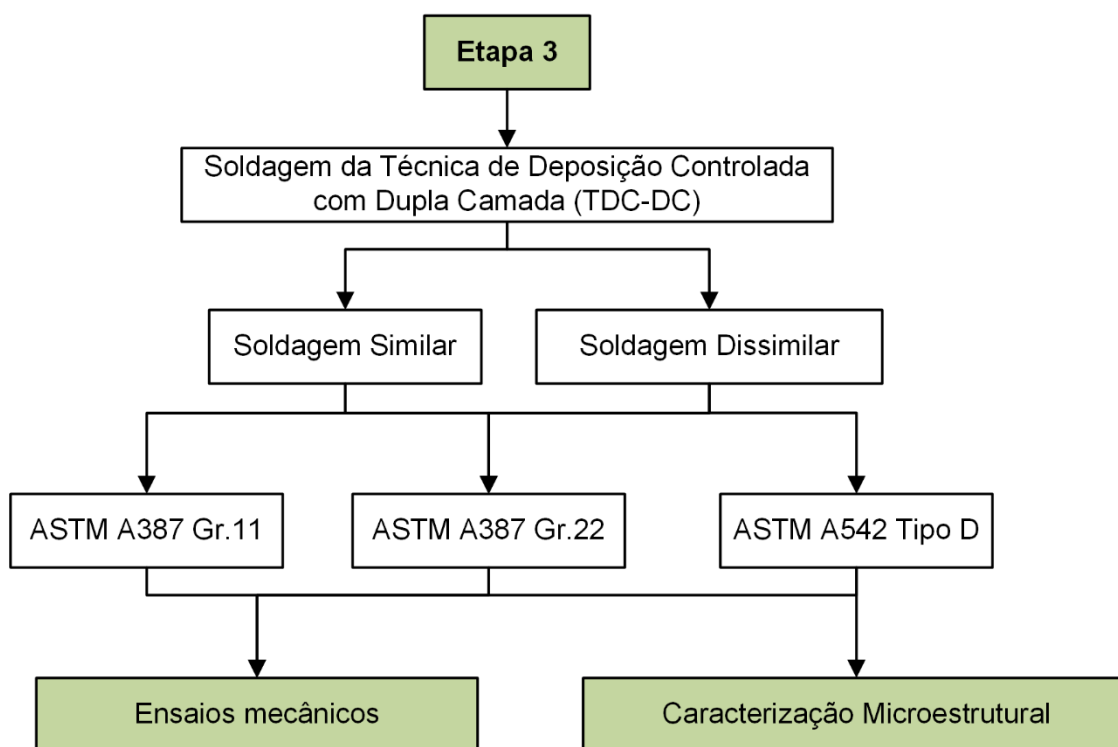
- **Prioridade 1**, assegurar que a zona dura da primeira camada seja revenida pela zona macia da segunda camada.
- **Prioridade 2**, garantir o refinamento na microestrutura da ZAC-GG da primeira camada decorrente da sobreposição da ZAC-GF da segunda camada.
- **Prioridade 3**, assegurar que a zona dura (ZD) da segunda camada esteja contida na ZF da primeira camada, para que não tenha grandes possibilidades de sobreposição de regiões duras.
- **Prioridade 4**, assegurar que a ZAC-GG da segunda camada esteja contida na zona fundida da primeira camada (R1+P1)

Adotando esta ordem de prioridades, é possível assegurar melhores propriedades na ZAC quando comparado a uma condição ao qual não foi respeitada essa ordem.

4.5 Etapa 3 – Soldagem da técnica de deposição controlada com dupla camada (TDC-DC)

As duplas camadas foram produzidas por soldagem MIG/MAG robotizada em chapas de 30 mm de espessura para o aço ASTM A387 Gr 11 e em chapas de 80 mm de espessura para os aços ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D. A diferença na espessura das chapas está associada ao potencial de aplicação de cada material. Foram escolhidas as melhores condições para a soldagem com dupla camada, de acordo com as condições obtidas pelos diagramas de decisão.

Figura 36 - Fluxograma da etapa 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5.1. Planejamento experimental TDC-DC – Etapa 3

Para cada metal de base foi escolhida uma combinação de parâmetros e técnicas de soldagem que foi aprovada no diagrama de decisão para a aplicação da Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada (TDC-DC). Para efeito de comparação da eficácia da TDC-DC foi escolhida uma condição com combinação de parâmetros e técnica de soldagem que foi reprovada nos diagramas de decisão. Para a condição reprovada foi escolhida a mesma energia de soldagem para a primeira e segunda camada. Após a soldagem das condições reprovadas, parte da amostra foi submetida a tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) para análise comparativa dos resultados considerando o procedimento padrão de fabricação e manutenção.

A soldagem da TDC-DC seguiu o planejamento experimental apresentado pela Tabela 23 utilizando-se os eletrodos dissimilares recomendados para cada metal de base específico.

Tabela 23 - Planejamento de experimental para a soldagem dissimilar com TDC-DC.

Metal de base	Eletrodo	Condição
ASTM A387 Gr11	AWS ERNiCrMo-3	Aprovada
		Reprovada
		Reprovada +TTPS
ASTM A387 Gr22	AWS ER309L AWS ER347	Aprovada
		Reprovada
		Reprovada +TTPS
ASTM A542 Tipo D	AWS ER309L AWS ER347	Aprovada
		Reprovada
		Reprovada +TTPS

Fonte: Elaborada pelo autor.

A soldagem similar da TDC-DC seguiu o planejamento experimental apresentado pela Tabela 24.

Tabela 24 - Planejamento de experimental para a soldagem similar com TDC-DC.

Metal de base	Eletrodo	Condição
ASTM A387 Gr11	AWS ER80S-B2	Aprovada ($T_0=200^{\circ}\text{C}$)
		Aprovada ($T_0=200^{\circ}\text{C}$)
		Reprovada ($T_0=200^{\circ}\text{C}$)
		Reprovada +TTPS
ASTM A387 Gr22	AWS ER90S-B3	Aprovada ($T_0=250^{\circ}\text{C}$)
		Aprovada ($T_0=350^{\circ}\text{C}$)
		Reprovada ($T_0=250^{\circ}\text{C}$)
		Reprovada +TTPS
ASTM A542 Tipo D	Eletrodo Protótipo	Aprovada ($T_0=250^{\circ}\text{C}$)
		Aprovada ($T_0=350^{\circ}\text{C}$)
		Reprovada ($T_0=250^{\circ}\text{C}$)
		Reprovada +TTPS

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 25 estão apresentados os valores de temperatura e de tempo para o tratamento na parte das amostras que foram submetidas a tratamento térmico pós-soldagem (TTPS), tais valores foram definidos pela norma ASME VIII Divisão 2.[10]

Tabela 25 - Parâmetros do tratamento térmico pós-soldagem.

Metal de base	Temperatura de tratamento ($^{\circ}\text{C}$)	Tempo de patamar (min)	Resfriamento
ASTM A387 Gr11	650	60	Ar calmo após 425°C
ASTM A387 Gr22	675	120	Ar calmo após 425°C
ASTM A542 Tipo D	675	120	Ar calmo após 425°C

Fonte: ASME VIII Divisão 2 (2015).

4.5.2. Avaliação de dureza Vickers – Etapa 3

Avaliação de dureza é uma etapa fundamental no desenvolvimento do procedimento de soldagem de reparo adotando a TDC-DC com intuito de se evitar aplicação de TTPS.

Os revestimentos foram avaliados quanto a dureza, conforme recomendações de medições da norma Petrobras N 133 e ASME IX. A carga de 10 kgf e tempo de impressão de 15 s foram utilizados nas medições. A distância entre as impressões de dureza foi de 0,5 mm. O durômetro utilizado para a realização dos ensaios de dureza Vickers está apresentado na Figura 37.

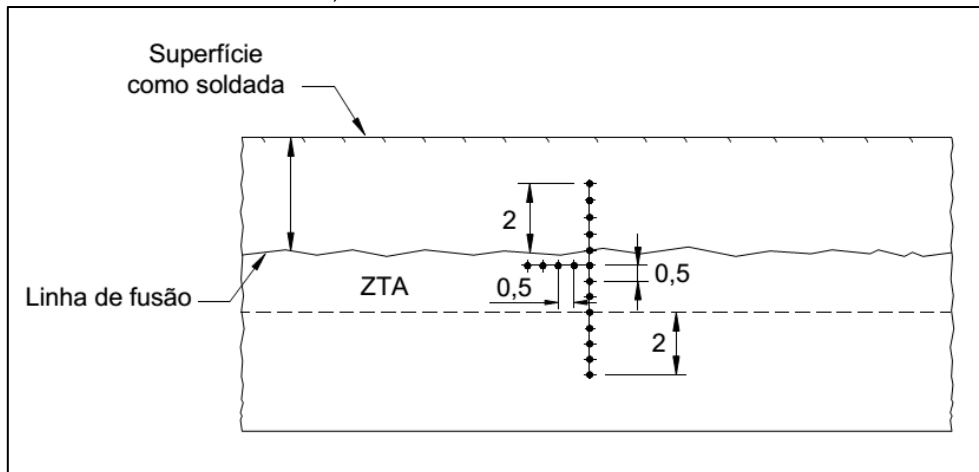
Figura 37 - Durômetro Vickers.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 38 representa esquematicamente a recomendação da norma Petrobras N133 para a realização das medidas de dureza. [9]

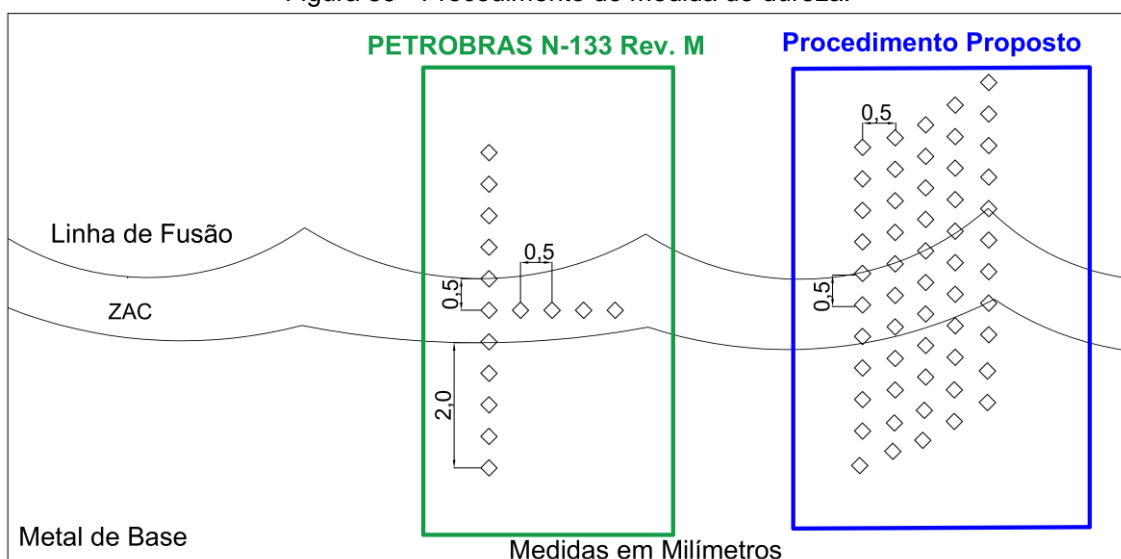
Figura 38 - Representação esquemática das regiões onde foram realizadas as medidas de dureza, conforme norma Petrobras N-133.



Fonte: Petrobras N133

Com objetivo de melhorar a análise de dureza na zona afetada pelo calor, realizou-se, adicionalmente a norma, uma varredura mais ampla. O procedimento adotado pela norma Petrobras N133-Revisão M e o procedimento proposto, como pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 - Procedimento de medida de dureza.

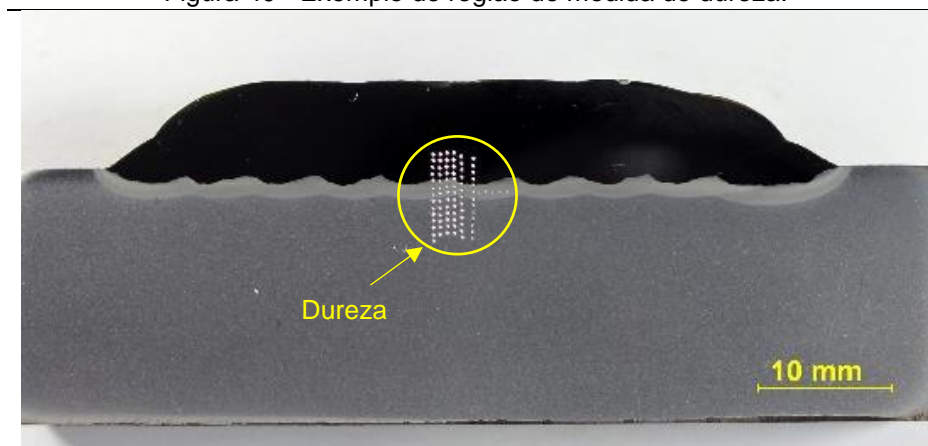


Fonte: Própria do autor.

Convém destacar que outras normas internacionais não especificam esta distância da ZAC em relação a linha de fusão para a soldagem de revestimento (independentemente de ser para reparo ou não). Podem ser citadas as normas ASME IX (2015) e API 6A/ISO 10423:2010.

As medições de dureza foram realizadas ao longo da seção transversal da dupla camada. As linhas de dureza foram feitas a partir do terceiro cordão que compõe a segunda camada. Tomou-se o cuidado de realizar as medições em todos os corpos de prova nessa região, com o intuito de se garantir que as durezas foram obtidas numa posição da ZAC afetada pelos ciclos térmicos dos passes laterais da primeira e da segunda camada, como pode ser visto na Figura 40.

Figura 40 - Exemplo de região de medida de dureza.



4.6 Etapa 4 – Estudo preliminar de soldagem de reparo

Esta etapa foi dividida em duas partes. De forma a avaliar algumas características dos materiais envolvidos na soldagem de reparo.

Parte 1: Efeito do envelhecimento por “Step cooling”

Parte 2: Soldagem de Qualificação do Eletrodo Protótipo

4.6.1. PARTE 1 - Efeito do envelhecimento por “Step cooling” – Etapa 4

Os exemplos de equipamentos abordados neste trabalho são tambores de coque e reatores de HDT. Como detalhado anteriormente, estes são submetidos a condições severas de operação, principalmente, temperatura elevada por muitos anos de operação.

Na Etapa 5 será apresentada a simulação da soldagem de reparo em condições semelhantes aos tambores de coque e aos reatores de HDT. Normalmente o reparo é realizado no material na condição envelhecido.

Para avaliar esse envelhecimento dois tipos de tratamentos térmicos são muito utilizados: o envelhecimento isotérmico e o tratamento térmico de “Step Cooling”. O tratamento térmico de “Step cooling” tem o objetivo de acelerar o fenômeno de fragilização do material. O “step cooling” tornou-se padrão por diversas normas para estudo de fragilização dos aços CrMo e CrMoV, dentre elas, a norma Petrobras I-ET-5000.00-0000-500-PPC-001, API RP934A e API RP934C. Baseado nisso, foi realizado o “step cooling” com o objetivo de simular o envelhecimento em operação dos equipamentos escolhidos como aplicação de reparo.

O objetivo desta etapa é avaliar a soldagem do material não envelhecido e envelhecido por “step cooling”, de forma a identificar a necessidade de ajustes nos parâmetros e/ou técnicas de soldagem definidas na etapa anterior. Para isso, foi avaliado o efeito da soldagem das duas condições de metal base (Não envelhecido e Envelhecido) nos perfis de microdureza e nas extensões de ZAC

Neste estudo foi utilizado como metal de base o aço ASTM A182 F22 na forma de meio disco com 210 mm de diâmetro e 75 mm de espessura. Como metal de adição foi utilizado o arame de aço AWS ER309L.

Para a realização deste estudo foi utilizada a seguinte metodologia:

1. O aço ASTM A182 Gr F22 foi normalizado a 900 °C, permanecendo nesta temperatura por 90 minutos para em seguida ser resfriado ao ar calmo.
2. Após a normalização, foi realizado o revenimento na temperatura de 675 °C, permanecendo nesta temperatura por 150 minutos.
3. Por fim, o “Step Cooling” foi realizado seguindo as recomendações da norma API RP934-A. Os valores de tempo e de temperatura de cada patamar estão apresentados Tabela 26, inclusive as velocidades de resfriamento entre temperaturas. [8]

Os tratamentos térmicos foram realizados em um forno mufla com sistema de controle e aquisição de temperatura de tratamento, apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Forno mufla utilizado para realização dos tratamentos térmicos.



Fonte: Própria do autor.

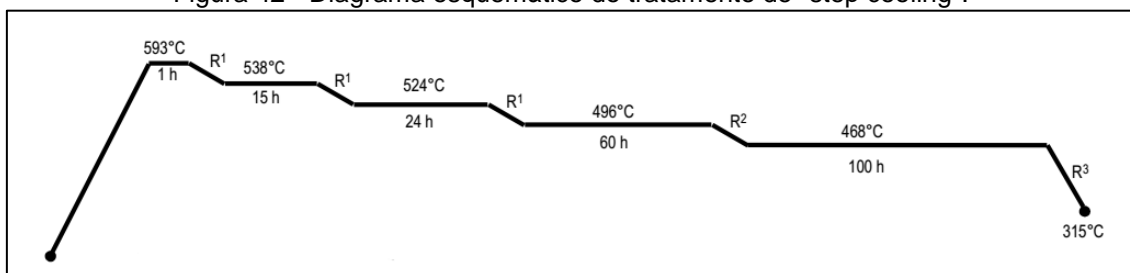
Tabela 26 – Parâmetros do tratamento de envelhecimento por “Step Cooling”.

Temperatura (°C)	Tempo de permanência (h)	Velocidade de resfriamento para próxima temperatura (°C/h)
593	1	5,6
538	15	5,6
524	24	5,6
496	60	3,0
468	100	27,8
315	Resfriamento ao ar calmo	

Fonte: API RP-934A.

Na Figura 42 é apresentado um desenho esquemático do tratamento térmico de envelhecimento por “step cooling”.

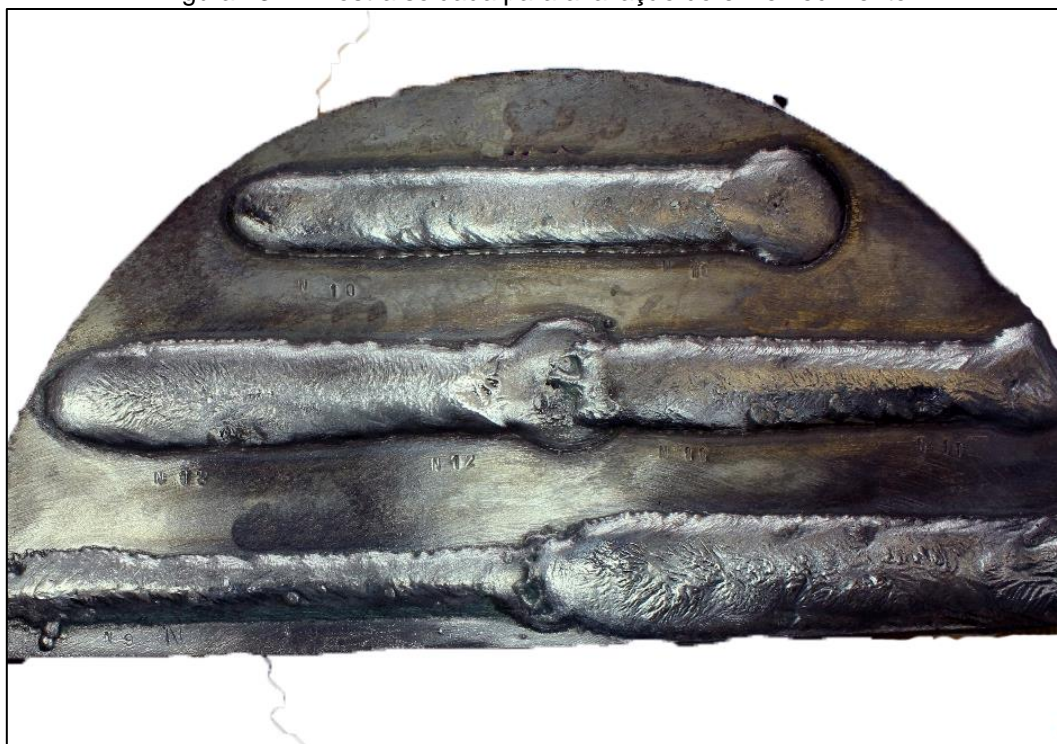
Figura 42 - Diagrama esquemático do tratamento de "step cooling".



Fonte: API RP-934A.

As soldagens foram realizadas nas três faces de corpos de prova com 75 mm x 75 mm x 105 mm nas condições normalizado e revenido com e sem "Step Cooling", conforme apresentada na Figura 43. Foram utilizadas quatro energias de soldagem (0,8 kJ/mm, 1,4 kJ/mm, 2,0 kJ/mm e 2,6 kJ/mm). Para cada energia de soldagem foi realizado um cordão de solda nos corpos de prova, com e sem envelhecimento por "Step Cooling". O gás de proteção utilizado foi o argônio puro com vazão de 15 l/min.

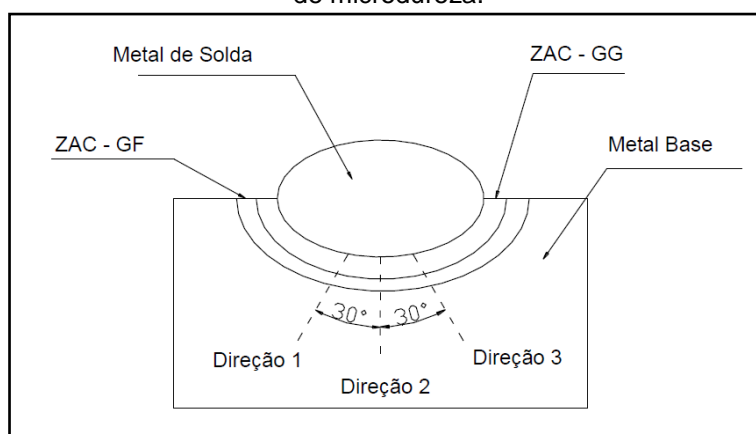
Figura 43 - Amostra soldada para avaliação do envelhecimento.



Fonte: Própria do autor.

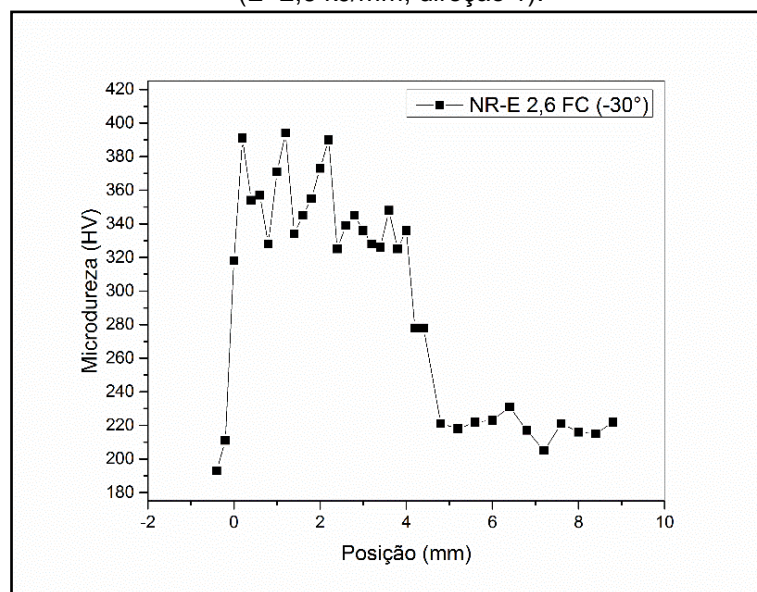
Após as soldagens, cada cordão de solda foi cortado transversalmente para em seguida as seções transversais serem lixadas utilizando uma lixadeira rotativa e lixas com granulação de 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, polidas com pasta de diamante de 3 μm e 1 μm e posteriormente atacadas quimicamente com o reagente Nital 2% (98% álcool e 2% ácido nítrico). Após a preparação das amostras, foram levantados os perfis de microdureza Vickers com carga de 100 gf para as determinações das extensões das zonas duras e macias em três direções na ZAC conforme a Figura 44. A Figura 45 mostra um exemplo de um perfil obtido.

Figura 44 - Desenho ilustrativo destacando as direções onde foram realizadas as impressões de microdureza.



Fonte: Própria do autor.

Figura 45 - Perfil de microdureza da ZAC do aço ASTM A182 Gr F22 normalizado e revenido. (E=2,6 kJ/mm, direção 1).

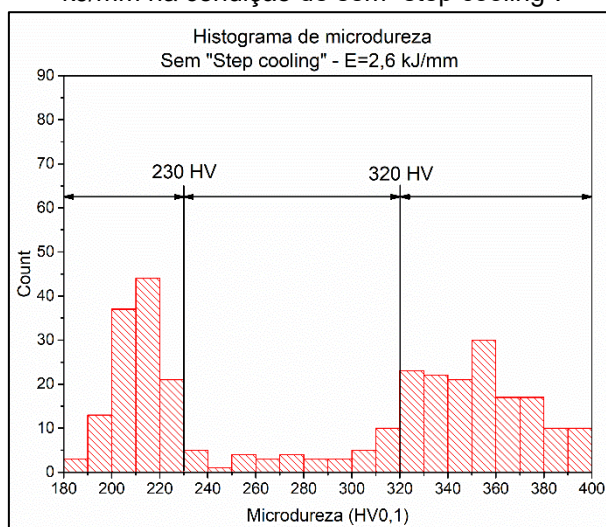


Fonte: Própria do autor.

Para definir os limites de zona dura e de zona macia foi estabelecido um critério baseado no histograma da distribuição das frequências das microdurezas da ZAC até o metal base para cada energia de soldagem. O procedimento de definição de limites de variáveis pelo uso do histograma tem sido feito em outros trabalhos realizados no LPTS, por exemplo, Cavalcante, fez uso do histograma para definição de limites de zona dura e zona macia.[42]

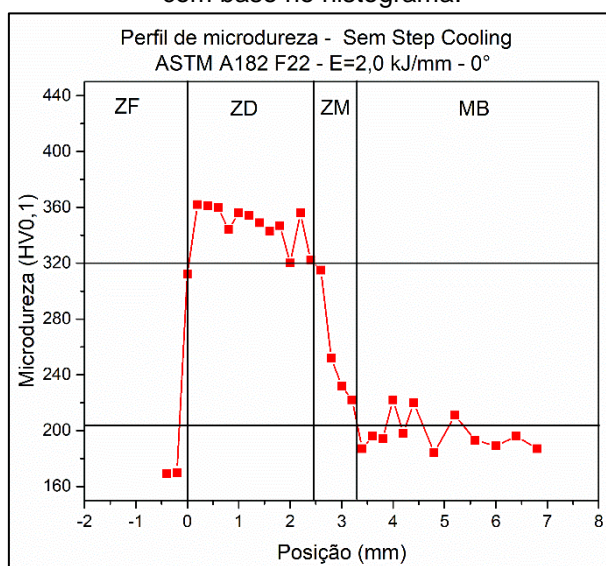
A Figura 46 apresenta o histograma para a energia de 2,6 kJ/mm na condição normalizado e revenido sem “step cooling”. Como pode ser visto no histograma, abaixo de 230 HV₁₀ tem-se a dureza do metal base e acima de 320 HV₁₀ concentram-se as durezas referentes a zona dura. Entre 230 HV₁₀ e 320 HV₁₀ tem-se, portanto, a zona macia para esta condição. Com base neste critério, foram identificadas as extensões das zonas duras e macias para todas as condições de soldagem. A Figura 47 mostra um exemplo do perfil de microdureza.

Figura 46 - Histograma com a distribuição de frequências de dureza para a energia de 2,6 kJ/mm na condição de sem “step cooling”.



Fonte: Própria do autor.

Figura 47 - Identificação das extensões das zonas duras e macias no perfil de microdureza com base no histograma.



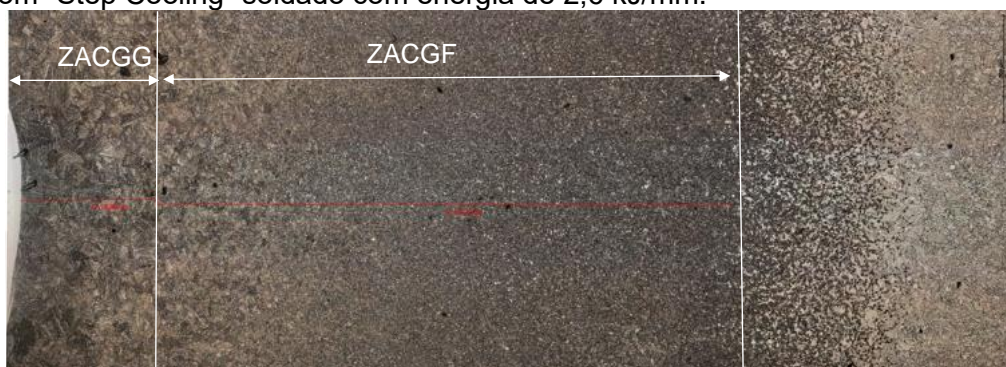
Fonte: Própria do autor.

De posse das extensões das zonas duras e macias para as condições normalizado e revenido, com e sem “Step Cooling”, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para avaliar o efeito da condição do material nas extensões das zonas duras e macias da ZAC.

A extensão da ZACGG e ZACGF para cada condição do material foi determinada utilizando-se uma montagem de uma sequência de fotos da ZAC

com um aumento de 200X, conforme apresentada na Figura 48. Foi estabelecido como critério de fim da ZACGG, um diâmetro médio de grão de 31,8 μm , pois em torno desse valor a ZAC se apresenta com o mesmo padrão de microestrutura com os contornos de grãos bem definidos. Para o fim da ZACGF foi estabelecido como o início da ZAC intercrítica (ZACIC).

Figura 48 - Montagem da ZAC do aço ASTM A182 Gr F22 normalizado e revenido com "Step Cooling" soldado com energia de 2,6 kJ/mm.



Fonte: Própria do autor.

Para a verificação do efeito da condição do material sobre as extensões das ZACs GG e GF, foi utilizada a análise de variância com o mesmo planejamento experimental utilizado para verificar o efeito da condição do material nas extensões das zonas duras e macias, mudando-se apenas as variáveis respostas que passaram a ser as extensões das ZACs GG e GF.

4.6.2. PARTE 2- Soldagem de Qualificação do Eletrodo Protótipo- Etapa 4

A soldagem de reparo de parede do aço ASTM A542 Tipo D com o processo MIG/MAG envolveu a produção de uma bobina protótipo de arame do tipo "Metal Cored" com composição similar. A seguir é apresentada a metodologia utilizada para a qualificação do eletrodo, conforme procedimento estabelecido pela norma AWS 5.28 e pela norma API RP934-A. [8; 52]

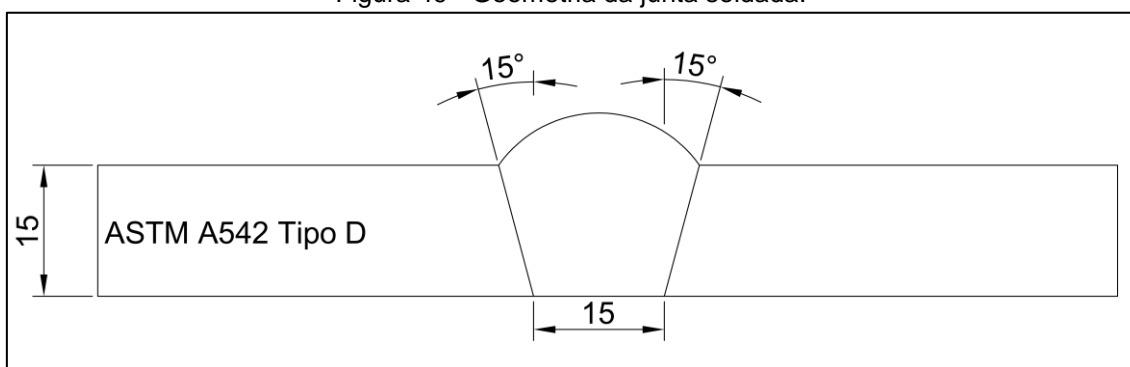
O material de base utilizada na junta foi o aço ASTM A542 Tipo D com espessura de 15 mm na condição temperado e revenido. O gás de proteção utilizado foi a mistura binária de argônio com 4% de dióxido de carbono (CO_2).

4.6.3. Soldagem da junta com eletrodo protótipo CrMoV- Etapa 4

As soldagens foram realizadas com o processo MIG/MAG na posição plana, mesma bancada detalhada na Figura 20. A temperatura de preaquecimento/interpasse utilizada nas soldagens foi de 175°C, segundo a norma API RP 934-A.

A geometria da junta soldada está apresentada na Figura 49 conforme norma AWS 5.28.

Figura 49 - Geometria da junta soldada.



Fonte: Própria do autor.

Os parâmetros de soldagem utilizados estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Parâmetros de soldagem do eletrodo protótipo.

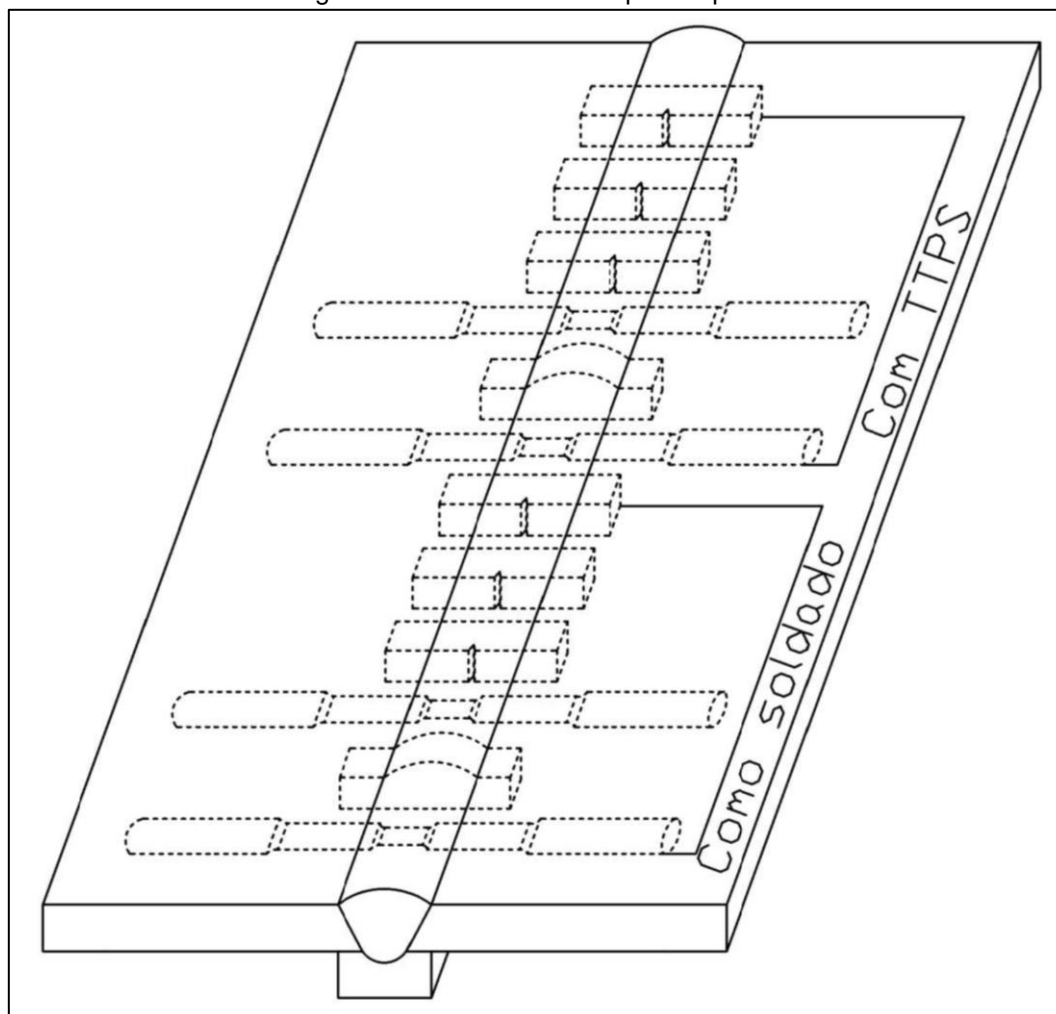
I (A)	Vsold (m/min)	Valim (m/min)	DBCP (mm)	U (V)	Energia (kJ/mm)
220 A Corrente contínua	0,60	7,1	19,0	31,0	1,0

Fonte: Própria do autor.

4.6.4. Avaliação e Caracterização da Soldagem com eletrodo protótipo – Etapa 4

As posições de retirada dos corpos de prova para os ensaios de impacto Charpy e tração estão apresentadas no desenho esquemático da Figura 50.

Figura 50 - Retirada dos corpos de prova.



Fonte: Própria do autor.

Os ensaios de dureza Vickers da zona fundida foram realizados segundo a norma ASTM E92-16 com carga de 10 kgf e tempo de duração da força de ensaio de 15 s.

4.6.5. Ensaio de Charpy – Eletrodo Protótipo – Etapa 4

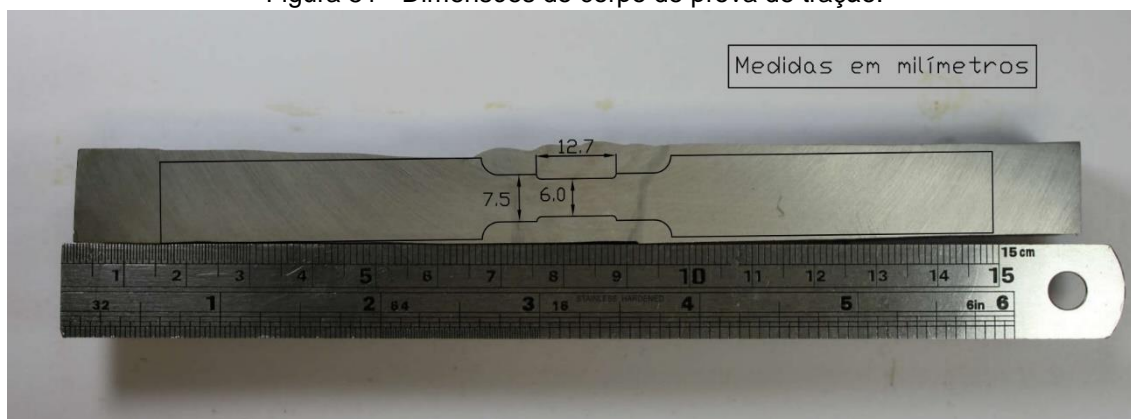
Os ensaios de Charpy foram realizados segundo a norma ASTM E23-16 em seis corpos de prova, sendo três na condição de como soldado, “as weld”, e três com tratamento térmico pós-soldagem (TTPS).

Os ensaios foram realizados na temperatura de -30°C , conforme exigência das normas Petrobras N-133, API RP934-A e I-ET-5000.00-0000-500-PPC-001 REV. D, cujo critério de aprovação exige que o material tenha uma energia absorvida média mínima de 55 J e valores individuais de no mínimo 47 J.

4.6.6. Ensaio de Tração – Eletrodo Protótipo – Etapa 4

Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma ASTM A370-16 em quatro amostras retiradas na direção transversal a direção da soldagem, conforme pode ser visto na Figura 50. As dimensões do corpo de prova de tração estão apresentadas na Figura 51, conforme norma DNV-OS-F101. [56]

Figura 51 - Dimensões do corpo de prova de tração.



Fonte: Própria do autor.

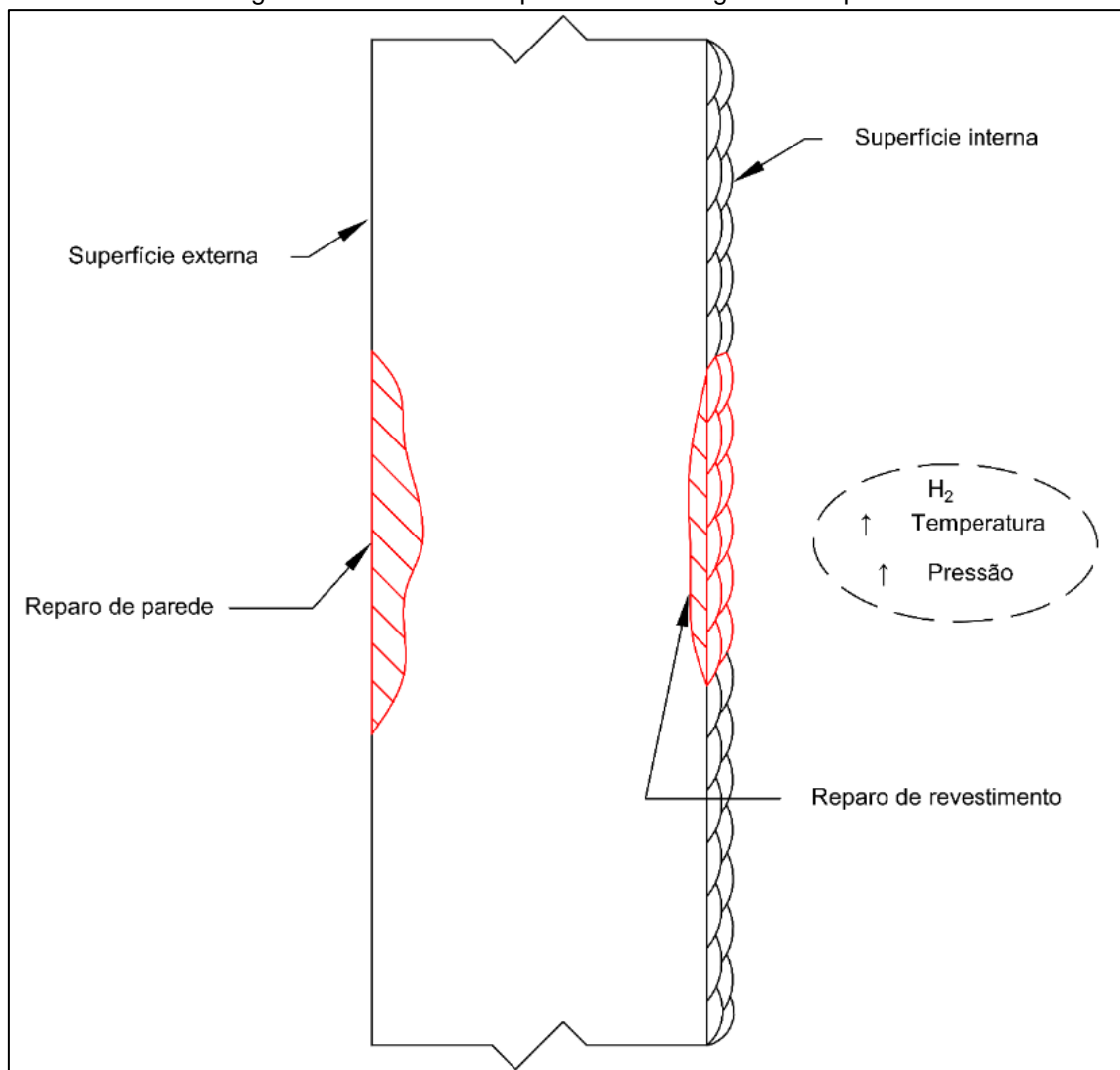
4.7 Etapa 5 - Soldagem simulando caso prático de reparo horizontal

Nesta etapa foram realizadas soldagens em situações que simulem casos práticos de reparo similar (parede) e reparo dissimilar (revestimento). Nestas soldagens foram aplicadas as melhores condições obtidas na soldagem de dupla camada.

As soldagens simulando reparos foram realizadas na posição horizontal (ASME 2G), pelo fato dos equipamentos escolhidos neste trabalho operarem na posição vertical, como exemplo, os tambores de coque e os reatores de HDT.

A Figura 52 representa um esquemático das regiões que serão submetidas a soldagem de reparo. A primeira condição de simulação de reparo é na região externa, ou seja, simular o reparo similar (na parede) de um equipamento. A segunda condição de reparo simulando a região interna do equipamento revestida com aço inoxidável ou liga de níquel.

Figura 52 – Desenho esquemático das regiões de reparo.



Fonte: Própria do autor.

As soldagens de reparo foram realizadas no aço ASTM A387 Gr11, no aço ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D, simulando o reparo similar e simulando o reparo dissimilar.

O planejamento experimental das soldagens simulando reparo está apresentado na Tabela 28.

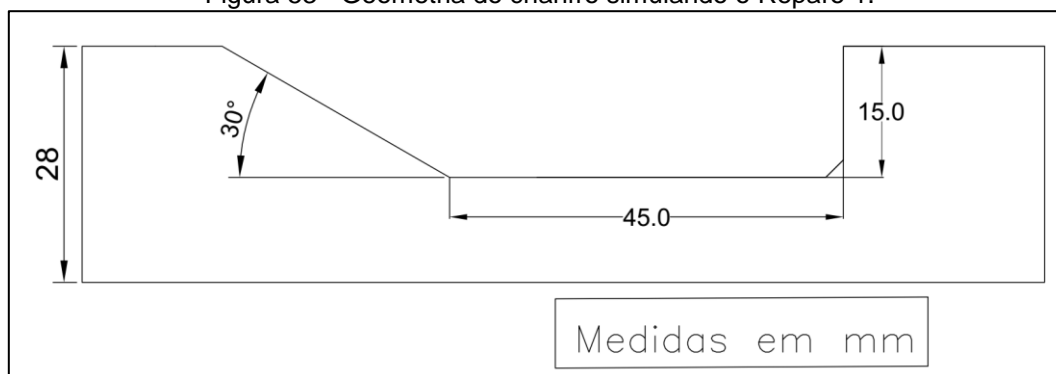
Tabela 28 - Planejamento experimental da soldagem simulando reparo.

REPARO	METAL BASE	METAL DE ADIÇÃO
REPARO 1	ASTM A387 GR11	AWS ER80S-B2
REPARO 2	ASTM A387 GR11	AWS ERNiCrMo-3
REPARO 3	ASTM A387 GR22	AWS ER309L E AWS ER347
REPARO 4	ASTM A543 TIPO D	AWS ER309L E AWS ER347

Fonte: Própria do autor.

Para o Reparo 1, a geometria do chanfro utilizado na soldagem simulando o reparo de parede está apresentada na Figura 53. Foi utilizada uma aresta reta (90°) para posterior retirada de amostras para o ensaio de impacto Charpy na ZAC.

Figura 53 - Geometria do chanfro simulando o Reparo 1.



Fonte: Própria do autor.

Para o Reparo 2, o Reparo 3 e o Reparo 4, a soldagem de revestimento foi realizada na superfície da chapa.

4.7.1. Ensaios Mecânicos - Etapa 5

A norma ASME IX estabelece aos ensaios mecânicos necessários para avaliação de técnica de reparo (“Temper Bead”). Conforme as recomendações, foram realizados os ensaios mecânicos de forma a avaliar a eficácia da TDC-DC quanto as propriedades mecânicas. Os ensaios mecânicos realizados e a quantidade de corpos de prova estão apresentados na Tabela 29.

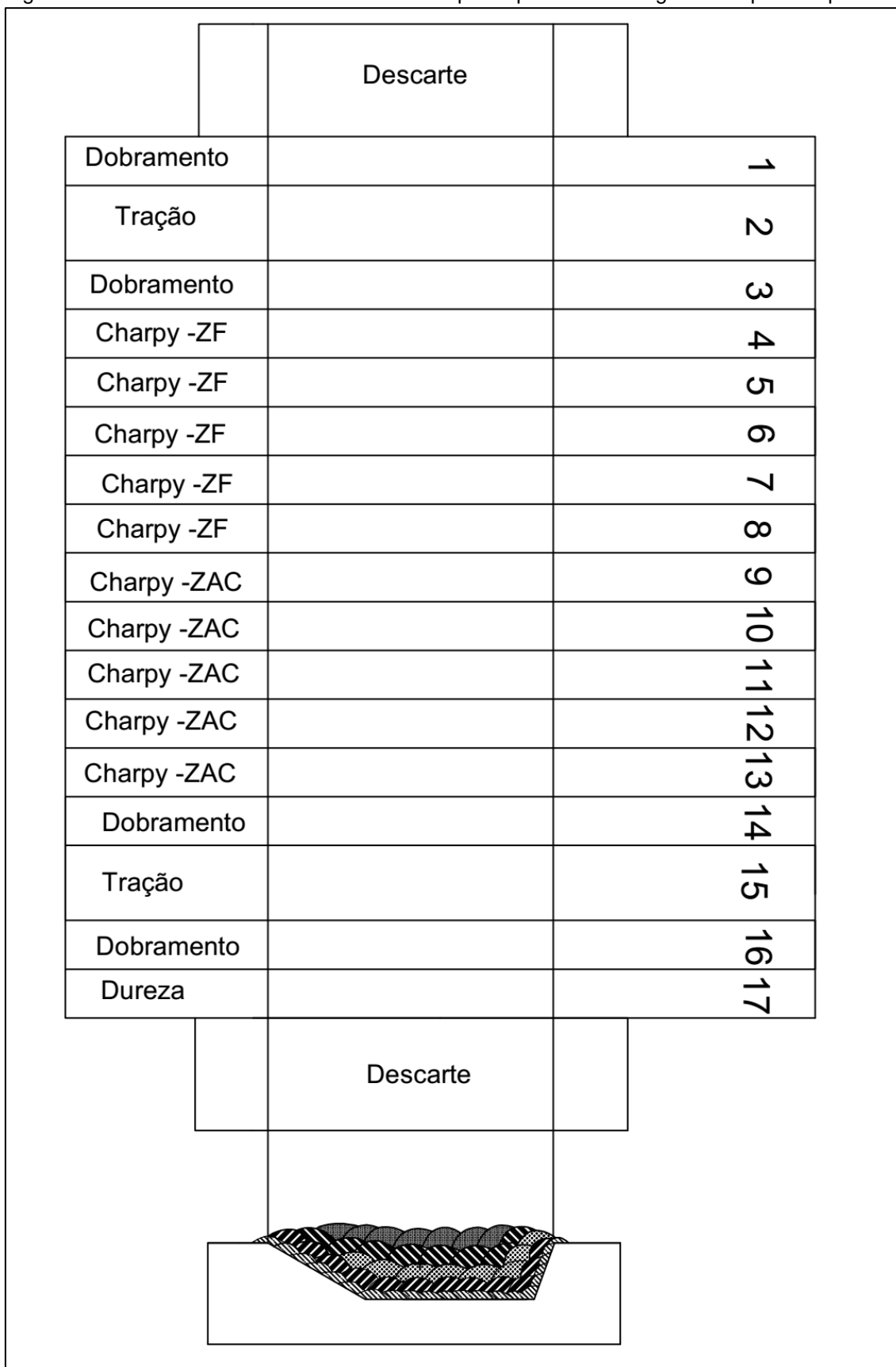
Tabela 29 - Quantidade de ensaios e corpos de prova.

Tipo de reparo	Ensaios mecânicos			
	Dobramento lateral	Tração transversal	Impacto	Dureza Vickers
Reparo de parede	4 cps	2 cps	5 cps na ZAC 5 cps na ZF 5 cps no MB	ZF, ZAC e MB
Reparo de revestimento	4 cps	Não se aplica	5 cps na ZAC 5 cps na ZF 5 cps no MB	ZF, ZAC e MB

Fonte: Própria do autor.

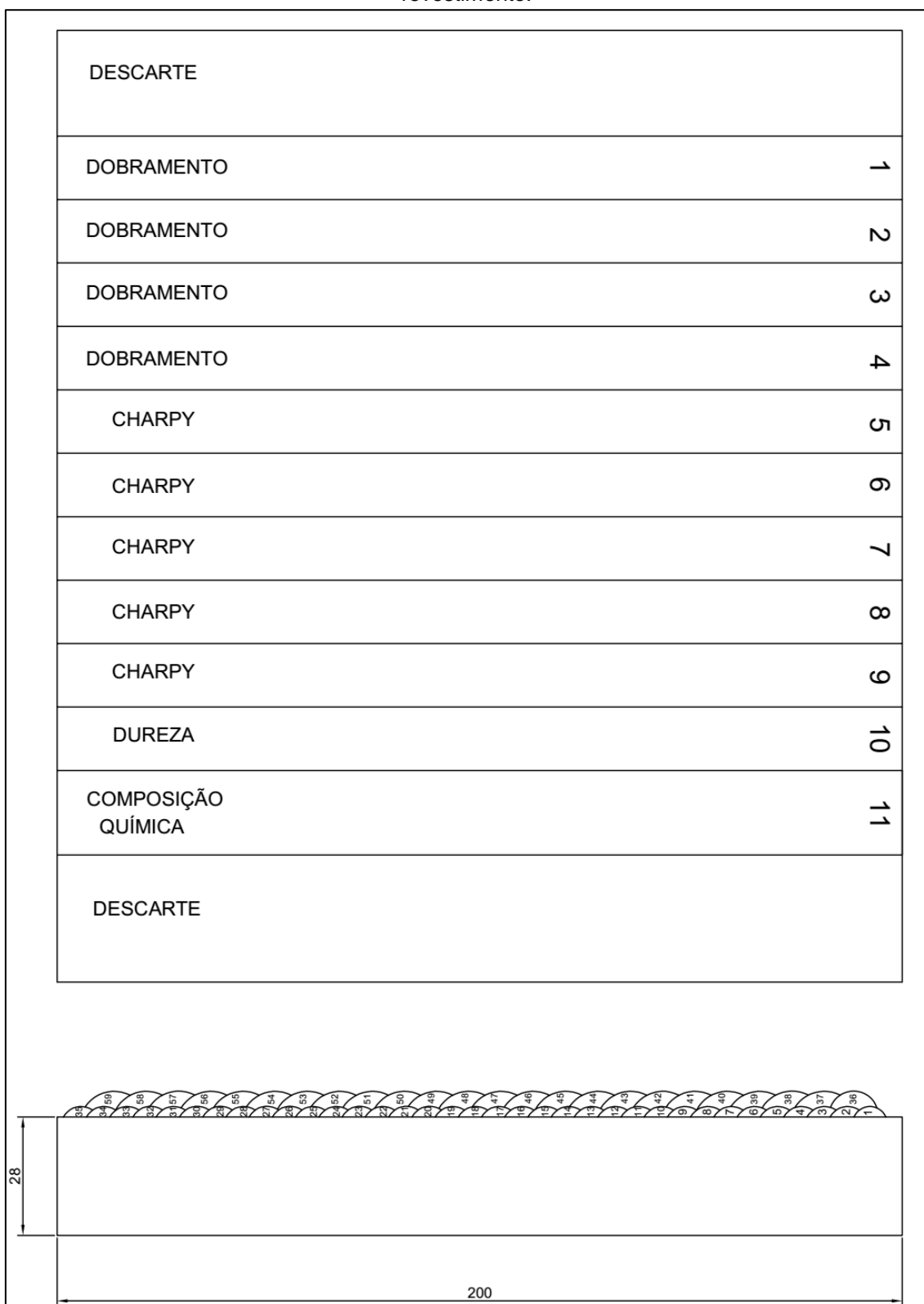
Os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram retirados conforme localização na Figura 54 e confeccionados de acordo com a norma ASME IX.

Figura 54 - Local de retirada de amostras no corpo de prova da soldagem de reparo de parede.



Fonte: Própria do autor.

Figura 55 - Local de retirada de amostras no corpo de prova da soldagem de reparo de revestimento.



Fonte: Própria do autor.

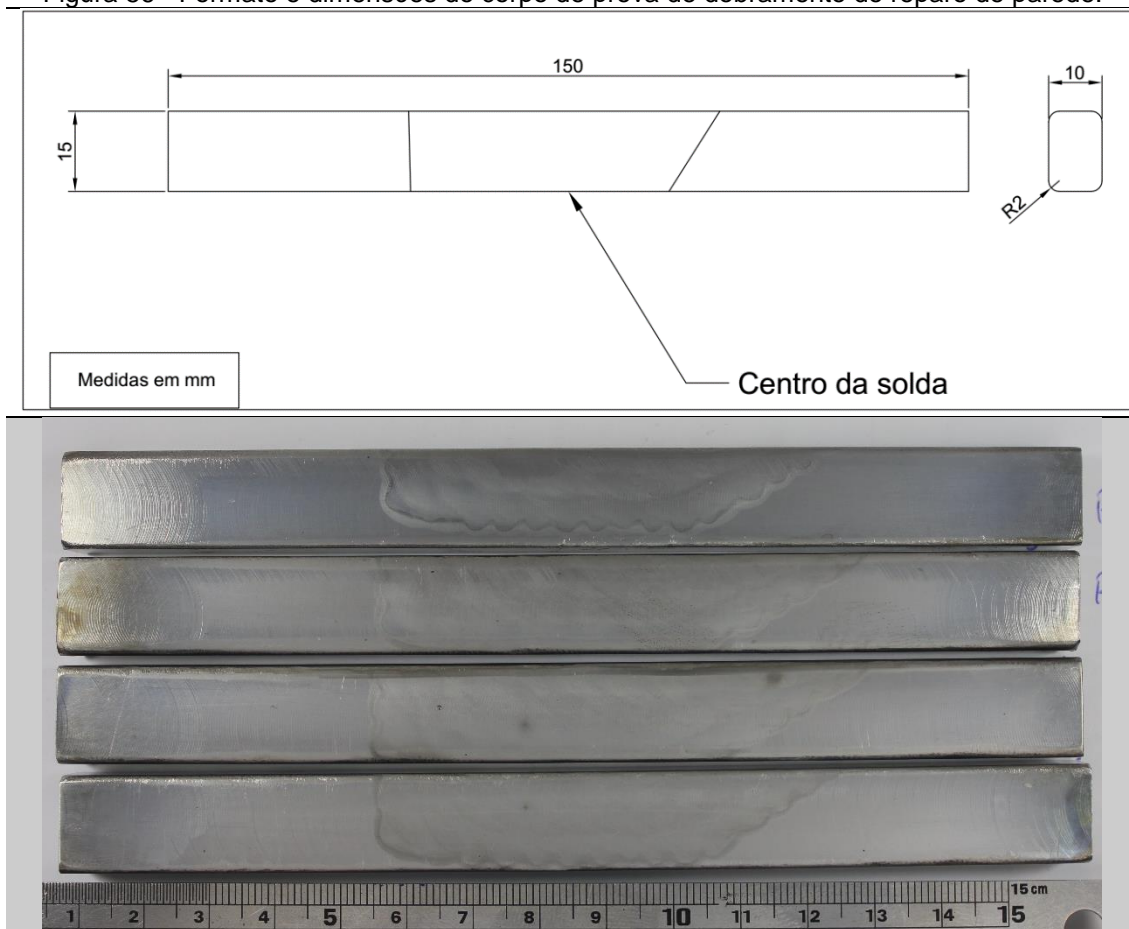
4.7.1.1. Ensaios de dureza – Etapa 5

Os ensaios de dureza foram realizados conforme os procedimentos descritos anteriormente no item 4.5.2 (Avaliação de dureza Vickers).

4.7.1.2. Ensaios de dobramento – Etapa 5

Os quatro corpos de prova para o ensaio de dobramento (“*transverse side bend*”) da soldagem de reparo de parede foram retirados conforme localização especificada na Figura 54 e confeccionados de acordo com a norma ASME IX, com dimensões de acordo com a Figura 56.

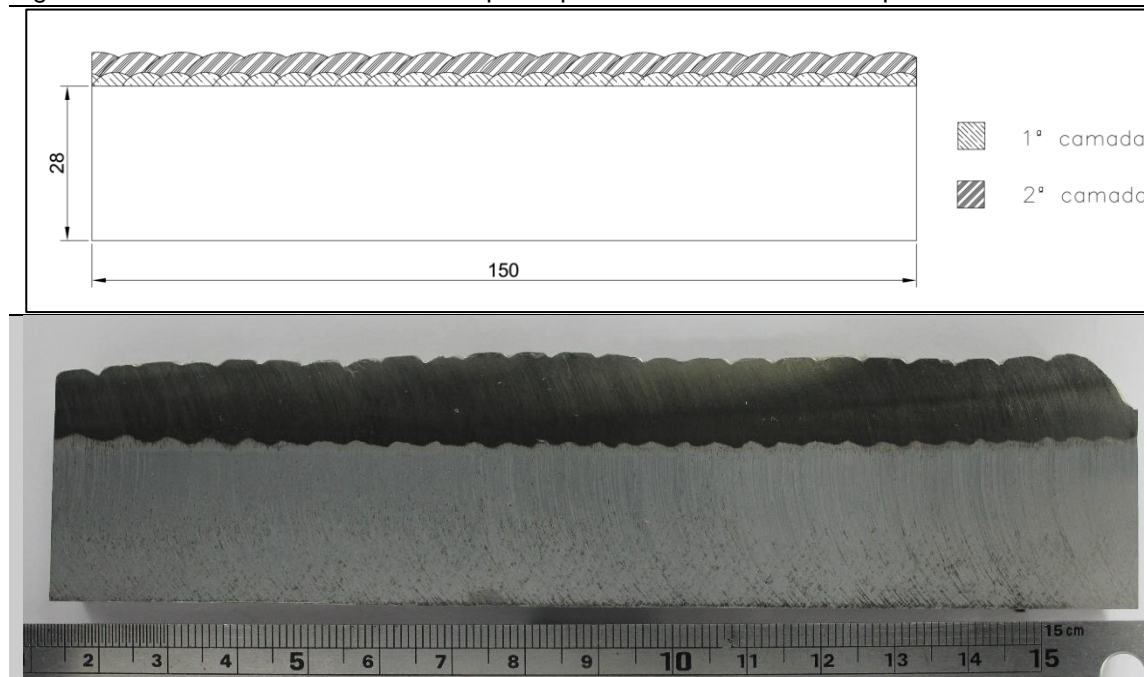
Figura 56 - Formato e dimensões do corpo de prova de dobramento do reparo de parede.



Fonte: Própria do autor.

Os quatro corpos de prova para o ensaio de dobramento (*transverse side bend*) da soldagem de reparo de revestimento foram retirados conforme localização especificada na Figura 55 e confeccionados de acordo com a norma ASME IX, com dimensões de acordo com a Figura 57.

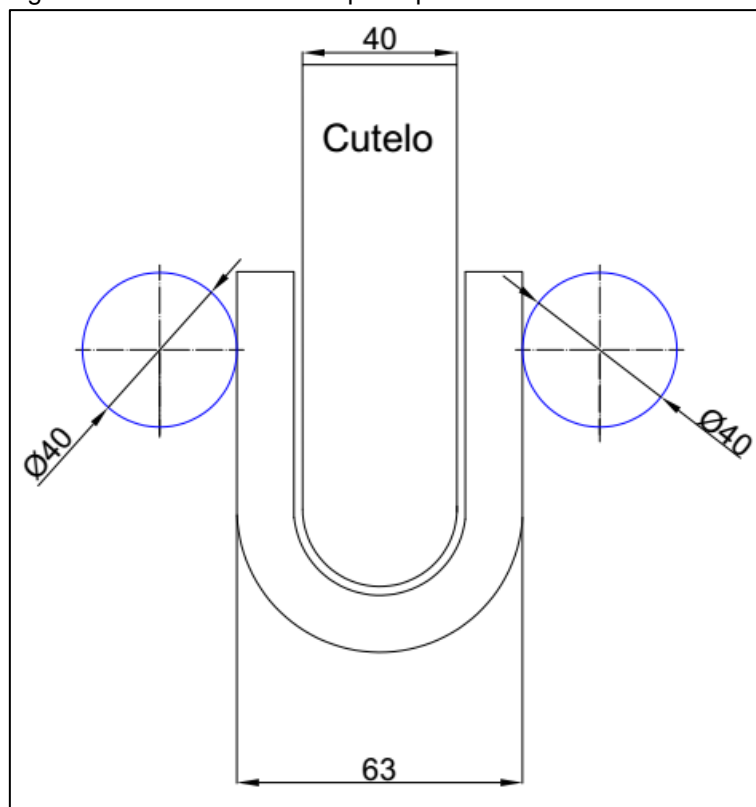
Figura 57 - Formato e dimensões do corpo de prova de dobramento do reparo de revestimento.



Fonte: Própria do autor.

O diâmetro do cutelo utilizado foi de 40 mm e a distância entre os roletes foi de 63 mm. A velocidade do ensaio utilizada foi de 0,5 mm/s. (Figura 59)

Figura 58 - Dimensões do suporte para o ensaio de dobramento.



Fonte: Própria do autor.

Os ensaios de dobramento foram conduzidos na máquina da marca MTS com 100 kN de capacidade (Figura 59).

Figura 59 - Máquina e mecanismo de dobramento.



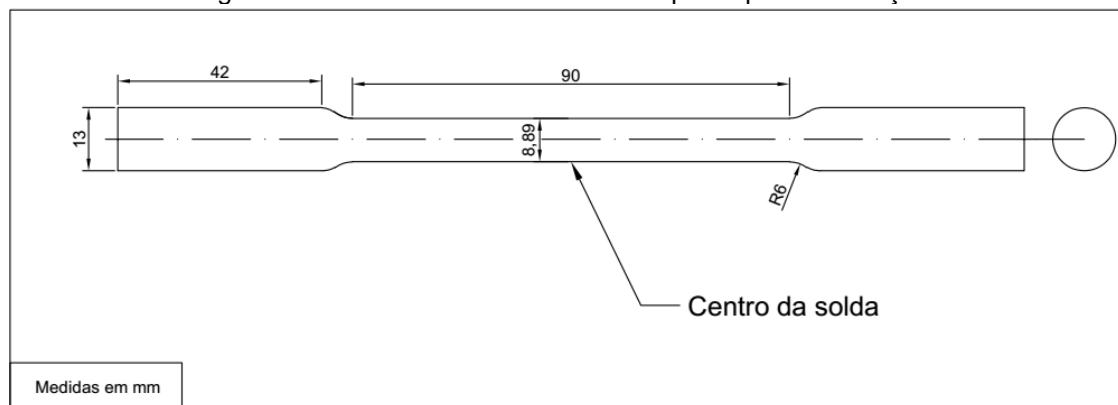
Fonte: Própria do autor.

O critério para aceitação do ensaio de dobramento pela ASME IX ocorre quando os corpos de prova de dobramento guiado não devem ter descontinuidade aberta na zona fundida ou zona afetada pelo calor, excedendo 1/8 pol. (3 mm), medida em qualquer direção na superfície convexa da amostra após a flexão. As descontinuidades abertas que ocorrem nos cantos do corpo de prova durante o teste não devem ser consideradas, a menos que apresentem evidências definitivas de que resultam da falta de fusão, inclusões de escória ou outras descontinuidades internas. [47]

4.7.1.3. Ensaios de tração – Etapa 5

Os dois corpos de prova para o ensaio de tração foram retirados conforme localização na Figura 54 e confeccionados de acordo com a norma ASME IX, com dimensões de acordo com a Figura 60.

Figura 60 - Formato e dimensões do corpo de prova de tração.



Fonte: Própria do autor.

Os ensaios de tração foram conduzidos na máquina da marca MTS com 100 kN de capacidade (Figura 61).

Figura 61 – Máquina de tração.

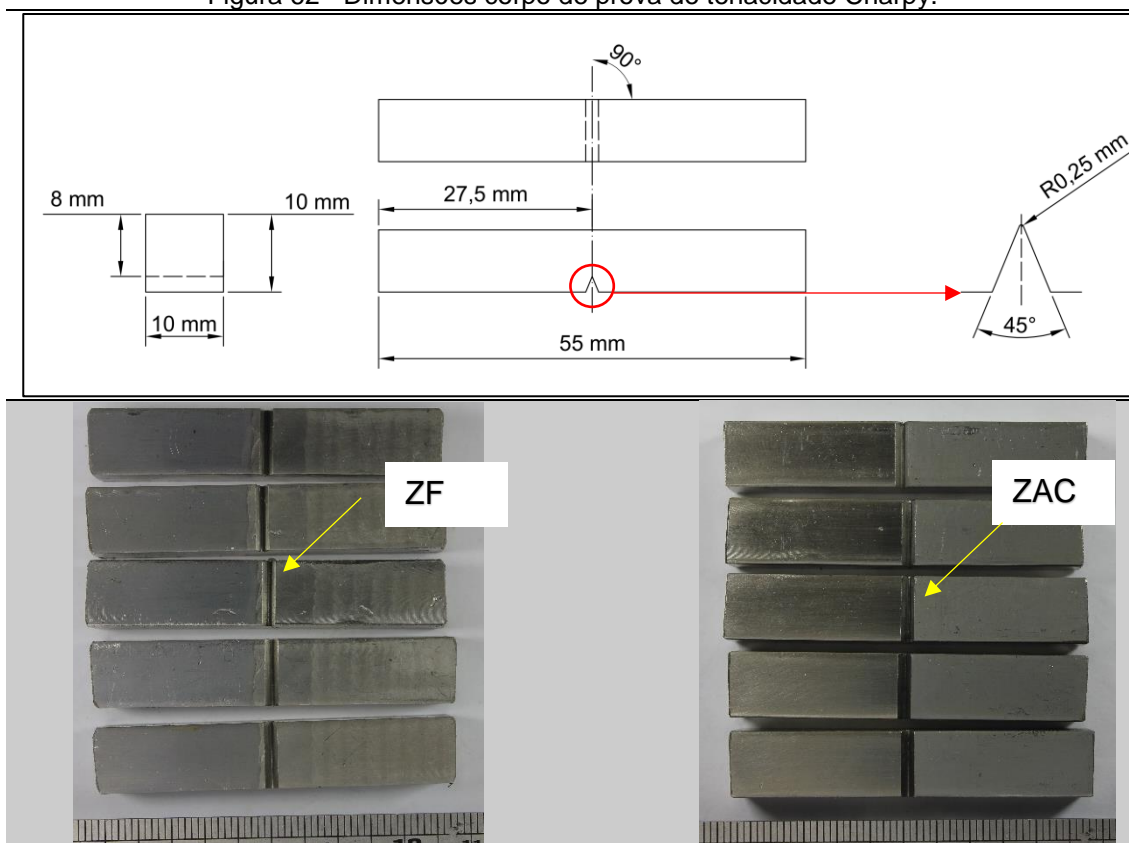


Fonte: Própria do autor.

4.7.1.4. *Ensaio de tenacidade Charpy – Etapa 5*

Os cinco corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy foram confeccionados de acordo com a norma ASTM E23 com dimensões de 10 mm x 10 mm x 55 mm (Figura 62) e entalhe em “V” posicionada na ZAC tangente a linha de fusão. Além dos corpos de prova da ZAC foram retirados cinco corpos de prova do metal de base. A localização de retirada das amostras foi feita conforme apresentada na Figura 54 e na Figura 55

Figura 62 - Dimensões corpo de prova de tenacidade Charpy.



Fonte: ASTM E23.

Os entalhes foram usinados na entalhadora e as dimensões foram verificadas no projetor de perfil localizado no laboratório de metrologia (LAMETRO-UFC), conforme a Figura 63

Figura 63 - a) Máquina entalhadora e b) Projetor de perfil.



Fonte: Própria do autor.

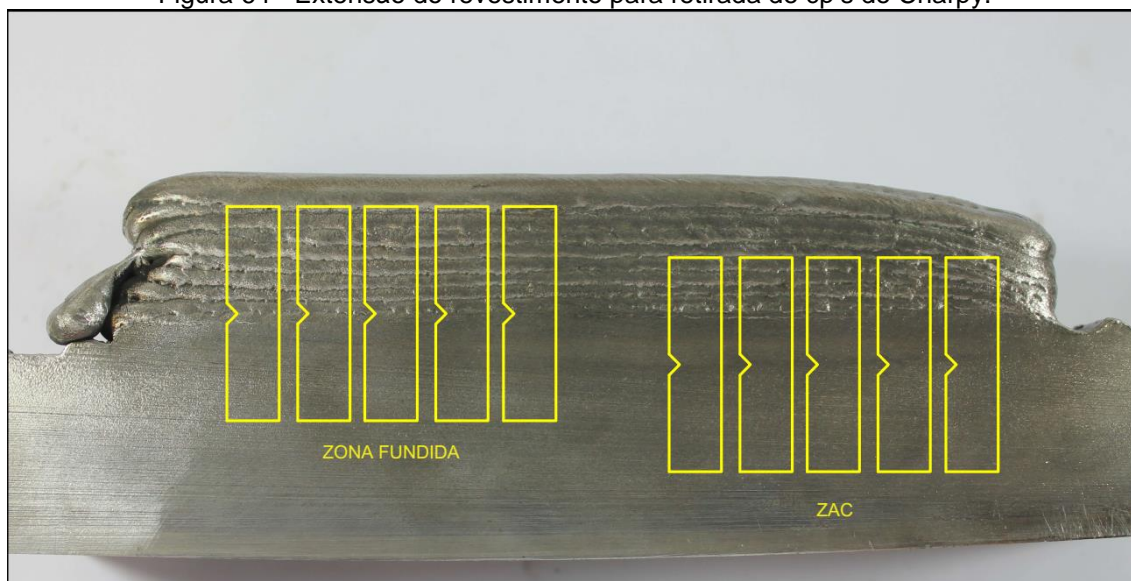
Para o aço ASTM A387 Gr11, o critério para aceitação do ensaio de impacto Charpy-V é apresentar a mínima energia absorvida de 55 J na média de três amostras e 27 J mínimo para uma única amostra, todos ensaios realizados na temperatura de -18°C conforme a norma API RP 934-A.

Para os aços ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D, o critério para aceitação do ensaio de impacto Charpy-V é apresentar a mínima energia absorvida de 55 J na média de três amostras e 47 J mínimo para uma única amostra, todos ensaios realizados na temperatura de -30°C conforme a norma API RP 934-C.

Para retirada dos corpos de prova de Charpy da ZAC, foram feitas mais 7 camadas com baixa energia de soldagem ($E=0,8\text{ kJ/mm}$) e temperatura de interpasse menor que 50°C , obtendo comprimento suficiente para retirada do

corpo de prova, conforme mostrada na Figura 64.

Figura 64 - Extensão do revestimento para retirada de cp's de Charpy.



Fonte: Própria do autor.

Os ensaios de impacto foram conduzidos de acordo com a norma ASTM E23. Os corpos de prova inicialmente foram mantidos em solução de álcool etílico e nitrogênio líquido na temperatura do ensaio (-18°C) por no mínimo de 10 minutos, para em seguida serem transferidos para o suporte da amostra na máquina de ensaio e então o pêndulo foi liberado, esta operação durou no máximo 4 s.

A máquina utilizada foi da marca TIME equipada com pêndulo de 750J (Figura 65). A temperatura do ensaio foi controlada com medidor de temperatura equipado com termopar submerso na solução.

Figura 65 – Máquina de ensaio de impacto.



Fonte: Própria do autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados e a discussão referentes as etapas descritas na metodologia.

5.1 Etapa 1 - Caracterização dos metais de base

Primeiramente serão apresentados ensaios de caracterização dos materiais de base. Na Tabela 30 estão apresentados os valores das composições químicas dos materiais de base obtidos pela técnica de espectrometria de emissão ótica.

Tabela 30 - Composição química do metal de base medido por espectrometria de emissão ótica.

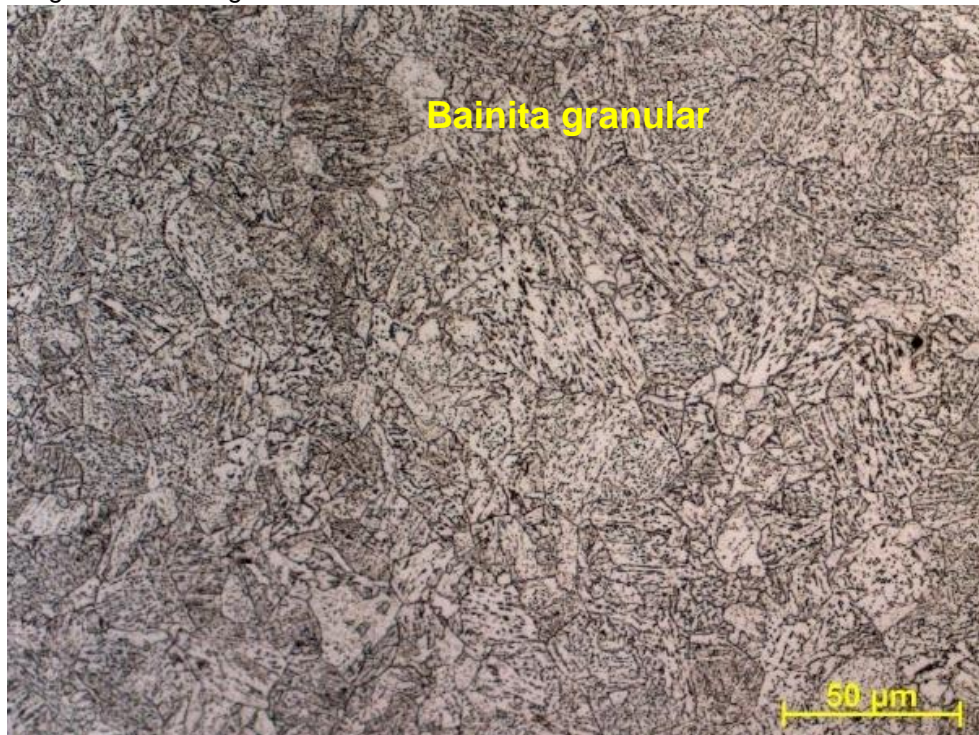
Material	Composição (%)							Ceq (IIW)
ASTM A387 Gr11 (1,25Cr-0,5Mo)	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	0,71
	0,16	0,46	0,003	0,003	0,52	1,41	0,5	
ASTM A387 Gr22 (2,25Cr-1,0Mo)	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	0,92
	0,17	0,47	0,004	0,003	0,23	2,24	0,94	
ASTM A542 TipoD (2,25Cr-1,0Mo-0,25V)	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	0,96
	0,15	0,51	0,007	0,008	0,064	2,30	0,94	
	V	Ni	Cu	Ti	Nb			
	0,3	0,15	0,09	0,016	0,056			

Fonte: Elaborada pelo autor.

As composições químicas obtidas estão de acordo com os requisitos estabelecidos pelas normas ASTM A387 e ASTM A542 para cada elemento químico.

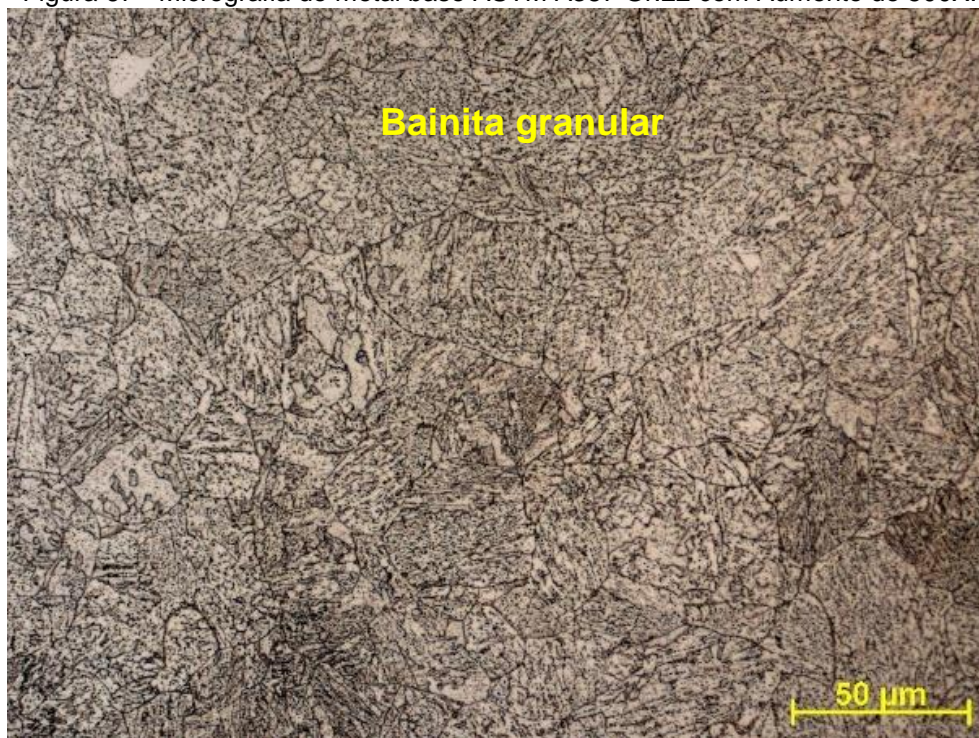
As micrografias obtidas por microscopia ótica nos metais de base dos aços CrMo são apresentadas na Figura 66 e na Figura 67. Em geral, as microestruturas são compostas predominantemente por bainita granular com grãos grosseiros.

Figura 66 - Micrografia do metal base ASTM A387 Gr.11 com aumento de 500x.



Fonte: Própria do autor.

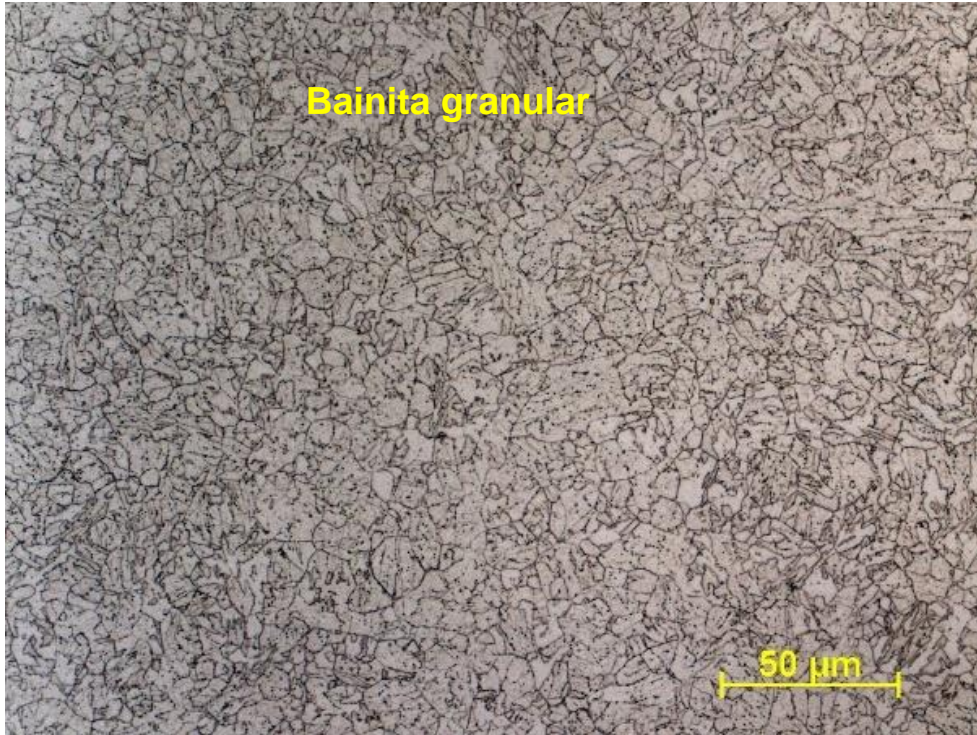
Figura 67 - Micrografia do metal base ASTM A387 Gr.22 com Aumento de 500X.



Fonte: Própria do autor.

A micrografia obtida por microscopia ótica no metal de base do aço CrMoV é apresentada na Figura 68. Observa-se o elevado grau de refinamento na microestrutura obtida do aço ASTM A542 Tipo D, devido a formação de carbonetos de vanádio mais finos e estáveis atuando como refinadores de grãos, esta microestrutura é predominantemente bainita granular com grão menores.

Figura 68 - Micrografia do metal base ASTM A542 Tipo D com aumento de 500x.



Fonte: Própria do autor.

Os valores medidos de dureza em amostras do aço ASTM A387 Gr.11, ASTM A387 Gr.22 e ASTM A542 Tipo D na condição como recebido estão mostrados na Tabela 31. São apresentados os valores médios de dureza seguido do desvio padrão.

Tabela 31 - Valores medidos e médios das durezas obtidas do aço na condição como recebido.

Ponto	Dureza HV (10)		
	ASTM A387 Gr11	ASTM A387 Gr.22	ASTM A542 Tipo D
01	171	187	198
02	180	185	168
03	178	191	182
04	178	185	187
05	174	190	181
06	177	183	178
07	172	189	187
08	173	188	182
09	175	185	179
10	178	185	182
Média	176 ± 3 HV10	187 ± 3 HV10	182 ± 7 HV10

Os materiais de base apresentaram dureza Vickers abaixo do máximo exigido pelas normas vigentes (Petrobras N133, API RP934A e API RP934C) para estes materiais, quando aplicados na indústria do petróleo, por exemplo, os vasos de pressão, os tambores de coque e os reatores de HDT.

Nestas condições de dureza e microestrutura, os aços ferríticos CrMo e CrMoV costumam ser empregados em temperaturas superiores a 400 °C, devido a boa resistência à quente e boa resistência ao hidrogênio em alta temperatura.

Desta forma, os metais de base estão dentro dos limites estabelecidos para a composição química, para a dureza exigida e com microestrutura adequada. [7; 8; 9]

5.2 Etapa 2 – Técnica de deposição controlada

A técnica de deposição controlada é uma técnica bastante empregada para soldagem de aços que tendem a apresentar dureza elevada e crescimento de grão decorrentes do ciclo térmico aplicado. Para os aços CrMo e CrMoV é fundamental que seja utilizada alguma técnica que proporcione melhorias nessas propriedades. A técnica de deposição controlada tem se mostrado uma grande ferramenta para a escolha das relações de parâmetros a serem aplicados na dupla camada. A seguir são apresentados os resultados e a discussão referente a esta etapa.

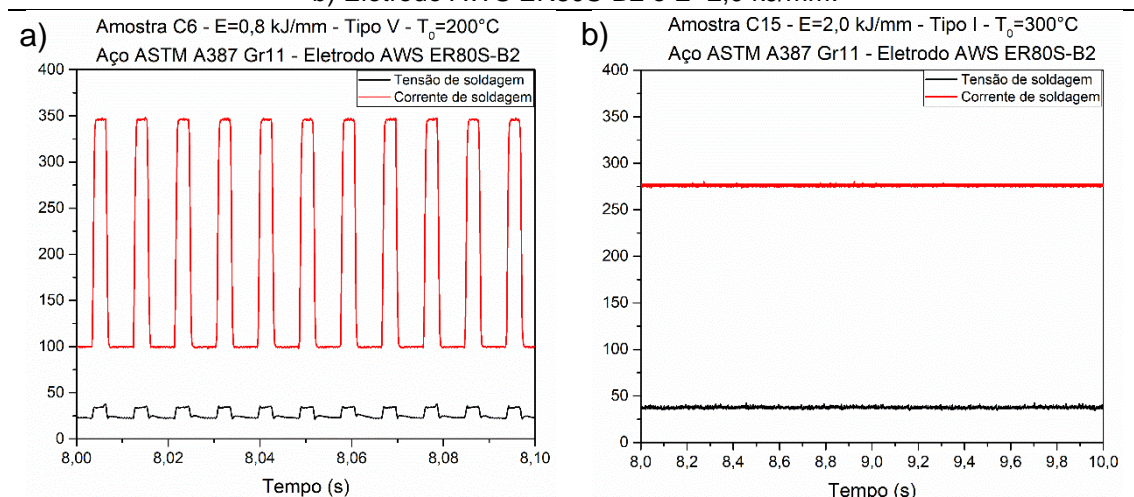
5.2.1. Soldagem de simples deposição – Etapa 2

A seguir são apresentados resultados referentes as soldagens de simples deposição para aplicação dos critérios de microdureza e de microestrutura. Exemplos de oscilogramas de tensão e de corrente de soldagem obtidos nas soldagens exploradas para o arame similar AWS ER80S-B2 são apresentados na Figura 69. A Figura 70 ilustra exemplos de oscilogramas de tensão e de corrente das soldagens exploradas para o arame dissimilar AWS ERNiCrMo-3.

As soldagens foram, em geral, bastante estáveis, com pouca geração de respingos e com pouco desvio de corrente e de tensão de soldagem.

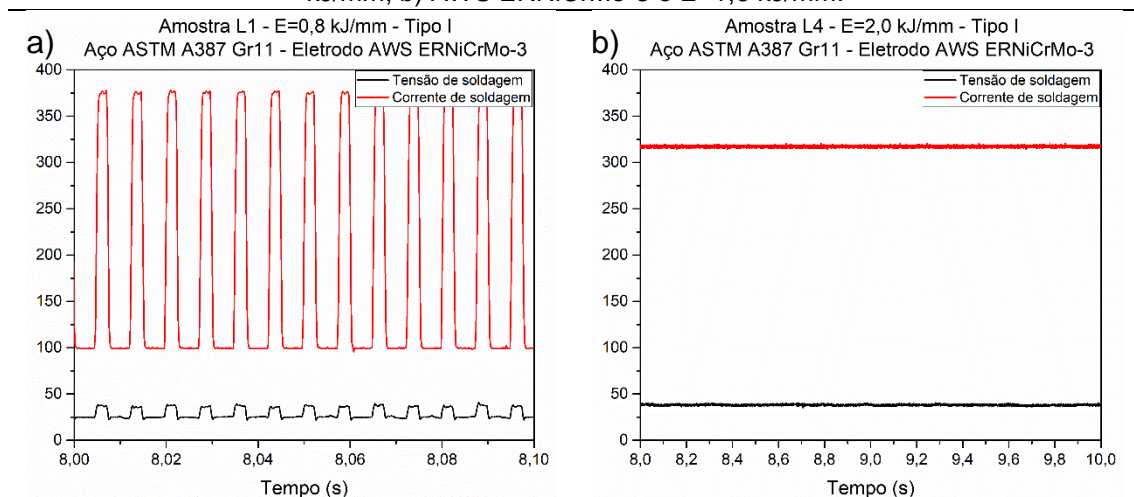
O eletrodo protótipo apresentou boas características operacionais, excelente estabilidade e, principalmente, excelente molhabilidade conforme Figura 71.

Figura 69 - Oscilogramas de tensão e de corrente. a) Eletrodo AWS ER80S-B2 e $E=0,8$ kJ/mm; b) Eletrodo AWS ER80S-B2 e $E=2,0$ kJ/mm.



Fonte: Própria do autor.

Figura 70 - Oscilogramas de tensão e de corrente. a) Eletrodo AWS ERNiCrMo-3 e $E=0,8$ kJ/mm; b) AWS ERNiCrMo-3 e $E=1,6$ kJ/mm.



Fonte: Própria do autor.

De um modo geral, em uma avaliação visual, considerando o acabamento superficial, possíveis defeitos macroscópicos, respingos e irregularidades, os cordões de solda foram satisfatórios para os objetivos do trabalho. Esta análise pode ser confirmada pela Figura 71 para a soldagem utilizando-se eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e Eletrodo Protótipo) e na Figura 72 para a soldagem com eletrodos dissimilares (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347).

Figura 71 - Soldagem Similar: Imagens dos cordões de solda.

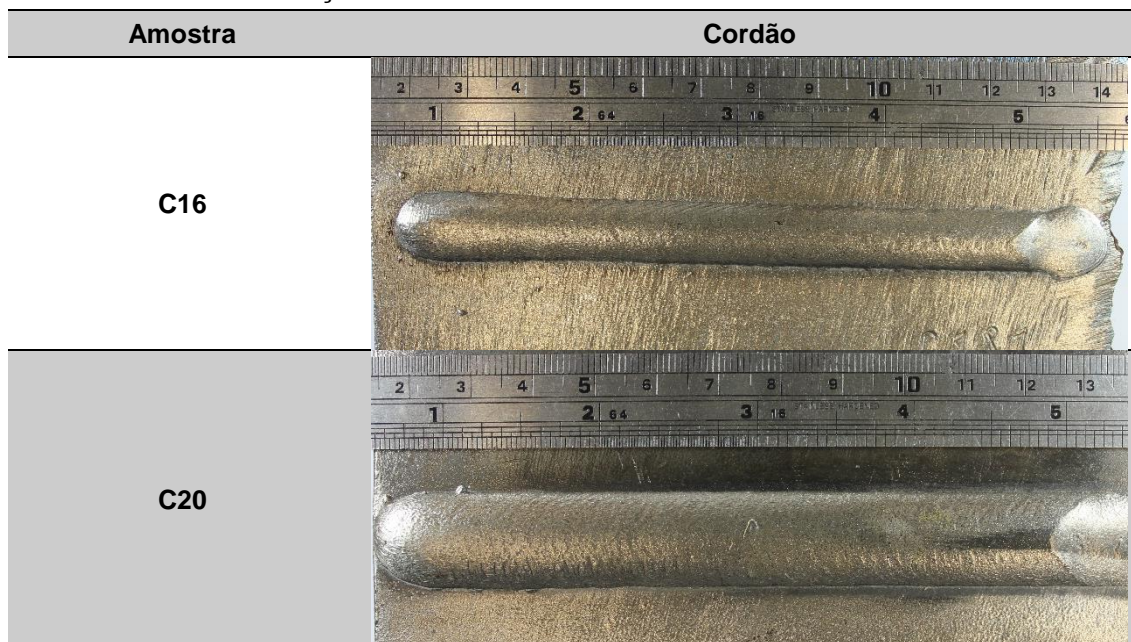
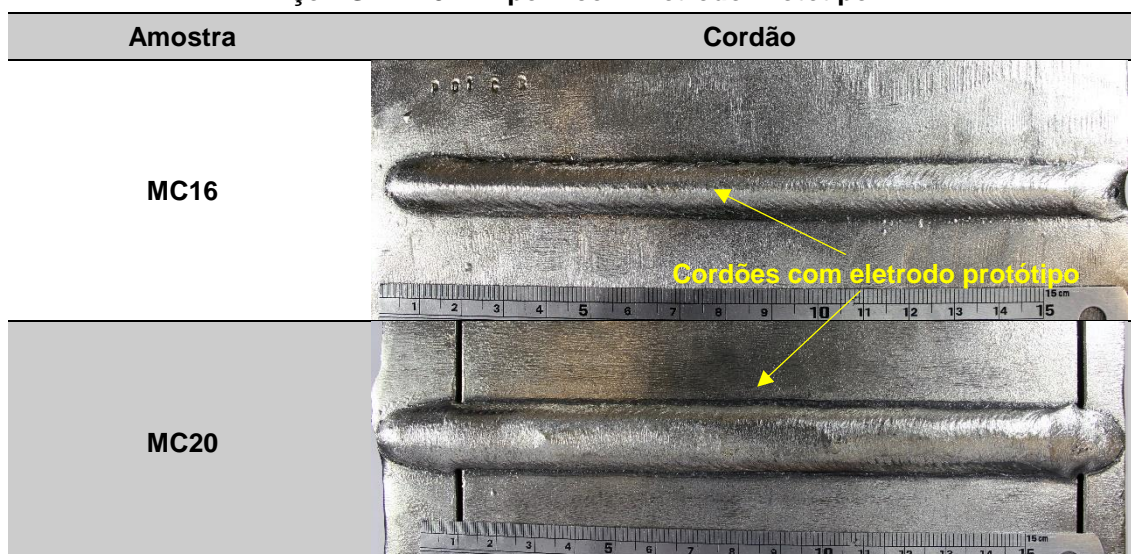

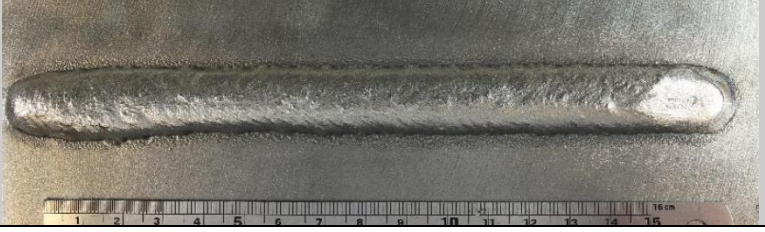
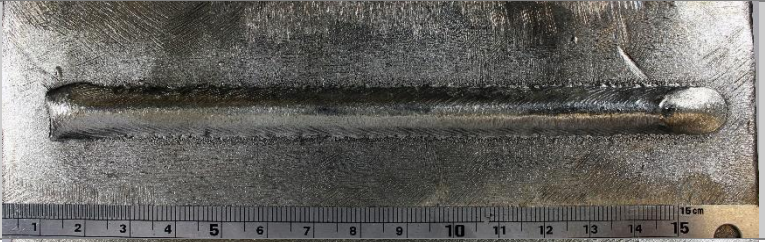
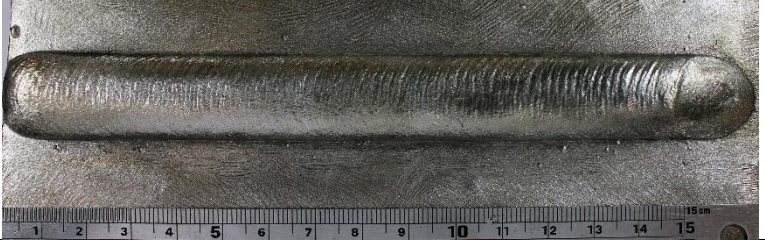


Aço ASTM A387 Gr11 com AWS ER80S-B2.**Aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER90S-B3.****Aço ASTM A542 Tipo D com Eletrodo Protótipo.**

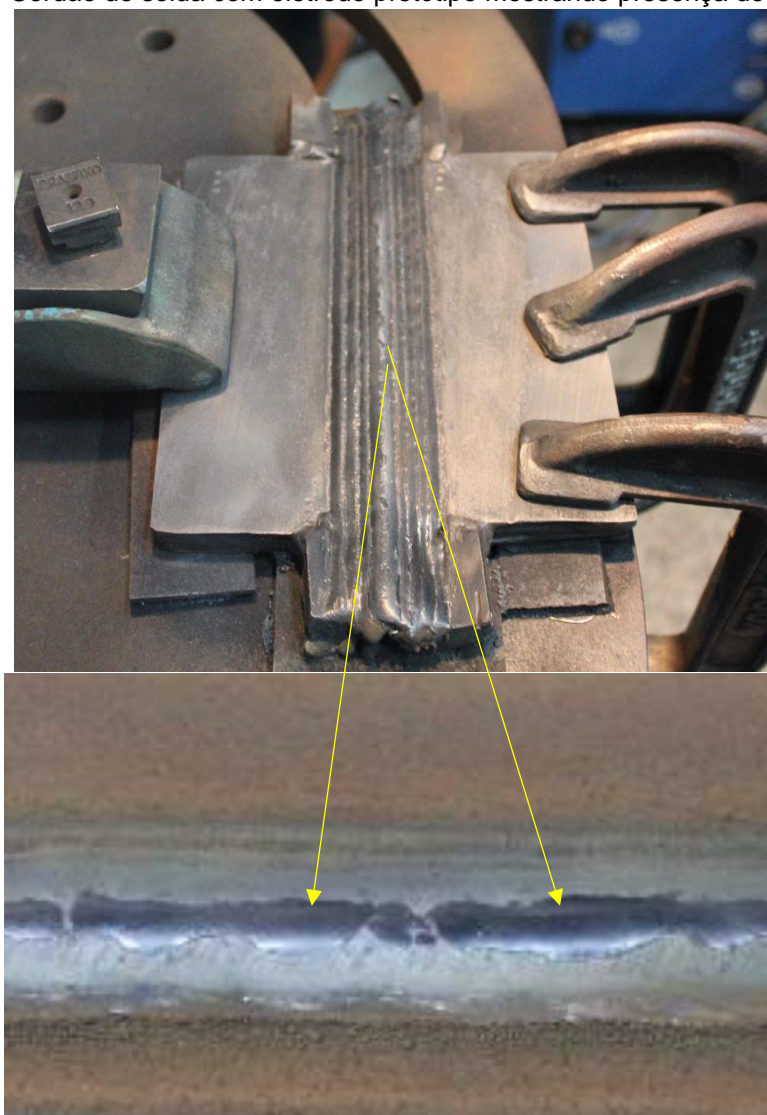
Figura 72 - Soldagem Dissimilar: Imagens dos cordões de solda.

Aço ASTM A387 Gr11 com AWS ERNiCrMo-3.	
Amostra	Cordão
L5	 A photograph of a weld bead labeled L5. The weld is a single, relatively smooth line on a metal surface. A ruler is placed below it for scale, showing it is approximately 15 cm long.
L8	 A photograph of a weld bead labeled L8. The weld is a single, smooth line with a slightly rounded end. A ruler is placed below it for scale, showing it is approximately 15 cm long.
Aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER309L e ER347.	
Amostra	Cordão
D6	 A photograph of a weld bead labeled D6. The weld is a single, smooth line with a rounded end. A ruler is placed below it for scale, showing it is approximately 15 cm long.
D10	 A photograph of a weld bead labeled D10. The weld is a single, smooth line with a rounded end. A ruler is placed below it for scale, showing it is approximately 15 cm long.
Aço ASTM A542 Tipo D com AWS ER309L e ER347.	
Amostra	Cordão
DV6	 A photograph of a weld bead labeled DV6. The weld is a single, smooth line with a rounded end. A ruler is placed below it for scale, showing it is approximately 15 cm long.
DV10	 A photograph of a weld bead labeled DV10. The weld is a single, smooth line with a rounded end. A ruler is placed below it for scale, showing it is approximately 15 cm long.

Fonte: Própria do autor.

O eletrodo protótipo, por ser do tipo “metal cored”, apresentou a presença de uma fina camada de escória na superfície superior do cordão de solda, conforme indica a seta (Figura 73). Esta fina camada de escória é de difícil remoção, devido isso, em cada passe foi realizada a limpeza com esmerilhadeira equipada com escova rotativa e disco de corte.

Figura 73 – Cordão de solda com eletrodo protótipo mostrando presença de fina escória.



Fonte: Própria do autor.

5.2.2. Avaliação da Geometria dos cordões de solda – Etapa 2

A avaliação da geometria dos cordões de solda é de fundamental importância para compreensão dos efeitos dos parâmetros e técnicas empregadas para aplicação da técnica de deposição controlada.

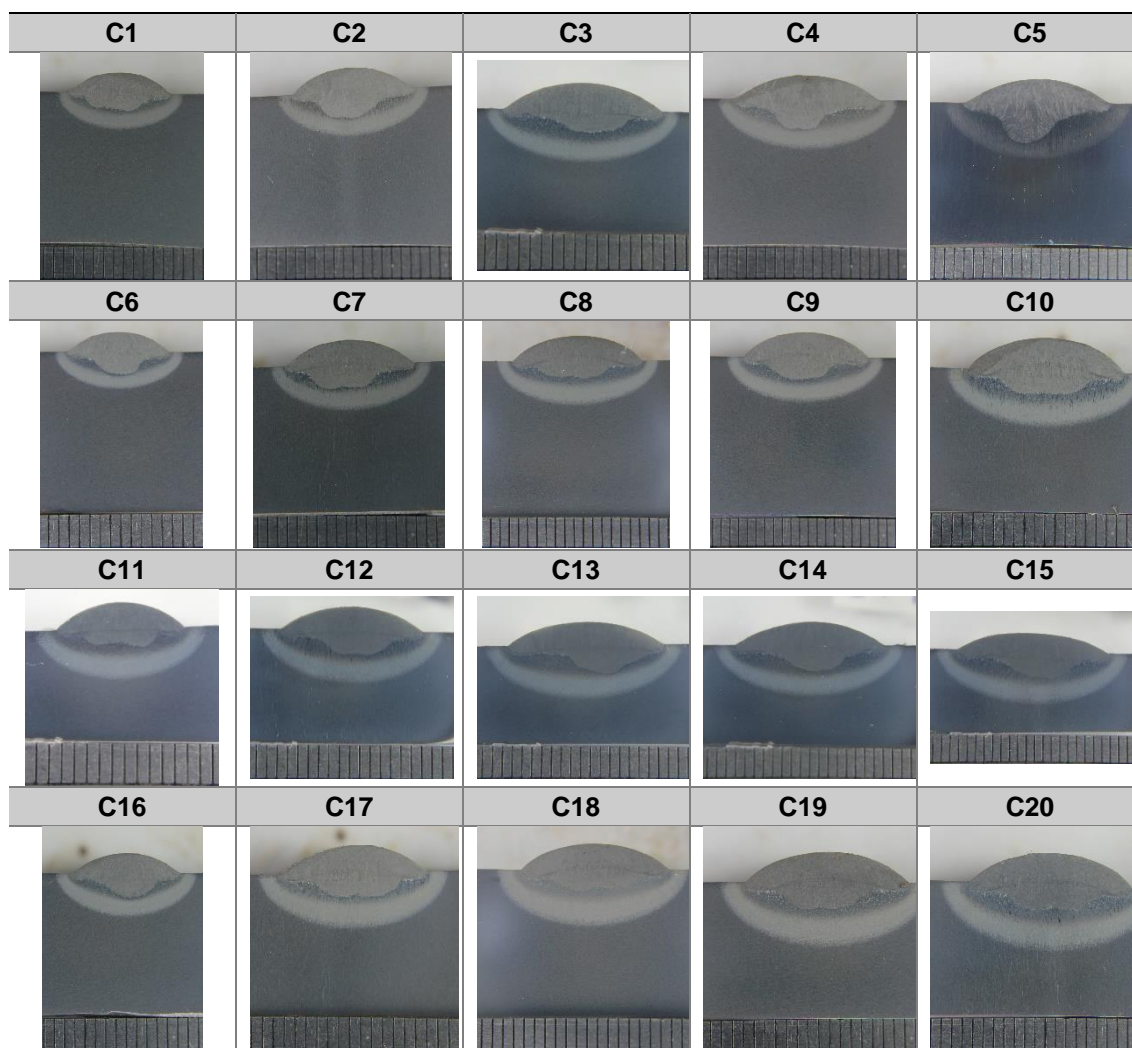
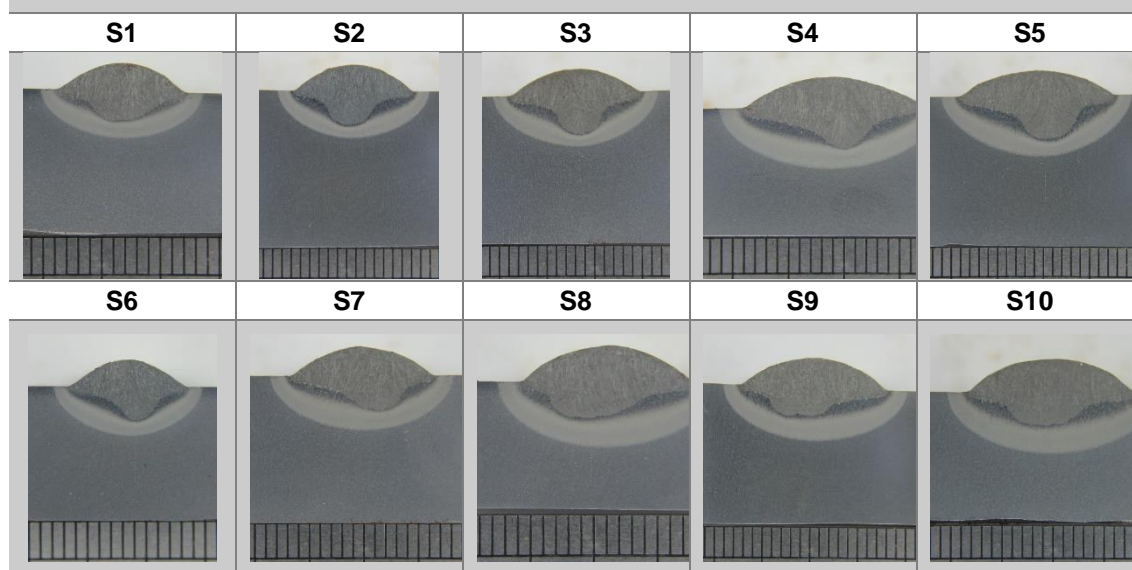
Serão apresentados a seguir os resultados das geometrias das soldagens de simples deposição sobre os respectivos metais de base, conforme as combinações apresentadas no Planejamento experimental da Etapa 2 (página 76).

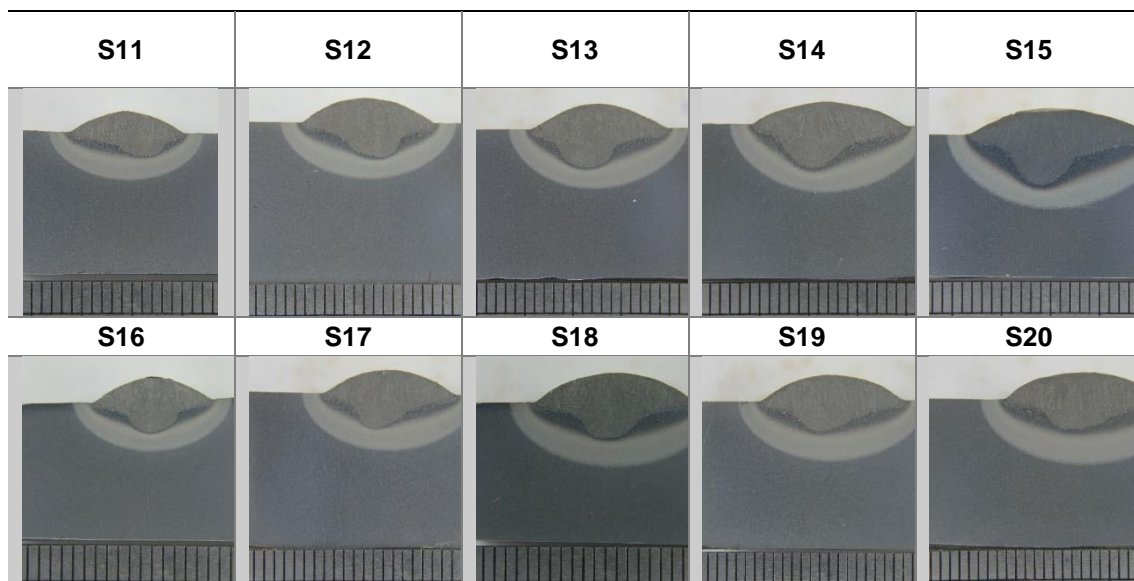
Na Figura 74 estão apresentadas as seções transversais dos cordões de solda para as soldagens similares e na Figura 75 para as soldagens dissimilares.

De um modo geral, as soldas realizadas apresentaram uma geometria uniforme ao longo de toda a extensão do cordão de solda. Destaca-se que o uso do tecimento atingiu o objetivo desejado de amenizar e até eliminar a formação de perfil de penetração do tipo “finger-shape”. O efeito do tecimento da tocha tem sido estudado para diferentes processos de soldagem e diferentes combinações de materiais. Em geral, o tecimento tem um efeito significativo de redução da penetração do tipo taça, redução da diluição, redução de defeitos entre passes e cordões com reforço mais uniformes, conforme encontrados em diversos trabalhos. [57; 58; 59]

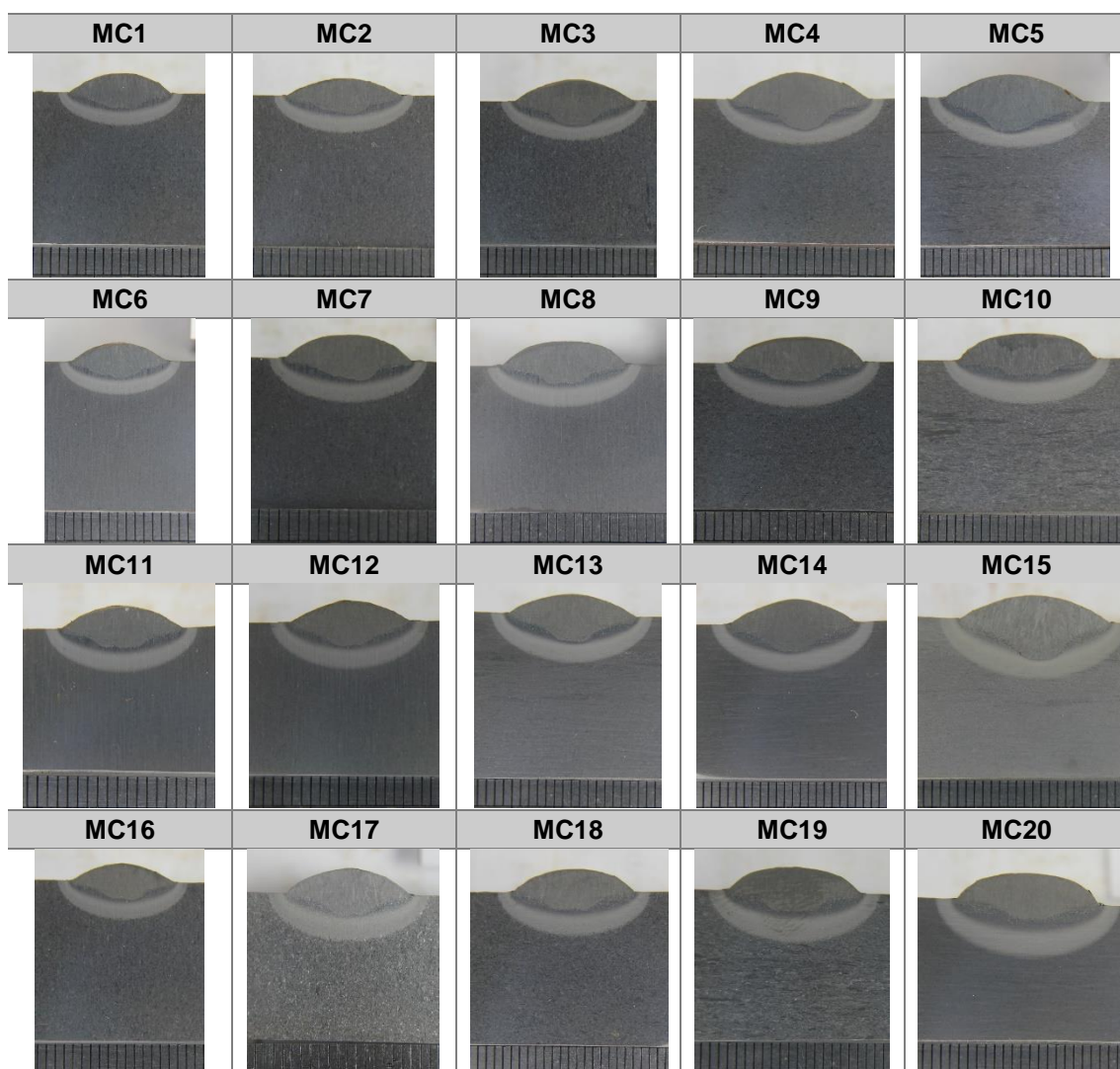
Devido ao movimento de oscilação triangular, durante a mudança no sentido da tocha pode haver a concentração do arco por um instante e provocar leves protuberâncias na geometria da solda, indicado na Figura 75. Posteriormente é detalhado mais sobre este efeito do tecimento e a geometria dos cordões na aplicação da TDC-DC.

Figura 74 - Soldagem similar: macrografias das seções transversais dos cordões de solda.

Aço ASTM A387 Gr11 – Eletrodo AWS ER80S-B2.**Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER90S-B3.**

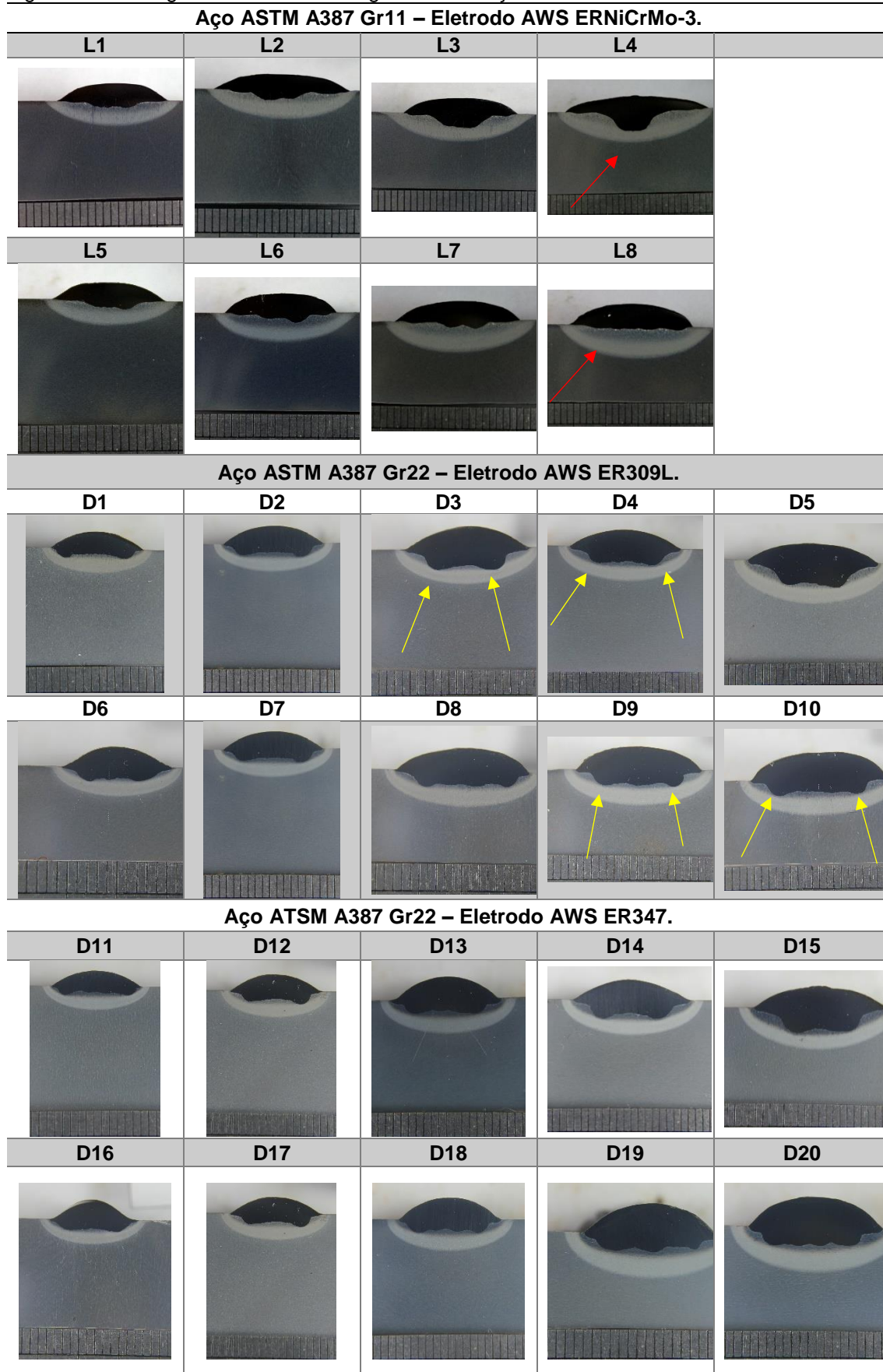


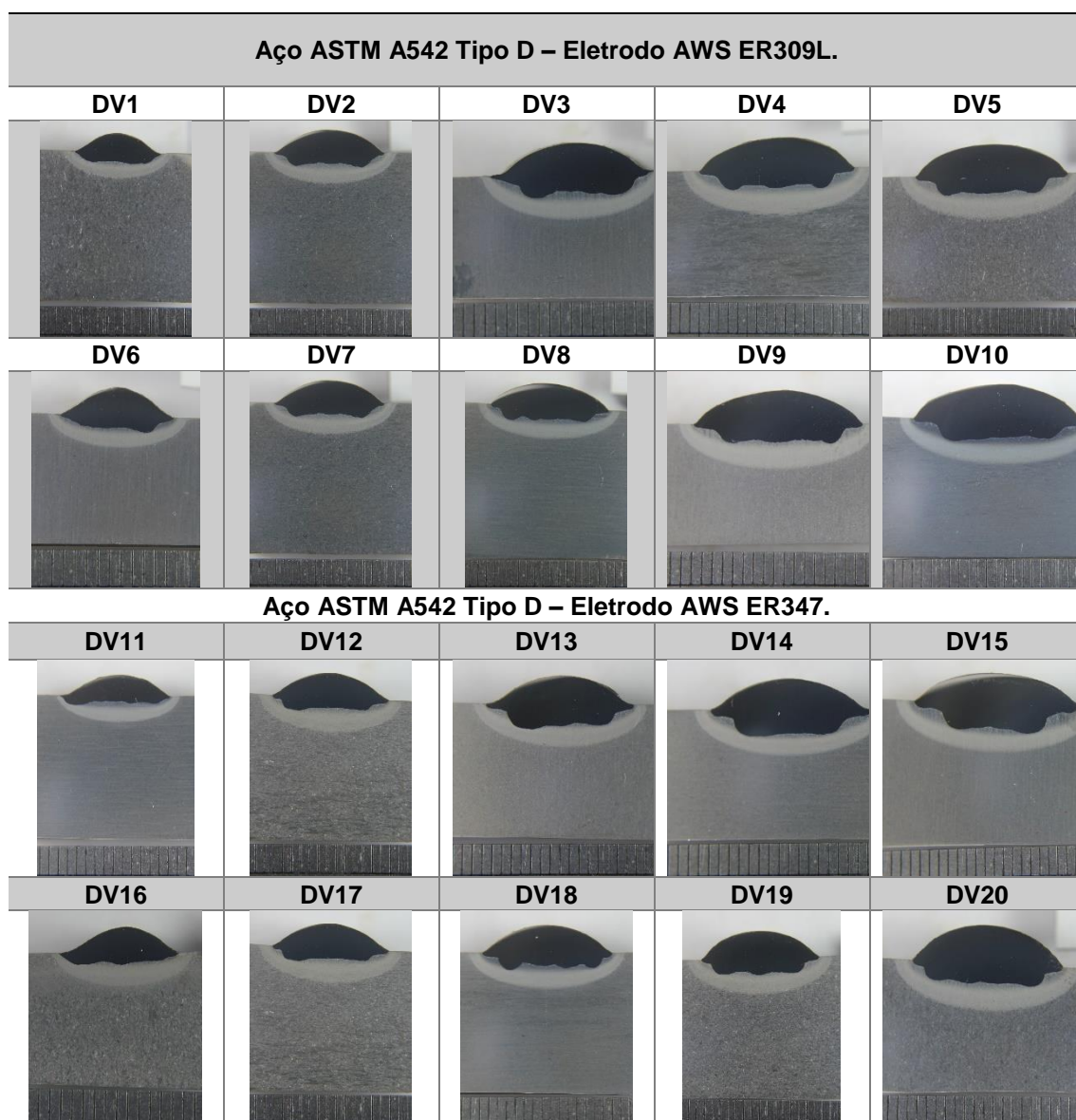
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo Protótipo.



Fonte: Própria do autor.

Figura 75 - Soldagem dissimilar: macrografias das seções transversais dos cordões de solda.





Fonte: Própria do autor.

Os valores de reforço, penetração e largura dos cordões de solda são apresentados na Tabela 32 para as condições soldadas com eletrodo similar e na Tabela 33 para os eletrodos dissimilares.

Tabela 32 - Soldagem similar: medidas de geometria dos cordões.

Aço ASTM A387 Gr11 – Eletrodo AWS ER80S-B2							
Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
C1	2,2±0,06	10,7±0,10	1,8±0,02	C11	2,1±0,03	10,2±0,04	1,5±0,02
C2	2,5±0,01	13,5±0,16	2,8±0,03	C12	2,3±0,03	13,7±0,13	2,3±0,03
C3	2,4±0,04	14,2±0,18	1,9±0,04	C13	2,4±0,01	16,0±0,11	2,9±0,03
C4	2,5±0,08	15,8±0,09	3,3±0,08	C14	2,6±0,01	16,2±0,11	2,8±0,03
C5	2,5±0,01	15,9±0,03	4,3±0,06	C15	2,2±0,03	17,9±0,22	3,1±0,03
C6	2,0±0,04	10,4±0,09	2,2±0,02	C16	2,0±0,03	11,1±0,10	2,4±0,03
C7	2,6±0,04	13,4±0,02	2,3±0,11	C17	2,6±0,05	14,4±0,32	2,4±0,05
C8	2,8±0,06	14,5±0,16	2,0±0,07	C18	2,6±0,06	14,8±0,30	2,0±0,02
C9	3,0±0,07	14,7±0,06	2,5±0,08	C19	3,0±0,11	15,8±0,25	2,6±0,02
C10	3,3±0,06	15,8±0,19	2,3±0,02	C20	3,2±0,03	16,4±0,18	2,5±0,01
Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER90S-B3.							
Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
S1	2,4±0,02	11,3±0,08	2,5±0,03	S11	2,2±0,05	11,7±0,03	2,2±0,08
S2	2,8±0,03	13,1±0,05	3,7±0,02	S12	2,5±0,03	13,5±0,03	3,4±0,04
S3	2,5±0,05	13,9±0,07	4,1±0,10	S13	2,7±0,02	14,5±0,03	3,8±0,05
S4	2,6±0,01	16,7±0,27	3,8±0,02	S14	2,4±0,02	16,3±0,14	4,2±0,12
S5	2,7±0,02	17,4±0,15	4,6±0,06	S15	2,7±0,02	18,6±0,01	5,1±0,10
S6	2,3±0,04	10,7±0,25	2,8±0,04	S16	2,2±0,02	10,9±0,13	2,7±0,04
S7	2,7±0,01	13,7±0,11	3,2±0,02	S17	2,5±0,02	13,6±0,12	3,5±0,05
S8	2,8±0,04	14,7±0,38	2,7±0,03	S18	2,6±0,01	14,4±0,01	3,2±0,04
S9	3,1±0,01	14,5±0,60	3,0±0,07	S19	2,8±0,02	15,7±0,02	3,3±0,01
S10	3,3±0,02	16,6±0,11	3,2±0,07	S20	2,9±0,02	17,2±0,06	3,2±0,04
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo Protótipo.							
Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
MC1	2,3±0,01	11,9±0,17	1,8±0,02	MC11	2,2±0,04	12,0±0,08	2,0±0,07
MC2	2,1±0,05	13,0±0,11	2,0±0,01	MC12	2,3±0,01	13,2±0,21	2,6±0,04
MC3	2,6±0,10	14,7±0,42	3,0±0,04	MC13	2,5±0,02	14,4±0,33	3,0±0,02
MC4	3,1±0,09	15,7±0,41	3,5±0,03	MC14	3,0±0,01	16,0±0,26	3,7±0,01
MC5	3,1±0,03	17,2±0,18	3,8±0,08	MC15	3,1±0,07	18,4±0,38	4,7±0,06
MC6	2,2±0,02	11,4±0,11	1,9±0,02	MC16	2,1±0,04	12,2±0,26	2,0±0,06
MC7	2,6±0,06	12,8±0,09	2,0±0,09	MC17	2,8±0,01	13,6±0,07	2,2±0,14
MC8	2,7±0,02	14,0±0,08	2,0±0,08	MC18	2,8±0,04	15,0±0,14	2,1±0,01
MC9	2,8±0,02	14,5±0,03	2,0±0,07	MC19	2,8±0,03	15,8±0,42	2,3±0,04
MC10	3,0±0,05	16,2±0,14	1,7±0,15	MC20	3,4±0,06	16,3±0,19	1,8±0,02

Fonte: Própria do autor.

Tabela 33 - Soldagem dissimilar: medidas de geometria dos cordões.

Aço ASTM A387 Gr11 – Eletrodo AWS ERNiCrMo-3.							
Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
L1	2,3±0,02	12,0±0,22	1,0±0,01	L5	2,0±0,01	15,3±0,11	0,6±0,03
L2	2,8±0,01	15,3±0,17	1,9±0,04	L6	2,3±0,02	18,2±0,17	1,0±0,01
L3	2,3±0,01	20,0±0,20	3,2±0,01	L7	1,6±0,01	24,0±0,24	2,7±0,02
L4	3,6±0,10	22,3±0,29	2,5±0,05	L8	2,3±0,01	25,2±0,34	2,9±0,02
Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER309L.							
Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
D1	2,2±0,04	12,1±0,19	1,2±0,03	D6	2,1±0,04	11,6±0,11	1,2±0,15
D2	2,5±0,03	14,0±0,08	1,9±0,02	D7	2,5±0,03	14,0±0,08	1,9±0,02
D3	2,9±0,03	16,8±0,09	2,2±0,35	D8	2,8±0,04	15,8±0,07	1,6±0,12
D4	2,7±0,03	17,0±0,03	2,7±0,02	D9	3,2±0,06	16,6±0,02	2,0±0,11
D5	2,9±0,08	20,0±0,21	3,8±0,04	D10	3,7±0,03	19,1±0,06	2,1±0,12
Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER347.							
Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
D11	2,1±0,04	11,8±0,23	1,3±0,08	D16	2,5±0,04	11,3±0,15	1,2±0,13
D12	2,6±0,05	14,2±0,10	2,0±0,01	D17	2,6±0,05	14,2±0,10	2,0±0,01
D13	3,1±0,07	15,0±0,08	1,4±0,28	D18	3,1±0,09	14,1±0,13	1,3±0,31
D14	3,0±0,02	17,1±0,19	2,8±0,09	D19	3,6±0,11	15,8±0,39	2,2±0,09
D15	3,1±0,07	19,6±0,23	3,8±0,08	D20	3,8±0,01	16,6±0,02	2,3±0,04
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo AWS ER309L.							
Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)	Amostra	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
DV1	2,3±0,02	10,1±0,09	1,1±0,13	DV6	2,5±0,06	10,1±0,02	1,0±0,03
DV2	3,0±0,10	14,1±0,19	1,4±0,07	DV7	3,0±0,10	14,1±0,19	1,4±0,07
DV3	2,9±0,01	15,5±0,10	1,7±0,05	DV8	3,0±0,02	14,9±0,09	1,6±0,03
DV4	3,4±0,03	16,6±0,13	2,0±0,04	DV9	3,5±0,05	16,7±0,07	1,6±0,08
DV5	3,7±0,03	18,0±0,04	2,1±0,07	DV10	4,0±0,01	18,5±0,09	1,9±0,02
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo AWS ER347.							
DV11	2,3±0,03	12,1±0,03	0,6±0,04	DV16	2,3±0,03	10,8±0,04	1,0±0,05
DV12	2,8±0,02	13,1±0,05	1,2±0,02	DV17	2,8±0,02	13,1±0,05	1,2±0,02
DV13	3,0±0,04	15,4±0,02	2,3±0,02	DV18	3,2±0,02	14,9±0,01	1,5±0,03
DV14	3,2±0,01	16,3±0,04	2,4±0,02	DV19	3,5±0,01	15,1±0,12	2,1±0,05
DV15	3,4±0,04	18,6±0,13	2,8±0,01	DV20	4,0±0,04	15,8±0,05	2,0±0,01

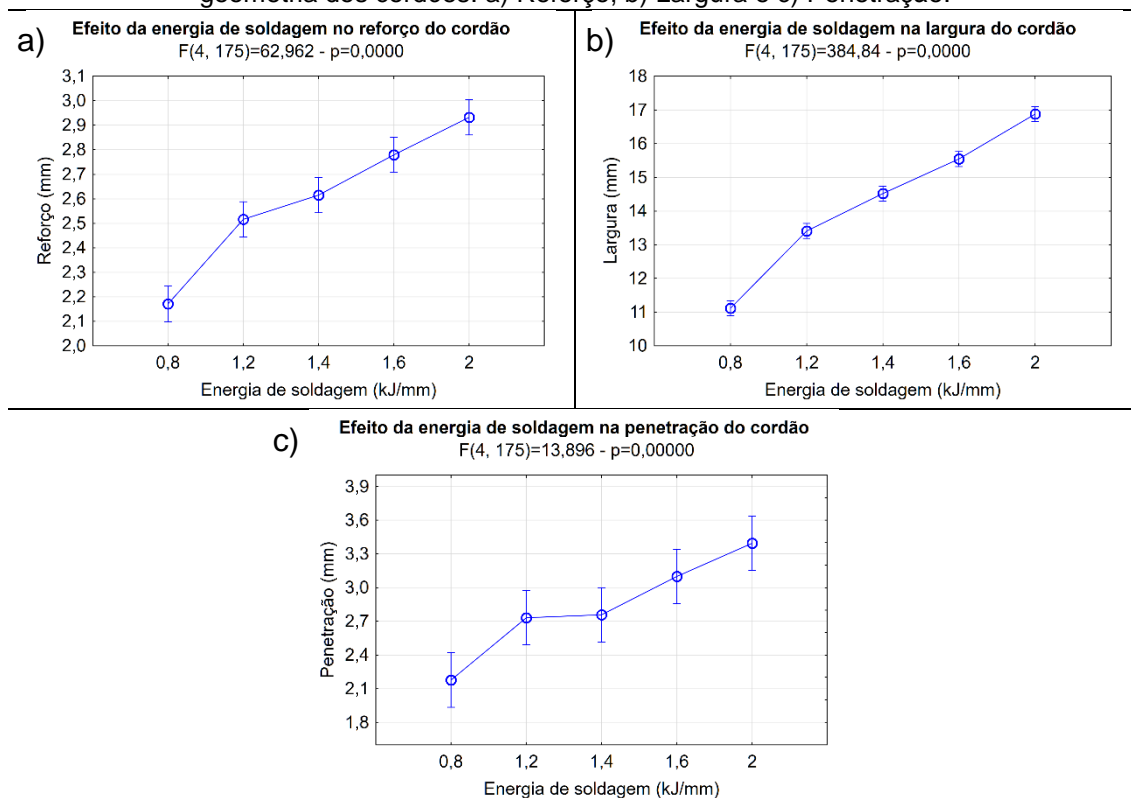
Fonte: Própria do autor.

5.2.2.1. Soldagens com Eletrodos Similares – Etapa 2

A seguir, são discutidos os efeitos dos fatores de controle na geometria dos cordões de solda utilizando os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e Eletrodo Protótipo).

Na Figura 76 é apresentado o efeito da energia de soldagem no reforço, na largura e na penetração dos cordões soldados com os eletrodos similares.

Figura 76 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a energia de soldagem altera de forma relevante e estatisticamente significativa a geometria dos cordões de solda, onde o reforço, a largura e a penetração dos cordões aumentam de acordo com o aumento da energia de soldagem.

O aumento da penetração é justificado pelo aumento da quantidade de calor fornecida à peça por unidade de tempo, que implica em aumento do aporte térmico. Apesar deste comportamento não ocorrer para todo aumento de energia de soldagem. O aumento do reforço e da largura ocorre pelo fato do aumento da quantidade de material adicionado por unidade de área.

Em algumas situações, o aumento da energia na soldagem MIG/MAG (e também para outros processos de soldagem que utilizam eletrodo consumível) provoca a deposição de muito metal de adição. Este aumento exagerado de metal de adição pode acarretar em muito material interposto entre o arco e o metal base, induzindo a uma redução de penetração mesmo com o aumento da energia de soldagem.

Este fenômeno não pode ser esquecido e pode, muitas vezes, viabilizar ou não a aplicação de técnicas de deposição controlada (TDC-DC ou “temper bead”) quando o processo não for adequadamente ajustado.

Algumas alternativas podem ser empregadas para possibilitar melhor ajuste da energia de soldagem com maior independência de seu efeito térmico (maior e menor aporte) em relação ao seu efeito geométrico (maior e menor penetração).

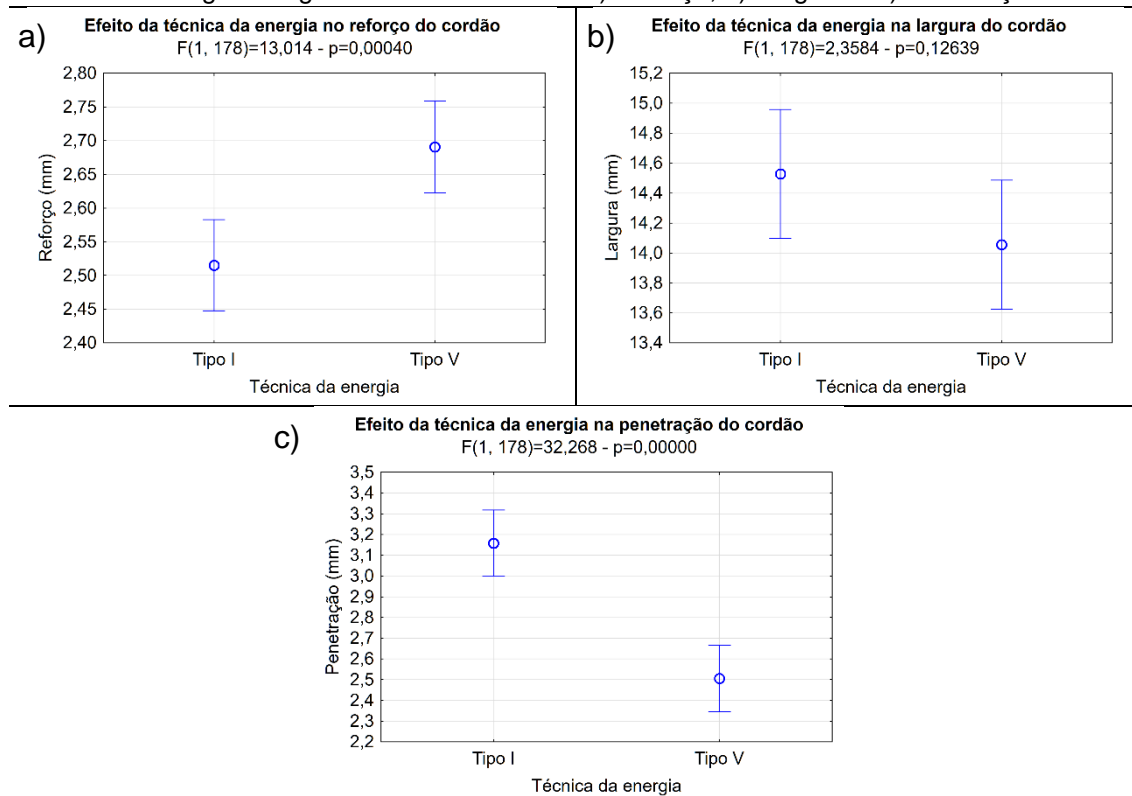
Uma das soluções é a introdução de um arame frio na soldagem MIG/MAG. Uma segunda alternativa é a utilização da soldagem TIG com alimentação de arame frio.

Apesar de ambas as soluções serem viáveis, optou-se neste trabalho pela exploração mais ampla e sistemática da soldagem MIG/MAG com arame simples. As soluções alternativas sugeridas deverão ser exploradas em trabalhos futuros.

Uma terceira alternativa foi adotada neste trabalho: alterar a energia de soldagem pela potência (Corrente de soldagem) ou pela velocidade de soldagem. Os resultados desta técnica serão apresentados e discutidas a seguir.

Na Figura 77 é apresentado o efeito da técnica de alteração da energia de soldagem no reforço, na largura e na penetração dos cordões soldados com os eletrodos similares.

Figura 77 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da técnica de alteração da energia de soldagem na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.



Fonte: Própria do autor.

Conforme relatado no parágrafo anterior, a alteração da energia de soldagem pela corrente de soldagem ou pela velocidade de soldagem tem sido estudada pela maior possibilidade de ajustes do efeito da energia sobre a geometria da solda e, conseqüentemente, aumentar as possibilidades de ajustes para aplicação da Técnica de Deposição Controlada.

O processo MIG/MAG é uma soldagem com alimentação de arame e isso afeta o resultado do efeito da energia de soldagem quando a alteração da energia de soldagem é feita pela potência do arco ou pela velocidade de soldagem. Observa-se na Figura 77a que a técnica de alteração da energia de soldagem proporcionou um aumento no reforço do cordão. Esse comportamento

ocorre devido a influência da velocidade de soldagem sobre a taxa de deposição de material por unidade de comprimento. Para menores velocidades de soldagem, maior é o tempo que o arco voltaico permanece sobre um ponto, proporcionando uma maior deposição de material. Esta maior deposição de material sobre a peça resulta no aumento do reforço do cordão de solda. A largura do cordão não sofreu alteração significativa com utilização da técnica de alteração da energia de soldagem (Figura 77b). Entretanto, a tendência é a diminuição da largura com alteração da energia pela velocidade de soldagem.

Na Figura 77c observa-se que a penetração sofreu alteração significativa com a técnica da energia, sendo que a alteração da energia pela velocidade de soldagem apresentou valores menores, quando comparados à alteração pela corrente de soldagem.

O aumento da energia de soldagem ($E = \eta * \frac{I*V}{v_{sold}}$) provocada apenas pela redução da velocidade de soldagem implica em maior energia por unidade de comprimento (kJ/mm) sem aumento efetivo da potência do arco (principal fonte de energia). Este tipo de ajuste normalmente é associado a menores penetrações (Figura 77c), provavelmente pelo acúmulo de mais material relativamente mais frio interposto entre o arco e o metal base.

Por sua vez, o aumento da energia de soldagem apenas por meio do ajuste da corrente implica no aumento efetivo da potência do arco, de modo que, mesmo com aumento da velocidade de alimentação, não há acúmulo de material relativamente mais frio (pois houve aumento da potência do arco) interposto entre o arco e o metal base. Adicionalmente, deve ser considerado que, com o aumento da corrente, há o aumento das forças eletromagnéticas que influenciam a convecção da poça de fusão, que por sua vez, promove o crescimento da pressão do arco sobre a superfície da poça de fusão, proporcionando um aumento na fusão do metal de base, conforme a Equação 13 da pressão do arco. Este fenômeno contribui para o aumento da penetração conforme pode ser visto na Figura 77c. [60; 61]

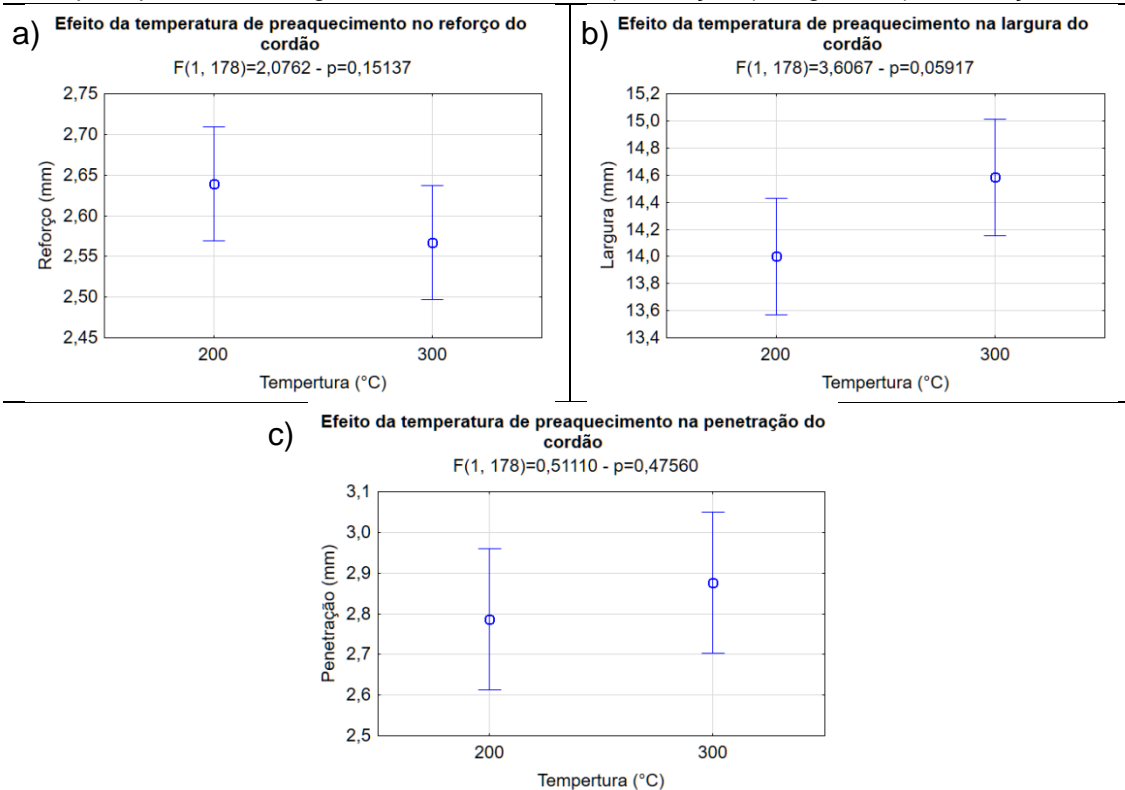
$$P = \frac{\mu_0 * I^2}{4 * \pi^2 * R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

Equação 13

Onde, μ_0 é a permeabilidade magnética, I é a corrente e R é o raio do condutor.

Na Figura 78 é apresentado o efeito da temperatura de preaquecimento no reforço, na largura e na penetração dos cordões soldados com os eletrodos similares.

Figura 78 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da temperatura de preaquecimento na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se pela Figura 78 que não houve alteração significativa da geometria da solda com o aumento da temperatura de preaquecimento, apesar da diferença de 100°C (de 200°C para 300°C) entre as temperaturas de

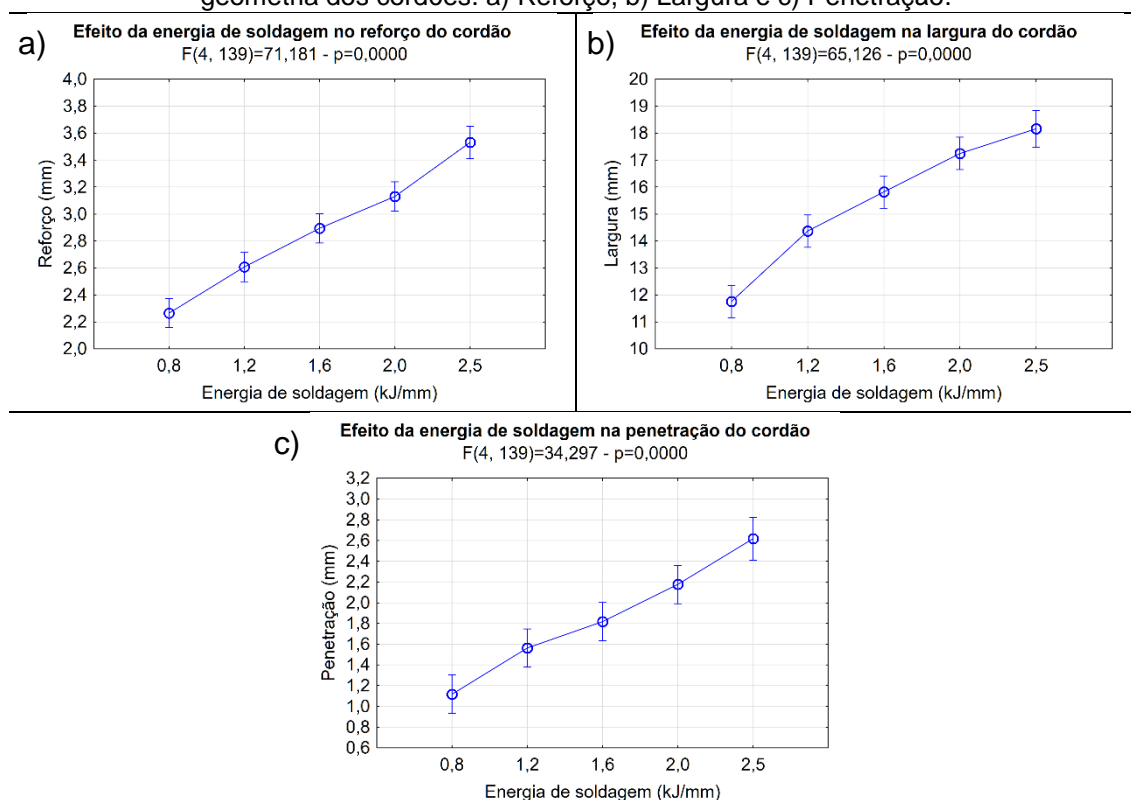
preaquecimentos utilizados. Este fato pode ser associado com as pequenas diferenças nas propriedades do material com o aumento da temperatura.

De qualquer forma, o preaquecimento maior proporciona uma melhor molhabilidade, com tendência de redução do reforço do cordão e de aumento da largura do cordão, decorrente da diminuição da tensão superficial. [60; 62]

5.2.2.2. Soldagens com Eletrodos Dissimilares – Etapa 2

Na Figura 79 é apresentado o efeito da energia de soldagem no reforço, na largura e na penetração dos cordões soldados com os eletrodos dissimilares (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347).

Figura 79 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.

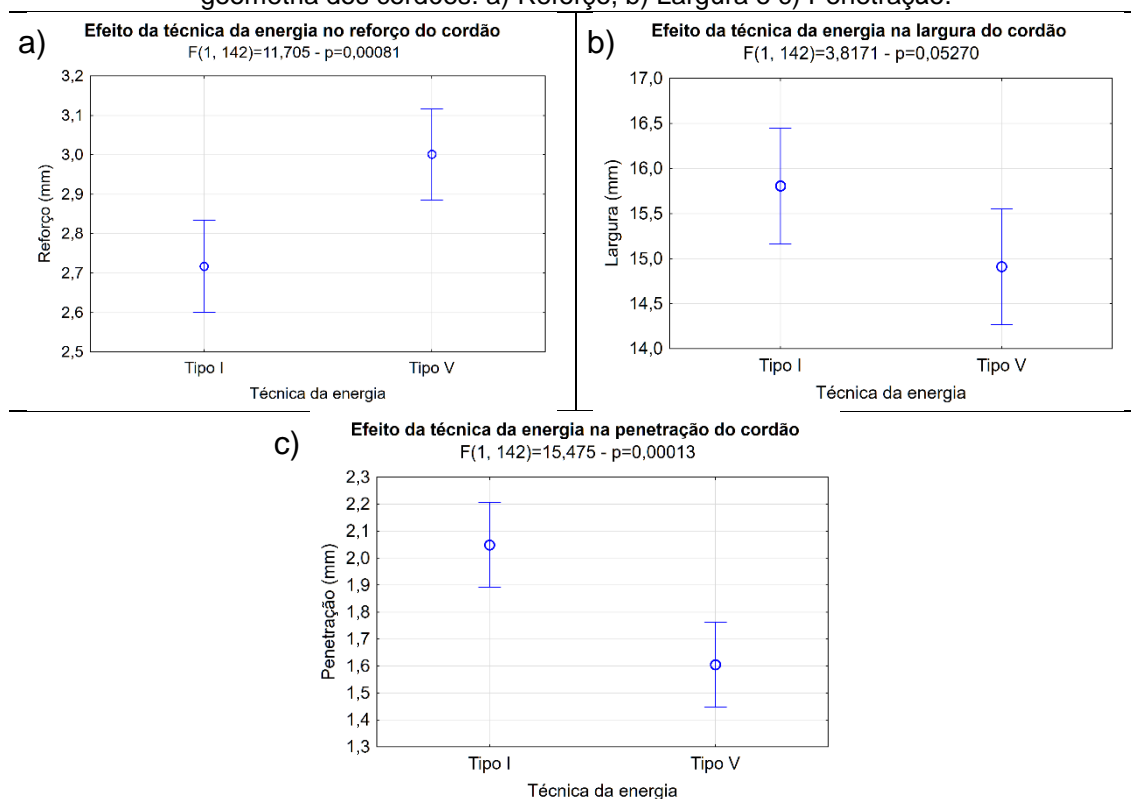


Fonte: Própria do autor.

Observa-se que, assim como a soldagem com eletrodos similares, a energia de soldagem afetou de forma significativa as medidas geométricas dos cordões. A explicação para este fato é semelhante ao apresentado para a soldagem similar e eventuais alterações do comportamento em relação aos eletrodos similares pode ser associada ao efeito da diluição, uma vez que a diferença de composição química da poça de fusão passa atenuar ou intensificar os fenômenos na soldagem dissimilar.

Na Figura 80 é apresentado o efeito da técnica de alteração da energia de soldagem no reforço, na largura e na penetração dos cordões soldados com os eletrodos dissimilares.

Figura 80 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da técnica da energia na geometria dos cordões. a) Reforço, b) Largura e c) Penetração.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se que o efeito da técnica da alteração da energia de soldagem pela corrente de soldagem e pela velocidade de soldagem apresentou o mesmo comportamento da soldagem utilizando-se eletrodos similares, sendo a análise similar para estes comportamentos.

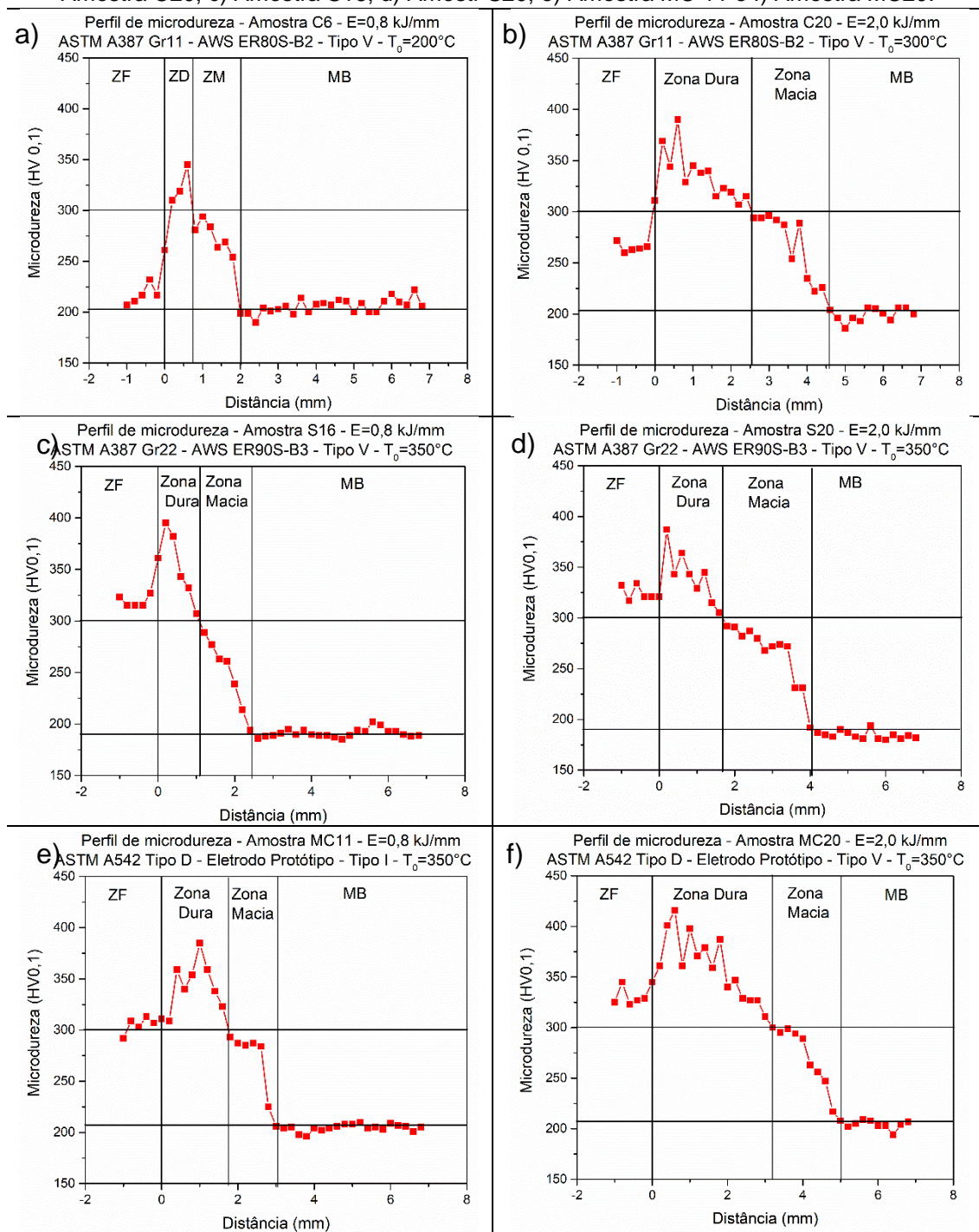
5.2.3. Microdureza – Zona Dura e Zona Macia – Etapa 2

Na Figura 81 estão apresentados exemplos de perfis de microdureza realizados nas amostras soldadas com eletrodo similar. Na Figura 82 são apresentados perfis de microdureza de soldas realizadas com eletrodos dissimilares. Ao total foram realizadas 12960 impressões de microdureza. Este extenso mapeamento é fundamental para uma análise adequada dos efeitos dos parâmetros de soldagem sobre as alterações relevantes do material soldado. Este mapeamento contribuirá para a seleção das condições mais adequadas para aplicação da TDC.

Pela Figura 81, percebe-se que a microdureza da zona fundida das condições apresentadas nas Figura 81c, Figura 81d, Figura 81e e Figura 81f apresentaram valores próximos e até maiores do que o estipulado para a zona dura (300 HV_{0,1}). Este comportamento deverá ser avaliado quando realizada a soldagem da técnica de deposição controlada com dupla camada pois pode induzir a formação de zona fundida com durezas superiores ao especificado pelas normas nacionais e internacionais, e com possibilidades de apresentar prejuízos nas propriedades mecânicas, principalmente tenacidade.

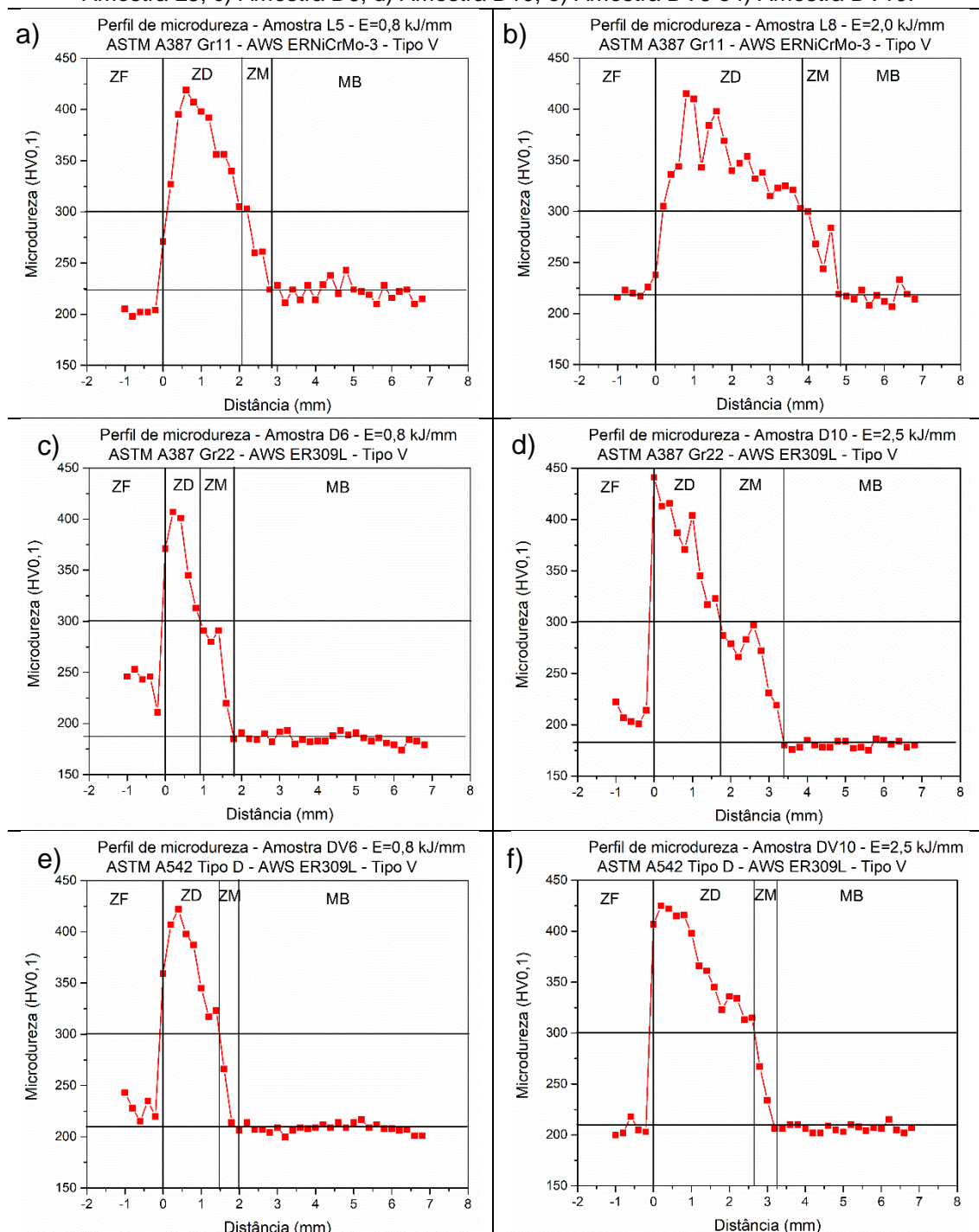
A Tabela 34 apresenta os valores medidos de zona dura e macia para aplicação dos testes da técnica de deposição controlada para os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e o eletrodo protótipo) e na Tabela 35 para os eletrodos dissimilares (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347). Os valores apresentados de zona duras e zonas macias são as médias das três linhas obtidas pelo perfil de microdureza e medidas conforme procedimento adotado na metodologia (Item 4.4.4.Determinação das Extensões de zona dura e zona macia).

Figura 81 - -- Soldagem similar - Exemplos de perfis de microdureza. a) Amostra C6; b) Amostra C20; c) Amostra S16; d) Amostr S20; e) Amostra MC 11 e f) Amostra MC20.



Fonte: Própria do autor.

Figura 82 – Soldagem dissimilar - Exemplos de perfis de microdureza. a) Amostra L5; b) Amostra L8; c) Amostra D6; d) Amostra D10; e) Amostra DV6 e f) Amostra DV10.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se pela Figura 82 que as condições soldadas com eletrodos dissimilares induziam a formação de zona fundida com dureza relativamente baixa para os parâmetros de soldagem adotados.

Tabela 34 - Soldagem similar: Extensões de zona dura e zona macia.

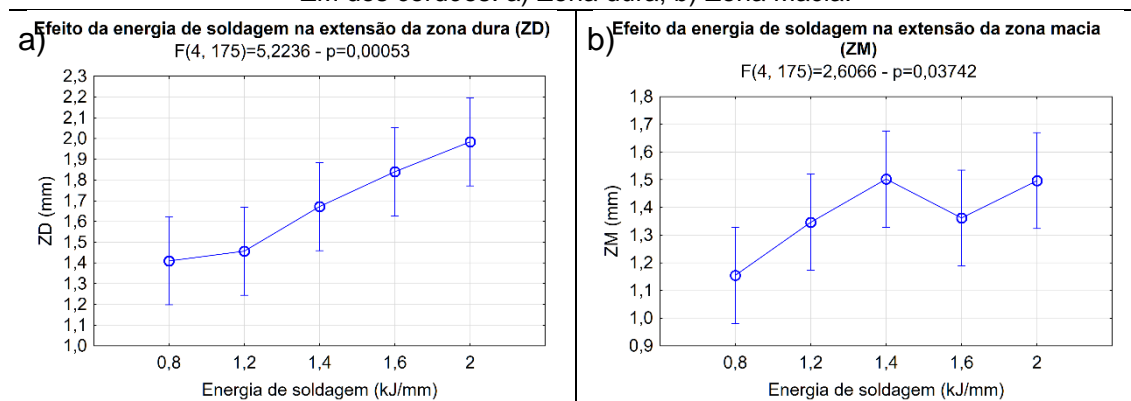
Aço ASTM A387 Gr11 – Eletrodo AWS ER80S-B2					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
C1	1,92±0,15	0,31±0,11	C11	1,87±0,11	1,01±0,12
C2	1,32±0,11	0,74±0,21	C12	1,33±0,39	1,83±0,11
C3	2,58±0,52	0,74±0,12	C13	1,74±0,70	1,52±0,55
C4	1,48±0,38	0,99±0,16	C14	2,19±0,41	1,22±0,29
C5	1,30±0,34	0,86±0,07	C15	2,01±0,67	1,69±0,33
C6	1,03±0,43	0,74±0,45	C16	1,27±0,16	1,04±0,09
C7	1,49±0,43	1,22±0,29	C17	1,21±0,06	1,91±0,20
C8	1,70±0,35	1,51±0,23	C18	1,85±0,13	1,9±0,34
C9	2,29±0,62	0,69±0,36	C19	1,48±0,29	2,24±0,13
C10	2,69±0,20	1,03±0,62	C20	2,02±0,43	2,28±0,23
Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER90S-B3					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
S1	0,80±0,12	1,11±0,22	S11	1,04±0,40	1,73±0,09
S2	0,72±0,10	1,27±0,39	S12	1,01±0,21	1,69±0,09
S3	1,08±0,09	0,82±0,24	S13	0,97±0,06	1,95±0,34
S4	0,91±0,26	1,50±0,22	S14	1,32±0,44	1,88±0,17
S5	0,99±0,10	1,45±0,37	S15	1,17±0,14	1,91±0,27
S6	1,15±0,50	1,31±0,49	S16	0,79±0,24	1,67±0,41
S7	1,13±0,57	1,36±0,18	S17	0,87±0,46	1,8±0,42
S8	1,35±0,33	2,00±0,70	S18	1,27±0,31	2,3±0,10
S9	1,66±0,40	1,44±0,49	S19	1,70±0,31	2,06±0,38
S10	1,71±0,36	1,47±0,31	S20	1,99±0,64	2,27±0,23
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo Protótipo					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
MC1	1,75±0,17	1,29±0,58	MC11	1,66±0,14	1,41±0,24
MC2	2,25±0,35	0,89±0,40	MC12	1,62±0,18	1,40±0,20
MC3	1,05±0,30	1,60±0,39	MC13	2,07±0,35	1,07±0,27
MC4	1,47±0,47	1,06±0,53	MC14	1,68±0,40	1,39±0,09
MC5	1,90±0,23	0,78±0,63	MC15	1,38±0,28	1,77±0,16
MC6	1,78±0,22	0,79±0,12	MC16	1,85±0,25	1,44±0,34
MC7	2,38±0,19	0,74±0,17	MC17	2,14±0,08	1,3±0,05
MC8	2,31±0,11	0,94±0,38	MC18	2,10±0,28	1,68±0,13
MC9	2,75±0,09	0,81±0,26	MC19	3,14±0,24	1,06±0,37
MC10	3,12±0,16	1,05±0,13	MC20	3,52±0,31	1,39±0,58

Tabela 35 - Soldagem dissimilar: Extensões de zona dura e zona macia.

Aço ASTM A387 Gr11 – Eletrodo AWS ERNiCrMo-3					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
L1	1,41±0,08	1,62±0,14	L5	1,43±0,24	1,42±0,22
L2	1,20±0,16	1,84±0,48	L6	1,40±0,05	2,43±0,34
L3	0,75±0,26	1,44±0,26	L7	0,82±0,16	1,67±0,13
L4	0,72±0,29	1,27±0,38	L8	0,40±0,45	1,83±0,14
Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER309L					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
D1	2,42±0,09	0,32±0,20	D6	0,93±0,36	0,83±0,05
D2	2,65±0,05	0,43±0,11	D7	2,65±0,05	0,43±0,011
D3	1,15±0,36	1,22±0,11	D8	1,40±0,16	1,19±0,16
D4	2,78±0,40	0,52±0,14	D9	1,42±0,17	1,58±0,13
D5	2,63±0,41	0,87±0,31	D10	2,12±0,41	1,38±0,27
Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER347					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
D11	2,17±0,30	0,39±0,10	D16	1,16±0,36	0,87±0,16
D12	2,61±0,12	0,47±0,12	D17	2,61±0,12	0,47±0,12
D13	1,83±0,29	1,51±0,43	D18	1,83±0,19	1,34±0,07
D14	3,13±0,21	0,47±0,02	D19	2,07±0,19	1,43±0,35
D15	2,82±0,23	0,41±0,12	D20	2,47±0,29	1,41±0,19
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo AWS ER309L					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
DV1	1,59±0,18	0,48±0,06	DV6	1,35±0,37	0,68±0,46
DV2	2,06±0,37	0,82±0,37	DV7	2,06±0,37	0,82±0,37
DV3	2,19±0,15	0,48±0,16	DV8	2,02±0,44	0,72±0,26
DV4	2,48±0,29	1,06±0,10	DV9	2,46±0,28	0,9±0,15
DV5	2,63±0,29	1,17±0,26	DV10	2,57±0,31	0,82±0,33
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo AWS ER347					
Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)	Amostra	ZD (mm)	ZM (mm)
DV11	2,01±0,06	0,31±0,06	DV16	1,78±0,16	0,87±0,17
DV12	2,06±0,46	1,67±0,37	DV17	2,06±0,46	1,67±0,37
DV13	1,92±0,49	0,66±0,26	DV18	1,56±0,70	1,24±0,34
DV14	1,75±0,17	0,70±0,26	DV19	2,35±0,31	0,67±0,14
DV15	2,05±0,36	1,16±0,28	DV20	2,46±0,42	0,93±0,09

Na Figura 83 é apresentado o efeito da energia de soldagem na extensão da zona dura e zona macia dos cordões soldados com os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e o eletrodo protótipo).

Figura 83 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.



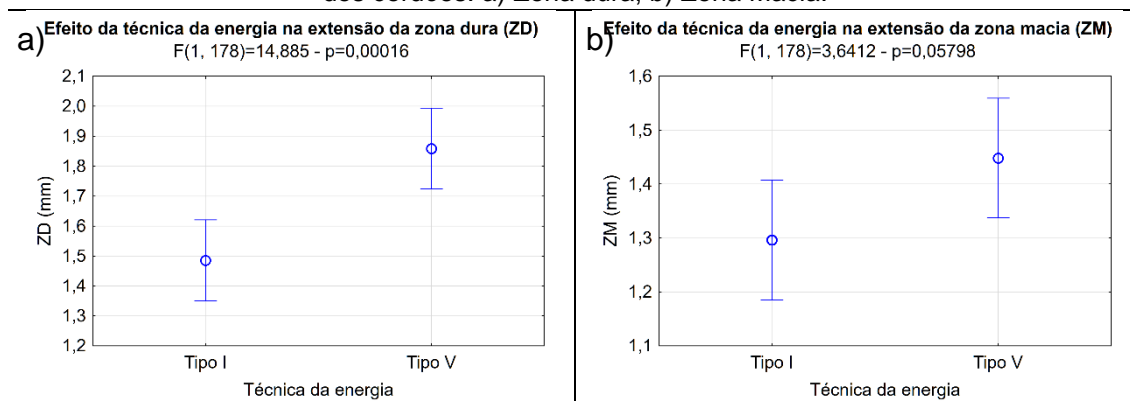
Fonte: Própria do autor.

A análise da energia de soldagem da Figura 83 mostrou que quanto maior for a energia de soldagem, maior será a extensão da zona afetada pelo calor e, conseqüentemente, maior será a zona dura e a zona macia.

Tal fato ocorre devido ao aumento da extensão da zona afetada pelo calor decorrente do aumento do aporte térmico sem aumento proporcional de eficiência de fusão.

Na Figura 84 é apresentado o efeito da técnica de alteração da energia de soldagem na extensão da zona dura e zona macia dos cordões soldados com os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e o Eletrodo Protótipo).

Figura 84 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da técnica de energia na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.



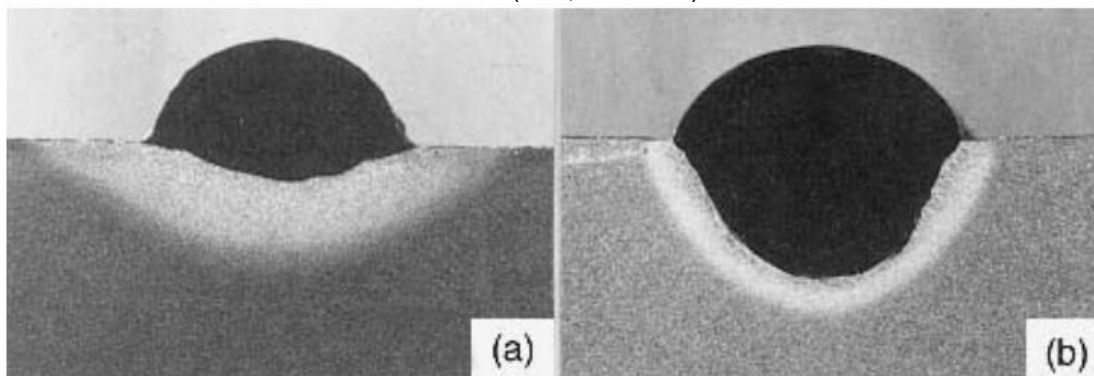
Fonte: Própria do autor.

Observa-se (Figura 84) que a técnica da alteração da energia de soldagem afetou de forma significativa a extensão da zona dura, de forma que, a técnica tipo V proporcionou uma extensão de zona dura maior e, apesar da zona macia não apresentar efeito significante, a tendência foi a mesma, ou seja, apresentou extensão de zona macia maior para a técnica tipo V.

A principal explicação para este efeito consiste do fundamento da eficiência de fusão. Basicamente, quanto maior for a eficiência de fusão menor será a ZAC, pois a energia do arco passa a ser melhor aproveitada na fusão em relação às “perdas” relativas para as demais regiões de peça soldada (ZAC e MB).

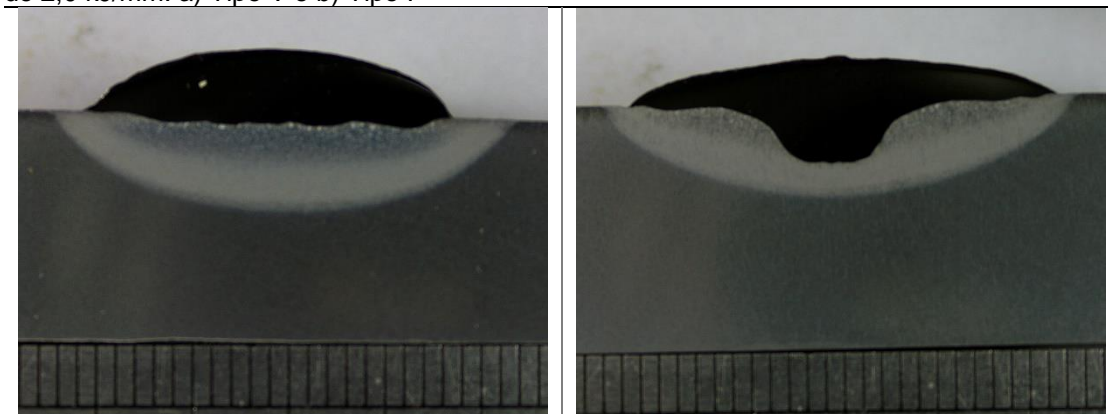
Este fenômeno é comprovado por Sind Kou. A Figura 85a e Figura 85b mostrou a seção transversal de duas soldas de aço que diferem na eficiência de fusão. A amostra da Figura 85a foi soldada com potência de ($P=UI = 3825 \text{ W}$) e velocidade de soldagem ($V_{\text{sold}} = 10 \text{ mm/s}$) resultando na energia de soldagem de ($E_{\text{sold}}=0,383 \text{ kJ/mm}$). A amostra da Figura 85b foi soldada com potência maior ($P=UI= 10170 \text{ W}$) e velocidade de soldagem ($V = 26\text{mm/s}$) resultando na energia de soldagem de ($E_{\text{sold}}=0,391 \text{ kJ/mm}$). Observe que a energia de soldagem é equivalente em cada caso. Resultado semelhante é apresentado na Figura 86. [26]

Figura 85 – Eficiência de fusão. a) Baixa eficiência de fusão ($E=0,38$ kJ/mm) e b) Alta eficiência de fusão ($E=0,39$ kJ/mm).



Fonte: [26]

Figura 86 - Eficiência de fusão - Soldagem Dissimilar - ASTM A387 Gr 11 - Energia de soldagem de 2,0 kJ/mm. a) Tipo V e b) Tipo I



Fonte: Própria do autor.

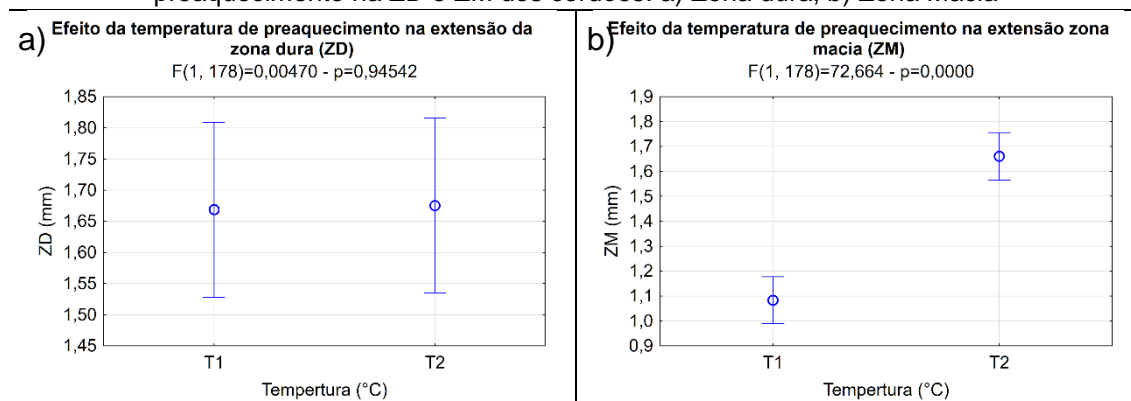
Desta forma, como já discutido anteriormente, o aumento da energia de soldagem pelo aumento da corrente induz ao melhor aproveitamento da energia do arco para fusão pelo aumento da convecção da poça de fusão. Neste sentido, o melhor aproveitamento da energia do arco para fundir acarreta em menor energia perdida no aquecimento das demais zonas (ZAC e MB).

Os resultados da Figura 84 comprovam que a alteração da energia de soldagem pela corrente de soldagem acarreta em menores extensões da ZAC (ZD e ZM), devido a maior eficiência de fusão do MB (comprovada e discutida nos resultados apresentados na Figura 77c).

Na Figura 87 é apresentado o efeito da temperatura de preaquecimento nas extensões da zona dura e zona macia dos cordões

soldados com os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e o Eletrodo Protótipo).

Figura 87 - Soldagem Similar - Análise de variância do efeito da temperatura de preaquecimento na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia



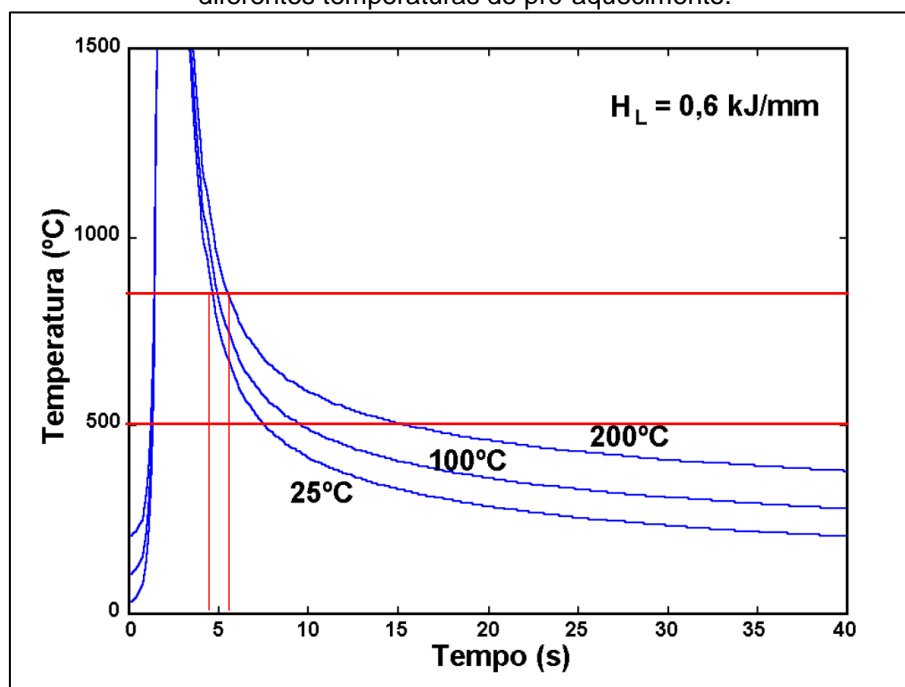
Fonte: Própria do autor.

Pelos resultados apresentados na Figura 87, percebe-se que a temperatura de preaquecimento não afetou a extensão da zona dura. Por sua vez, houve um aumento da extensão de zona macia.

O preaquecimento pode provocar o aumento da extensão da ZAC (ZD+ZM). Contudo, deve-se esclarecer o porquê deste aumento de extensão da ZAC ser associado apenas ao aumento da zona macia. [62]

Acredita-se que este comportamento seja explicado pelo efeito da temperatura de preaquecimento sobre o ciclo térmico da soldagem. Como pode ser visto na Figura 88, o aumento da temperatura de preaquecimento tem menor efeito no ciclo térmico quando se considera maiores temperaturas. Por sua vez, constata-se que para menores temperaturas, a alteração da velocidade de resfriamento é mais intensa.

Figura 88 - Ciclo térmico no centro do cordão para a soldagem de chapa grossa com diferentes temperaturas de pré-aquecimento.

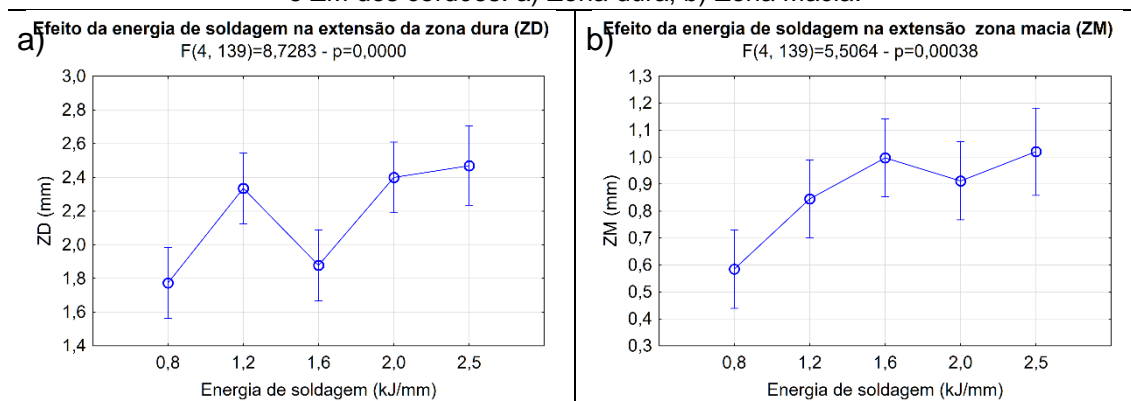


Fonte: Modenesi [2003].

Como observado, para faixas de temperaturas mais altas (associadas a zona dura próxima a zona fundida) a diferença na velocidade de resfriamento (e/ou tempo) é pequena quando comparada com faixas de temperaturas menores (associadas a zona macia que é mais afastada da zona fundida).

Na Figura 89 é apresentado o efeito da energia de soldagem na extensão da zona dura e zona macia dos cordões soldados com os eletrodos dissimilares (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347).

Figura 89 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.

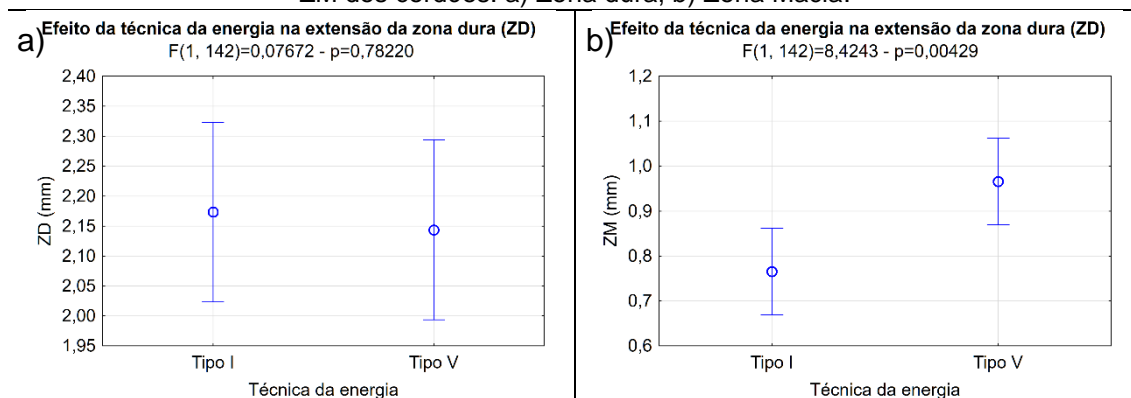


Fonte: Própria do autor.

A análise da energia de soldagem da Figura 89 mostrou que quanto maior for a energia de soldagem maior será a extensão da zona afetada pelo calor, conseqüentemente, maior zona dura e zona macia, semelhante ao que ocorreu para os eletrodos similares.

Na Figura 90 é apresentado o efeito da técnica de alteração da energia de soldagem na extensão da zona dura e zona macia dos cordões soldados com os eletrodos dissimilares (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347).

Figura 90 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da técnica de energia na ZD e ZM dos cordões. a) Zona dura, b) Zona Macia.



Fonte: Própria do autor.

Analisando a Figura 90, observa-se que a técnica da alteração da energia de soldagem não afetou de forma significativa a extensão da zona dura, entretanto, foi relevante para a zona macia, onde a técnica tipo V proporcionou uma extensão de zona macia maior, comportamento semelhante para os eletrodos similares e suas respectivas explicações.

5.2.4. Microestrutura – ZACGG e ZACGF – Etapa 2

A seguir são apresentados resultados referentes as extensões das ZACs atribuídas aos critérios de microestrutura.

A Tabela 36 e a Tabela 37 apresentam os valores das extensões de ZAC's grãos grossos (ZAC-GG) e grãos finos (ZAC-GF), que serão utilizados para aplicação dos testes da técnica de deposição controlada, para as soldagens utilizando os eletrodos similares e dissimilares, respectivamente.

Tabela 36 - Soldagem similar: medidas de ZACGG e ZACGF.

Aço ASTM A387 Gr11 – Eletrodo AWS ER80S-B2					
Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
C1	0,52±0,01	1,16±0,01	C11	0,89±0,01	1,53±0,02
C2	0,41±0,01	1,16±0,01	C12	0,59±0,02	1,87±0,05
C3	0,72±0,04	1,6±0,01	C13	0,54±0,02	1,91±0,04
C4	0,35±0,02	1,19±0,01	C14	0,59±0,01	1,78±0,01
C5	0,21±0,03	0,93±0,03	C15	0,56±0,01	2,04±0,03
C6	0,28±0,01	0,81±0,01	C16	0,61±0,01	1,43±0,01
C7	0,42±0,01	1,42±0,01	C17	0,97±0,03	1,72±0,04
C8	0,70±0,01	1,72±0,01	C18	1,42±0,01	1,99±0,01
C9	0,62±0,01	1,53±0,02	C19	0,94±0,02	2,07±0,01
C10	1,02±0,01	1,78±0,01	C20	1,33±0,02	2,26±0,03
Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER90S-B3					
Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
S1	0,25±0,01	1,07±0,01	S11	0,52±0,14	1,61±0,09
S2	0,34±0,03	0,91±0,04	S12	0,44±0,04	1,42±0,03
S3	0,41±0,03	0,84±0,03	S13	0,39±0,02	1,58±0,09
S4	0,23±0,03	1,24±0,06	S14	0,55±0,02	1,65±0,04
S5	0,41±0,06	1,24±0,02	S15	0,49±0,04	1,5±0,08
S6	0,28±0,02	0,84±0,05	S16	0,54±0,01	1,66±0,02
S7	0,36±0,02	1,39±0,01	S17	0,36±0,09	1,49±0,03
S8	0,38±0,01	1,62±0,04	S18	0,42±0,01	1,96±0,04
S9	0,51±0,03	1,84±0,01	S19	0,51±0,06	2,39±0,04
S10	0,46±0,05	1,96±0,04	S20	0,79±0,07	2,4±0,16

Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo Protótipo

Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
MC1	0,38±0,01	1,21±0,20	MC11	0,58±0,02	1,51±0,23
MC2	0,55±0,03	1,62±0,12	MC12	0,61±0,02	1,38±0,32
MC3	0,36±0,03	1,18±0,05	MC13	0,42±0,05	1,65±0,23
MC4	0,21±0,01	0,83±0,01	MC14	0,4±0,01	1,62±0,19
MC5	0,34±0,04	1,15±0,12	MC15	0,58±0,04	1,57±0,13
MC6	0,31±0,12	1,23±0,03	MC16	0,53±0,02	1,33±0,21
MC7	0,46±0,01	1,43±0,12	MC17	0,47±0,11	1,75±0,03
MC8	0,46±0,03	1,81±0,02	MC18	0,76±0,04	1,86±0,15
MC9	0,74±0,08	1,93±0,04	MC19	0,62±0,02	2,3±0,16
MC10	0,84±0,23	2,33±0,23	MC20	1,05±0,04	2,67±0,05

Fonte: Própria do autor.

Tabela 37 - Soldagem dissimilar: medidas de ZACGG, ZACGF e ZACIC.

Aço ASTM A387 Gr11 – Eletrodo AWS ERNiCrMo-3

Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
L1	0,55±0,01	1,41±0,01	L5	0,76±0,01	1,38±0,01
L2	0,39±0,02	1,15±0,10	L6	0,63±0,02	1,69±0,03
L3	0,24±0,02	0,74±0,08	L7	0,36±0,03	1,64±0,03
L4	0,27±0,01	0,65±0,06	L8	0,28±0,03	1,44±0,03

Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER309L

Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
D1	0,48±0,03	1,76±0,04	D6	0,23±0,01	1,07±0,01
D2	0,55±0,01	1,77±0,01	D7	0,55±0,01	1,77±0,01
D3	0,40±0,01	1,54±0,01	D8	0,41±0,01	1,71±0,01
D4	0,65±0,06	2,06±0,06	D9	0,43±0,01	1,86±0,01
D5	0,73±0,01	2,00±0,01	D10	0,68±0,01	2,12±0,03

Aço ASTM A387 Gr22 – Eletrodo AWS ER347

Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
D11	0,35±0,01	1,56±0,02	D16	0,40±0,01	1,22±0,01
D12	0,45±0,01	1,45±0,01	D17	0,45±0,01	1,45±0,01
D13	0,74±0,01	1,98±0,01	D18	1,20±0,01	1,35±0,02
D14	0,80±0,03	1,87±0,01	D19	0,40±0,02	2,41±0,02
D15	0,69±0,01	1,98±0,01	D20	0,48±0,02	2,32±0,01

Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo AWS ER309L

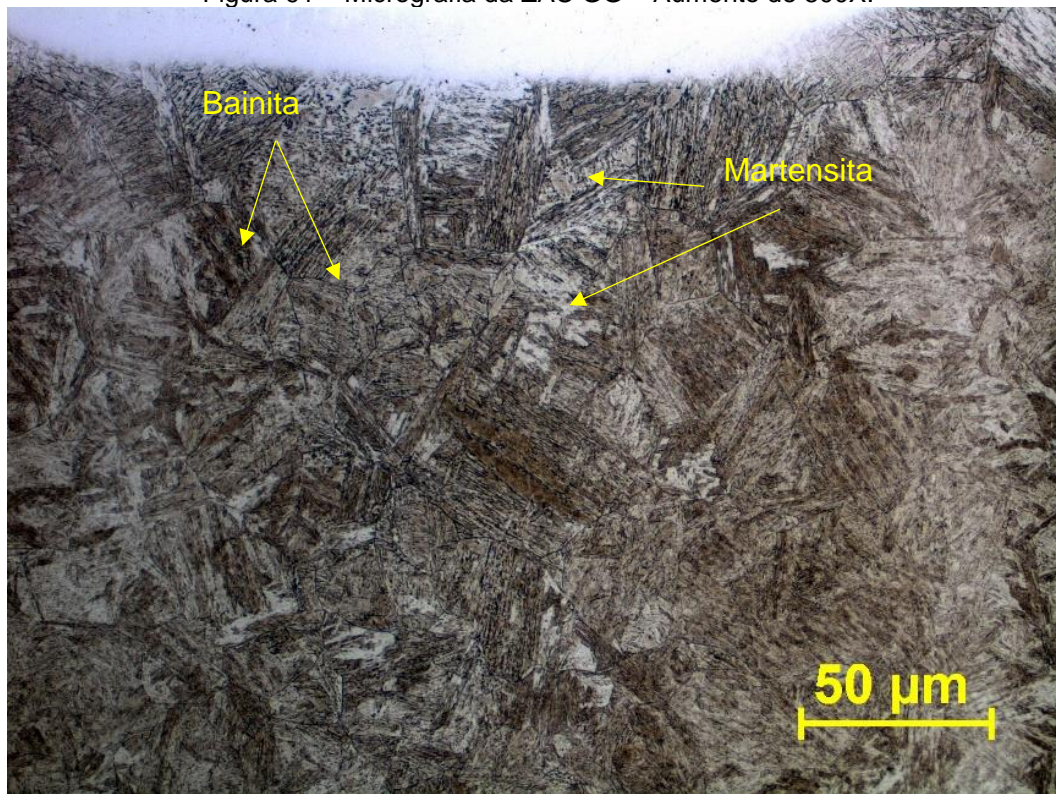
Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
DV1	0,49±0,03	1,26±0,04	DV6	0,42±0,07	0,9±0,01

DV2	0,63±0,04	1,73±0,06	DV7	0,63±0,04	1,73±0,06
DV3	0,79±0,05	1,48±0,02	DV8	0,43±0,09	1,62±0,07
DV4	0,74±0,01	2,00±0,03	DV9	0,48±0,09	1,67±0,08
DV5	0,62±0,01	2,10±0,08	DV10	0,60±0,02	1,94±0,01
Aço ASTM A542 Tipo D – Eletrodo AWS ER347					
Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)	Amostra	ZAC-GG (mm)	ZAC-GF (mm)
DV11	0,63±0,01	1,36±0,02	DV16	0,44±0,03	1,35±0,15
DV12	0,42±0,20	1,37±0,01	DV17	0,42±0,20	1,37±0,01
DV13	0,41±0,06	1,04±0,30	DV18	0,47±0,02	1,8±0,06
DV14	0,48±0,01	1,44±0,01	DV19	0,41±0,12	1,64±0,21
DV15	0,83±0,01	1,51±0,10	DV20	0,63±0,07	1,36±0,13

Fonte: Própria do autor.

A Figura 91 apresenta uma micrografia da ZAC-GG. De um modo geral, esta região é caracterizada por uma estrutura grosseira, composta por bainita e martensita. Sendo essas microestruturas obtidas em condições de velocidade de resfriamento mais elevadas, conforme diagrama de resfriamento da Figura 1, esta região tende a ser mais problemática nos aços, devido apresentar baixa tenacidade e ser região susceptível a trincas.

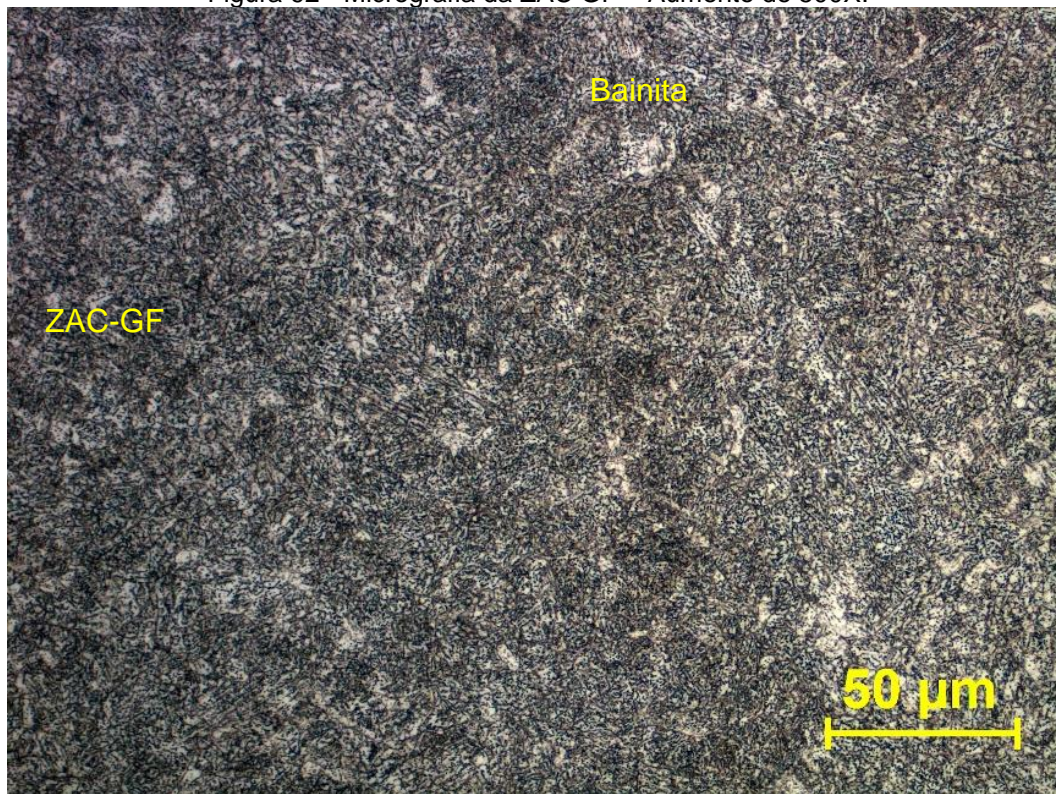
Figura 91 – Micrografia da ZAC GG – Aumento de 500X.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 92 apresenta uma microestrutura predominantemente de bainita granular da ZAC GF. É conhecido que a obtenção de boa resistência de solda é dada pelo controle do tamanho de grão. Assim apesar de algumas condições apresentarem dureza acima do máximo exigido, acredita-se que, com o refinamento da microestrutura, é possível alcançar boas propriedades mecânicas, dentre as quais a tenacidade.

Figura 92 - Micrografia da ZAC GF – Aumento de 500X.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 93 e na Figura 94 estão apresentados exemplos de montagens da ZAC para amostras soldadas dos aços ASTM A387 Gr11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D para as soldagens similares e dissimilares, respectivamente.

Figura 93 - Soldagem Similar - Montagem da ZAC. a) Amostra C1, b) Amostra S1 e c) Amostra MC1.

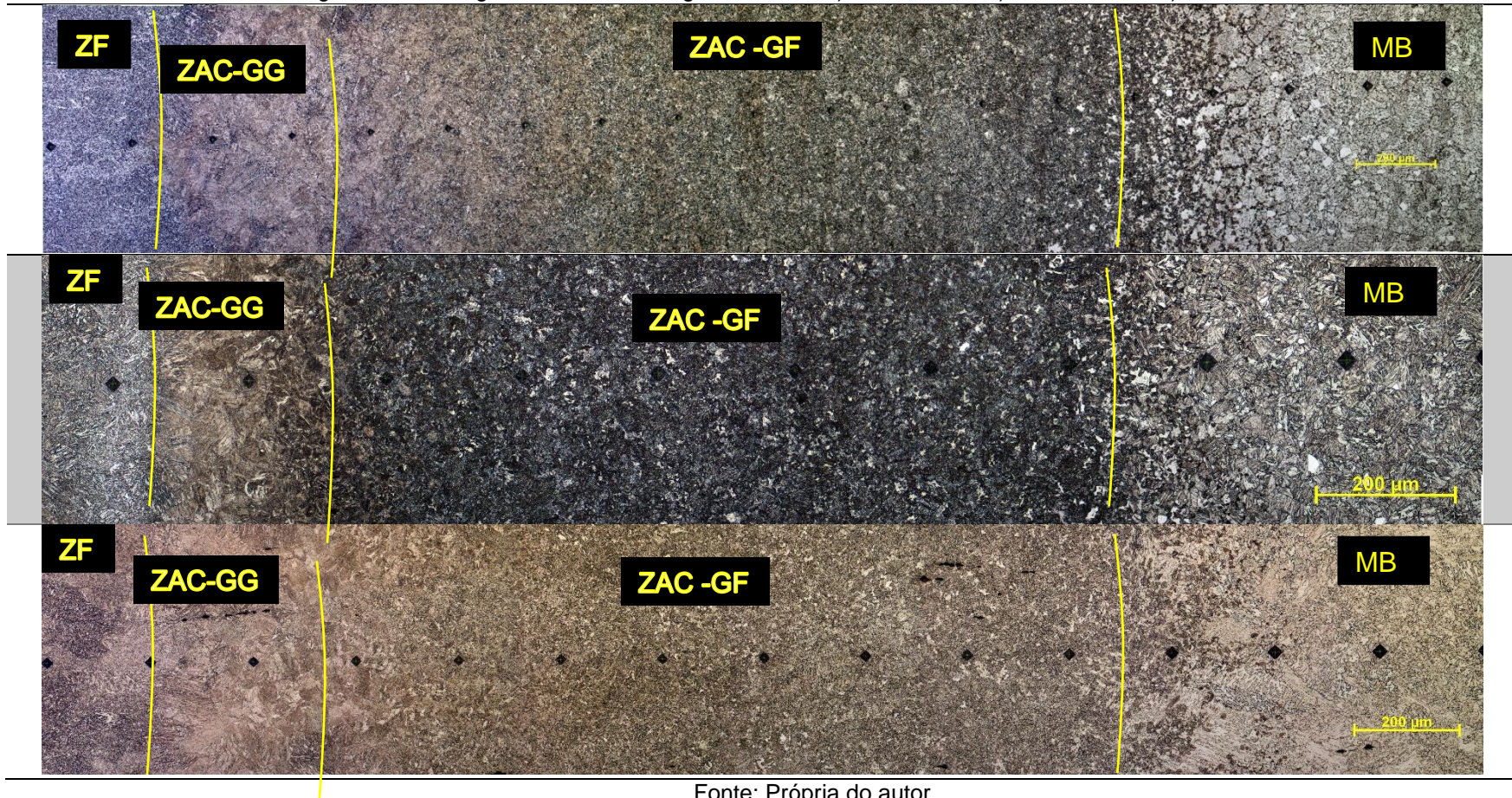
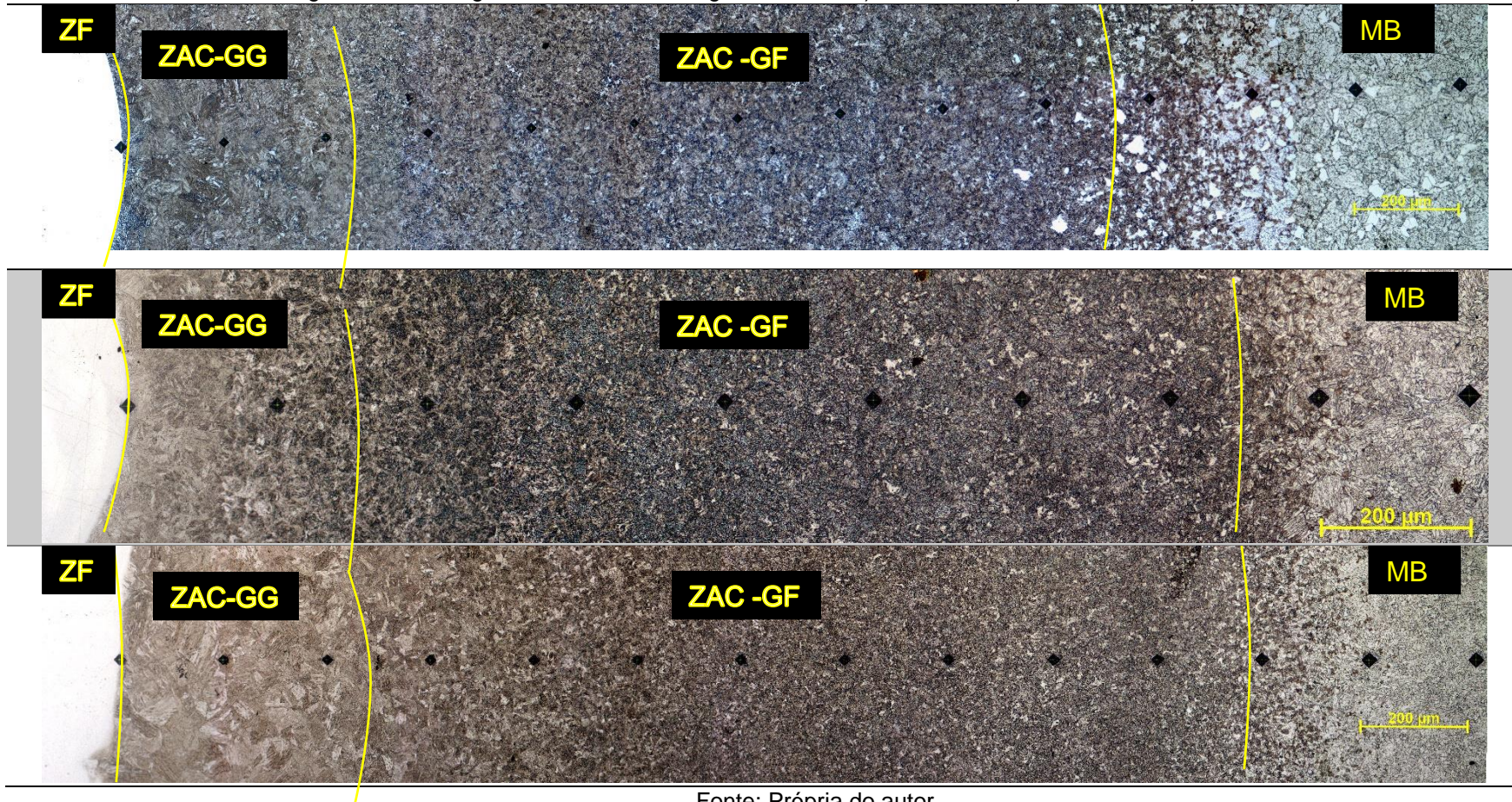


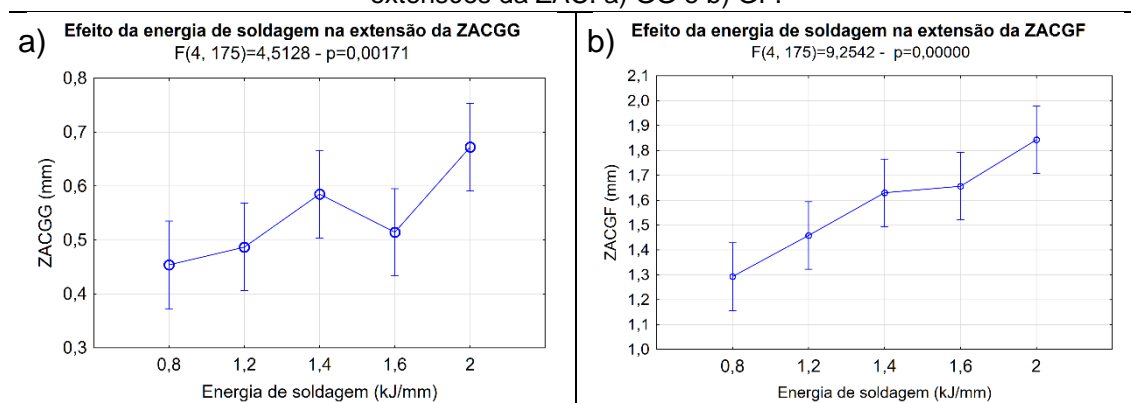
Figura 94 – Soldagem Dissimilar - Montagem da ZAC. a) Amostra L1 b) Amostra D1 e c) Amostra DV1.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 95 é apresentado o gráfico do efeito da energia de soldagem na extensão da ZACGG e ZACGF dos cordões soldados com os eletrodos similares.

Figura 95 - Soldagem similar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF.



Fonte: Própria do autor.

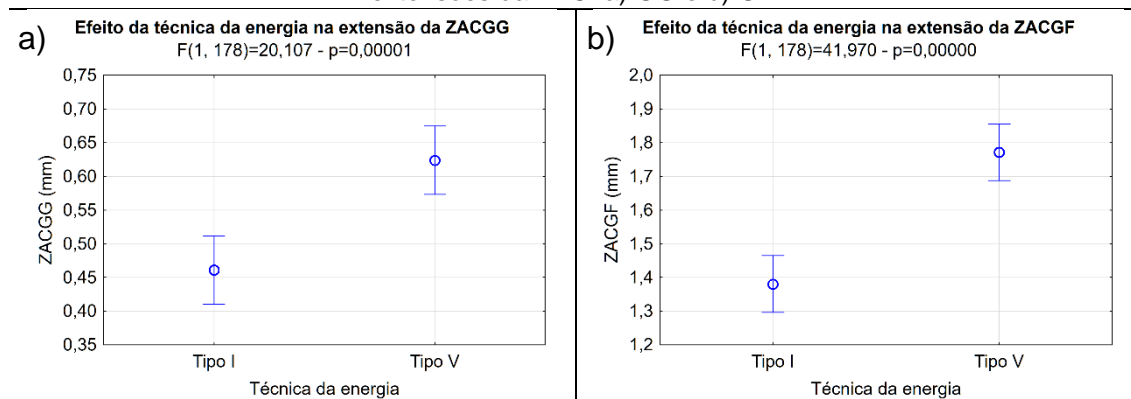
Observa-se na Figura 95 que a energia de soldagem afetou significativamente as extensões das ZAC's. Mostrando que, quanto maior a energia de soldagem aplicada, maior a extensão da ZAC grãos grosseiros e grãos finos. Tal fato ocorre devido ao aumento da quantidade de calor depositada sobre o metal base de acordo com o aumento da energia de soldagem. Sabe-se que a extensão da ZAC é função da temperatura de preaquecimento (T_0), da energia de soldagem (H_L), da espessura da chapa (e) de algumas constantes físicas do material (ρC), conforme pode ser visto na Equação 14 [26; 63].

$$T_p = T_0 + \left(\frac{2}{\pi * e} \right) * \left(\frac{H_L}{\rho C r^2} \right)$$

Equação 14

Na Figura 96 é apresentado o efeito da técnica de alteração da energia de soldagem na extensão da ZAC-GG e ZAC-GF dos cordões soldados com os eletrodos similares.

Figura 96 - Soldagem similar - Análise de variância do efeito da técnica da energia nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF.

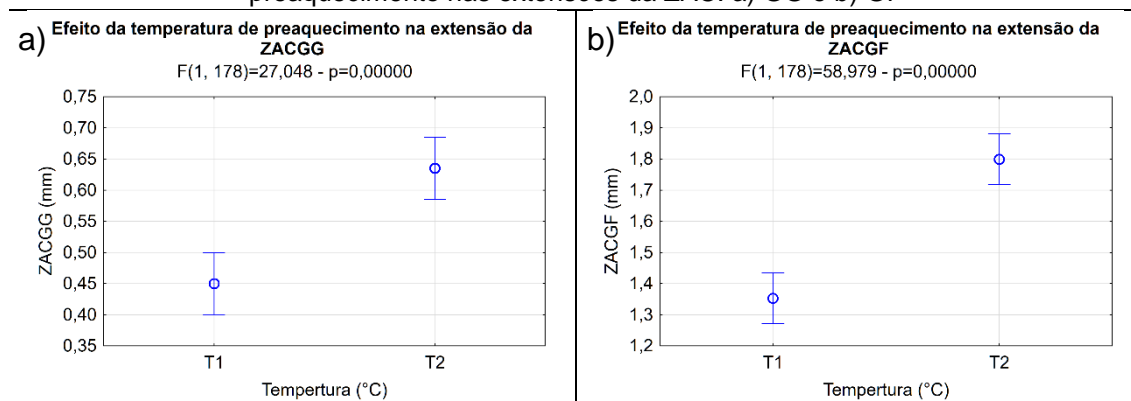


Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a técnica de alteração da energia foi significativa para a extensão da ZAC GG e ZAC GF. A explicação para este fato é análoga ao efeito da técnica da energia na zona dura e zona macia, em que a alteração da energia pela variação da corrente de soldagem apresenta uma maior eficiência de fusão, conseqüentemente, menor ZAC GG e GF.

Na Figura 97 é apresentado o efeito da temperatura de preaquecimento na extensão da ZACGG e ZACGF dos cordões soldados com os eletrodos similares.

Figura 97 - Soldagem similar - Análise de variância do efeito da temperatura de preaquecimento nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF

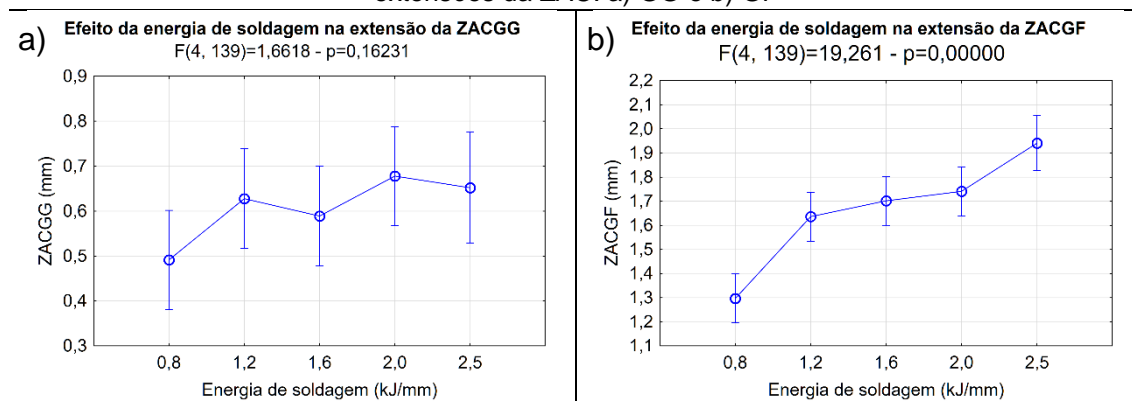


Fonte: Própria do autor.

Conforme detalhado anteriormente, a extensão da zona afetada pelo calor é função da energia de soldagem, da espessura da chapa, da temperatura de preaquecimento e das constantes físicas do material. Desta forma, as extensões das ZACGG e ZACGF apresentaram valores maiores com o aumento da temperatura de preaquecimento. Isto ocorre, pois, quanto maior a temperatura de preaquecimento, maior o calor imposto à peça, resultando em ciclos térmicos com temperaturas de pico maiores em regiões mais extensas se comparados a um preaquecimento menor. Dessa maneira, as transformações ocorrerão a distâncias maiores da linha de fusão para temperaturas de preaquecimento maiores. [26; 64]

Na Figura 98 é apresentado o efeito da energia de soldagem na extensão da ZACGG e ZACGF dos cordões soldados com os eletrodos dissimilares.

Figura 98 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da energia de soldagem nas extensões da ZAC. a) GG e b) GF

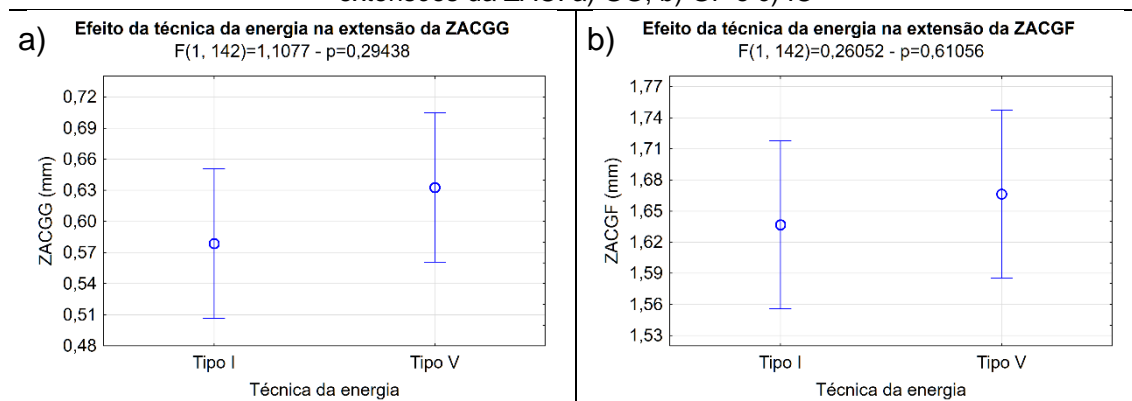


Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a energia de soldagem não afetou de forma significativa a extensão da ZAC-GG. Entretanto, para a ZAC GF a energia de soldagem apresentou resultado estatisticamente significativo.

Na Figura 99 é apresentado o efeito da técnica de alteração da energia de soldagem na extensão da ZACGG e ZACGF dos cordões soldados com os eletrodos dissimilares.

Figura 99 - Soldagem Dissimilar - Análise de variância do efeito da técnica da energia nas extensões da ZAC. a) GG, b) GF e c) IC



Fonte: Própria do autor.

Observa-se, para as soldagens dissimilares, que a técnica de alteração da energia de soldagem não apresentou efeito significativo para as extensões das ZAC's.

5.2.5. Diagrama de Decisão – Etapa 2

Os valores da Tabela 32, da Tabela 34 e da Tabela 36 foram substituídos na Equação 9, Equação 10, Equação 11 e Equação 12 para elaboração dos diagramas de decisão (DD) para os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e o Eletrodo Protótipo).

Os diagramas de decisão foram elaborados conforme procedimentos descritos no item 4.4.6. Foram realizadas ao todo 864 combinações, permutando energia de soldagem, técnica de energia e temperatura de preaquecimento, resultando em 88 diagramas de decisão. Todos os diagramas de decisão obtidos das combinações de parâmetros e técnicas empregadas estão listados no Apêndice A.

Na Figura 100 estão apresentados os diagramas de decisão com as condições escolhidas para aplicação da TDC-DC para os metais de base soldados com os respectivos eletrodos similares. Foi observado, por meio dos diagramas de decisão, que as condições de soldagem que utilizaram baixa energia de soldagem na primeira camada (0,8 kJ/mm) apresentaram as maiores possibilidades de aprovação.

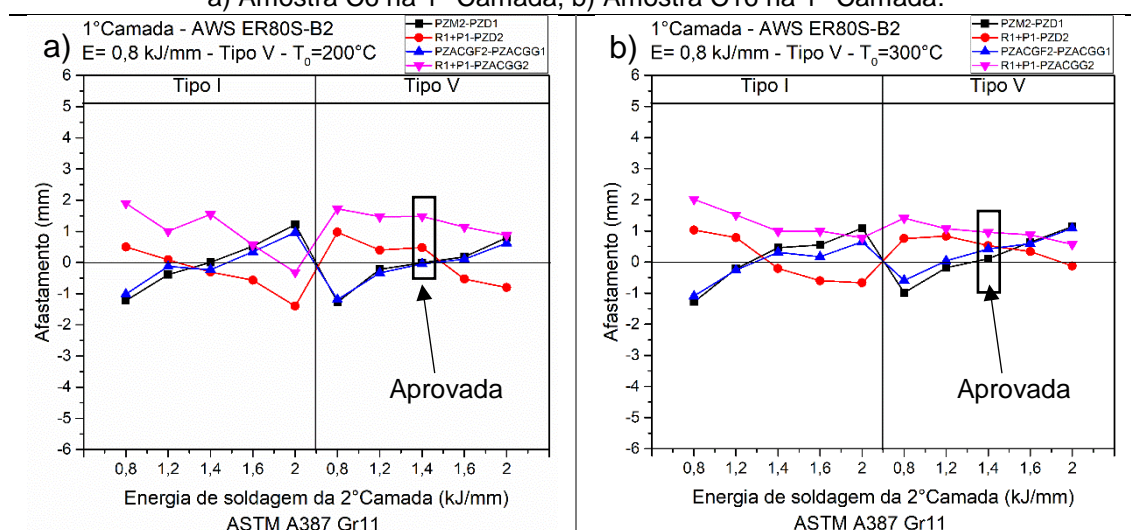
Isto ocorre devido ao fato das energias baixas produzirem menores reforços, penetrações e extensões de ZAC (ZAC GG + ZAC GF), devido ao menor aporte térmico e também em função da menor quantidade de metal depositado (menores Valim).

Em função das menores extensões de ZAC e menor quantidade de metal depositado, fica mais fácil a obtenção de energias de soldagem para segunda camada que proporcionem o adequado revenimento e refinamento da ZAC.

Na Figura 100a e na Figura 100b estão apresentados os diagramas de decisão com as condições escolhidas (destacadas em preto) para a soldagem similar do aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ER80S-B2 para a temperatura de preaquecimento de 200°C e 300°C, respectivamente. Em ambos

os diagramas, os critérios de microdureza e microestrutura foram positivos indicando condições favoráveis para aplicação da TDC-DC. Neste caso, as condições de soldagem aprovadas foram aquelas com energia de soldagem de 0,8 kJ/mm na primeira camada e 1,4 kJ/mm na segunda camada, ambas com a técnica da alteração da energia dada pela velocidade de soldagem. A utilização de preaquecimento altera a geometria da solda (pela alteração da molhabilidade e da energia total imposta ao sistema), bem como as condições de resfriamento (pela alteração do ciclo térmico de soldagem).

Figura 100 – Soldagem Similar - Diagrama de decisão – Aço ASTM A387 Gr11
a) Amostra C6 na 1ª Camada, b) Amostra C16 na 1ª Camada.



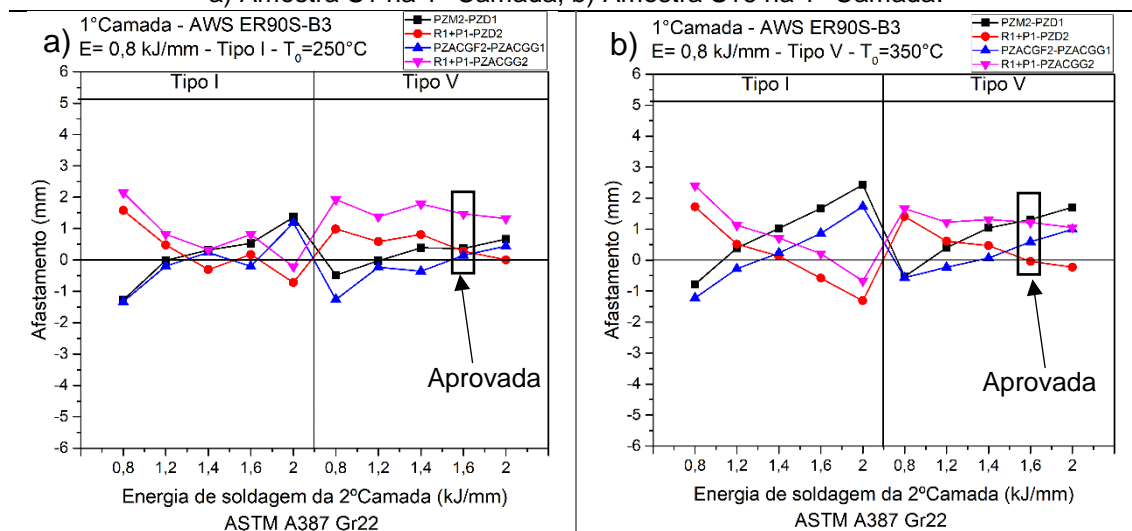
Fonte: Própria do autor.

No caso da Figura 100a e na Figura 100b constata-se que o aumento da temperatura de preaquecimento afetou de forma significativa no critério de microestrutura, em que o Afastamento 3 ($R1+P1 > PZACGG2$) diminuiu com o aumento da temperatura de preaquecimento de 200°C para 300°C. Conforme, visto na Figura 78, a temperatura de preaquecimento de 300°C apresenta maior extensão de ZAC GG do que com a temperatura de 200°C. O Afastamento 4 ($PZACGF2 > PZACGG1$) aumentou de acordo com o aumento da temperatura de preaquecimento.

Na Figura 101a e na Figura 101b estão apresentados os diagramas de decisão com as condições escolhidas para a soldagem similar do aço ASTM

A387 Gr22 com o eletrodo AWS ER90S-B3 para a temperatura de preaquecimento de 250°C e 350°C, respectivamente. Em ambos os diagramas, os critérios de microdureza e microestrutura foram positivos indicando condições favoráveis para aplicação da TDC-DC. Neste caso, as condições de soldagem aprovadas foram aquelas que combinam a energia de soldagem de 0,8 kJ/mm na primeira camada com a de 1,6 kJ/mm na segunda camada.

Figura 101 – Soldagem Similar - Diagrama de decisão – Aço ASTM A387 Gr22
a) Amostra S1 na 1ª Camada, b) Amostra S16 na 1ª Camada.



Fonte: Própria do autor.

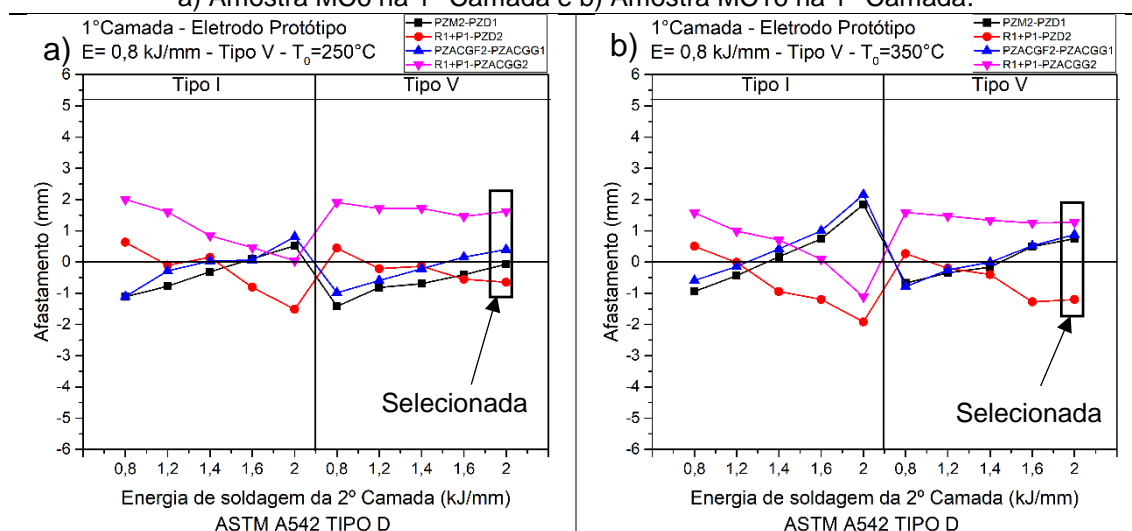
De uma forma geral, os resultados dos diagramas de decisão indicaram algumas possibilidades com 100% de aprovação dos critérios estabelecidos. Contudo, foi constatado que pode não haver aprovação de todos os critérios em função do tipo de material e das condições exploradas. Foi o caso do estudo para o aço ASTM A542 Tipo D.

Na Figura 102a e na Figura 102b estão apresentados os diagramas de decisão com as condições escolhidas para a soldagem similar do aço ASTM A542 Tipo D com o eletrodo protótipo para a temperatura de preaquecimento de 250°C e 350°C, respectivamente. Em ambos os diagramas, observa-se que o critério de microdureza não foi atendido para o AFASTAMENTO 1 ($R1+P1-PZD2 > 0$) e o critério de microestrutura apresentaram os afastamentos positivos indicando condições favoráveis para a aplicação da TDC-DC quanto ao

refinamento da microestrutura. Neste caso, a escolha da condição a ser soldada foi escolhida baseado nas prioridades detalhadas na metodologia (Item 4.4.6 - Construção dos Diagramas de Decisão – Etapa 2).

Assim, as condições de soldagem escolhidas foram dadas pela energia de soldagem de 0,8 kJ/mm na primeira camada e 2,0 kJ/mm na segunda camada, ambas com alteração de energia de soldagem pela velocidade de soldagem. Acredita-se que, apesar do critério não ser plenamente aprovado, com esse procedimento é possível garantir as melhores propriedades mecânicas na zona afetada pelo calor, quando comparados com os enchimentos tradicionais sem aplicação da técnica de deposição controlada.

Figura 102 – Soldagem Similar - Diagrama de decisão – Aço ASTM A542 Tipo D
a) Amostra MC6 na 1° Camada e b) Amostra MC16 na 1° Camada.



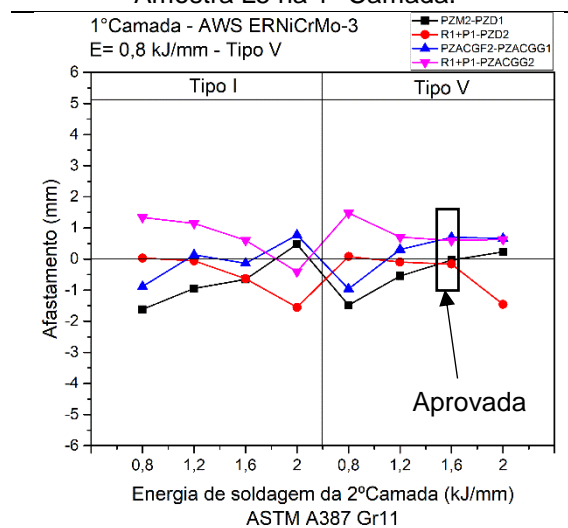
Fonte: Própria do autor.

Os valores da Tabela 33, da Tabela 35 e da Tabela 37 foram substituídos na Equação 9, Equação 10, Equação 11 e Equação 12 para elaboração dos diagramas de decisão para os eletrodos dissimilares (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347).

Na Figura 103 está apresentado o diagramas de decisão com a condição escolhida para a soldagem dissimilar do aço ASTM A387 Gr11 com o

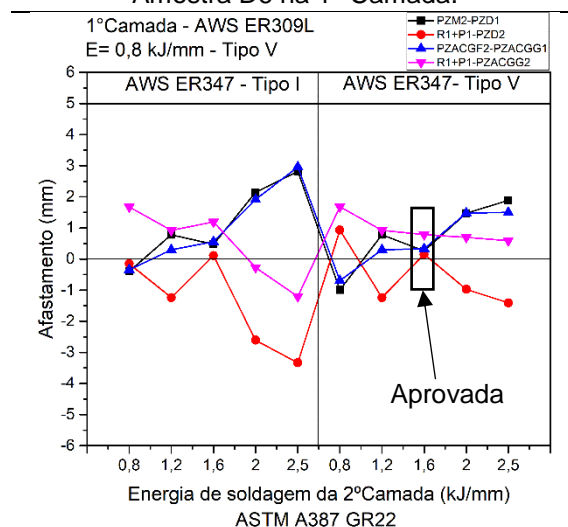
eletrodo AWS ERNiCrMo-3. Observa-se que a condição escolhida apresentou aprovação de todos os critérios estabelecido.

Figura 103 – Soldagem Dissimilar - Diagrama de decisão. Aço ASTM A387 Gr11
Amostra L5 na 1° Camada.



Na Figura 104 está apresentado o diagramas de decisão com a condição escolhida para a soldagem dissimilar do aço ASTM A387 Gr22 com os eletrodos AWS ER309L e AWS ER347. Observa-se que a condição escolhida apresentou aprovação de todos os critérios estabelecido.

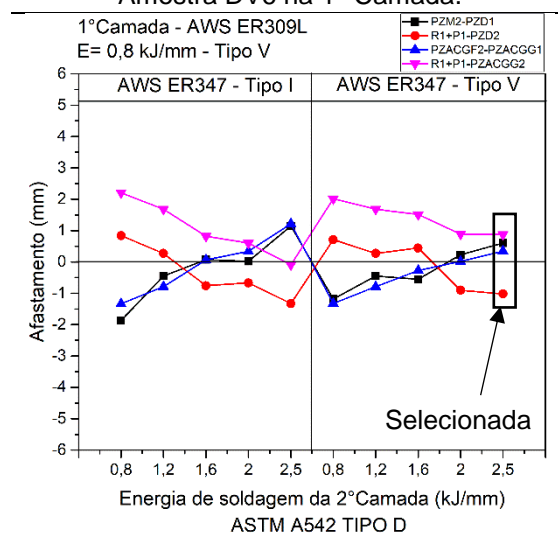
Figura 104 – Soldagem Dissimilar - Diagrama de decisão. Aço ASTM A387 Gr22
Amostra D6 na 1ª Camada.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 105 está apresentado o diagramas de decisão com a condição escolhida para a soldagem dissimilar do aço ASTM A387 Gr22 com os eletrodos AWS ER309L e AWS ER347.

Figura 105 – Soldagem Dissimilar - Diagrama de decisão. Aço ASTM A542 Tipo D
Amostra DV6 na 1ª Camada.



Fonte: Própria do autor.

De forma análoga a soldagem similar, os resultados dos diagramas de decisão indicaram algumas possibilidades com 100% de aprovação dos

critérios estabelecidos. Contudo, foi constatado que pode não haver aprovação de todos os critérios em função do tipo de material e das condições exploradas. Foi o caso de estudo para o aço ASTM A542 Tipo D, semelhante ao que ocorreu na soldagem similar desse mesmo aço.

Pela Figura 105 a condição que apresentou a melhor combinação de parâmetros baseado nas prioridades estabelecidas no Item 4.4.6 - Construção dos Diagramas de Decisão – Etapa 2) está marcada no gráfico.

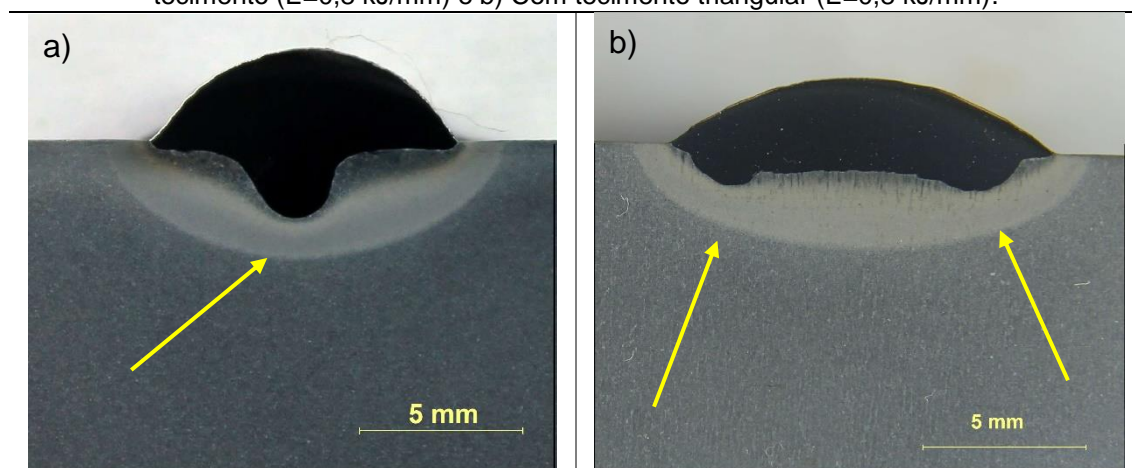
As relações aprovadas foram alcançadas com baixa energia de soldagem na primeira camada (0,8 kJ/mm) e com o dobro da energia de soldagem para a segunda camada nos aços ASTM A387 Gr.11 e ASTM A387 Gr.22. Para o aço ASTM A542 Tipo D a energia de soldagem da segunda camada foi três vezes a energia da primeira camada, devido ao efeito endurecedor do vanádio.

5.3 Etapa 3 – Técnica de deposição controlada com dupla camada

5.3.1. Considerações iniciais da TDC-DC – Etapa 3

O perfil de penetração do cordão de solda é um fator crucial para aplicação eficaz da Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada. A Figura 106 ilustra duas condições soldadas com parâmetros semelhantes, sendo distintas pelo uso do tecimento.

Figura 106 - Comparativo do efeito do tecimento no perfil de penetração da solda. a) Sem tecimento ($E=0,8$ kJ/mm) e b) Com tecimento triangular ($E=0,8$ kJ/mm).



Fonte: Própria do autor.

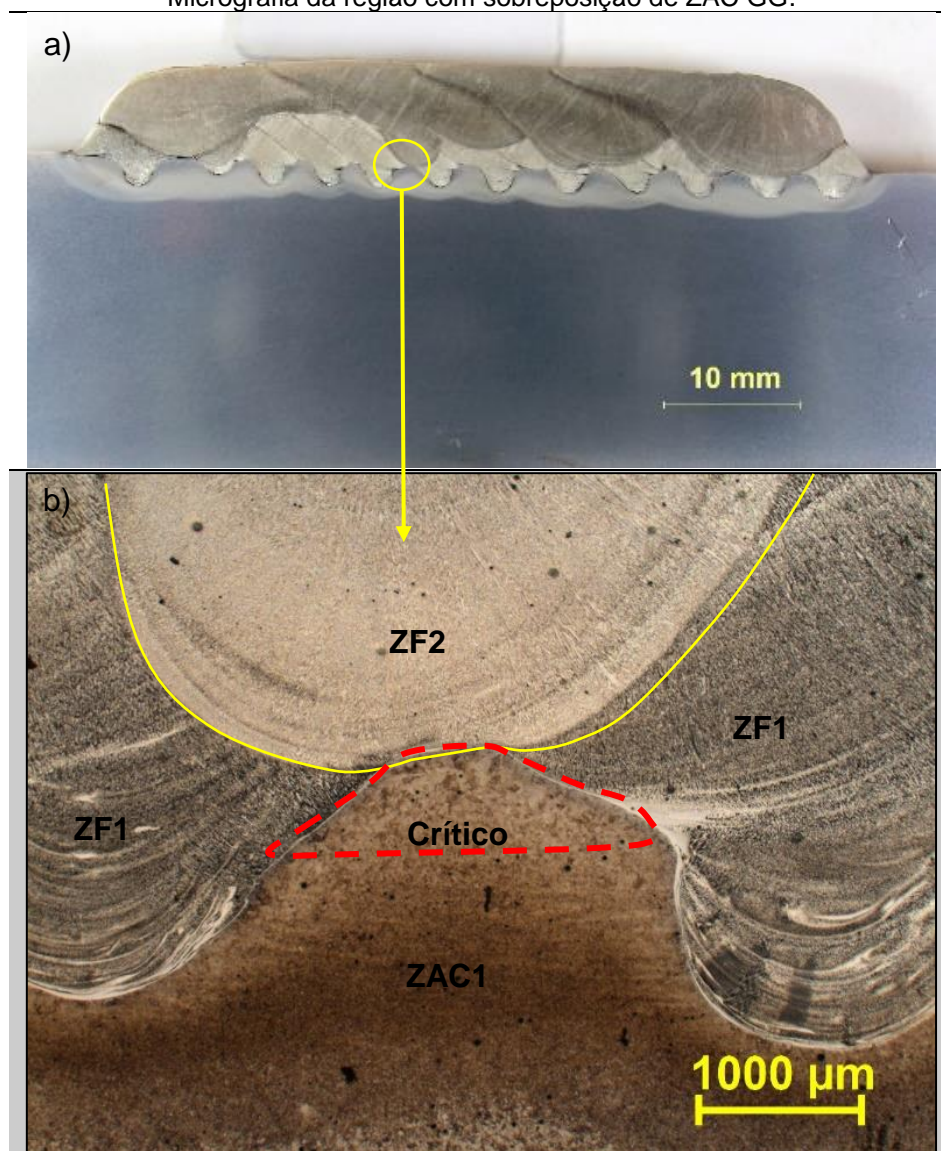
Observa-se que a condição da Figura 106a apresenta um perfil de penetração do tipo “finger-shape”. Tal perfil pode ser decorrente de diversos fatores, por exemplo, composição do gás de proteção, modo de transferência metálica, intensidade de corrente, dentre outros. Este perfil foi atenuado com a utilização da oscilação da tocha (tecimento) conforme pode ser visto na Figura 106b. A oscilação da tocha é uma prática muito comum para o controle da geometria dos cordões de solda. No movimento da tocha e, por consequência, do conjunto arco/poça, provoca-se maior distribuição de calor sobre metal de base aumentando a molhabilidade e uniformizando a ação da pressão do arco sobre a poça de fusão. Este fato distribui a convecção quase por completo, na poça de fusão. Como resultado, se tem cordões com maior largura, menor penetração e menor reforço (menor convexidade), além de evitar a concentração

de forças eletromagnéticas no centro da poça. No entanto, durante o deslocamento da tocha durante o tecimento, a mudança no sentido da tocha pode provocar leves protuberâncias na geometria da solda, indicado na Figura 106b. Resultados análogos foram obtidos por Aguiar, soldando com o processo MIG/MAG o metal de adição de liga de níquel. [44]

Na Figura 107b está apresentada uma dupla camada soldada com cordões sem utilização de tecimento. Observa-se que ocorre a sobreposição de ZAC's grãos grosseiros (região com delimitação vermelha) da segunda camada na primeira camada, tornando o procedimento totalmente inadequado aos objetivos da técnica de deposição controlada com dupla camada para redução de dureza e refino de grão, pois restará após a 2ª camada uma região dura e grosseira (ZAC GG da 2ª camada) na camada soldada.

Como discutido anteriormente, é necessário que a ZAC GG da segunda camada esteja posicionada na região da zona fundida da primeira camada. Esta região não sofrerá intensamente os efeitos maléficos da ZAC GG da segunda camada devido ao ajuste de composição química ocorrida pela escolha do arame eletrodo.

Figura 107 - Região de sobreposição de ZACs. a) Dupla camada soldada sem tecimento e b) Micrografia da região com sobreposição de ZAC GG.



Fonte: Própria do autor.

Além da geometria dos cordões, a sobreposição dos passes de soldagem é considerada um fator importante na abordagem geral da técnica de deposição controlada, de forma que os diferentes níveis de sobreposição afetam diretamente as características da camada soldada, como o reforço, a penetração e a largura da camada. O estudo exploratório realizado neste trabalho para avaliar o nível de sobreposição de 50% na aplicação de camadas/revestimentos mostrou que as camadas com sobreposição de 50% apresentaram ótimo acabamento superficial das soldas e perfis de penetração uniformes.

5.3.2. Soldagem Similar da TDC-DC – Etapa 3

A seguir são descritos os resultados referentes as soldagens da Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada nos aços ASTM 387 Gr 11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D utilizando-se os parâmetros e técnicas conforme condições consideradas aprovadas, não aprovadas e não aprovada com aplicação de TTPS para as soldagens utilizando eletrodos similares AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e o Eletrodo Protótipo desenvolvido.

5.3.2.1. Aspecto gerais da soldagem – Etapa 3

De um modo geral, em uma avaliação visual, considerando o acabamento superficial, defeitos macroscópicos, respingos e irregularidades, os revestimentos foram satisfatórios para os objetivos do trabalho (Figura 108a). No que diz respeito às seções transversais das camadas, pode-se visualizar que a sobreposição de 50% proporcionou reforços das camadas uniformes com poucas ondulações. Destaca-se que o uso do tecimento atingiu o objetivo desejado de amenizar e até mesmo eliminar o perfil de dedo nas penetrações dos revestimentos.

Figura 108 - Soldagem Similar - a) Acabamento superficial e b) Seção transversal.

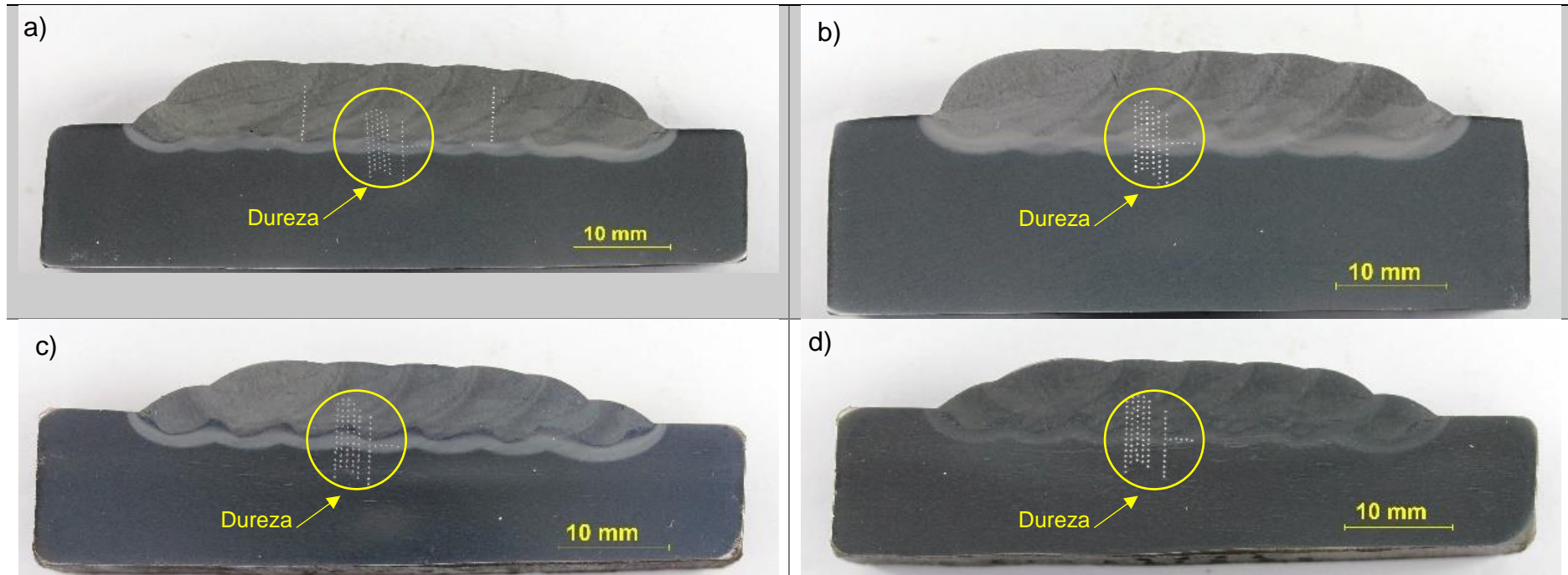


Fonte: Própria do autor.

Na Figura 109, na Figura 110 e na Figura 111 são apresentadas as macrografias das seções transversais das dupla camadas soldadas. Observa-se que o revestimento apresentou excelente acabamento superficial e perfil de penetração e de acabamento bastante uniformes.

Figura 109 – Soldagem Similar – Macrografias das TDC-DC. a) Aprovada (DC-C6-C8); b) Aprovada (DC C16-C18); c) Não aprovada (DC C6-C6); d) Não aprovada + TTPS (DC C6-C6-TTPS).

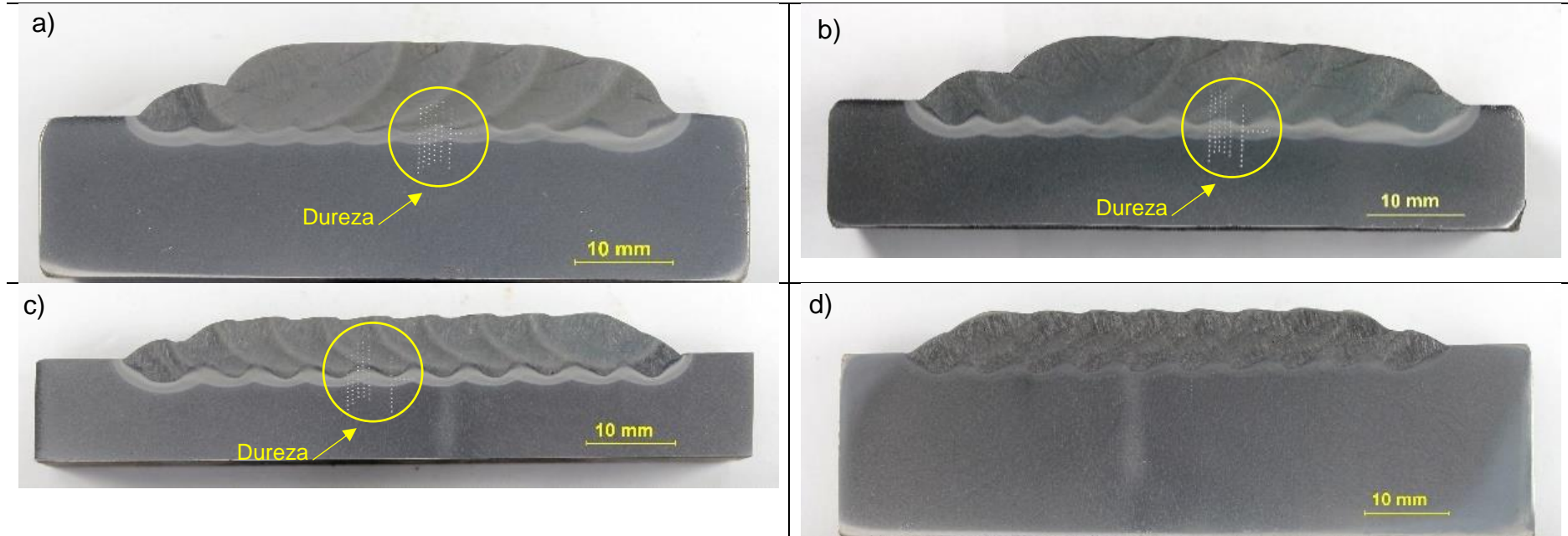
ASTM A387 Gr11 – AWS ER80S-B2



Fonte: Própria do autor.

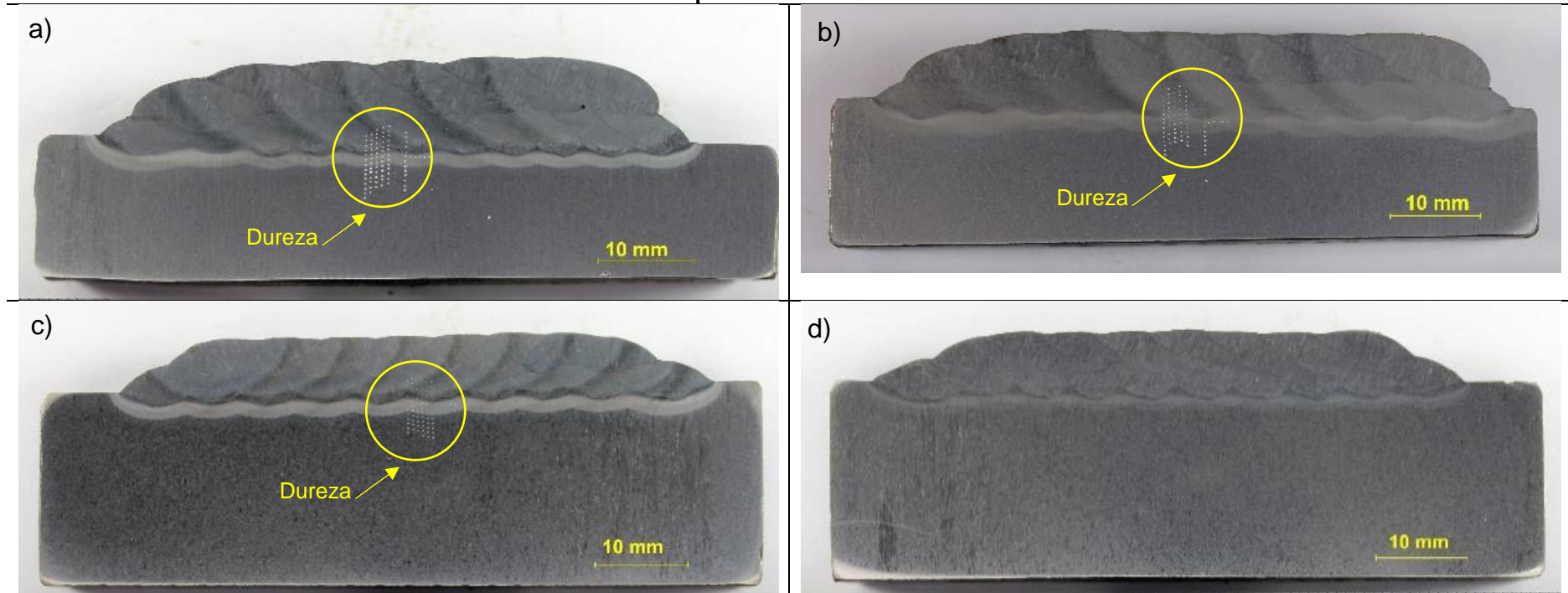
Figura 110 - a) Aprovada (DC-S6-S9); b) Aprovada (DC S16-S18); c) Não aprovada (DC S6-S6); d) Não aprovada + TTPS (DC S6-S6-TTPS)

ASTM A387 Gr22 – AWS ER90S-B3



Fonte: Própria do autor.

Figura 111 – a) Aprovada (DC-MC6-MC10); b) Aprovada (DC MC16-MC20); c) Não aprovada (DC MC6-MC6); d) Não aprovada + TTPS (DC MC6-MC6-TTPS)
ASTM A542 Tipo D – ELETRODO PROTÓTIPO



Fonte: Própria do autor.

5.3.2.2. Tratamento Térmico Pós-Soldagem (TTPS) – Etapa 3

O TTPS foi realizado com intuito de controlar a dureza resultante na ZAC formada nos aços CrMo e CrMoV, bem como o de promover o patamar máximo de dureza de 237 HV10 para o aço ASTM A387 G11 e 250 HV para os aços ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D, estabelecido pelas normas API RP 934A, API RP 934C e pela norma Petrobras N133.

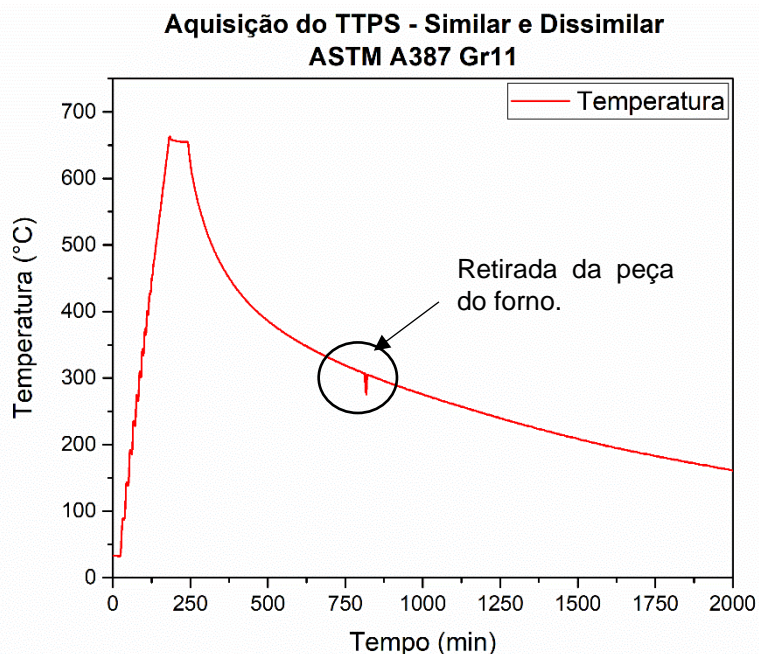
O tratamento térmico realizado conforme as especificações da norma ASME VIII-Divisão 1-2015 para o material em estudo permitirá a comparação do procedimento de soldagem realizado com a TDC-DC e o procedimento de soldagem sem aplicação da TDC-DC submetido a TTPS.

O tratamento térmico pós-soldagem foi realizado nas amostras soldadas que não foram aprovadas nos diagramas de decisão. De forma a comparar o nível de dureza obtido entre as amostras aprovadas pelos diagramas de decisão e as amostras não aprovadas e submetidas ao TTPS.

Na Figura 112 está apresentada a aquisição de temperatura do tratamento térmico pós-soldagem nas amostras das duplas camadas soldadas no aço ASTM A387 Gr11 utilizando-se o eletrodo similar (AWS ER80S-B2) e o eletrodo dissimilar (AWS ERNiCrMo-3).

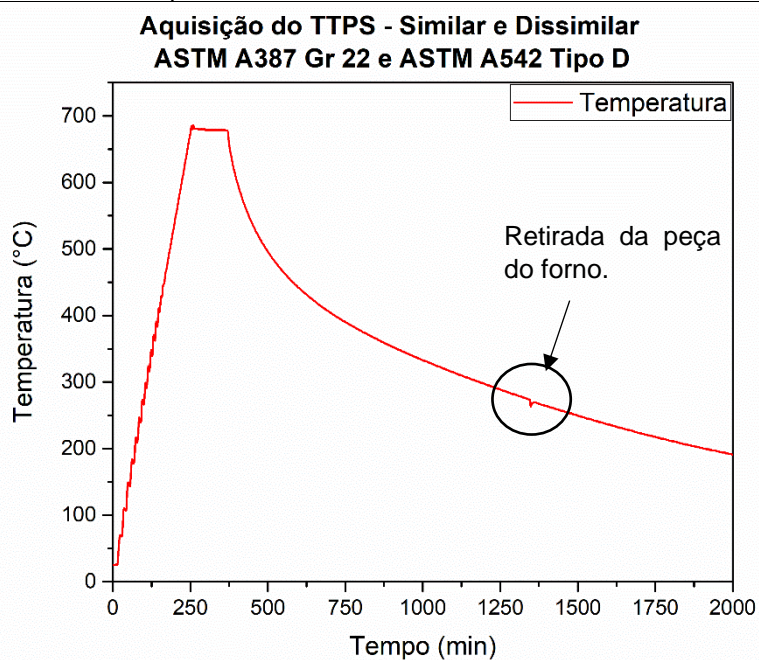
Na Figura 113 está apresentada a aquisição de temperatura do tratamento térmico pós-soldagem nas amostras das duplas camadas soldadas no aço ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D utilizando-se os eletrodos similares (AWS ER90S-B3 e o Eletrodo Protótipo) e os eletrodos dissimilares (AWS ER309L e AWS ER347).

Figura 112 - Aquisição de temperatura do TTPS nas duplas camadas soldadas. Aço ASTM A387 Gr11.



Fonte: Própria do autor.

Figura 113 - Aquisição de temperatura do TTPS nas duplas camadas soldadas. Aços ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D.



Fonte: Própria do autor.

O objetivo do tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) é recuperar propriedades mecânicas deterioradas, aliviar os níveis de tensões residuais, difundir o hidrogênio aprisionado e reverter a microestrutura da zona afetada pelo calor (ZAC). O TTPS geralmente é realizado em função da espessura ou do teor de liga do componente a ser soldado, conforme apresentado na Etapa 3 e na Tabela 25. Embora o TTPS seja exigido em diversos procedimentos após qualquer reparo de solda, existem várias limitações associadas. Por exemplo, realizar TTPS em grandes equipamentos de refinarias petroquímicas são extremamente caros e demorados. Às vezes, o TTPS é quase impossível de ser realizado devido as dimensões e a complexidade das peças ou equipamento, além de outros fatores. Os equipamentos que realizam processo de hidrotratamento podem apresentar espessura de parede de 300 mm, ou seja, possui um alto custo e dificuldade associados a realização desta operação.

5.3.2.3. *Análise de Dureza das Soldagens Similares das Duplas Camadas – Etapa 3*

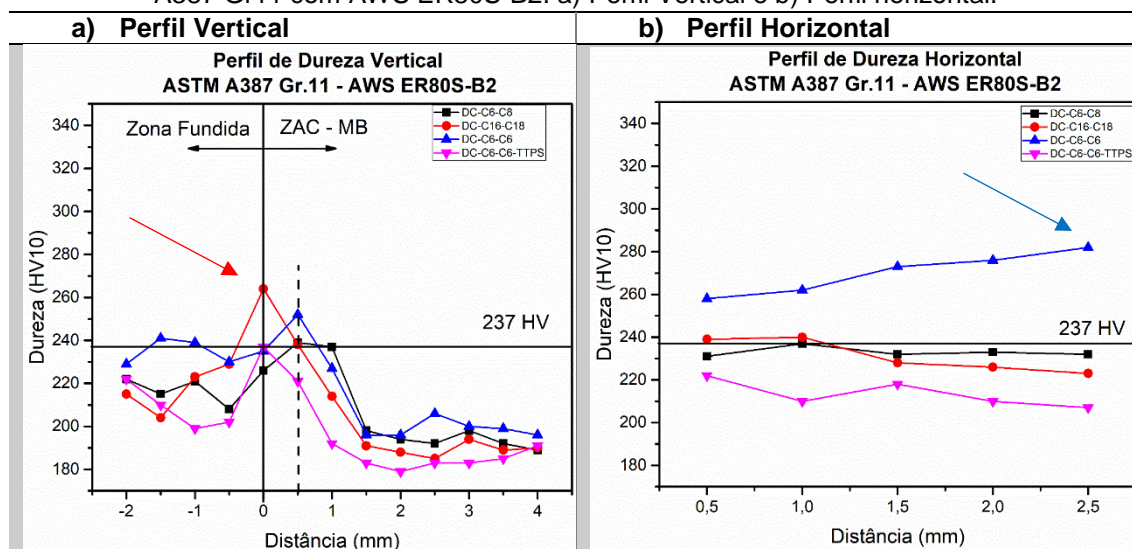
A seguir são apresentados os resultados de dureza das soldagens da Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada nos aços ASTM 387 Gr 11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D utilizando-se os parâmetros e técnicas conforme condições consideradas aprovadas, não aprovadas e com aplicação de TTPS para as soldagens utilizando eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e Eletrodo Protótipo).

A dureza da zona afetada pelo calor (ZAC) é frequentemente utilizada como indicador da susceptibilidade de uma microestrutura à trinca durante a avaliação das soldas de reparo. Por este fato, foram avaliados os diferentes perfis dando atenção especial aos ensaios de dureza na ZAC.

- Aço ASTM A387 Gr11 com AWS ER80S-B2

A Figura 114 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A387 Gr11 com eletrodo similar AWS ER80S-B2, que foram obtidas conforme o procedimento recomendado na norma Petrobras N133 (Figura 38). Esta norma estabelece um procedimento no qual a dureza deve ser medida em duas direções, no perfil vertical, cuja a linha atravessa a zona fundida, passando pela interface e regiões da ZAC e alcançando o metal base. O segundo perfil é horizontal com distância de 0,5 mm da linha de fusão.

Figura 114 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ER80S-B2. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.



Fonte: Própria do autor.

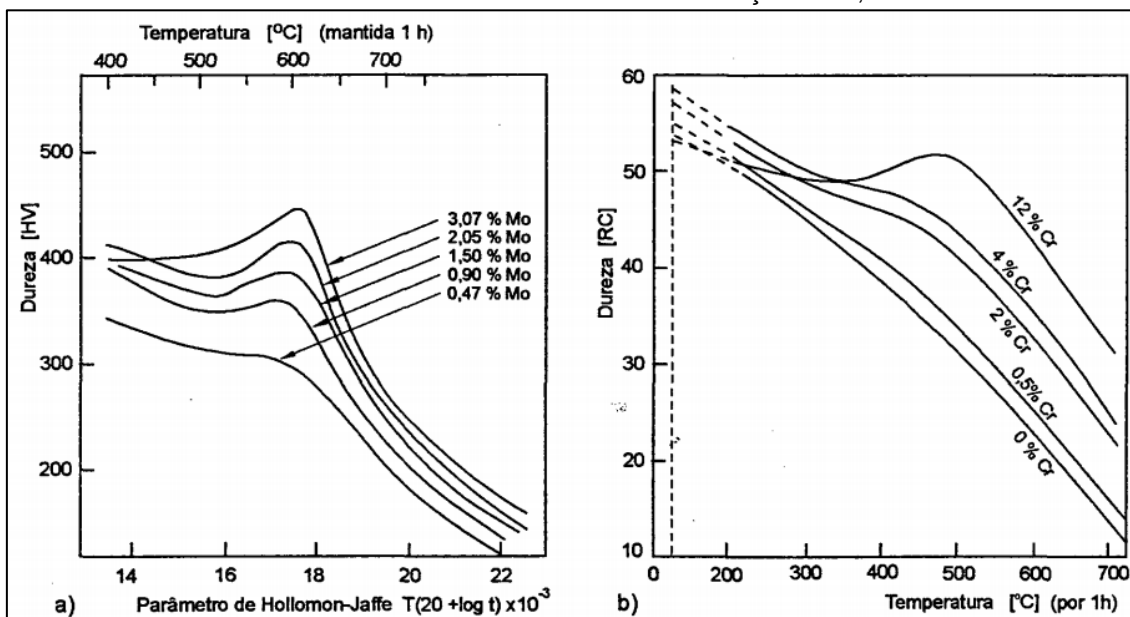
A norma Petrobras N133 estabelece o limite de dureza de 237HV10 na zona fundida e zona afetada pelo calor. Por esse critério, a condição Aprovada com temperatura de preaquecimento de 200°C (DC C6-C8), selecionada para aplicação da dupla-camada, atendeu plenamente aos requisitos de dureza da ZAC pela norma Petrobras N-133. Esse resultado aponta positivamente para aplicação da técnica da dupla camada com o intuito de promover redução de dureza do material ASTM A387 Gr11, quando submetido a soldagem de revestimento similar.

A condição aprovada com temperatura de preaquecimento de 300°C atendeu parcialmente ao critério de 237 HV10 máximo, apresentando um ponto de 265 HV10 (seta vermelha) na linha de fusão da primeira camada soldada. Esta dureza, um pouco mais alta, está relacionada a uma região que claramente foi revenida, porém, devido à temperatura mais elevada de preaquecimento pode ter ocorrido um endurecimento secundário ou o tempo foi insuficiente para promover a redução de dureza a níveis desejados.

Os aços com adições de elementos como Cr, V, Mo e Nb podem sofrer endurecimento secundário (precipitação de carbonetos finos e duros) durante o revenimento.[4; 64] Tal fenômeno pode ser mais agravante nos aços ASTM A387 Gr 22 e ASTM A542 Tipo D, por apresentarem maior teores dos elementos Cr, Mo e V.

Segundo Bhadeshia, nos aços ao Cr, dois carbonetos de Cr são encontrados com frequência: o Cr_7C_3 e o Cr_{23}C_6 . Os aços com teores abaixo de 7%Cr, o carboneto Cr_{23}C_6 é ausente, a menos que outros metais como por exemplo o molibdênio estejam presentes, conforme visto na Figura 115. [4]

Figura 115 - Efeito do molibdênio sobre o revenimento de um aço com 0,1 %C temperado; b) efeito do cromo sobre o revenimento de um aço com 0,2%C.



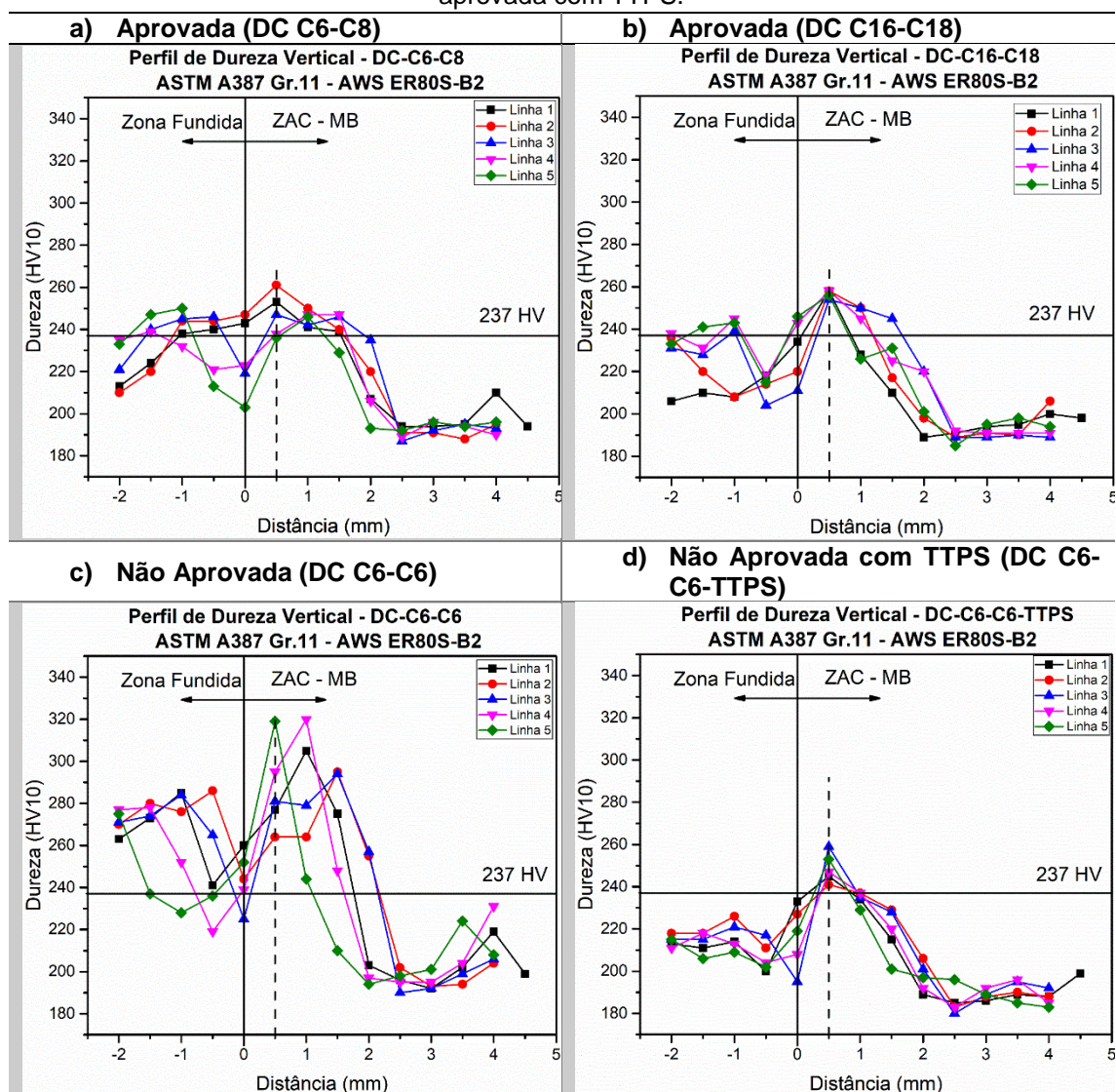
Fonte: Modificado de Bhadeshia [2006] [4] .

Durante o revenimento promovido pela segunda camada, os ciclos de aquecimento e de resfriamento são bem diferentes de um tratamento isotérmico. Por isso, análises mais específicas e detalhadas são necessárias para afirmar o fenômeno de endurecimento secundário nas amostras soldadas com a TDC-DC.

A condição reprovada (DC C6-C6) não atendeu aos requisitos de dureza máxima na ZAC pela norma Petrobras N133 apresentando ponto de dureza com 280 HV10 (seta azul) no perfil horizontal (Figura 114b), de fato, era esperado este resultado, afinal esta condição não foi aprovada no diagrama de decisão e foi soldada com o intuito de comparação com a condição aprovada.

A Figura 116 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A387 Gr11 com eletrodo similar AWS ER80S-B2. As medidas foram realizadas conforme o procedimento proposto na Figura 39, o qual estabelece uma varredura na ZAC da dupla camada.

Figura 116 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ER80S-B2. a) Aprovada ($T_0=200^\circ\text{C}$), b) Aprovada ($T_0=300^\circ\text{C}$), c) Não aprovada e d) Não aprovada com TTPS.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se de forma clara nestes perfis de dureza (Figura 116), a significativa diferença de dureza da ZAC das condições soldadas aprovadas (DC C6-C8 e DC C16-C18) com a condição não aprovada (DC C6-C6), sendo esse

perfil um resultado mais efetivo para mostrar a eficiência da TDC-DC na redução da dureza na ZAC.

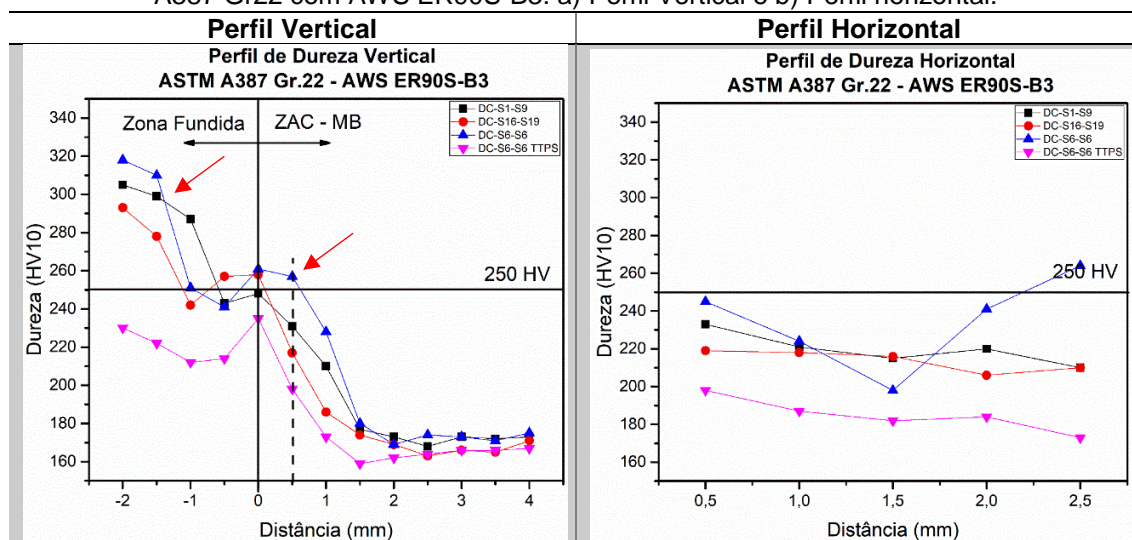
É possível observar que para as condições com dupla camada aprovadas (Figura 116a e Figura 116b), as medidas de dureza da ZAC nas regiões entre os passes apresentam valores de dureza acima do máximo permitido pela norma Petrobras N133. Esta metodologia tende a ser mais conservadora, pelo fato das impressões estarem em regiões onde ocorrem reaquecimento de passes laterais. Foi constatado valores de dureza de 260 HV10 em regiões entre passes, de forma análoga ao apresentado anteriormente, isto pode estar associado ao endurecimento secundário ou o revenimento não foi suficiente para amaciar a dureza a níveis exigidos pela norma. Entretanto, quando comparada com a condição não aprovada (Figura 116c), os valores de dureza são mais elevados (320 HV10) e permanece elevado por maiores distâncias da linha de fusão.

Comparando a Figura 116a e a Figura 116d, observa-se que a dupla camada não aprovada submetida ao TTPS apresentou nível de dureza semelhante ao da amostra aprovada soldada com a TDC-DC sem TTPS. Comportamento semelhante foi encontrado por outros autores, que utilizaram diferentes materiais de base e de adição, entretanto, aplicando-se a mesma essência da TDC-DC. [41; 65] Esse resultado torna-se importante em função da possibilidade de realizar soldagem de fabricação ou reparos em equipamentos sem a necessidade de aplicação de TTPS.

- Aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER90S-B3

A Figura 117 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A387 Gr22 com eletrodo similar AWS ER90S-B3. As medidas foram realizadas conforme o procedimento recomendado na norma Petrobras N133 (Figura 38), que estabelece um procedimento no qual a dureza deve ser medida em duas direções, no perfil vertical a linha atravessa a zona fundida, passando pela interface e regiões da ZAC e alcançando o metal base, e um segundo perfil horizontal próximo à linha de fusão.

Figura 117 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER90S-B3. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.



Fonte: Própria do autor.

A norma Petrobras N133 estabelece o limite de dureza de 250 HV10 na zona fundida e afetada pelo calor. Por esse critério, a condição Aprovada com temperatura de preaquecimento de 250°C (DC S1-S9), selecionada para aplicação da dupla camada, atendeu plenamente aos requisitos de dureza da ZAC e não atendeu para a zona fundida, conforme a norma Petrobras N-133.

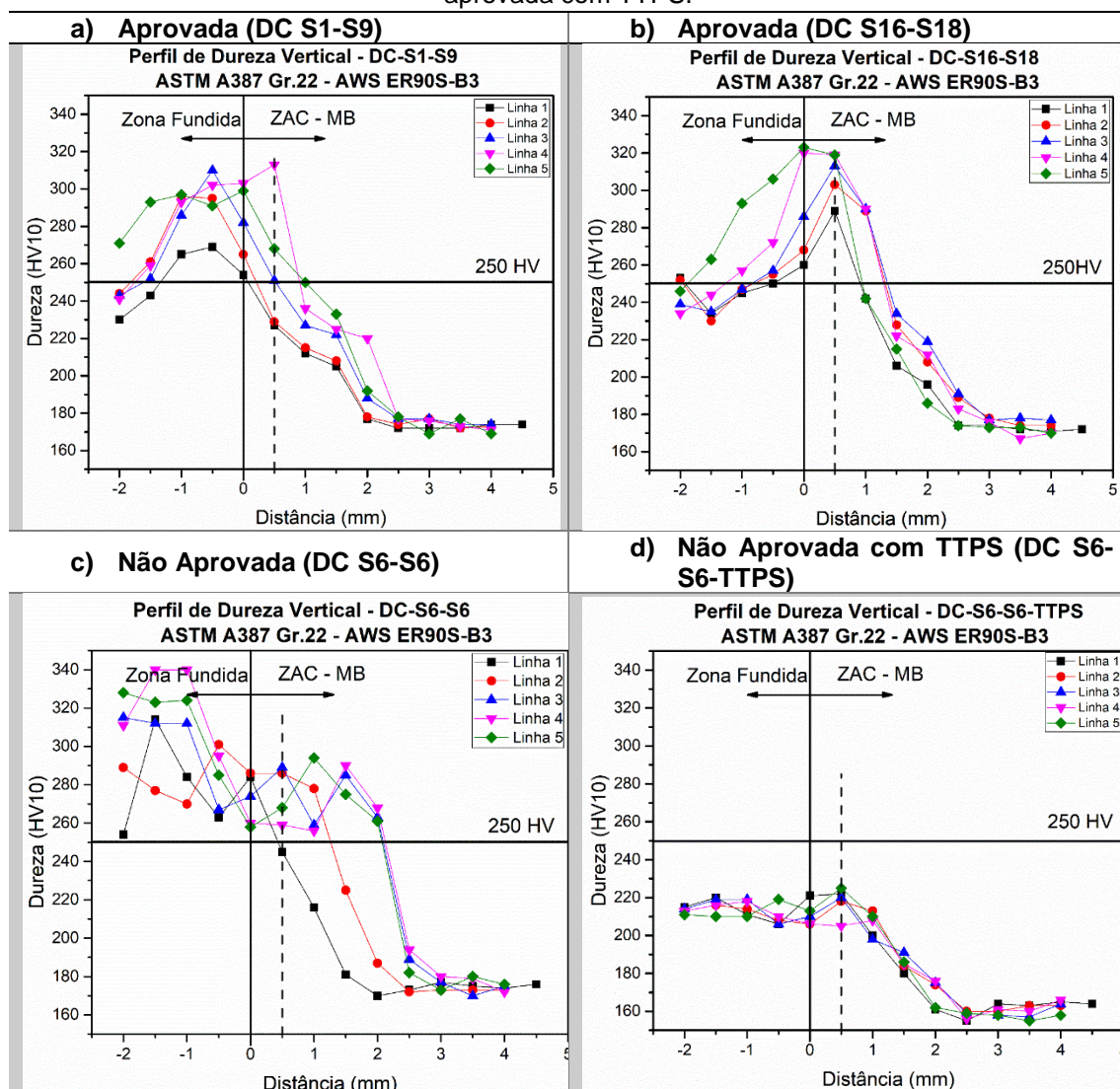
Esse resultado aponta positivamente para aplicação da técnica da dupla camada com o intuito de promover redução de dureza do material ASTM A387 Gr22, quando submetido a soldagem de revestimento similar. Entretanto, a dureza da zona fundida atingiu pontos próximos de 300 HV10. Resultado

semelhante obtido pela condição aprovada com temperatura de preaquecimento de 350°C, onde atendeu parcialmente ao critério de 250 HV10 máximo, apresentando um ponto de 260 HV10 na linha de fusão da primeira camada soldada.

A condição reprovada (DC S6-S6) apresentou valores próximos ao requisito de dureza máxima na ZAC pela norma Petrobras N133. Entretanto, essa condição foi realizada com mesmo nível de energia de soldagem na primeira e segunda camada. De forma que, por este procedimento da norma, não houve grande diferença entre uma soldagem realizada com a TDC-DC e um procedimento utilizando relação de energia de soldagem não aprovada.

A Figura 118 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A387 Gr22 com eletrodo similar AWS ER90S-B3, foram medidas conforme o procedimento proposto (Figura 39), o qual estabelece uma varredura na ZAC da dupla camada.

Figura 118 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER90S-B3. a) Aprovada ($T_0=250^\circ\text{C}$), b) Aprovada ($T_0=350^\circ\text{C}$), c) Não aprovada e d) Não aprovada com TTPS.



Fonte: Própria do autor.

Pelos perfis de dureza proposto (Figura 118), observa-se que a dureza da ZAC das condições aprovadas de acordo com os diagramas de decisão (DC S1-S9 e DC S16-S18) apresentaram pontos acima de 250 HV10. Sendo que, a condição DC S1-S9 apresentou somente dois pontos na ZAC acima de 250 HV10.

O perfil de dureza proposto obtido para a condição não aprovada DC S6-S6 apresenta dureza acima de 250 HV10 e por uma extensão maior (2 mm). Fato que comprova que esse perfil é mais efetivo para mostrar a eficiência da TDC-DC na redução da dureza na ZAC, afinal, o perfil de dureza realizado

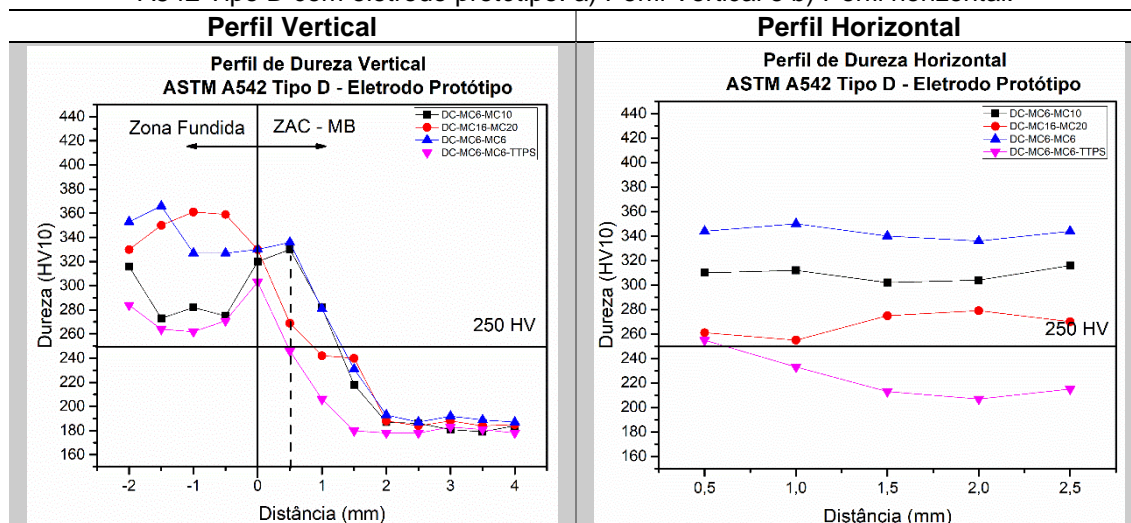
baseado na norma Petrobras N133 não apresentou diferença significativa entre as condições aprovada e não aprovada. Apesar do procedimento de medida de dureza da norma Petrobras N133 ser mais simples e rápido de executar, em determinadas situações específicas, pode apresentar divergências quando comparados ao procedimento proposto.

A condição não aprovada e submetida a TTPS atendeu plenamente aos critérios de dureza pelo perfil dado pela norma e pelo procedimento proposto.

- Aço ASTM A542 Tipo D com Eletrodo Protótipo

A Figura 119 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A542 Tipo D, soldado com o eletrodo similar protótipo. Foram realizadas medidas de dureza conforme o procedimento recomendado na norma Petrobras N133 (Figura 38).

Figura 119 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com eletrodo protótipo. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.



Fonte: Própria do autor.

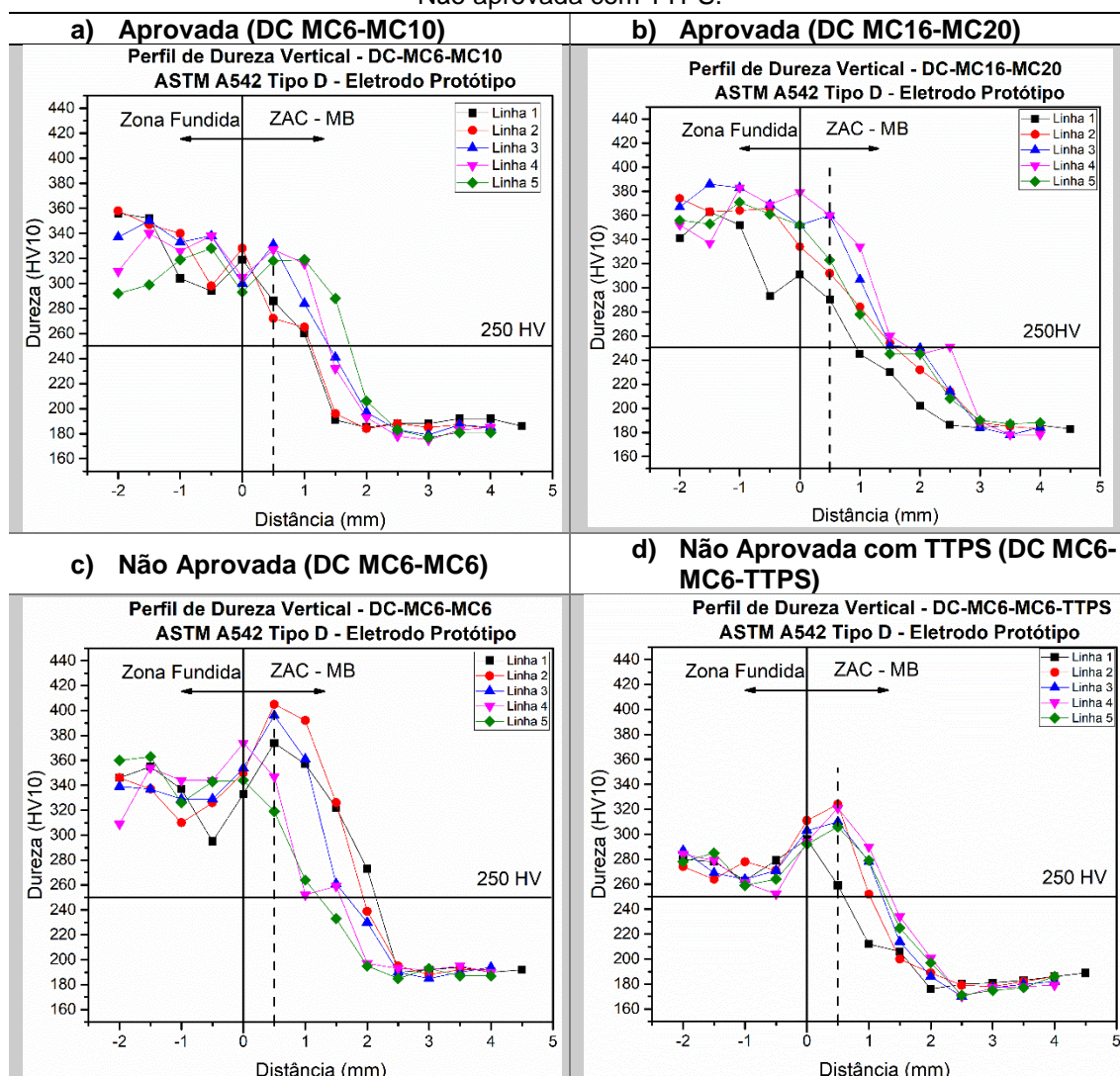
Pelo perfil de dureza da norma Petrobras N133, a condição (DC MC16-MC20) foi a condição que apresentou valores próximos de 250 HV10. A condição (DC MC6-MC10) apresentou valores de dureza elevados.

A condição não aprovada (DC MC6-MC6) apresentou valores elevados de dureza na ZAC e na ZF, atingindo valores de 370 HV10.

Por outro lado, a condição não aprovada submetido ao TTPS (DC MC6-MC6-TTPS) apresentou considerável redução de dureza na ZAC, no entanto os valores de dureza da zona fundida ficaram acima de 250 HV10.

A Figura 120 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A542 Tipo D com eletrodo similar protótipo, medidas conforme o procedimento proposto (Figura 39), que estabelece uma varredura na ZAC da dupla camada.

Figura 120 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com eletrodo protótipo. a) Aprovada ($T_0=250^{\circ}\text{C}$), b) Aprovada ($T_0=350^{\circ}\text{C}$), c) Não aprovada e d) Não aprovada com TTPS.



Fonte: Própria do autor.

De um modo geral, nenhuma condição de soldagem similar do aço ASTM A542 Tipo D atendeu ao critério de dureza estabelecido pelas normas. Os ensaios de dureza indicaram que o TTPS não proporcionou os benefícios significativos (revenimento) à ZAC quando comparado com a condição aprovada nos diagramas de decisão.

Apesar do Eletrodo Protótipo apresentar boas características operacionais, esses valores de dureza elevados na zona fundida podem afetar as propriedades mecânicas, principalmente a tenacidade.

5.3.2.4. *Análise Microestrutural da ZAC nas Soldagens Similares das Duplas Camadas*

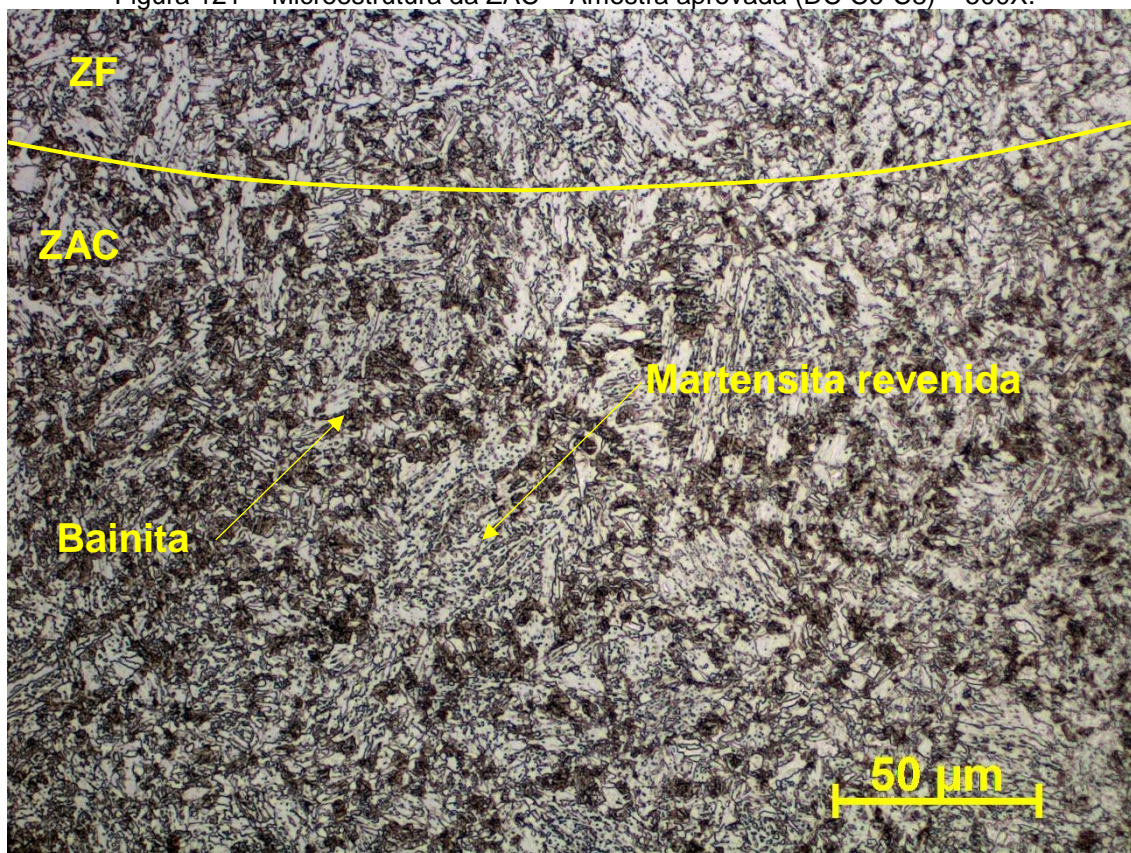
A seguir são apresentados os resultados das microestruturas obtidas nas ZAC's das condições soldadas com os eletrodos similares (AWS ER80S-B2, AWS ER90S-B3 e Eletrodo Protótipo).

Embora a dureza na ZAC seja frequentemente usada como um indicador de susceptibilidade à trinca, a verdadeira susceptibilidade depende das microestruturas presentes na ZAC, ou seja, o tamanho de grão e seus constituintes.

A Figura 121 apresenta microestrutura da ZAC próximo à linha de fusão da amostra aprovada, soldada no aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ER80S-B2 (DC C6-C8) com preaquecimento de 200 °C.

A Figura 122 apresenta microestrutura da ZAC próximo à linha de fusão da amostra aprovada soldada no aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ER80S-B2 (DC C16-C18) com preaquecimento de 300 °C.

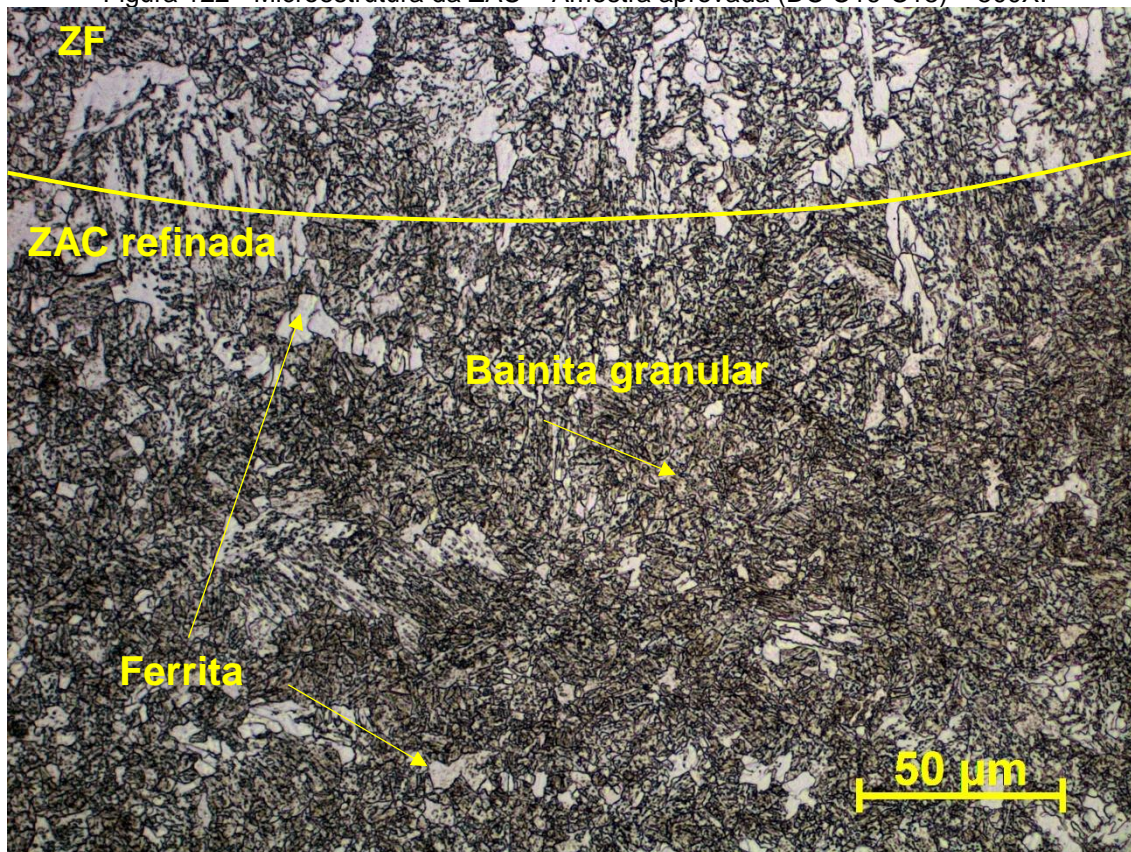
Figura 121 – Microestrutura da ZAC – Amostra aprovada (DC C6-C8) – 500X.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a microestrutura obtida na (Figura 121) por microscopia ótica é predominantemente martensita revenida e aglomerados de bainita.

Figura 122 - Microestrutura da ZAC – Amostra aprovada (DC C16-C18) – 500X.



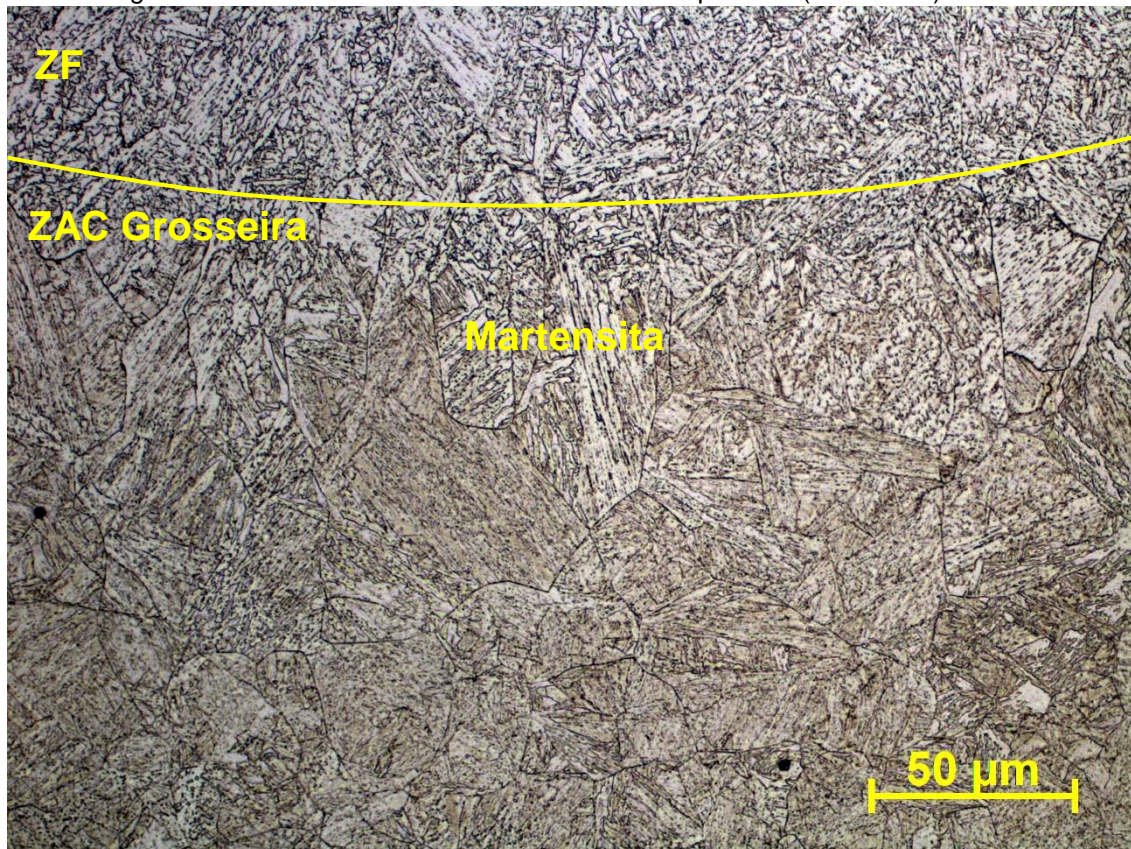
Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a microestrutura obtida na Figura 122 é predominantemente bainita granular e grãos de ferrita poligonais de forma dispersas. Devido a utilização de preaquecimento maior, consequentemente, velocidade de resfriamento menor, foi constatada a presença de grãos de ferrita poligonais.

Como pôde ser observado, os níveis de refinamento encontrados nas ZAC's das amostras soldadas com a TDC-DC foram bastante relevantes. Fica evidente a eficácia da técnica dupla camada na obtenção de microestruturas mais refinadas, conforme indicação dos diagramas de decisão.

A Figura 123 apresenta microestrutura da ZAC próximo à linha de fusão da amostra reprovada do aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ER80S-B2 (DC C6-C6) com preaquecimento de 200 °C,

Figura 123 - Microestrutura da ZAC – Amostra Reprovada (DC C6-C6) – 500X.



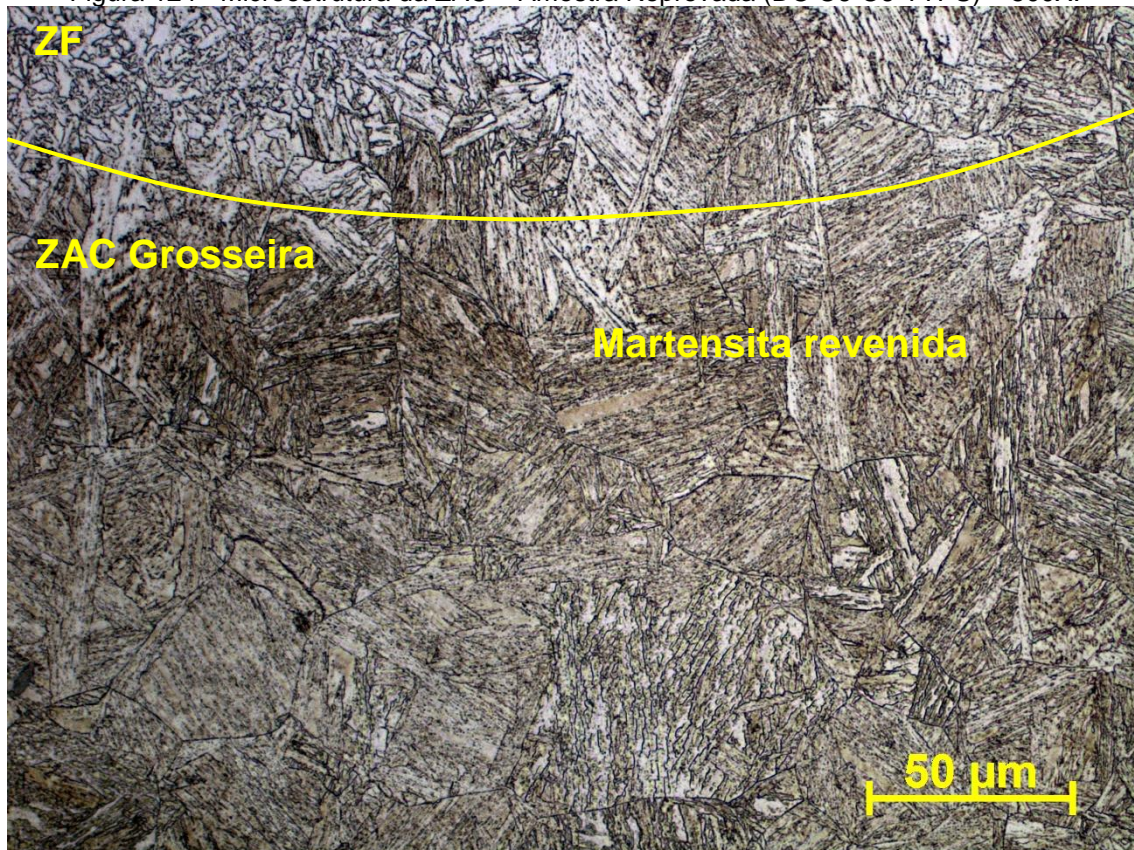
Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a microestrutura obtida na Figura 123 é predominantemente martensita. Esse tipo de microestrutura foi encontrada por Cavalcante, em regiões em que não foi aplicada a técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM A387 Gr11. [42]

A presença da microestrutura martensítica era esperada, uma vez que as condições de aquecimento e resfriamento fora de equilíbrio proporcionadas pela soldagem bem como a presença de carbono e outros elementos (Cr e Mo) na composição química desse aço criam condições para que esta fase se forme, principalmente pela utilização de baixa energia de soldagem na primeira camada (0,8 kJ/mm).

A Figura 124 apresenta microestrutura da ZAC próximo à linha de fusão da amostra submetida ao TTPS do aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ER80S-B2 (DC C6-C6-TTPS) com preaquecimento de 200 °C,

Figura 124 - Microestrutura da ZAC – Amostra Reprovada (DC C6-C6-TTPS) – 500X.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a microestrutura obtida na Figura 123 é predominantemente martensita revenida decorrente do TTPS realizado.

As microestruturas das amostras soldadas do aço ASTM A387 Gr22 e do aço ASTM A542 Tipo D apresentaram as mesmas características microestruturais das amostras soldadas do aço ASTM A387 Gr11. Ou seja, nas amostras aprovadas as microestruturas obtidas foram, predominantemente, bainita granular e pequenas quantidades de ferrita. Na amostra reprovada, a microestrutura foi preponderantemente martensita e na condição com TTPS foi basicamente martensita revenida.

A presença dessas microestruturas mais refinadas são indicativos de que as relações de energia encontradas nos diagramas de decisão (Critério de Microestrutura) foram satisfatórias do ponto de vista de refinamento. Diante disso, apesar da dureza em algumas condições não atingirem os valores mínimos estabelecidos em normas, acredita-se que o refinamento proporcionará um nível aceitável de tenacidade, visto que a substituição de uma microestrutura com granulometria grosseira por uma refinada, em aços ferríticos de baixo e médio carbono, é indicada por diversos autores como uma forma eficaz de aumentar a tenacidade do material.

Dieter [1988], afirma que quanto maior for o tamanho de grão, maiores serão as bandas de deslizamento e maiores as concentrações de tensão. Com maiores concentrações de tensão, microtrincas são induzidas nos contornos de grão causando a fratura por clivagem do material, ou seja, apresentará menor tenacidade.

Como discutido anteriormente, a tenacidade dos aços CrMo e CrMoV soldados depende tanto da dureza da região soldada quanto do tamanho de grão. De uma forma geral, foi verificado que as amostras que apresentaram revenimento decorrente da soldagem com dupla camada, apresentaram também, um excelente nível de refinamento, atingindo o objetivo desejado de melhoria nas propriedades.

5.3.3. Soldagem Dissimilar da TDC-DC – Etapa 3

A seguir são descritos os resultados referentes as soldagens dissimilares da Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada nos aços ASTM A387 Gr 11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D utilizando-se os parâmetros e técnicas conforme condições consideradas aprovadas, não aprovadas e não aprovada com aplicação de TTPS para as soldagens utilizando eletrodos AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347.

5.3.3.1. Aspecto gerais da soldagem – Etapa 3

De um modo geral, em uma avaliação visual, considerando o acabamento superficial, defeitos macroscópicos, respingos e irregularidades, os revestimentos foram satisfatórios para os objetivos do trabalho.

Na soldagem dissimilar foram necessários cuidados especiais com a limpeza dos passes e da peça, afim de evitar qualquer tipo de contaminação, apesar de que, neste trabalho, não foram avaliados os revestimentos produzidos quanto as microestruturas formadas e resistência à corrosão.

No que diz respeito às seções transversais das camadas, pode-se visualizar que a sobreposição de 50% proporcionou reforços das camadas uniformes com poucas ondulações. Destaca-se que o uso do tecimento atingiu o objetivo desejado de amenizar o perfil de dedo nas penetrações dos revestimentos, conforme visto na Figura 125.

Figura 125 – Aspecto da seção transversal da dupla camada.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 126, na Figura 127 e na Figura 128 estão apresentados os revestimentos soldados com a TDC-DC utilizando os eletrodos (AWS ERNiCrMo-3, AWS ER309L e AWS ER347.)

Figura 126 – Dupla camada soldada em metal de base de ASTM A387 Gr11 - AWS ERNiCrMo-3. a) Aprovada (DC-L5-L7) e b) Não aprovada (DC-L5-L5).



Fonte: Própria do autor.

Figura 127 – Dupla camada soldada em metal de base ASTM A387 Gr22 - AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada (DC-D6-D18) e b) Não aprovada (DC-D1-D11).



Fonte: Própria do autor.

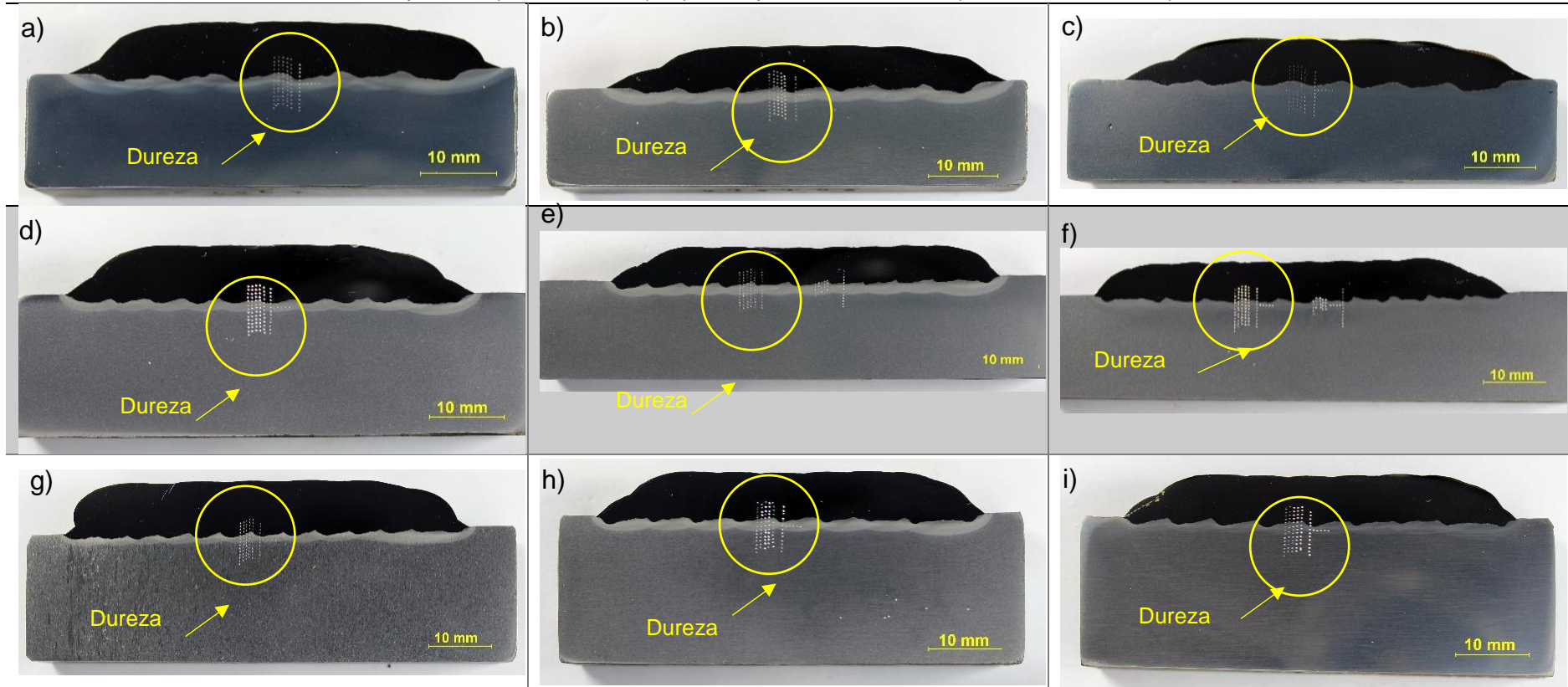
Figura 128 – Dupla camada soldada em metal de base ASTM A542 Tipo D - AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada (DC-DV6-DV20) e b) Não aprovada (DC-DV1-DV11).



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 129 estão apresentadas as macrografias das amostras soldadas com a TDC-DC. Observa-se a uniformidade dos perfis de penetração e dos reforços, decorrente da aplicação de sobreposição de 50% em todas as condições soldadas.

Figura 129 – Soldagem Dissimilar – Macrografias das TDC-DC. a) Aprovada (DC-L5-L7); b) Não aprovada (DC L5-L5); c) Não aprovada + TTPS (DC L5-L5-TTPS); d) Aprovada (DC D6-D18); e) Não aprovada (DC D1-D11); f) Não aprovada com TTPS (DC D1-D11-TTPS); g) Aprovada (DC DV6-DV20); h) Não aprovada (DC DV1-DV11) e i) Não aprovada com TTPS (DC DV1-Dv11-TTPS).



Fonte: Própria do autor.

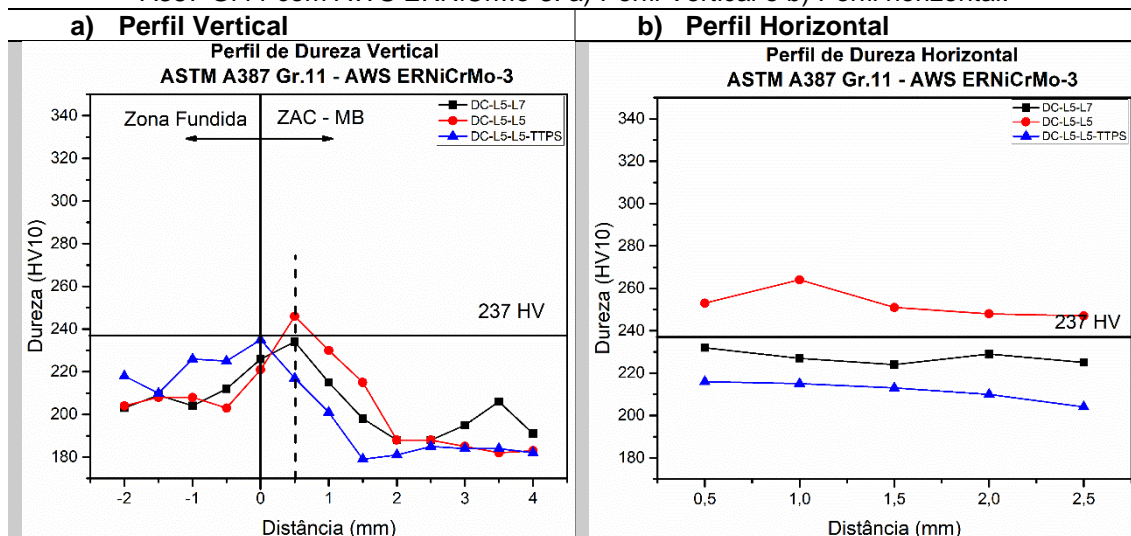
5.3.3.2. Análise de Dureza das Soldas Dissimilares com Dupla Camada – Etapa 3

A seguir são descritos os resultados de dureza das soldagens da Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada nos aços ASTM A387 Gr 11, ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D para as soldagens dissimilares.

- Aço ASTM A387 Gr11 com AWS ERNiCrMo-3

A Figura 130 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A387 Gr11 com eletrodo dissimilar AWS ERNiCrMo-3. As durezas foram medidas conforme o procedimento recomendado na norma Petrobras N133 (Figura 38), que estabelece medidas em duas direções; no perfil vertical a linha atravessa a zona fundida, passando pela interface e regiões da ZAC e alcançando o metal base, e no segundo um perfil horizontal com distância de 0,5 mm próximo à linha de fusão, conforme Figura 39.

Figura 130 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ERNiCrMo-3. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.



Fonte: Própria do autor.

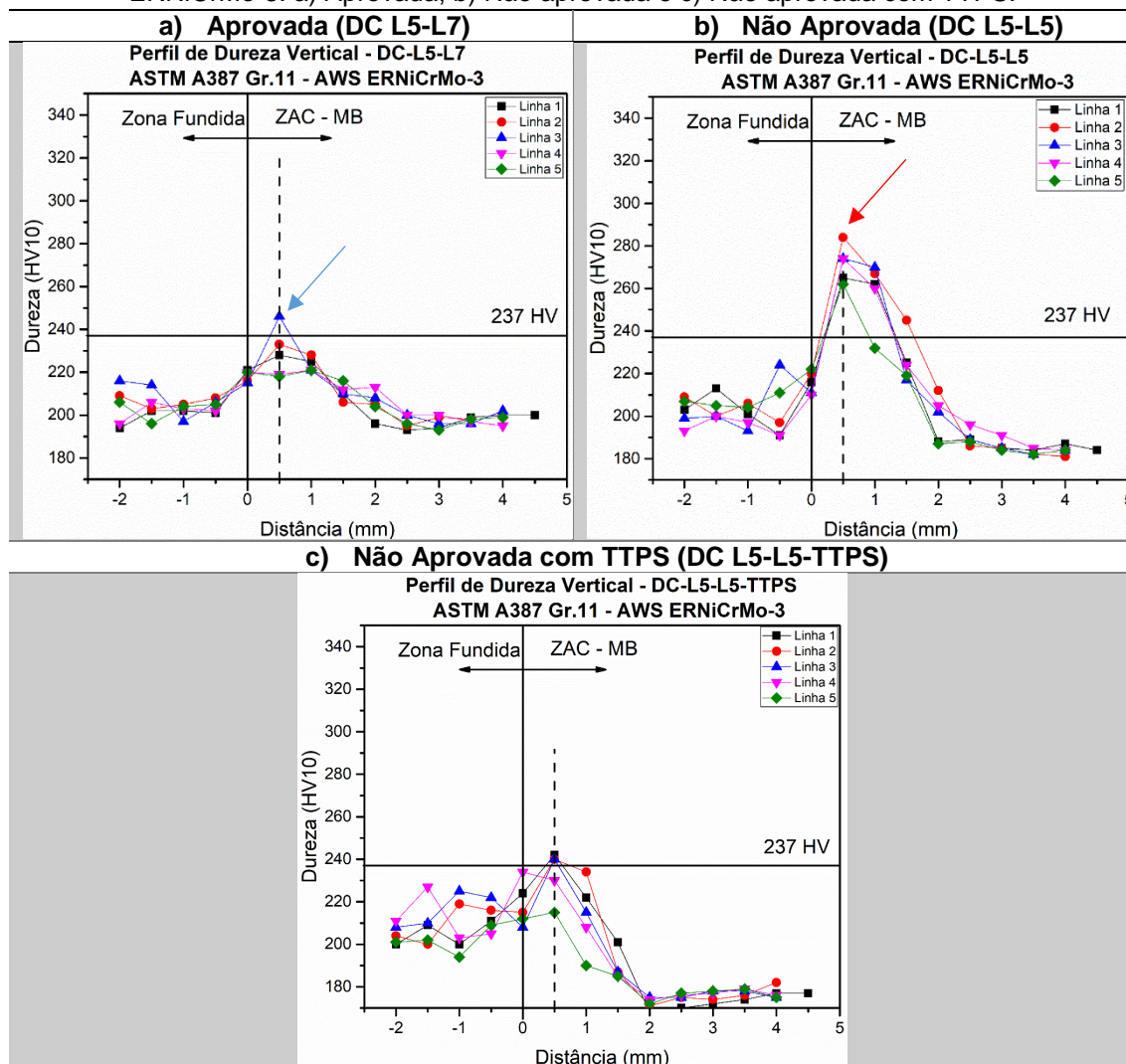
A norma Petrobras N133 estabelece o limite de dureza de 237HV na ZF e na ZAC. Por esse critério, a condição DC L5-L7 (linha preta da Figura 130a e Figura 130b), selecionada para aplicação da dupla camada, foi a que atendeu ao critério de dureza estabelecido. Esse resultado aponta positivamente para aplicação da técnica da dupla camada com o intuito de promover redução de

dureza do material ASTM A387 Gr11, quando submetido às soldagens de revestimento.

A condição não aprovada e submetida ao TTPS atendeu ao critério de dureza estabelecido pela norma Petrobras N133, ou seja, o TTPS foi eficaz no revenimento da amostra soldada sem aplicação da TDC (linha azul da Figura 130b).

A Figura 131 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas dissimilares (aprovada, reprovada e reprovada com TTPS) para o aço ASTM A387 Gr11 com eletrodo AWS ERNiCrMo-3. As durezas foram medidas conforme o procedimento proposto (Figura 39), que estabelece uma varredura na ZAC da dupla camada.

Figura 131 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr11 com AWS ERNiCrMo-3. a) Aprovada, b) Não aprovada e c) Não aprovada com TTPS.



Fonte: Própria do autor.

Pelo perfil de dureza proposto, observa-se que a dureza da ZAC da condição soldada aprovada (DC L5-L7) apresentou apenas um ponto de dureza acima de 237 HV₁₀ (seta azul na Figura 131a) em todo mapeamento realizado, apresentando-se bastante semelhante ao perfil de dureza da amostra submetida ao TTPS.

O perfil de dureza proposto da condição não aprovada DC L5-L5 apresenta dureza acima de 237 HV₁₀ (seta vermelha Figura 131b). Os resultados reforçam novamente que o mapeamento da dureza em várias linhas horizontais e verticais, conforme Procedimento Proposto neste trabalho, permite uma melhor compreensão e análise das alterações microestruturais e de dureza decorrentes da soldagem. A análise da Figura 131 possibilita identificar que o

procedimento não aprovado induz a durezas maiores que o identificado pela norma Petrobras N133.

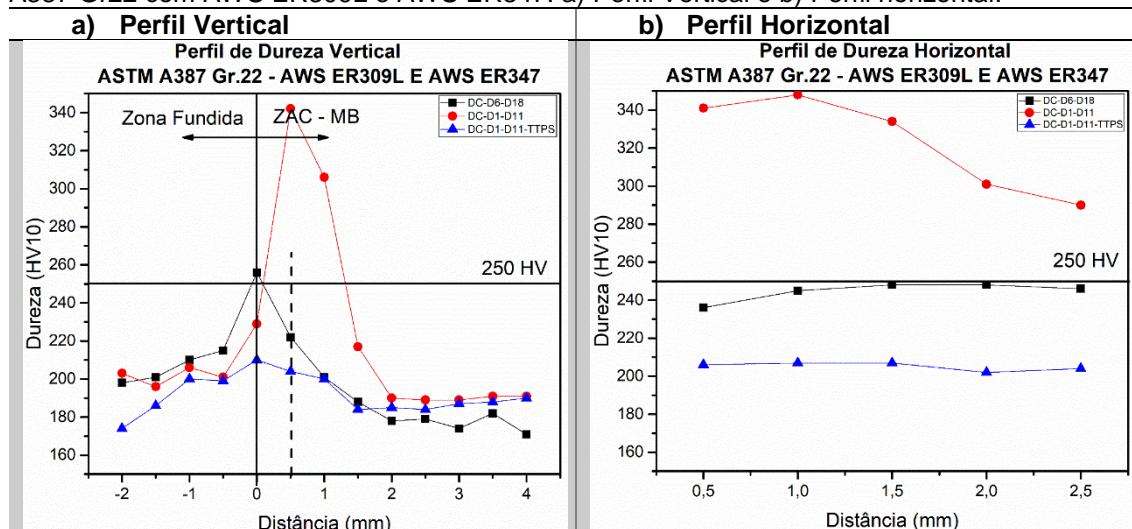
Todavia, cabe ressaltar que a norma Petrobras N133 é utilizada para ajustar procedimentos diversos de soldagem considerando as inúmeras aplicações existentes nesta empresa e que, de uma forma geral, deve ser simples e garantir uma alta confiabilidade dos procedimentos de soldagem.

A proposta de um mapeamento de dureza mais refinado proposto neste trabalho tem o objetivo de entendimento mais geral dos fenômenos e das consequências envolvidas nas soldagens dos aços CrMo e CrMoV. Não significa, porém, que os resultados propostos não possam ser utilizados para eventuais ajustes nas normas existentes.

- Aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER309L e AWS ER347

A Figura 132 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas (Aprovada, reprovada e com TTPS) para o aço ASTM A387 Gr22 com os eletrodos dissimilares AWS ER309L e AWS ER347, foram medidas conforme o procedimento recomendado na norma Petrobras N133 (Figura 38).

Figura 132 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER309L e AWS ER347. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.



Fonte: Própria do autor.

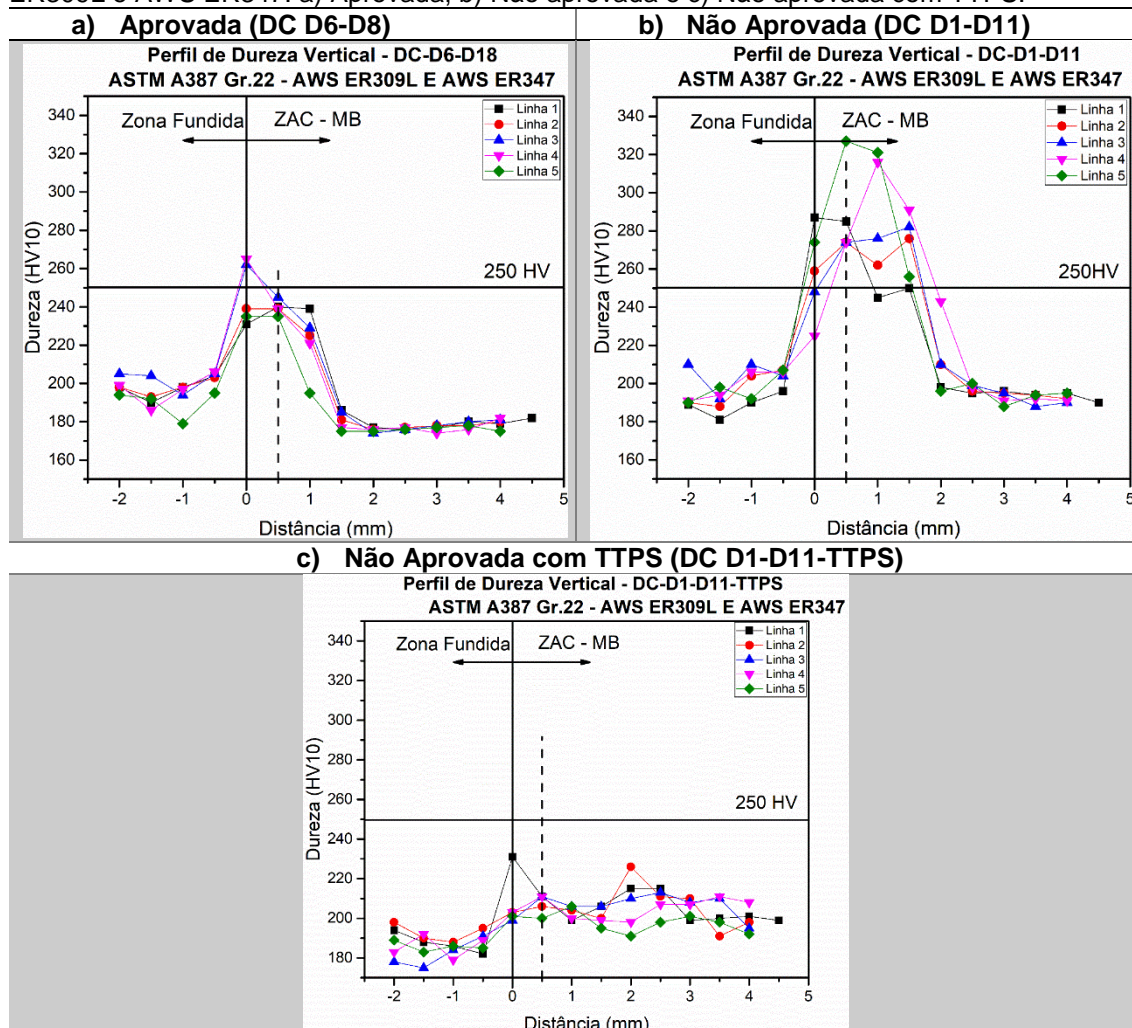
A norma Petrobras N133 estabelece o limite de dureza de 250HV na zona fundida e termicamente afetada pelo calor. Por esse critério, a condição aprovada (linha preta da Figura 132a), selecionada para aplicação da dupla-camada, foi a que melhor respondeu aos critérios de microdureza e microestrutura da técnica de deposição controlada.

O resultado se repetiu nos perfis de dureza horizontais apresentados na Figura 132b, onde estão plotadas as medições de dureza realizadas na linha horizontal. Todas as medidas foram realizadas na ZAC, conforme estabelecido pela norma Petrobras N133. Esse resultado demonstra que é possível realizar com sucesso a aplicação da técnica da dupla-camada com o intuito de promover redução de dureza do material ASTM A387 Gr22, quando submetido às soldagens de revestimento.

A condição não aprovada não atendeu aos requisitos de dureza máxima na ZAC, segundo os critérios da norma N133, de fato, era esperado este resultado. Nesta condição a zona dura da primeira camada não sofreu qualquer alteração causada pela zona macia da segunda camada, resultado retirado do diagrama de decisão e comprovado pelos valores de dureza elevados.

A Figura 133 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A387 Gr22 com eletrodos dissimilares AWS ER309L e AWS ER347, foram medidas conforme o procedimento proposto (Figura 39), que estabelece uma varredura na ZAC da dupla camada.

Figura 133 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A387 Gr22 com AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada, b) Não aprovada e c) Não aprovada com TTPS.



De maneira análoga à condição de soldagem anterior, a amostra aprovada apresentou dureza na ZAC abaixo do máximo permitido (250 HV10) pela norma Petrobras N133, pelos dois procedimentos de medidas adotados.

A amostra não aprovada apresentou dureza elevada na ZAC acima do máximo permitido (250 HV10) pela norma Petrobras N133, pelos dois procedimentos de medidas adotados.

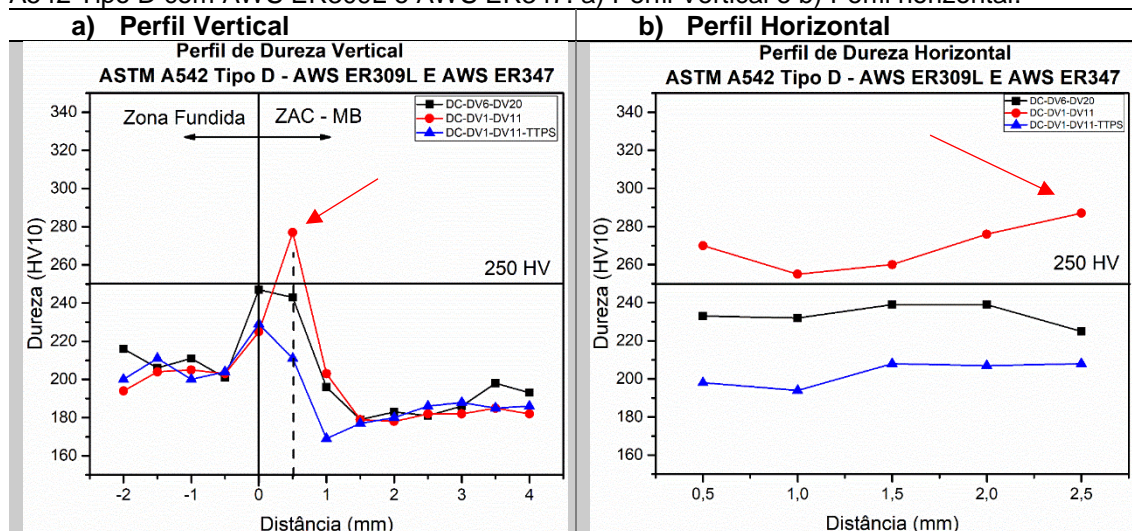
De maneira análoga a condição de soldagem anterior com TTPS, a amostra com TTPS apresentou dureza na ZAC abaixo do máximo permitido pela norma Petrobras N133, pelos dois procedimentos de medidas adotados. Ou

seja, o tratamento foi suficiente para reaver a microestrutura, provavelmente martensita, a níveis de dureza aceitáveis.

- Aço ASTM A542 Tipo D com AWS ER309L e AWS ER347

A Figura 134 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A542 Tipo D com os eletrodos dissimilares AWS ER309L e AWS ER347. As durezas foram medidas conforme o procedimento recomendado na norma Petrobras N133 (Figura 38).

Figura 134 – Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com AWS ER309L e AWS ER347. a) Perfil Vertical e b) Perfil horizontal.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 134a e Figura 134b são apresentados os resultados de dureza do perfil vertical e do perfil horizontal, respectivamente. Todas as medidas foram realizadas na ZAC, conforme estabelecido pela norma Petrobras N133.

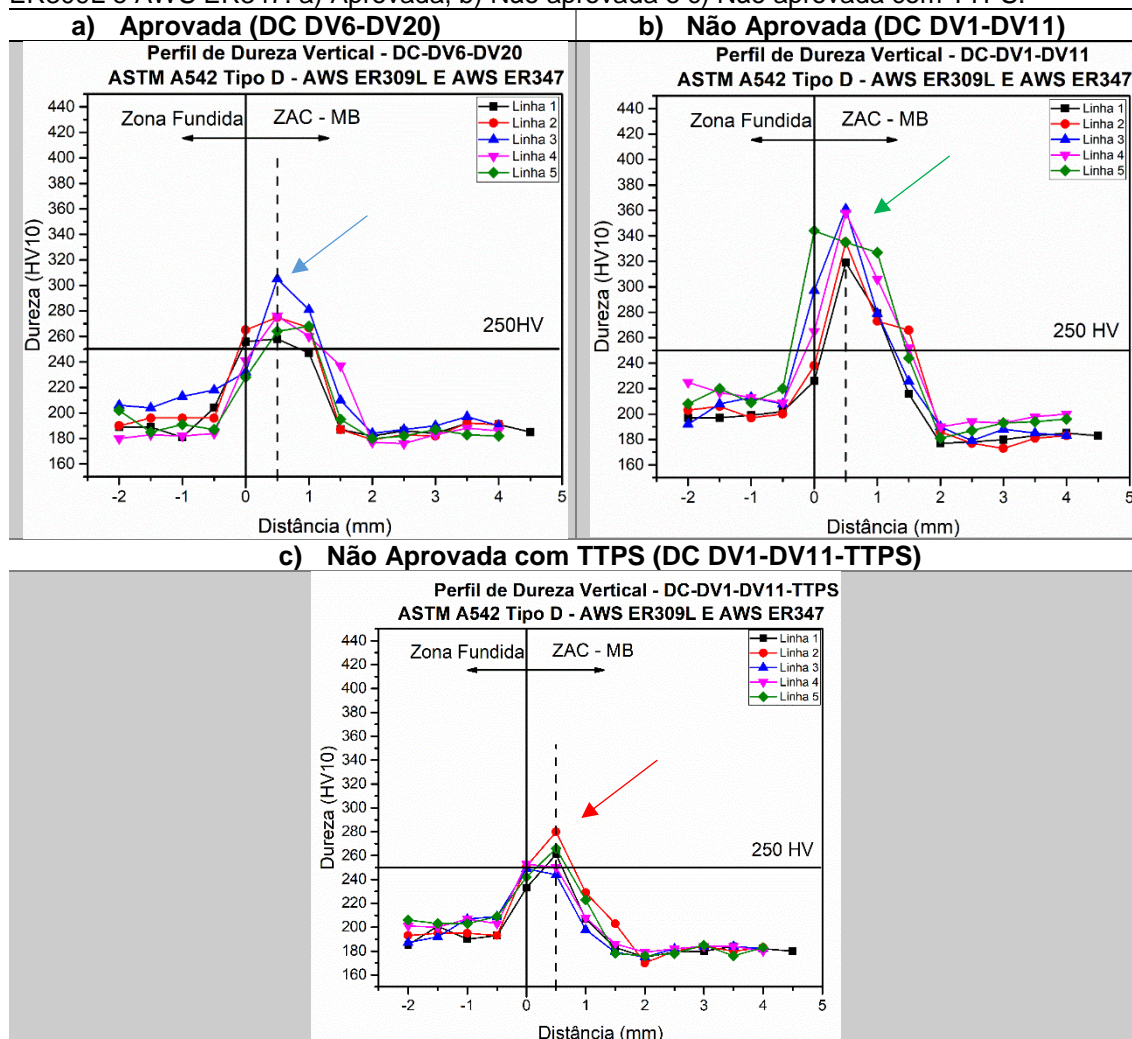
A norma Petrobras N133 estabelece o limite de dureza de 250HV na ZF e ZAC do aço ASTM A542 Tipo D. Por esse critério, a condição de soldagem aprovada (DC DV6-DV20) apresentou dureza na ZAC abaixo do máximo permitido (perfil preto). Pelos procedimentos de medidas adotados pela norma Petrobras N133, este é um resultado bastante satisfatório devido o aço ASTM A542 Tipo D apresentar maior temperabilidade do que os demais aços estudados. Esse resultado indica que a aplicação da técnica da dupla camada

com o intuito de promover redução de dureza do material ASTM A542 Tipo D, quando submetido às soldagens de revestimento.

A condição reprovada (DC DV1-DV11) não atendeu aos requisitos de dureza máxima (seta vermelha) na ZAC pela norma Petrobras N133, de fato, era esperado este resultado.

A Figura 135 apresenta os perfis de dureza das condições soldadas para o aço ASTM A542 Tipo D com eletrodos dissimilares AWS ER309L e AWS ER347. As durezas foram medidas conforme o procedimento proposto (Figura 39), que estabelece uma varredura na ZAC da dupla camada.

Figura 135 - Perfil de dureza proposto para as TDC-DC do aço ASTM A542 Tipo D com AWS ER309L e AWS ER347. a) Aprovada, b) Não aprovada e c) Não aprovada com TTPS.



Fonte: Própria do autor.

Pelos perfis de dureza realizados pelo Procedimento Proposto (Figura 135), é possível observar que a condição de dupla camada aprovada (DC DV6-DV20) os pontos de dureza da ZAC na região entre passes apresentam valores de dureza acima do máximo permitido pela norma Petrobras N133. Esta metodologia tende a ser mais conservadora, pelo fato das impressões seguirem à linha de fusão. Foi constatado valores de dureza de 305 HV10 (seta azul na Figura 135a) em regiões entre passes onde o revenimento não foi suficiente para amaciar a dureza a níveis exigidos pela norma. Entretanto, quando comparada com a condição não aprovada, os valores de dureza são mais elevados, de até 360 HV10 (seta verde na Figura 135b) e por maiores distâncias da linha de fusão.

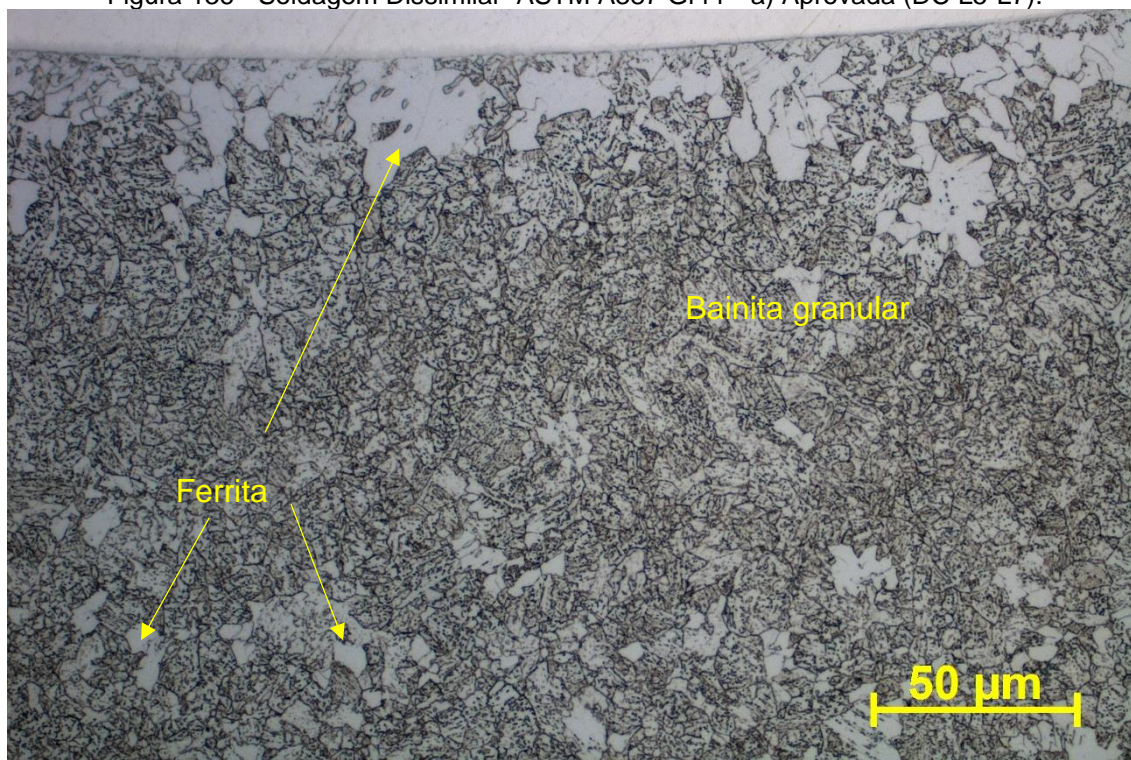
Comparando a Figura 135b com a Figura 135c, observa-se a redução de dureza da amostra submetida ao TTPS bastante eficiente, entretanto, o perfil de dureza na condição com TTPS apresentou valor de 280 HV10 (seta vermelha).

5.3.3.3. *Análise Microestrutural da ZAC nas Soldagens Dissimilares da Técnica Deposição Controlada com Duplas Camadas – Etapa 3*

A Figura 136 apresenta as microestruturas da amostra aprovada soldada no aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ERNiCrMo-3, observa-se que a microestrutura predominante é bainita granular e há presença de grãos de ferrita poligonal. Os grãos de ferrita poligonais são decorrentes de dois fenômenos distintos: o primeiro é da descarbonetação próximo à linha de fusão e o segundo associado ao ciclo de resfriamento da soldagem.

O fenômeno da descarbonetação pode estar relacionado a um processo de migração de carbono, no qual o mesmo presente no metal de base (%C \approx 0,16), por efeito difusional, migra pela interface para a zona fundida, liga de níquel ou aço inoxidável, ambos com baixo carbono. Esse processo de descarbonetação é decorrente dos sucessivos ciclos térmicos e/ou da utilização do TTPS.

Figura 136 - Soldagem Dissimilar–ASTM A387 Gr11 - a) Aprovada (DC L5-L7).

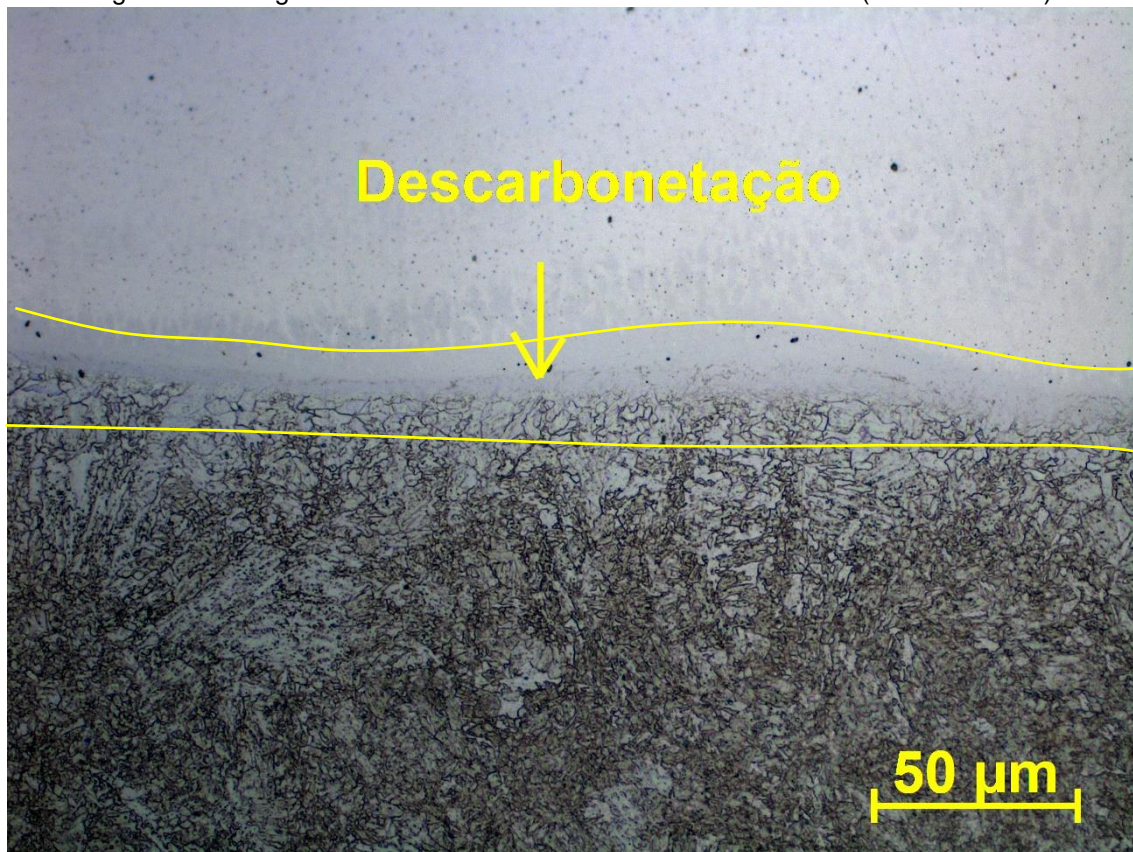


Segundo Kejelin, Buschinelli e Pope, essa região empobrecida de carbono favorece a formação de fase ferrítica. A ausência de carbono também compromete a formação de carbonetos estáveis, que se precipitam na matriz, facilitando assim o crescimento de grãos nessas regiões durante o ciclo de térmico. [67]

Em geral, em todos revestimentos com dupla camada dissimilar foram encontradas regiões descarbonetadas próximas a linha de fusão vista na Figura 137. Gittos, indica essa região descarbonetada como responsável pelo baixo nível de energia absorvida durante o impacto em juntas dissimilares. As extensões dessas regiões dependem de tempo de exposição e temperatura. [30]

Olden, se refere às regiões descarbonetadas como regiões de baixa dureza e baixa energia absorvida durante o impacto. De forma que, o carbono que foi expulso dessa região se difunde para regiões adjacentes, podendo levar à saturação de carbono e precipitação de carbonetos que podem causar um endurecimento e fragilização no aço inoxidável. [68]

Figura 137 - Região descarbonetada da amostra DC DV6-DV20. (aumento 500X).

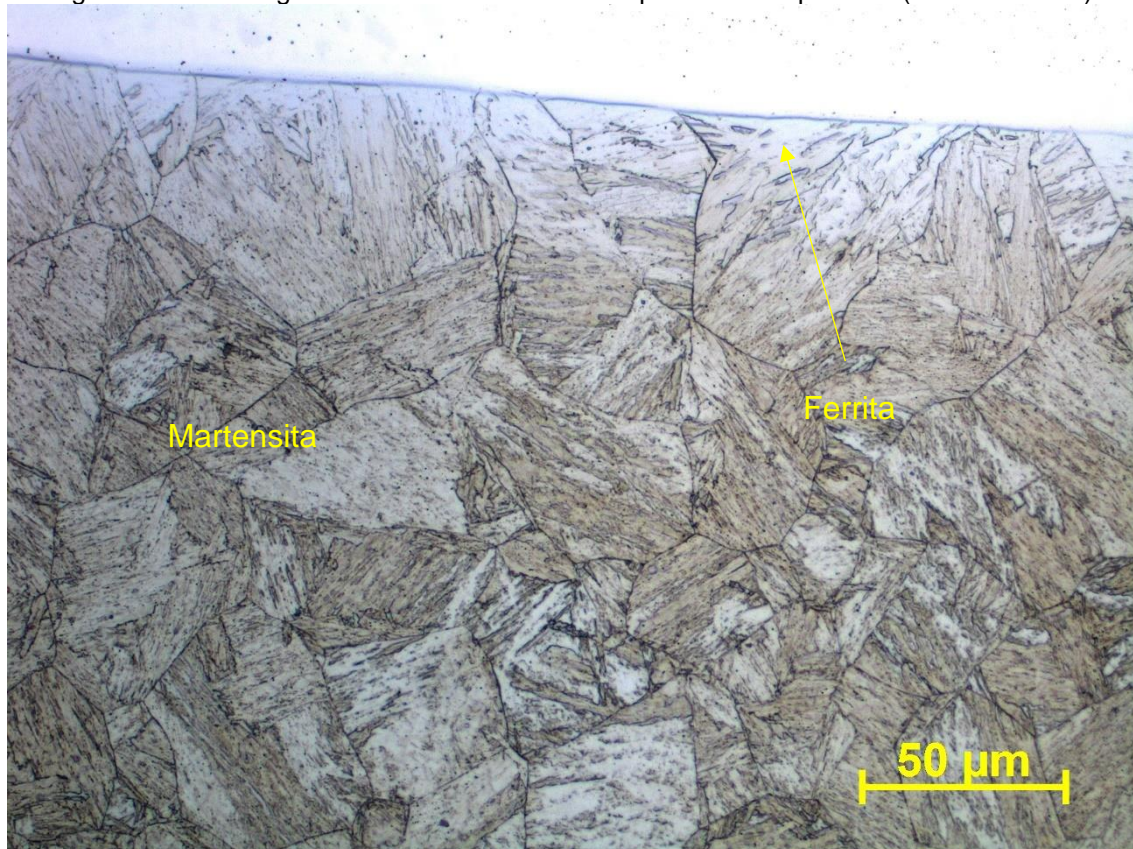


Fonte: Própria do autor.

De modo geral, observa-se na Figura 136 e na Figura 137 que as condições aprovadas apresentaram um elevado grau de refinamento de grão na ZAC gerado pela correta sobreposição dos ciclos térmicos, conforme indicação nos diagramas de decisão.

Na Figura 138 está apresentada a microestrutura típica das amostras não aprovadas, em geral, a microestrutura foi bastante grosseira com predominância de martensita, fato que caracterizou valores de dureza elevados. Na interface foi identificado alguns grãos de ferrita decorrente da descarbonetação.

Figura 138 - Soldagem Dissimilar–ASTM A542 Tipo D - Não aprovada (DC DV1-DV11).



Fonte: Própria do autor.

As amostras não aprovadas (Figura 138) apresentaram ZAC com microestrutura extremamente grosseira e com dureza alta, fato que era esperado, afinal a condição foi escolhida no diagrama de decisão com propósito de não apresentar refinamento na microestrutura da ZAC.

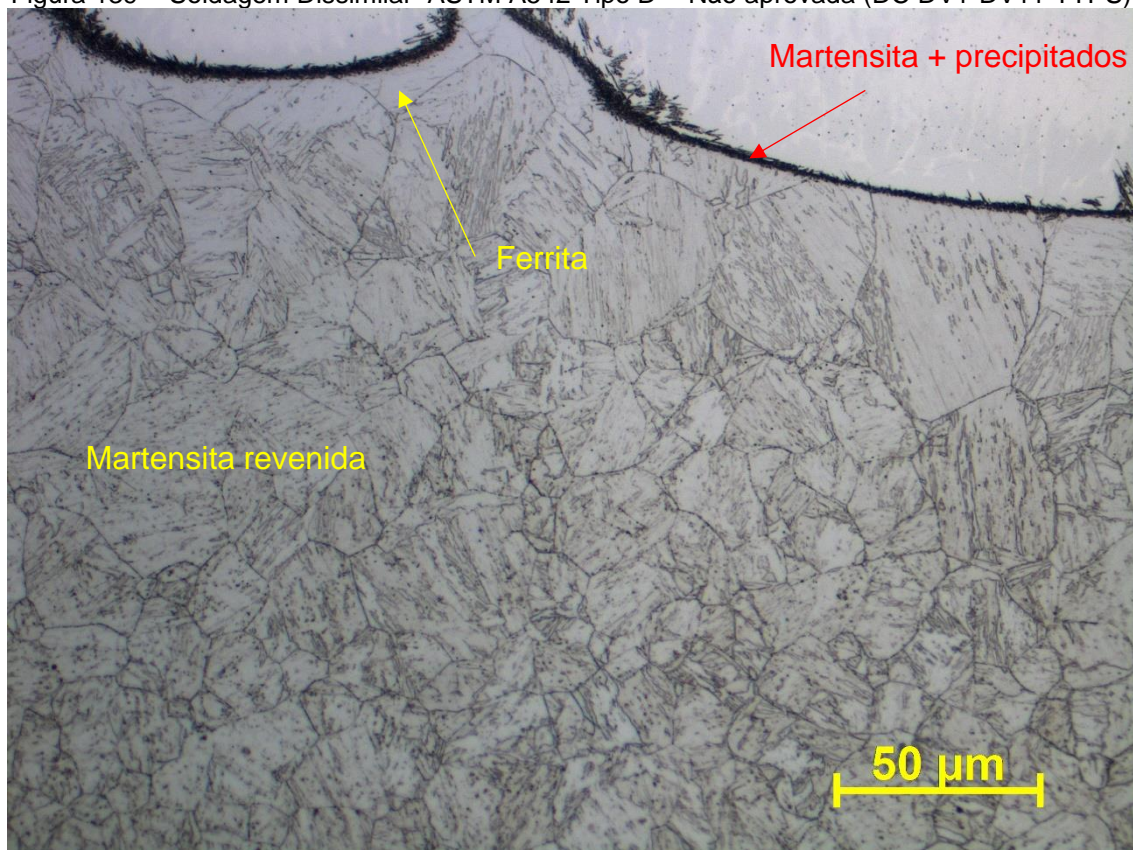
Pelos diagramas de decisão, essas condições (não aprovadas) o critério de microestrutura, por meio do Afastamento 3, foi bastante negativo, implicando que a energia de soldagem da segunda camada não foi capaz de proporcionar alteração microestrutural na ZAC da primeira camada.

Na Figura 139 está apresentada a microestrutura típica das amostras com TTPS. A microestrutura foi predominantemente martensita revenida e alguns grão de ferrita na interface decorrente da descarbonetação.

Foi identificado nos revestimentos com TTPS (Figura 139), uma fina faixa escura na interface da solda. Oliveira, analisando esse tipo de região no MEV encontrou que essa faixa é composta por martensita e precipitados decorrentes do TTPS. [41]

Alguns autores, afirmam que essas regiões podem ser pontos preferenciais para a nucleação de trincas, em função da elevada dureza encontrada nas mesmas. [30; 41]

Figura 139 - Soldagem Dissimilar–ASTM A542 Tipo D - Não aprovada (DC DV1-DV11-TTPS).



Fonte: Própria do autor.

5.4 Etapa 4 - Estudos preliminares para a soldagem de reparo

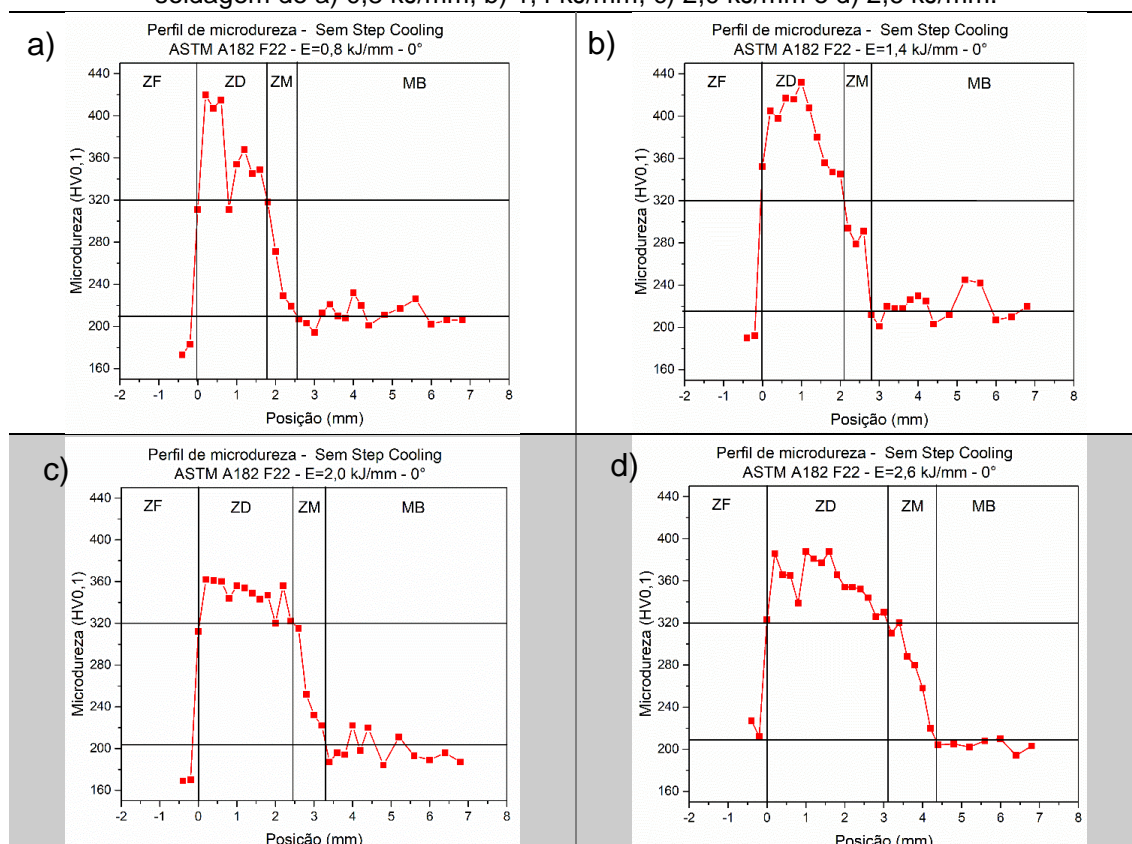
A seguir, são apresentados os resultados do estudo do envelhecimento (Parte 1) e a qualificação do eletrodo protótipo (Parte 2).

5.4.1. Parte 1 – Efeito da soldagem em chapas envelhecidas por “Step cooling” – Etapa 4

A seguir são apresentados os resultados referentes ao estudo do efeito da soldagem em chapa sem envelhecimento e em chapa envelhecida pelo tratamento de “step cooling”, para verificar os eventuais efeitos do envelhecimento sobre as características microestruturais das soldas.

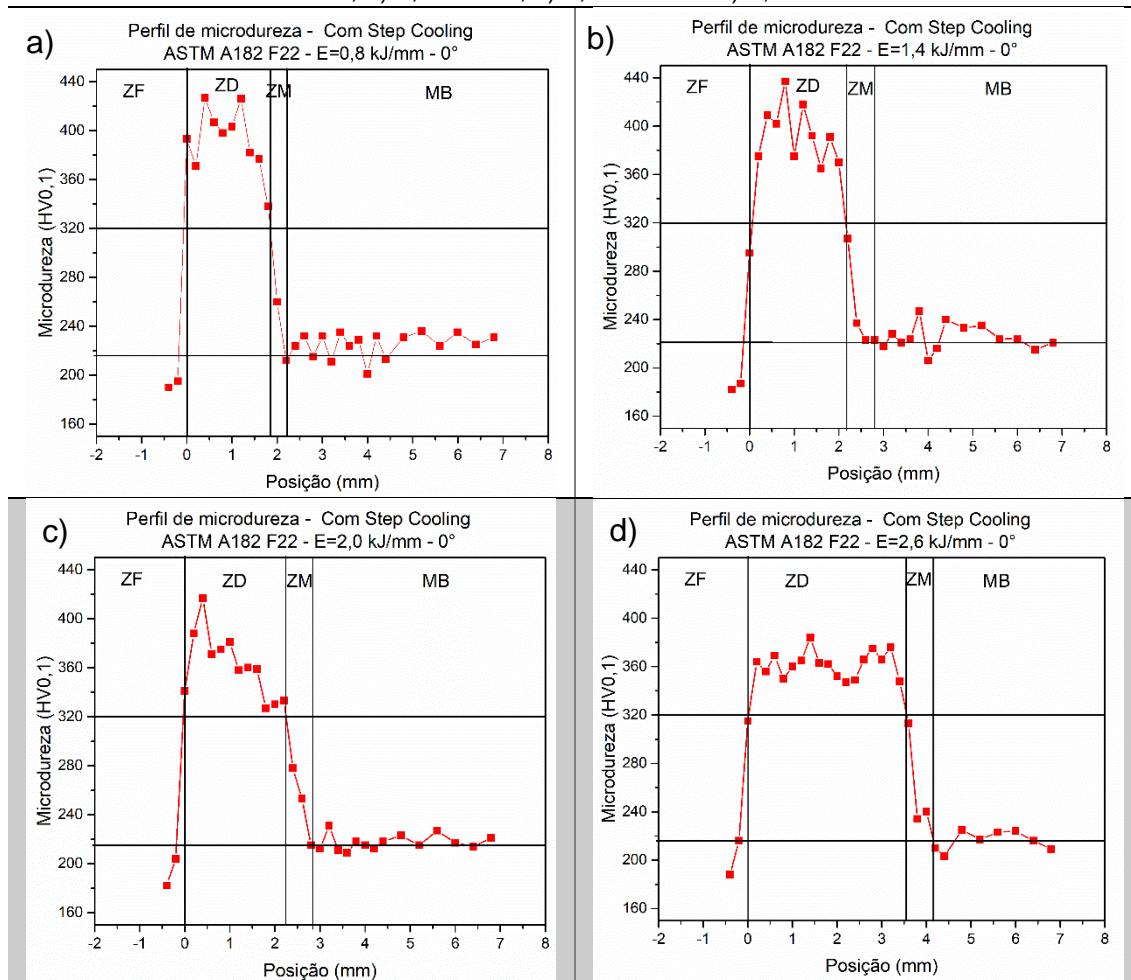
A Figura 140 e a Figura 141 mostram exemplos de perfis de microdureza da ZAC para seções do cordão nas condições normalizado e revenido sem e com “Step Cooling”, respectivamente, para energias de soldagem de 0,8 kJ/mm, 1,4 kJ/mm, 2,0 kJ/mm e 2,6 kJ/mm.

Figura 140 - Perfis de microdureza da ZAC para amostras sem “step cooling” para energias de soldagem de a) 0,8 kJ/mm, b) 1,4 kJ/mm, c) 2,0 kJ/mm e d) 2,6 kJ/mm.



Fonte: Própria do autor.

Figura 141 - Perfis de microdureza da ZAC para seções do meio do cordão na condição normalizado e revenido com tratamento de "Step Cooling" para energias de soldagem de a) 0,8 kJ/mm, b) 1,4 kJ/mm, c) 2,0 kJ/mm e d) 2,6 kJ/mm.



Fonte: Própria do autor.

De posse das extensões das zonas duras e macias obtidas dos perfis de microdureza para as condições normalizado e revenido com e sem "Step Cooling", foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para avaliar o efeito da condição do material nas extensões das zonas duras e macias da ZAC. A Tabela 38 mostra os valores das zonas duras e macias obtidas para cada ensaio.

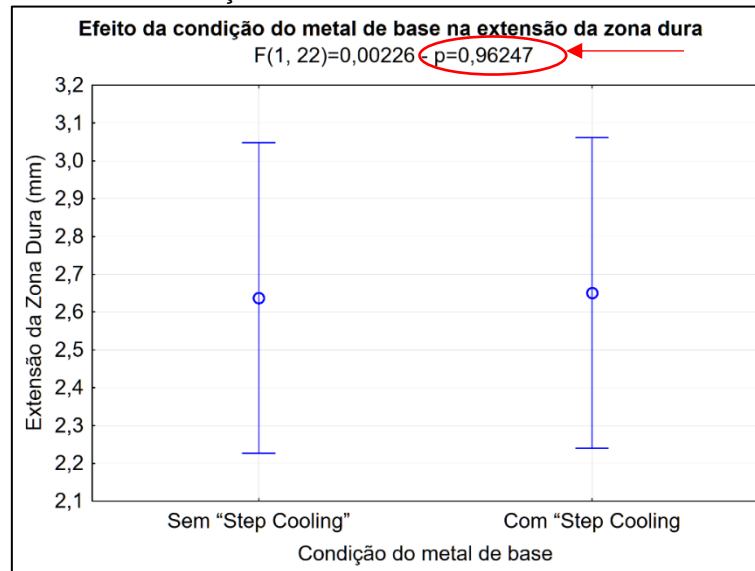
Tabela 38 - Valores das extensões duras e macias da ZAC para cada ensaio do planejamento experimental.

Energia de soldagem (kJ/mm)	Condição do material	Extensão da Zona Dura (mm)	Extensão da Zona Macia (mm)
0,8	Sem "Step Cooling"	2,07	0,31
0,8	Sem "Step Cooling"	1,80	0,62
0,8	Sem "Step Cooling"	2,06	0,41
0,8	Com "Step Cooling"	2,10	0,23
0,8	Com "Step Cooling"	1,97	0,26
0,8	Com "Step Cooling"	2,08	0,42
1,4	Sem "Step Cooling"	2,23	0,43
1,4	Sem "Step Cooling"	2,49	0,53
1,4	Sem "Step Cooling"	2,52	0,46
1,4	Com "Step Cooling"	2,42	0,24
1,4	Com "Step Cooling"	2,29	0,36
1,4	Com "Step Cooling"	2,34	0,48
2,0	Sem "Step Cooling"	2,89	0,59
2,0	Sem "Step Cooling"	2,96	0,49
2,0	Sem "Step Cooling"	2,65	0,82
2,0	Com "Step Cooling"	2,32	0,44
2,0	Com "Step Cooling"	2,06	0,93
2,0	Com "Step Cooling"	2,84	0,64
2,6	Sem "Step Cooling"	2,96	0,59
2,6	Sem "Step Cooling"	3,72	0,81
2,6	Sem "Step Cooling"	3,30	0,97
2,6	Com "Step Cooling"	3,22	0,94
2,6	Com "Step Cooling"	3,53	0,73
2,6	Com "Step Cooling"	4,64	1,22

Fonte: Própria do autor.

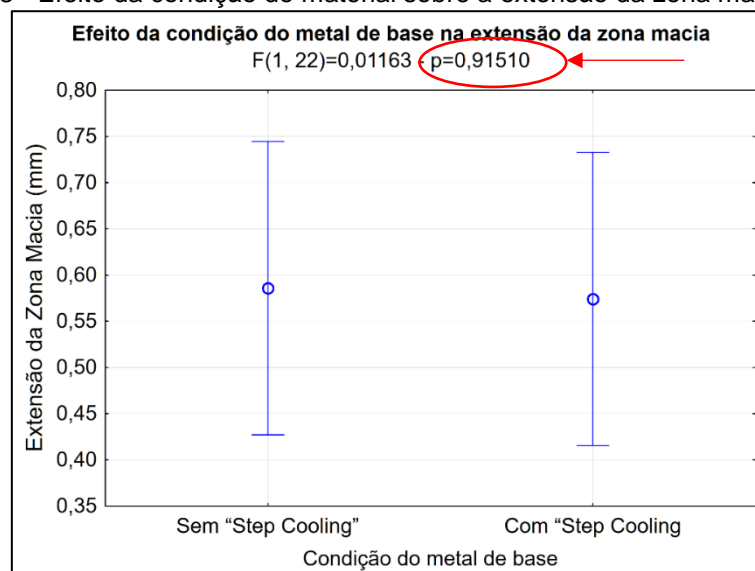
Os gráficos da Figura 142 e Figura 143 apresentam a análise de variância realizada nas extensões das ZAC's macias e duras dos materiais que foram tratados e o dos que não foram submetidos ao "Step Cooling".

Figura 142 - Efeito da condição do material sobre a extensão da zona dura da ZAC.



Fonte: Própria do autor.

Figura 143 - Efeito da condição do material sobre a extensão da zona macia da ZAC.



Fonte: Própria do autor.

A análise de variância realizada nas extensões de ZACs, medidas para os materiais soldados na condição tratada com "Step Cooling" e sem o

tratamento, mostrou que a condição do material não afetou as extensões das zonas duras e macias, como pode ser visto na Figura 142 e Figura 143.

A Figura 144 mostra um exemplo de uma montagem de fotos da ZAC utilizada para as medições das extensões das ZACs GG e GF. A Tabela 39 apresenta as extensões das ZAC's GG e GF para cada ensaio do planejamento experimental.

Figura 144 - Montagem da ZAC do aço ASTM A182 F22 normalizado e revenido com "Step Cooling" soldado com energia de 2,6 kJ/mm.



Fonte: Própria do autor.

Tabela 39 - Valores das extensões das ZAC's GG e GF para cada ensaio.

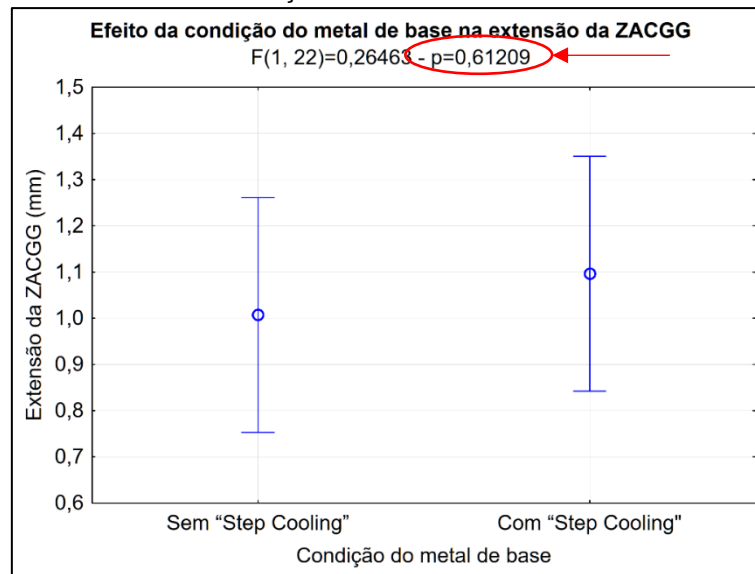
Energia de soldagem (kJ/mm)	Condição do material	Extensão da ZACGG (mm)	Extensão da ZACGF (mm)
0,8	Sem "Step Cooling"	0,85	0,89
0,8	Sem "Step Cooling"	0,71	1,13
0,8	Sem "Step Cooling"	0,91	1,05
0,8	Com "Step Cooling"	0,82	0,97
0,8	Com "Step Cooling"	0,78	0,91
0,8	Com "Step Cooling"	0,76	0,97
1,4	Sem "Step Cooling"	0,78	1,09
1,4	Sem "Step Cooling"	0,86	1,27
1,4	Sem "Step Cooling"	0,76	1,19
1,4	Com "Step Cooling"	0,95	1,08
1,4	Com "Step Cooling"	0,88	0,89

1,4	Com "Step Cooling"	0,82	1,11
2,0	Sem "Step Cooling"	1,01	1,39
2,0	Sem "Step Cooling"	1,18	1,35
2,0	Sem "Step Cooling"	0,89	1,50
2,0	Com "Step Cooling"	0,82	1,18
2,0	Com "Step Cooling"	0,97	1,16
2,0	Com "Step Cooling"	0,96	1,52
2,6	Sem "Step Cooling"	0,98	1,51
2,6	Sem "Step Cooling"	1,67	1,83
2,6	Sem "Step Cooling"	1,49	1,45
2,6	Com "Step Cooling"	1,43	1,56
2,6	Com "Step Cooling"	1,37	1,94
2,6	Com "Step Cooling"	2,60	2,16

Fonte: Própria do autor.

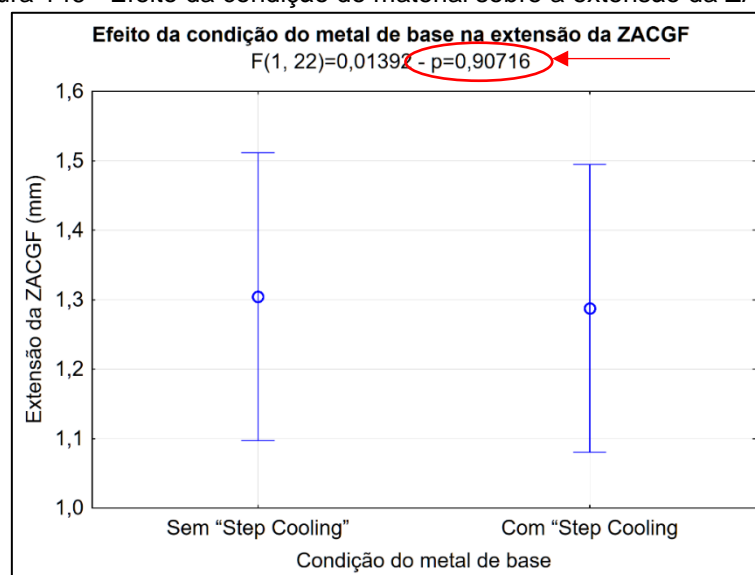
De posse dos valores medidos para ZAC GG e ZAC GF, foi realizada a análise de variância (Figura 145 e Figura 146) que mostrou que a condição do material não influenciou as extensões das ZAC's GG e GF, para um nível de significância de 5%.

Figura 145 - Efeito da condição do material sobre a extensão da ZACGG.



Fonte: Própria do autor.

Figura 146 - Efeito da condição do material sobre a extensão da ZACGF.



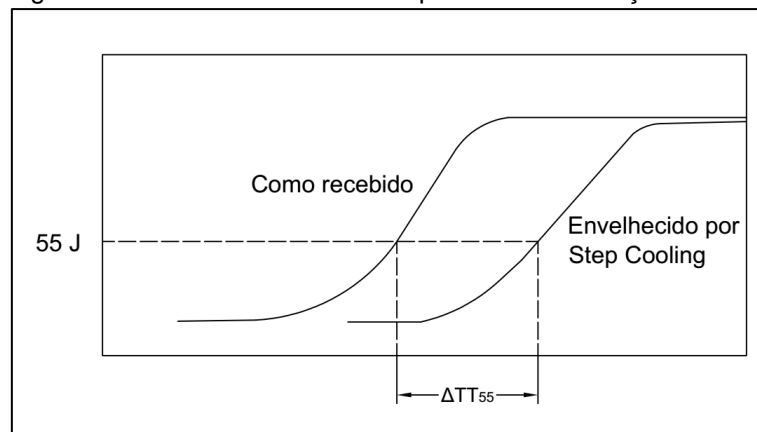
Fonte: Própria do autor.

O efeito real do envelhecimento não foi avaliado, pois dependerá de análises de tenacidade do material nas duas condições (envelhecida e não envelhecida). O fato da condição de envelhecimento do material não afetar nem as extensões das zonas duras e macias da ZAC, nem as extensões das ZAC's GG e GF, indica que o ciclo térmico imposto ao material pelo processo de soldagem foi capaz de produzir o mesmo nível de austenitização (tamanho de grão e solubilização de carbonetos) e resfriar a ZAC, independentemente da

condição do material, ou seja, do tratamento térmico. Acarretando em ZAC's com perfis de microestruturas e microdurezas semelhantes.

Estes resultados indicam que o “*step cooling*” não interfere no procedimento de soldagem TDC-DC. Todavia, o envelhecimento pelo tratamento de “*step cooling*” pode afetar as propriedades mecânicas dos aços CrMo e CrMoV. Uma destas propriedades é a tenacidade, uma vez que pode ocorrer um aumento da temperatura de transição dúctil/frágil, conforme desenho esquemático da Figura 147. [27; 32; 69]

Figura 147 - Deslocamento na temperatura de transição em 55J.



Fonte: Adaptado de [27; 32; 69] .

5.4.2. Parte 2 – Avaliação de Soldagem de Qualificação do Eletrodo Protótipo – Etapa 4

Para avaliação da soldagem de qualificação do Eletrodo Protótipo foi realizada a soldagem de uma junta de topo, com espessura de 15 mm. Na Figura 23 está apresentada a junta soldada. Foram aplicados 40 cordões de solda. Todos os cordões foram realizados com os parâmetros listados na Tabela 27. Vale ressaltar que esta soldagem foi de geração de corpos de prova para ensaios mecânicos, ou seja, não foi aplicada TDC-DC.

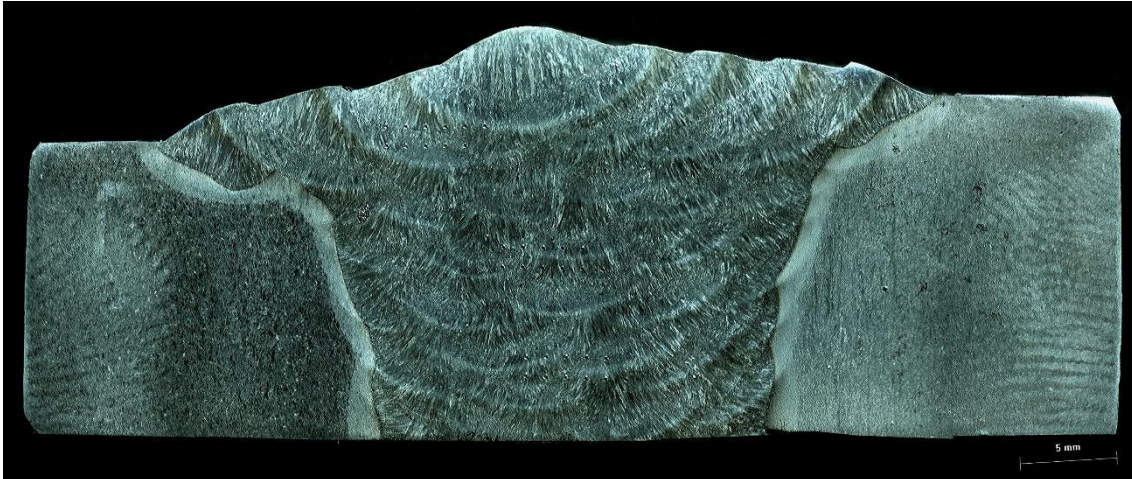
Figura 148 - Junta soldada.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 149 mostra a macrografia da junta na condição de como soldada, onde pode-se observar o número de passes, os perfis dos cordões e também que não ocorreram defeitos macroscópicos na junta.

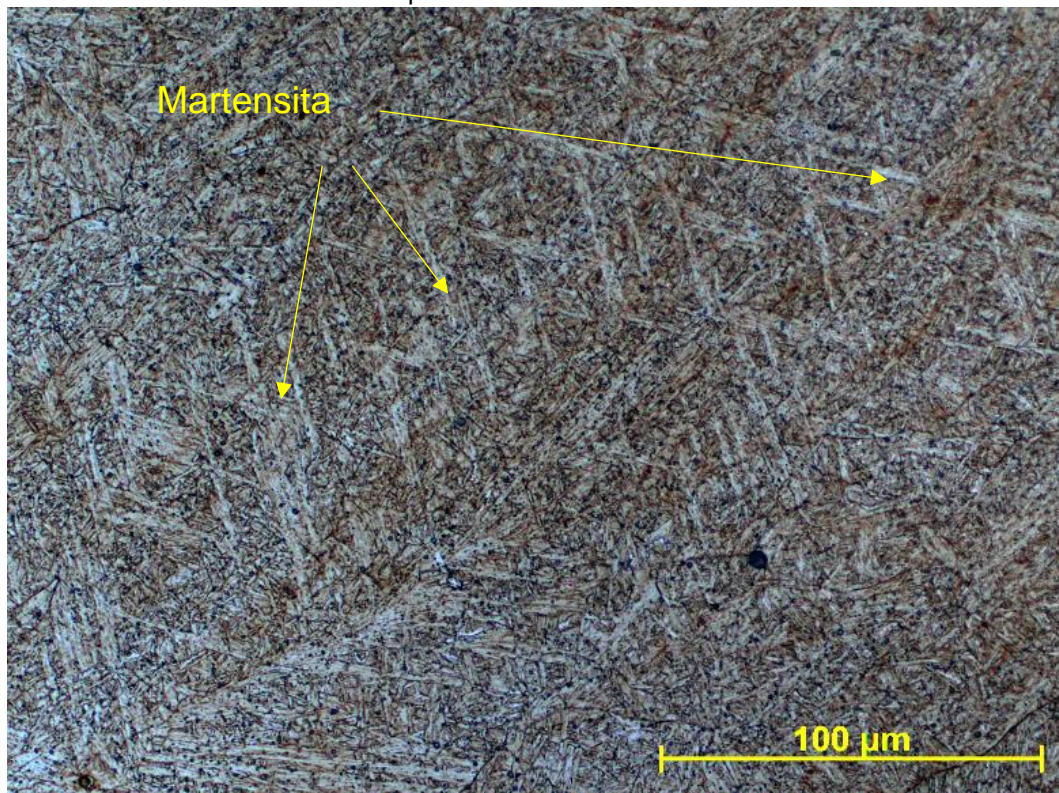
Figura 149 - Macrografia da junta na condição como soldada.



Fonte: Própria do autor.

A microestrutura do material na condição como soldado apresentou de uma maneira geral uma grande quantidade de microestrutura martensítica, como pode ser visto na Figura 150.

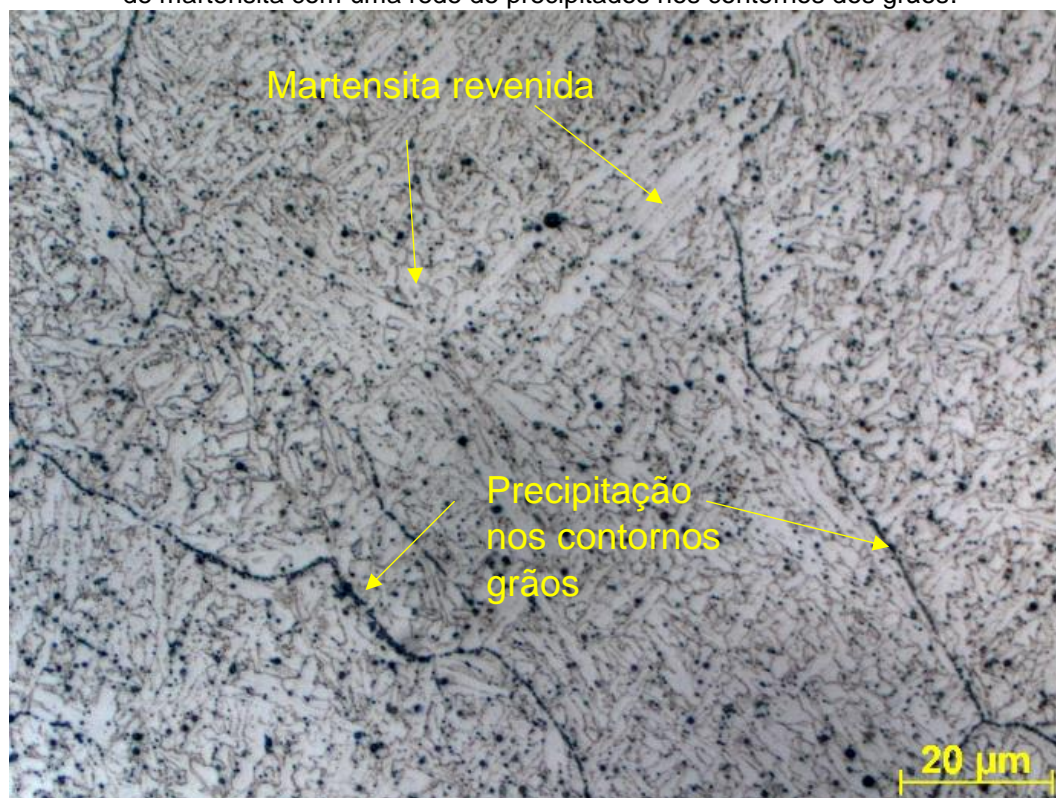
Figura 150 - Microestrutura da zona fundida na condição como soldada. De uma maneira geral observa-se a predominância de martensita 500X.



Fonte: Própria do autor.

O TTPS, além de reverter a martensita, produziu uma fina precipitação nos contornos dos grãos mais intensa do que na condição como soldado, como pode ser visto na Figura 151.

Figura 151 - Microestrutura da zona fundida na condição com TTPS constituída basicamente de martensita com uma rede de precipitados nos contornos dos grãos.



Fonte: Própria do autor.

5.4.3. Microdureza e Dureza - Eletrodo Protótipo – Etapa 4

A Tabela 40 mostra os valores de dureza Vickers da amostra de zona fundida na condição como soldado. As medidas foram realizadas de forma aleatória na região superior, central e inferior da junta. Em geral, os valores estão compatíveis com a microestrutura martensítica apresentada no metal de solda, no entanto, superior ao estabelecido pela norma API 934-A que é 250 HV10. A Tabela 41 mostra os valores de dureza Vickers do material com TTPS. Observa-se a eficácia do TTPS no sentido da redução da dureza para valores aceitáveis conforme a normas API RP934A e a Petrobras N133.

Tabela 40 - Dureza Vickers da zona fundida na condição como soldado.

Ponto	Dureza (HV10)	Dureza (HV10)	Dureza (HV10)	Média
1	338	353	344	342 ± 17 HV10
2	335	300	324	
3	356	344	338	
4	350	350	347	
5	335	332	356	
6	282	359	350	
7	330	344	344	
8	350	341	360	
9	335	347	344	
10	372	359	332	

Fonte: Própria do autor.

Tabela 41 - Dureza Vickers da zona fundida na condição com TTPS.

Ponto	Dureza (HV10)	Dureza (HV10)	Dureza (HV10)	Média
1	214	225	221	216 ± 5 HV10
2	217	213	223	
3	216	213	215	
4	213	214	217	
5	211	210	215	
6	220	220	220	
7	217	213	210	
8	215	211	217	
9	214	218	223	
10	211	215	228	

Fonte: Própria do autor.

5.4.4. Ensaio Charpy-V - Eletrodo Protótipo – Etapa 4

A Tabela 42 apresenta os valores de energia absorvida a -30C° dos corpos de prova nas condições como soldado e com TTPS. Observa-se que nas duas condições o material apresentou um comportamento extremamente frágil, não atendendo os critérios das normas Petrobras N-133, API 934-A e I-ET-5000.00-0000-500-PPC-001 REV. D, cujo critério de aprovação exige que o material tenha uma energia absorvida média de, no mínimo, 55 J e valores individuais de, no mínimo, 47 J.

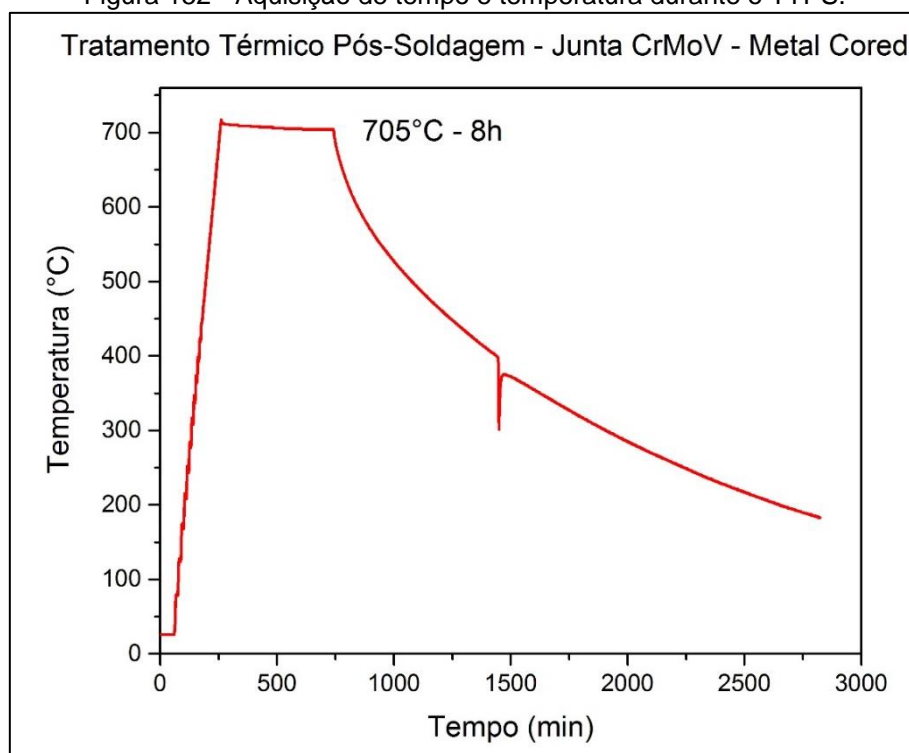
Tabela 42 - Energia absorvida.

Condição	Energia Absorvida (J)	
	Individual	Média
Como soldado	4,3	4,1
Como soldado	4,3	
Como soldado	3,6	
Com TTPS	5,8	9,3
Com TTPS	17,7	
Com TTPS	4,3	

Fonte: Própria do autor.

Na Figura 152 está apresentado o gráfico de aquisição de tempo e temperatura durante o TTPS, conforme a norma API RP-934A. A queda brusca de temperatura registrada na Figura 152 corresponde à retirada dos corpos de prova.

Figura 152 - Aquisição de tempo e temperatura durante o TTPS.

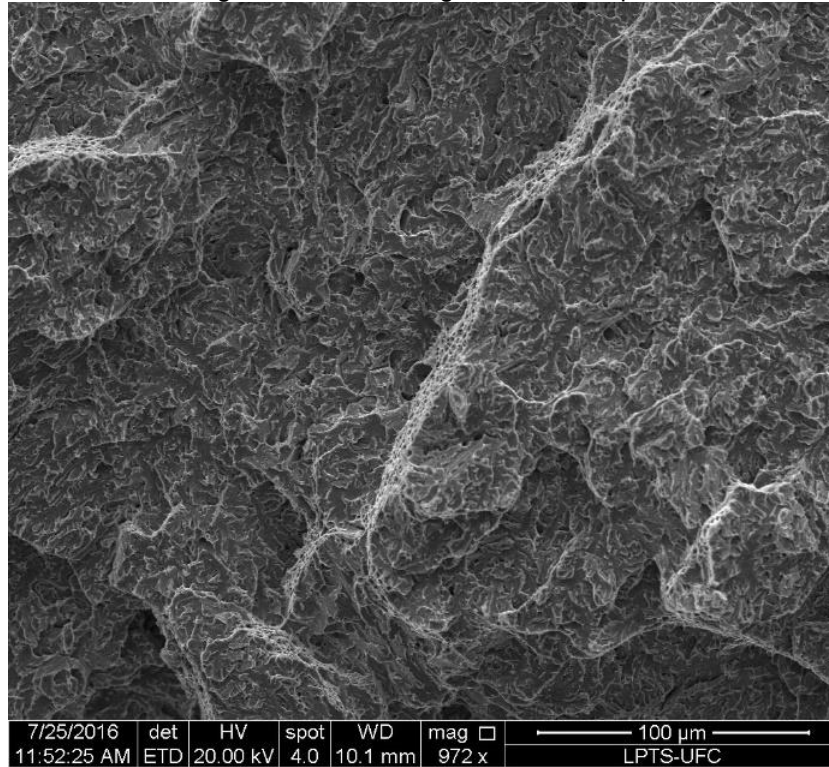


Fonte: Própria do autor.

Na condição como soldado, o material absorveu apenas 4,1 J de média. Esta baixa tenacidade já era esperada, uma vez que o material possui uma alta temperabilidade, produzindo martensita com facilidade. A Figura 153 e

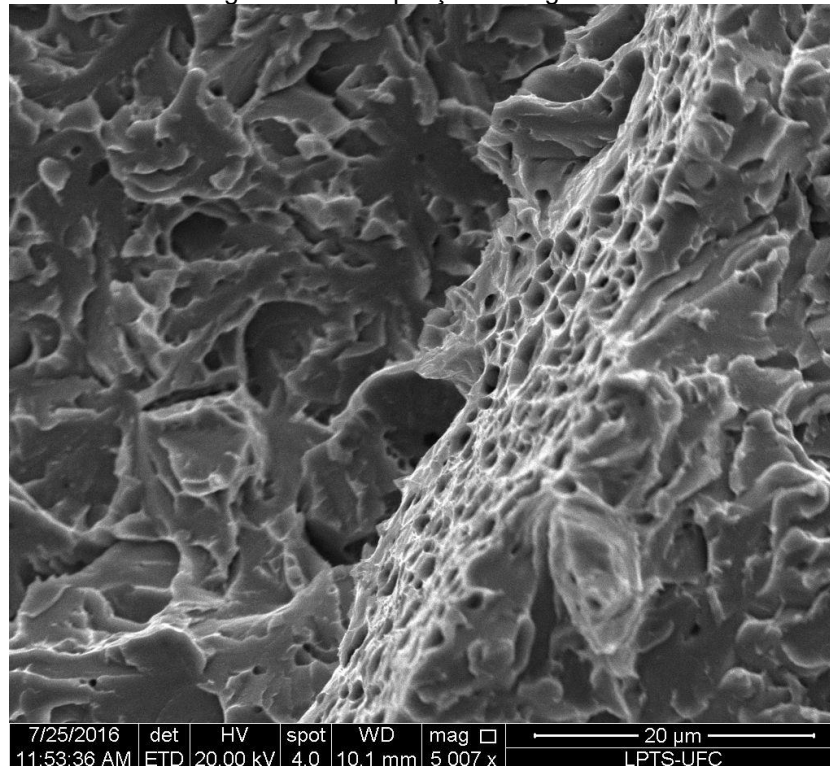
a Figura 154 mostram o aspecto frágil da fratura com a predominância de facetas de clivagem, mas contendo regiões com “dimples”.

Figura 153 - Aspecto frágil da fratura do material como soldado. Observa-se facetas de clivagem, bem como regiões com “dimples”.



Fonte: Própria do autor.

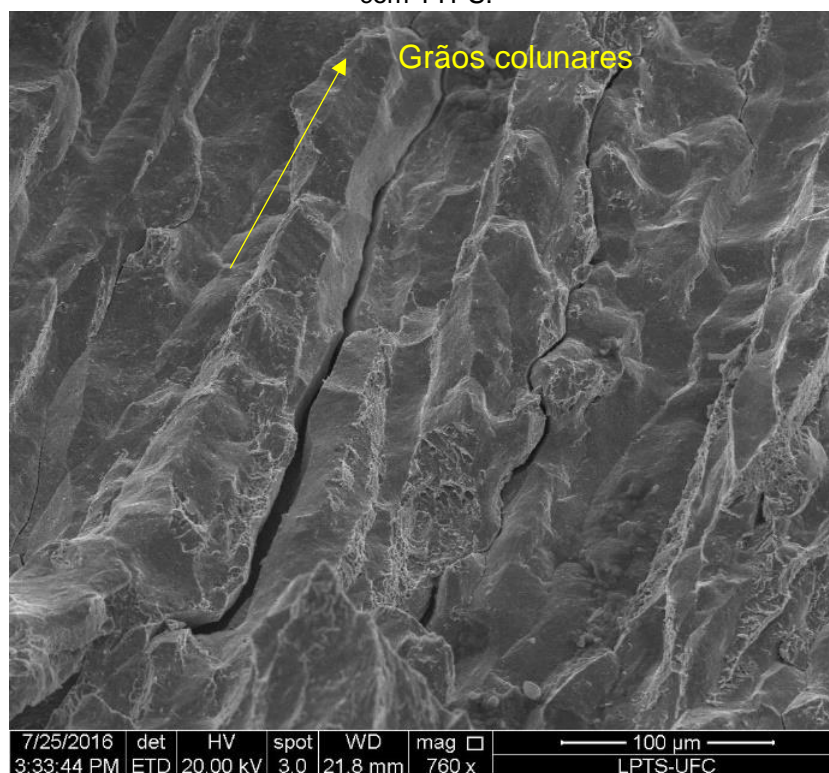
Figura 154 - Ampliação da Figura 153



Fonte: Própria do autor.

Na condição com TTPS, esperava-se uma tenacidade mais elevada em função do revenimento da martensita, entretanto esta expectativa não foi confirmada pelo ensaio Charpy onde a energia absorvida média foi de apenas 9,3 J. O tipo da fratura variou de intergranular para transgranular dependendo da região da zona fundida. Nas regiões de grãos colunares o tipo de fratura foi intergranular com a presença de “dimples” em algumas faces dos grãos. (Figura 155 e Figura 156). Os ‘dimples” nas faces de grãos numa fratura intergranular, normalmente estão associados a ocorrência de uma fina precipitação durante o TTPS, o que notadamente fragiliza o material. Também na Figura 157 foram observadas precipitações microscópicas nas superfícies dos grãos.

Figura 155 - Aspecto da fratura intergranular de uma região de grãos colunares do material com TTPS.



Fonte: Própria do autor.

Figura 156 - Outra região da fratura do material com TTPS. Fratura intergranular com "dimples" nas superfícies de alguns grãos.

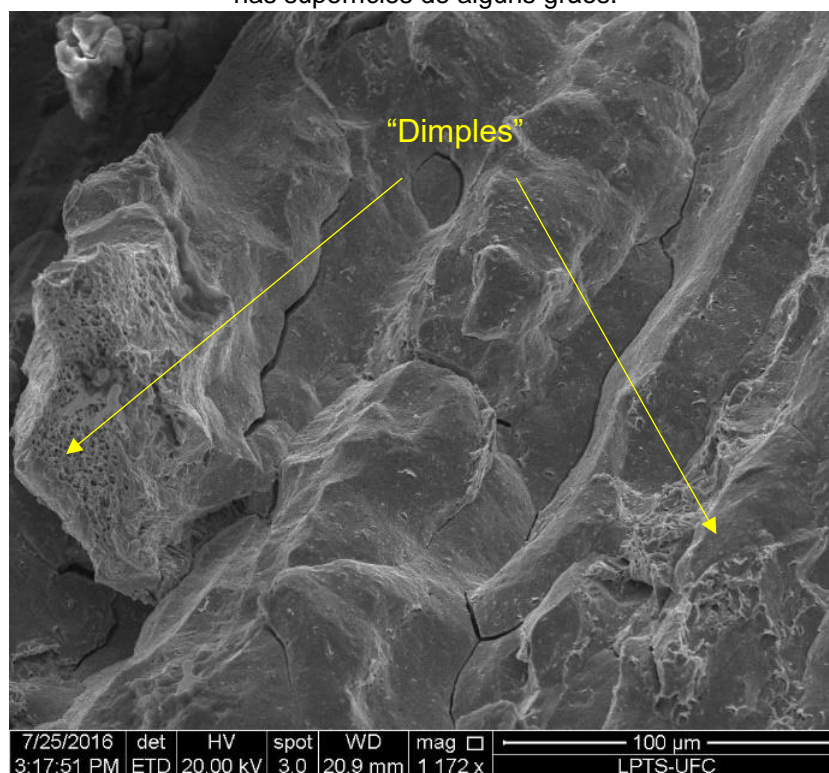
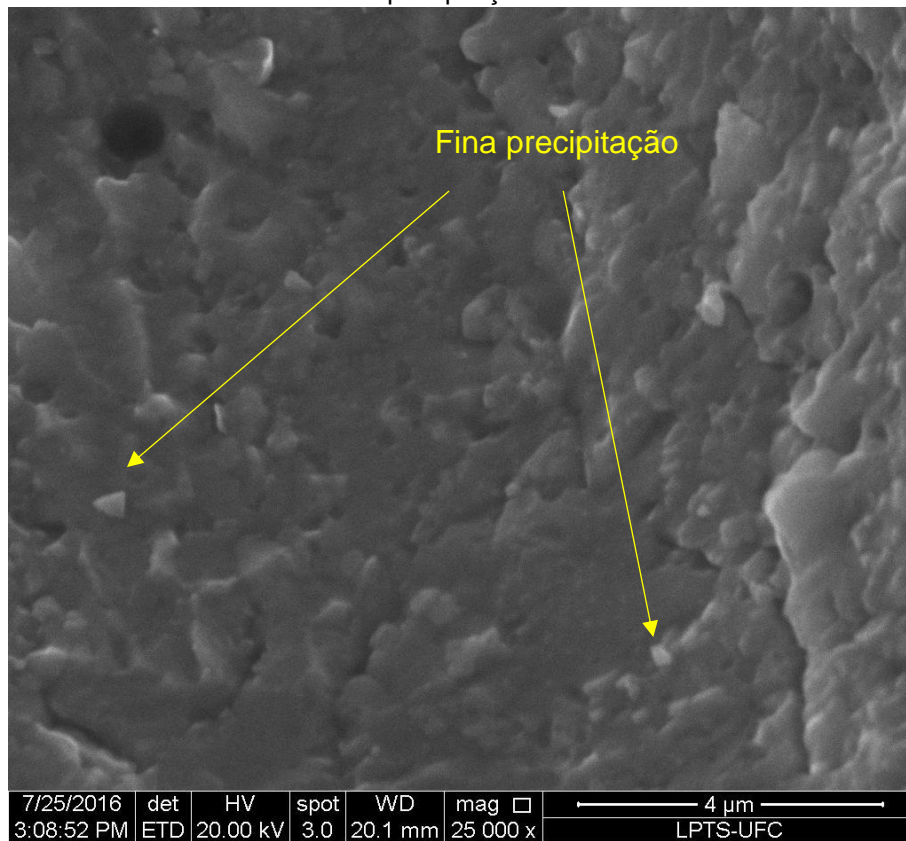


Figura 157. Ampliação da superfície de um grão do material com TTPS mostrando uma fina precipitação.



Fonte: Própria do autor.

5.4.5. Ensaio de tração

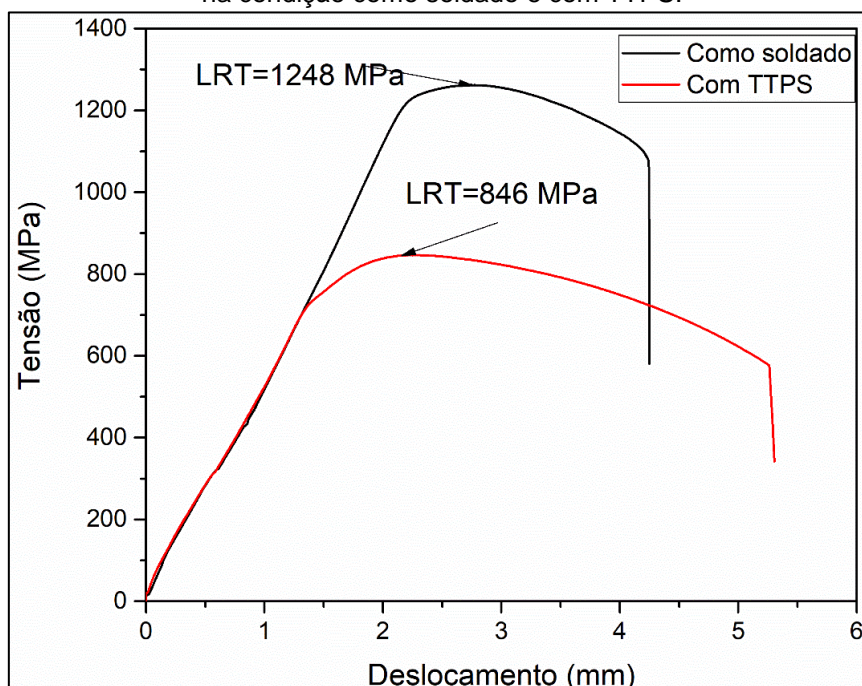
Na Tabela 43 estão apresentados os valores de limite de resistência à tração (LRT) das condições como soldada e com TTPS. O limite de resistência à tração do material na condição como soldado extrapolou o limite permitido de 760 MPa estabelecido para aços avançados na norma API RP934-A. Na condição com TTPS também foi superior ao máximo estabelecido, no entanto apresentou valores consideravelmente inferiores à condição como soldada. Na Figura 158 está apresentado o diagrama de tensão x deslocamento das condições como soldada e com TTPS.

Tabela 43 - Limite de resistência à tração.

Amostra/Condição	LRT (MPa)
Como soldada	1248
Como soldada	1262
Com TTPS	846
Com TTPS	833

Fonte: Própria do autor.

Figura 158 - Diagrama tensão x deslocamento das cruzetas da máquina de ensaio do material na condição como soldado e com TTPS.



Fonte: Própria do autor.

Apesar das excelentes características operacionais de soldagem, os resultados obtidos na qualificação do eletrodo protótipo, principalmente os valores baixos de tenacidade ao impacto, foi constatado que este eletrodo não atende aos requisitos de propriedades mecânicas estabelecidos pela norma API RP934-A. Desta forma, novos estudos devem ser realizados para produção de um novo arame protótipo com o intuito de superar os requisitos mínimos estabelecidos pelas normas API RP934A e Petrobras N133. Este tipo de desenvolvimento é complexo e exige estudos sistemáticos de produção e de avaliação. Assim, novos desafios surgem no desenvolvimento desses materiais, visando melhorias nas propriedades mecânicas.

5.5 Etapa 5 – Soldagem simulando caso prático de reparo horizontal

Conforme descrito na metodologia, esta etapa consiste da soldagem e avaliação do reparo por soldagem de casos práticos.

Desta forma, para o aço ASTM A387 Gr11 foi definido como caso prático o reparo de tambor de coque.

Por sua vez, para os aços ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D foi definido como caso prático o reparo de reatores de HDT.

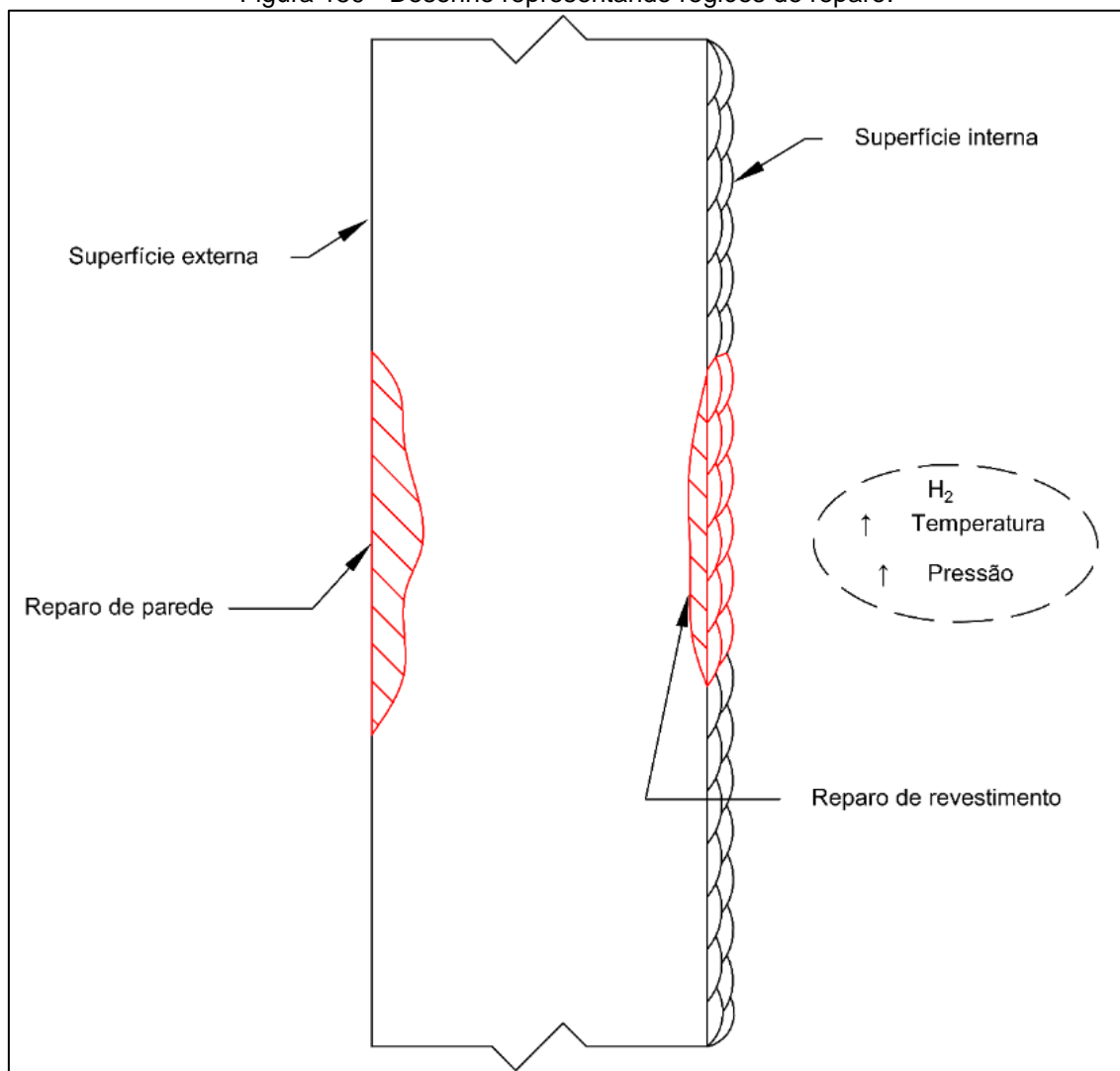
Em ambos os casos práticos, os reparos são realizados na posição horizontal (ASME 2G) e podem ocorrer na parede do equipamento (soldagem similar) ou no revestimento interno do equipamento (soldagem dissimilar).

As faixas de espessuras para os tambores de coque são de 15 a 30 mm. São espessuras bem menores do que os reatores de HDT, esta diferença está associada ao tipo de reação e ciclo de operação ao qual os tambores de coque são submetidos.

Os reatores de HDT realizam operações de refinamento do petróleo em condições de altas temperatura e altas pressões, por isso são construídos com espessuras relativamente grandes (100 a 300 mm) para suportar os esforços.

Conforme detalhado anteriormente, ao longo dos anos de operação, estes equipamentos estão sujeitos a diversos mecanismos de deterioração, por exemplo, corrosão no revestimento interno, ataque por hidrogênio etc. Com isso, são necessárias intervenções para manutenção na parte interna e externa do equipamento, ilustrado na Figura 159.

Figura 159 - Desenho representando regiões de reparo.



Fonte: Própria do autor.

Para avaliação do procedimento de soldagens simulando caso prático, foram analisadas as propriedades mecânicas utilizando quatro ensaios: dureza, dobramento, tração e tenacidade Charpy, conforme detalhado na ETAPA 5 da metodologia, normalmente utilizados para qualificação de procedimento de soldagem. A seguir, serão apresentados os resultados e a discussão referentes aos ensaios da soldagem de aplicação da técnica de deposição controlada com dupla camada simulando casos práticos de reparo de parede (similar) e o reparo de revestimento (dissimilar).

5.5.1. Aspectos gerais da soldagem de reparo – Etapa 5.

No início, foram encontradas dificuldades com relação a operação com o equipamento mecanizado utilizado nas soldagens. As dificuldades foram associadas com o ajuste do ângulo da tocha, no posicionamento do mecanismo e no uso do tecimento. Contudo, com o decorrer dos testes e das soldagens foram sendo desenvolvidos mecanismos e atualizações que tornou a operação de soldagem com este equipamento bastante viável, apresentando um excelente rendimento e facilidade de operação.

Em geral, as soldagens apresentaram boa estabilidade na posição horizontal, principalmente com energias de soldagem baixas (0,8 kJ/mm). Os cordões realizados com energia de soldagem mais elevadas (1,4, 1,6 e 2,5 kJ/mm) apresentaram uma leve tendência a escorrer. Tal comportamento foi amenizado com ajuste do ângulo da tocha e do posicionamento.

Na Figura 160 é apresentada a bancada utilizada na soldagem simulando reparo de parede do tambor de coque (aço ASTM A387 Gr11) utilizando o eletrodo AWS ER80S-B2.

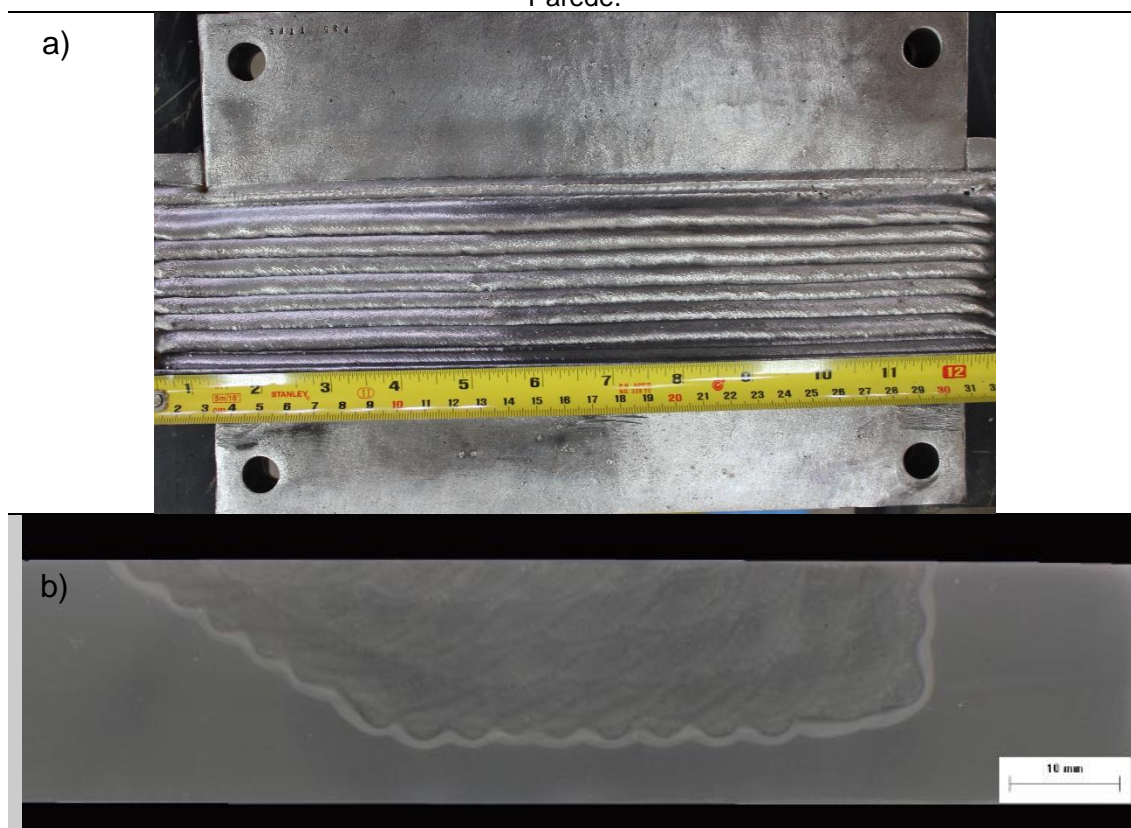
Figura 160 - Reparo de parede – Corpo de prova soldado.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 161a está apresentada a chapa soldada simulando o reparo no tambor de coque e na Figura 161b está apresentada a macrografia do reparo. Observa-se visualmente que a soldagem não apresentou defeitos macroscópicos, como falta de fusão e porosidades. Foram necessários 56 cordões de solda para enchimento do reparo.

Figura 161 – a) Simulação de reparo no tambor de coque e b) Macrografia do Reparo de Parede.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 162 é apresentada a chapa soldada simulando o reparo de revestimento do tambor de coque (aço ASTM A387 Gr11) utilizando o eletrodo AWS ERNiCrMo-3. Em geral, a soldagem foi estável na posição horizontal, principalmente na primeira camada com energia de 0,8 kJ/mm. Devido a liga de níquel apresentar elevada molhabilidade na segunda camada os cordões apresentaram somente uma leve tendência de descida, mas sem escorrer, não afetando o acabamento da superfície da camada.

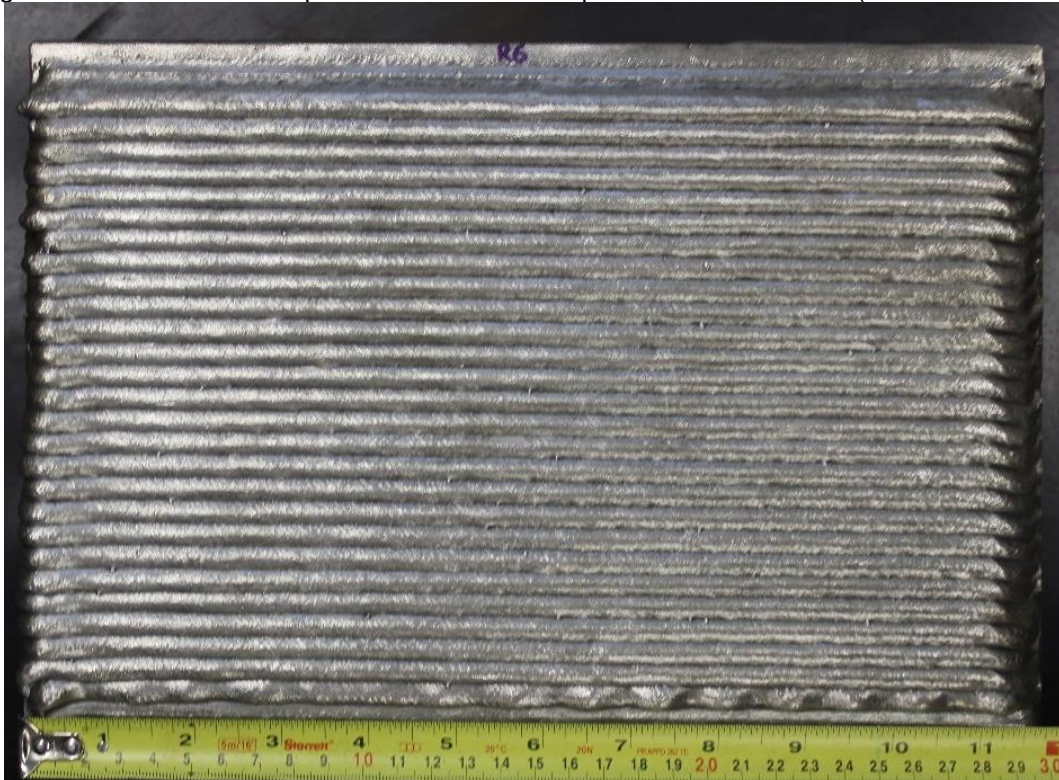
Na Figura 163 está apresentado o revestimento soldado no aço ASTM A387 Gr22 com o eletrodo AWS ER309L para a primeira camada e o eletrodo AWS ER347 para a segunda camada..

Figura 162 - Reparo de revestimento – Corpo de prova soldado.



Fonte: Própria do autor.

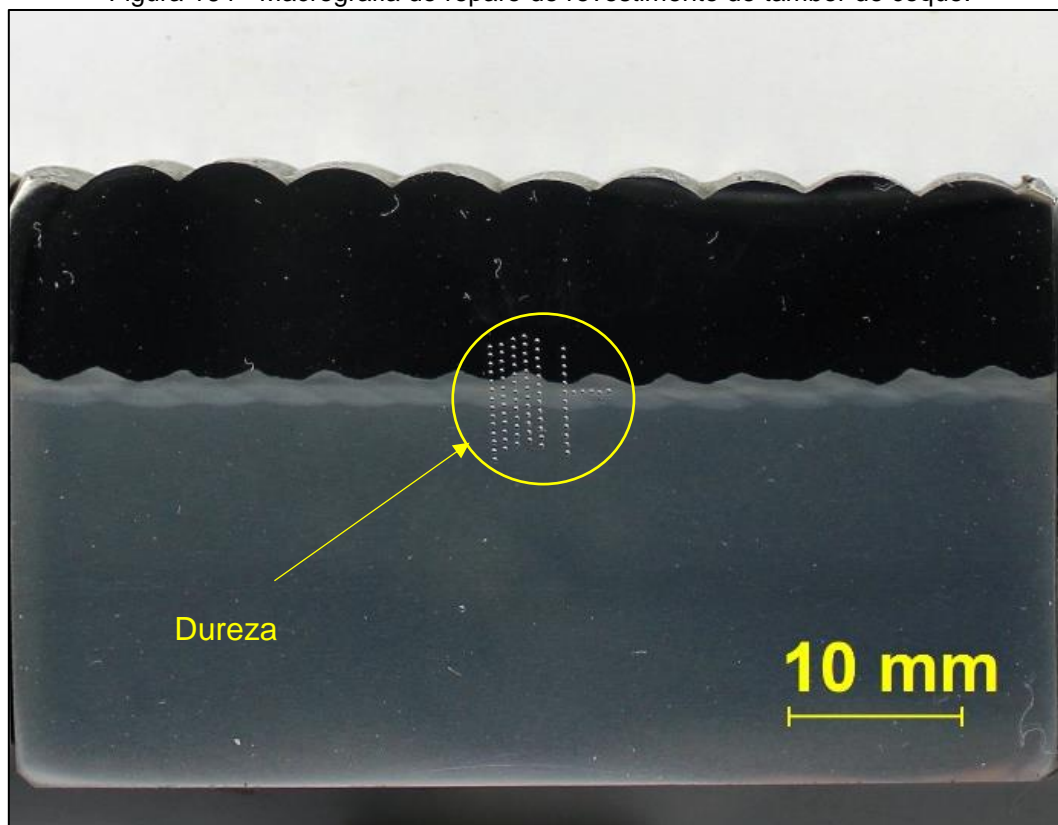
Figura 163 – Revestimento produzido simulando reparo no reator de HDT (ASTM A387 Gr22).



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 164 está apresentada a macrografia do reparo 2 de revestimento. De maneira semelhante ao anterior, a soldagem não apresentou defeitos visuais. Pela macrografia observa-se que o revestimento apresentou uma boa uniformidade na penetração, característica essencial para sucesso na aplicação da TDC-DC.

Figura 164 - Macrografia do reparo de revestimento do tambor de coque.



Fonte: Própria do autor.

5.5.2. Ensaios de dureza Vickers – Etapa 5

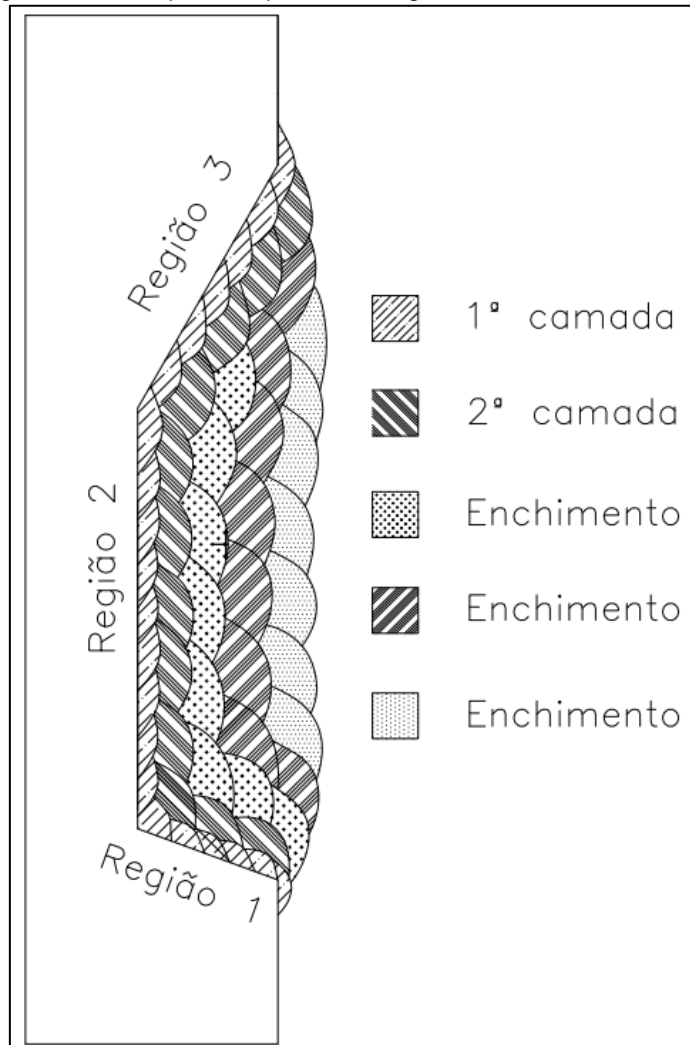
Os resultados dos ensaios de dureza foram divididos em reparo de parede e em reparos de revestimentos.

5.5.2.1. Reparo de parede – Reparo 1 – Etapa 5

O corpo de prova foi avaliado quanto a dureza, conforme recomendações de medições da norma Petrobras N-133 e o procedimento

proposto. O corpo de prova foi dividido em três regiões de análise, conforme Figura 165.

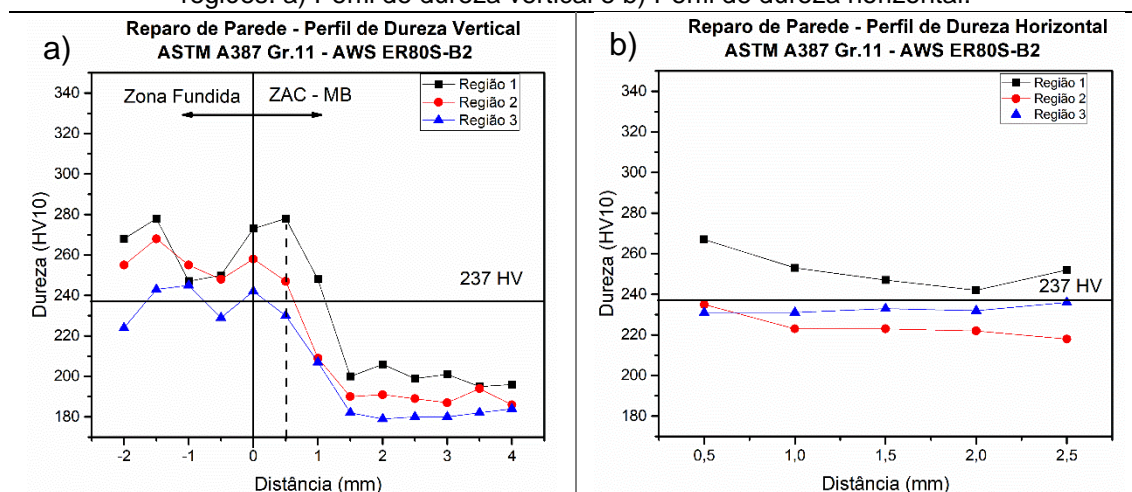
Figura 165 – Reparo de parede - Regiões de análise de dureza.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 166 está apresentado o gráfico dos valores de dureza das três regiões do reparo de parede, conforme adotado pela norma Petrobras N133.

Figura 166 – Reparo de Parede - Perfil de dureza conforme norma Petrobras N133 das três regiões. a) Perfil de dureza vertical e b) Perfil de dureza horizontal.

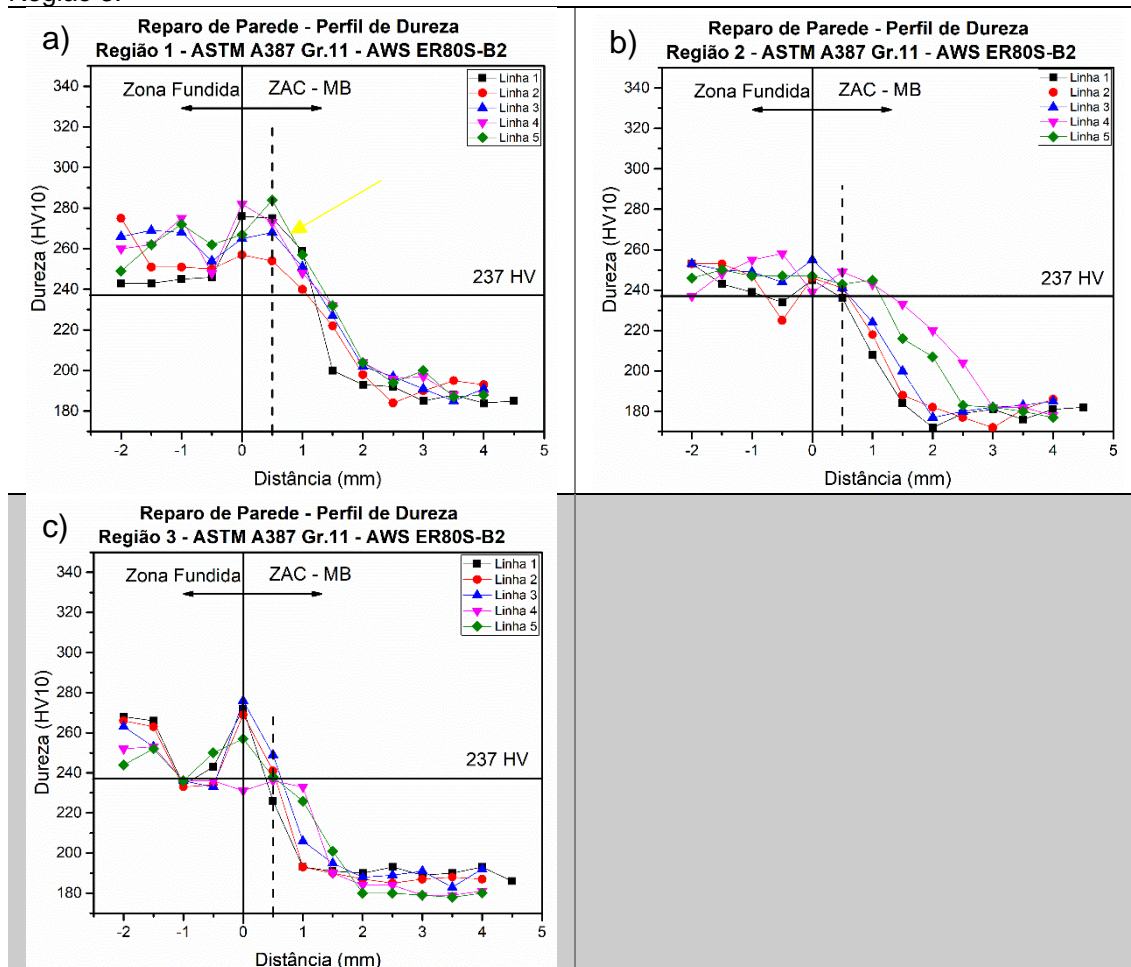


Fonte: Própria do autor.

Observa-se pela Figura 166 que os perfis de dureza das regiões 1, 2 e 3, apresentaram valores acima do máximo exigido pela norma. A região 1 foi a que apresentou maiores valores de dureza, atingido 280 HV10 na distância de 0,5 mm da linha de fusão. O fato da dureza apresentar valores mais elevados, quando comparado com as soldagens das duplas camada, pode estar associado a posição de soldagem afetar a geometria dos cordões, consequentemente afetar a sobreposição dos ciclos térmicos.

Na Figura 167 estão apresentados os perfis de dureza das três regiões do reparo de parede, conforme o procedimento proposto.

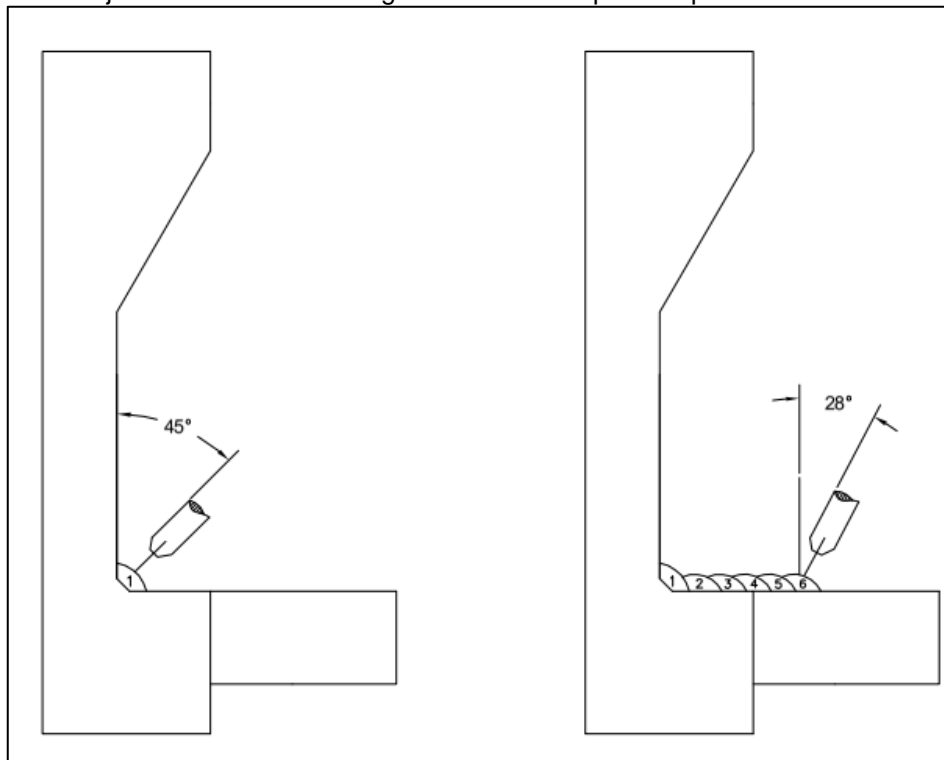
Figura 167 - Perfil de dureza conforme procedimento proposto. a) Região 1; b) Região 2 e c) Região 3.



Fonte: Própria do autor.

Observa-se que a Região 1 (Figura 167a) apresentou os maiores valores de dureza, conforme medidas realizadas pela norma Petrobras N133 e do Procedimento Proposto. A justificativa para este aumento da dureza pode estar associada a questão operacional do posicionamento inclinado da tocha na Região 1 do reparo, conforme desenho da Figura 168.

Figura 168 - Ajuste da tocha na soldagem simulando reparo de parede do tambor de coque.



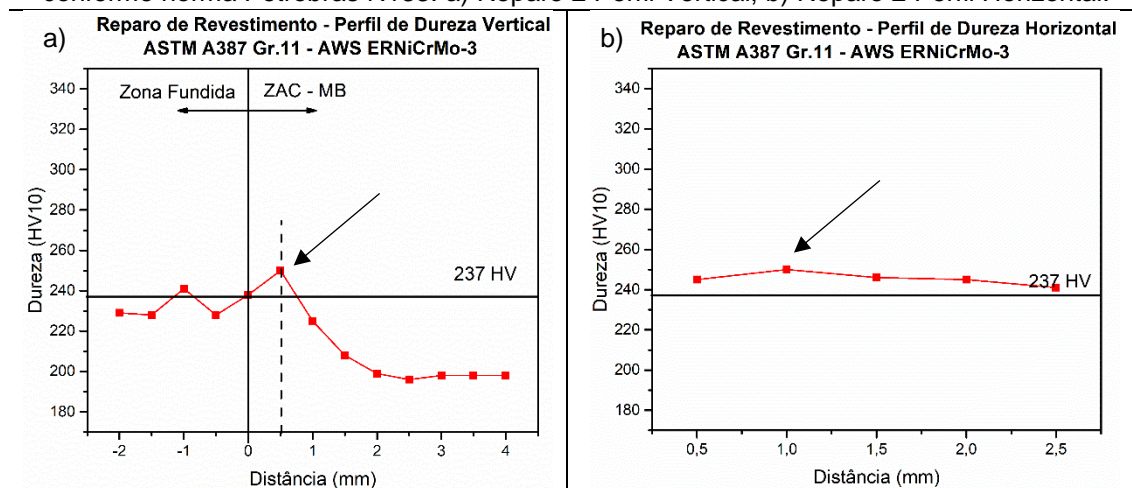
Fonte: Própria do autor.

5.5.2.2. *Reparo de revestimento- Reparo 2, Reparo 3 e Reparo 4 – Etapa 5*

Os corpos de prova dos reparos de revestimentos foram avaliados quanto a dureza, conforme recomendações de medições da norma Petrobras N-133 e o procedimento proposto.

Na Figura 169 estão apresentados os perfis de dureza dos Reparo 2, Reparo 3 e Reparo 4 de revestimento, conforme a norma Petrobras N133.

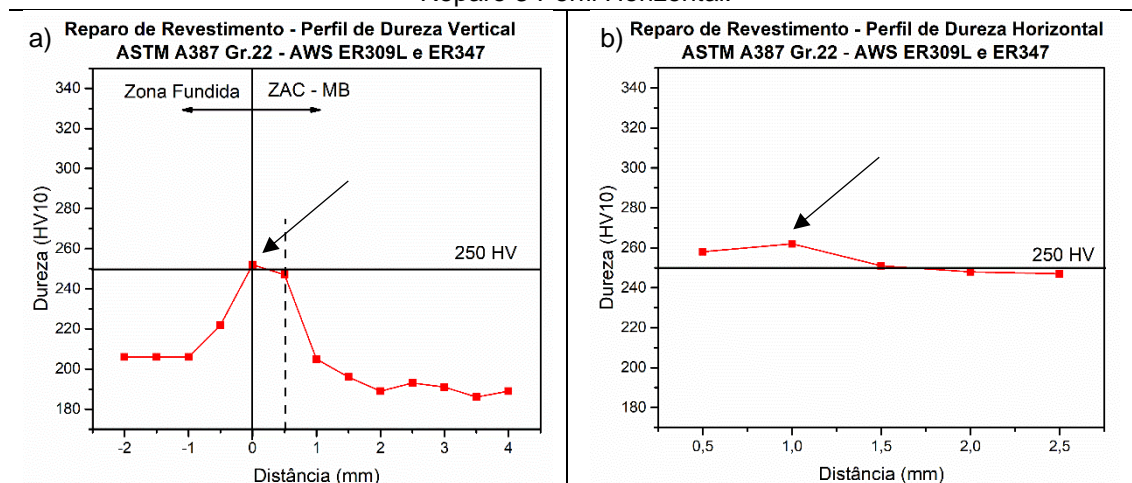
Figura 169 – Reparo de revestimento tambor de coque - Perfil de dureza na região central, conforme norma Petrobras N133. a) Reparo 2 Perfil Vertical, b) Reparo 2 Perfil Horizontal.



Fonte: Própria do autor.

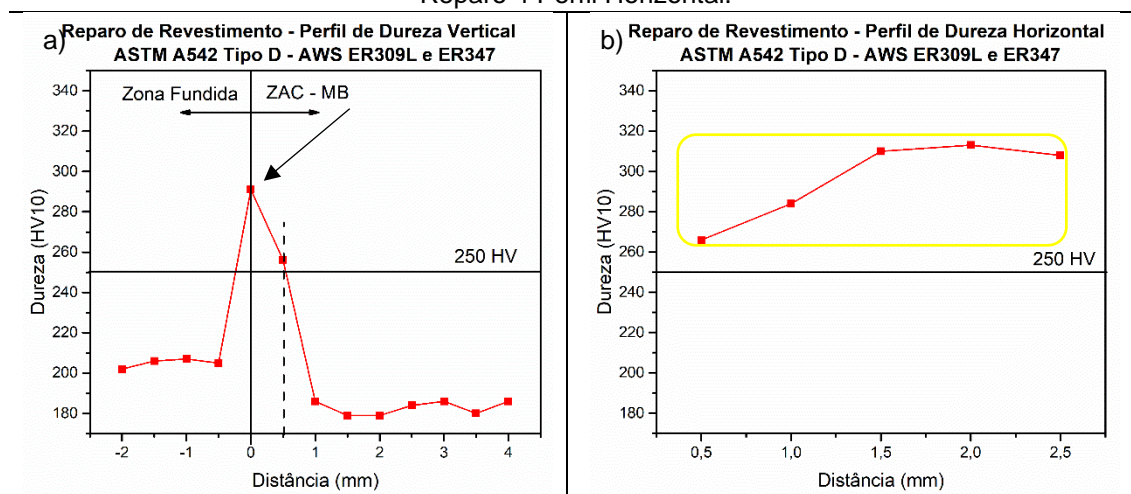
O Reparo 2 (Figura 169) apresentou os valores de dureza da ZAC um pouco acima do máximo permitido para esta aplicação, contudo, é evidente o revenimento promovido pela TDC-DC. De forma análoga, foram os resultados da de dureza do Reparo 3 (Figura 170).

Figura 170 – Reparo de revestimento do reator de HDT em aço ASTM A387 Gr22- Perfil de dureza na região central, conforme norma Petrobras N133. a) Reparo 3 Perfil Vertical, b) Reparo 3 Perfil Horizontal.



Fonte: Própria do autor.

Figura 171 – Reparo de revestimento em reator de HDT do Aço ASTM A542 Tipo D - Perfil de dureza na região central, conforme norma Petrobras N133. a) Reparo 4 Perfil Vertical, b) Reparo 4 Perfil Horizontal.



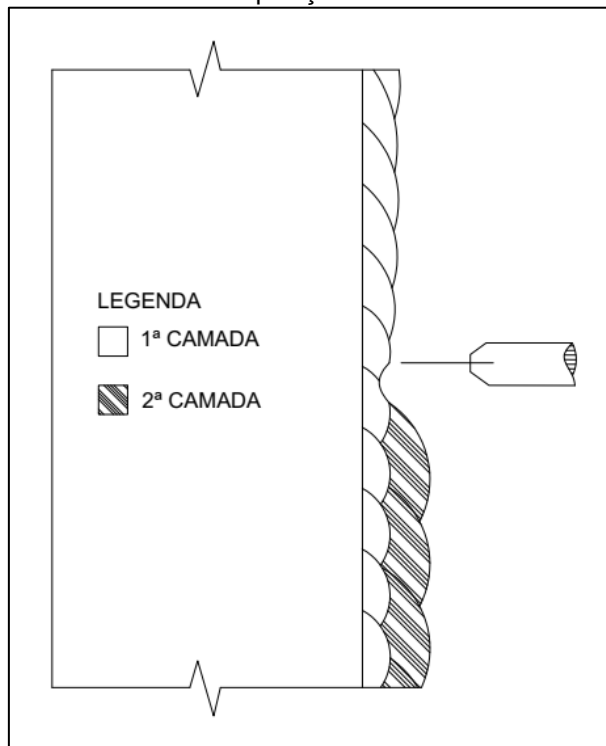
Fonte: Própria do autor.

O Reparo 4 (Figura 171a) apresentou valores de dureza elevados no perfil horizontal (300 HV10) quando comparado a amostra soldada na posição plana (Figura 134). No perfil horizontal as durezas foram todas acima de 300HV10 (Figura 171b).

Uma possível explicação para esse endurecimento, pode estar associado ao fato da aplicação da alta energia de soldagem (2,5 kJ/mm) da segunda camada na posição horizontal. Ocorre que o metal fundido (2ª camada) pode escorrer sobre o passe anterior, fazendo isso, uma região da primeira camada apresentará um menor reforço (Figura 172), conseqüentemente, não será a mesma na condição de aplicação da TDC-DC obtida na posição plana.

Assim, esses valores elevados de dureza possivelmente implicarão em baixa energia absorvida nessa região.

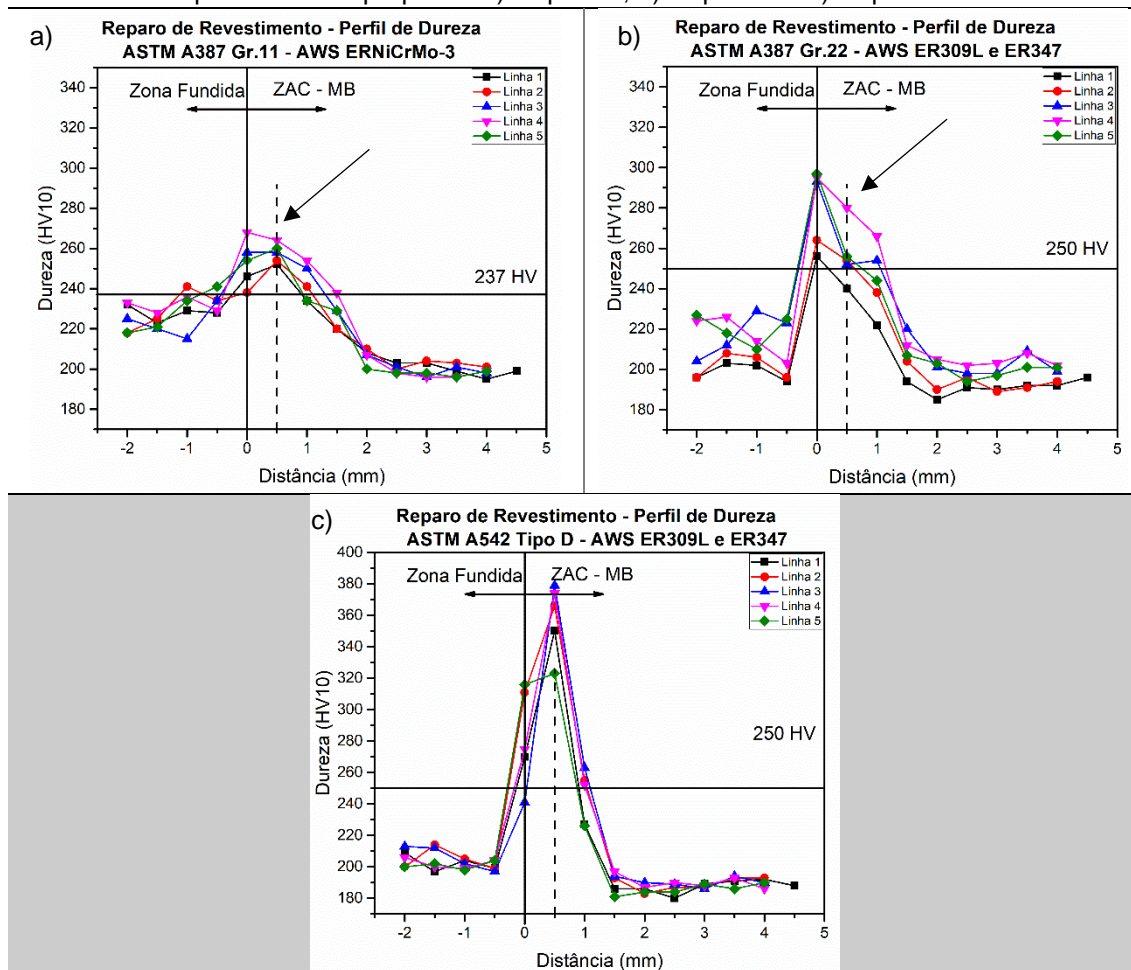
Figura 172 - Desenho da sobreposição da 2ª Camada com alta energia.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 173 estão apresentados os perfis de dureza dos Reparo 2, Reparo 3 e Reparo 4, conforme o Procedimento Proposto. Observa-se que todas as condições apresentaram pontos de dureza acima do mínimo estabelecido pelas normas, sendo mais crítico para o aço ASTM A542 Tipo D.

Figura 173 – Reparo de revestimento - Perfil de dureza na região central, conforme procedimento proposto. a) Reparo 2, b) Reparo 3 e c) Reparo 4.



Fonte: Própria do autor.

5.5.3. Ensaios de dobramento – Etapa 5

O ensaio de dobramento consiste em submeter um corpo de prova a uma deformação plástica por flexão até atingir um ângulo desejado. Apesar de ser um ensaio relativamente simples é bastante eficaz para detectar problemas metalúrgicos que podem afetar o comportamento dos materiais em serviço, principalmente, para equipamentos que são submetidos a diversos ciclos de aquecimento e resfriamento com altas velocidades.

O “bulge” é um exemplo de fenômeno de deformação em tambores de coque que pode fazer propagar trincas na superfície do equipamento. Neste caso, são necessários novos estudos para avaliar se é recomendado ou até mesmo viável, após o reparo do revestimento, remover a superfície irregular da dupla camada soldada de forma a eliminar essas regiões entre passes na superfície.

Após os ensaios de dobramento, verificou-se que todos os corpos de prova atenderam aos critérios de aceitação da norma ASME IX, QW-163, pois nenhuma descontinuidade nas superfícies convexas apresentou um comprimento superior a 3 mm, como pode ser visto na Figura 174.

Além disso, não foram encontradas trincas ou defeitos abertos na interface dos aços com os revestimentos.

No entanto, o fato de não ter sido removido a superfície da camada, as regiões entre passes apresentaram o início de formação de trincas. Apesar do bom nível de acabamento da camada, pode ser problemático quando a soldagem for aplicada em equipamento que sofrem um regime de trabalho com variação de temperatura e pressão ao longo do seu comprimento.

Figura 174 - Corpos de prova após dobramentos reparos em Tambor de coque e reator HDT.

a) Reparo 1– Reparo de Parede - Tambor de coque – ASTM A387 Gr11.



b) Reparo 2– Reparo de Revestimento - Tambor de coque – ASTM A387 Gr11.



c) Reparo 3– Reparo de Revestimento – Reator de HDT – ASTM A387 Gr22.



d) Reparo 3– Reparo de Revestimento – Reator de HDT – ASTM A542 Tipo D.



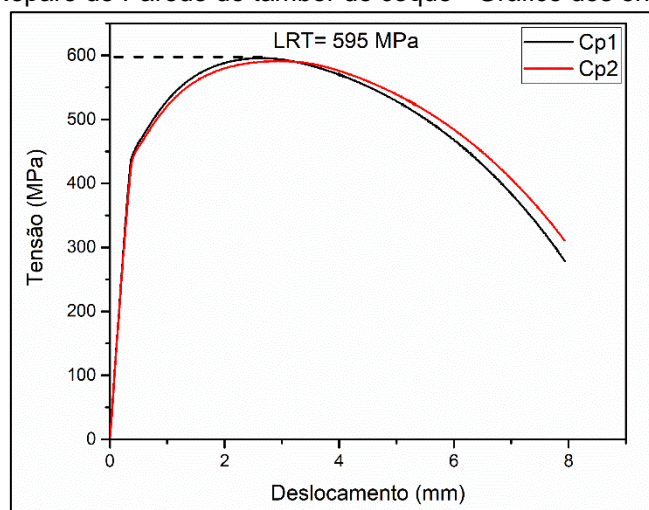
5.5.4. Ensaios de tração – Etapa 5

Os ensaios de tração foram realizados nas amostras referentes ao reparo de parede.

A Figura 175 mostra o gráfico Tensão versus Deslocamento para os corpos de prova do reparo de parede. Observa-se na Figura 176a e Figura 176b que a ruptura dos corpos de prova ocorreu no metal de base e os valores obtidos de resistência à tração estão dentro dos limites permitidos para o metal de base, conforme valores apresentados na Tabela 44.

Com base nos critérios de aceitação da ASME IX QW-153.1, para o ensaio de tração, é possível afirmar que o procedimento de soldagem utilizado no enchimento do chanfro está aprovado para o ensaio de tração, uma vez que os corpos de prova tiveram a ruptura no metal de base, apresentando um limite de resistência à tração superior ao mínimo especificado para o metal de base que é de 515 Mpa.

Figura 175 – Reparo de Parede do tambor de coque - Gráfico dos ensaios de tração.



Fonte: Própria do autor.

Tabela 44. Valores do limite de resistência à tração dos corpos de prova.

Corpo de Prova	LRT (MPa)	Local da Ruptura
Amostra 1	595	Metal de Base
Amostra 2	591	Metal de Base

Fonte: Própria do autor.

Figura 176 – Corpos de prova de tração ensaiados. a) R2-3 e b) R2-15.



Fonte: Própria do autor.

5.5.5. Ensaio de tenacidade Charpy-V – Etapa 5

Os resultados dos ensaios de impacto Charpy-V fornecem informações sobre a fratura (frágil ou dúctil) dos materiais. No contexto deste trabalho, as normas API RP934A e API RP934C estabelecem critérios de aceitação para os ensaios de Charpy na ZAC e na ZF dos materiais utilizados na construção de tambores de coque e reatores de HDT.

O critério para aceitação do ensaio de impacto Charpy-V para o tambor de coque (ASTM A387 Gr11) é apresentar a mínima energia absorvida de 54 J na média de três amostras e 27 J mínimo para uma única amostra, todos ensaios realizados na temperatura de -18°C conforme a norma API RP 934-C.

Para os reatores de HDT (ASTM A387 Gr22 e ASTM A542 Tipo D), é apresentar a mínima energia absorvida de 54 J na média de três amostras e 47 J mínimo para uma única amostra, todos ensaios realizados na temperatura de -30°C conforme a norma API RP 934-A.

5.5.5.1. *Reparo 1 - Reparo de Parede – Tambor de coque*

A Tabela 45 apresenta os resultados dos ensaios de impacto Charpy para os cinco corpos de prova da zona fundida, cinco para a ZAC e cinco para o metal de base da soldagem de reparo de parede. Foram utilizados somente três valores de energia de cada condição para o cálculo da média da energia, para isso, foram descartados o maior e o menor valor encontrado.

Tabela 45 – Reparo 1 – Reparo de Parede - Tambor de coque - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.

Corpo de Prova	Local do entalhe	Temperatura de ensaio (°C)	Energia de Impacto (J)	Energia Absorvida média (J)
CP 1	ZF	-19	30	31
CP 2	ZF	-19	43,5	
CP 3	ZF	-19	20	
CP 4	ZF	-19	15 (descarte)	
CP 5	ZF	-19	47,5 (descarte)	
CP 6	ZAC	-19	335	306
CP 7	ZAC	-19	295	
CP 8	ZAC	-19	290	
CP 9	ZAC	-19	285 (descarte)	
CP 10	ZAC	-19	350 (descarte)	
CP 11	MB	-19	365	336
CP 12	MB	-19	315	
CP 13	MB	-19	330	
CP 14	MB	-19	315 (descarte)	
CP 15	MB	-19	370 (descarte)	

Fonte: Própria do autor.

A zona fundida apresentou valores abaixo do mínimo permitido pela norma API RP934-C, para aplicação em tambores de coque. Vale ressaltar que para outras aplicações, por exemplo vasos de pressão fabricados com o aço ASTM A387 Gr11, o critério de tenacidade Charpy adotado é, apresentar energia média absorvida de 27J com até um valor individual de 20 J, realizados na temperatura de 0 °C.

Pelos valores de tenacidade obtidos, é possível afirmar que a TDC-DC foi eficiente em manter boas propriedades na ZAC.

5.5.5.2. *Reparo 2, Reparo 3 e Reparo 4 - Reparo de revestimento em Reator de HDT*

A Tabela 46 apresenta os resultados dos ensaios de impacto Charpy para os cinco corpos de prova da zona fundida, cinco para a ZAC e cinco para o metal de base da soldagem de reparo de revestimento do tambor de coque (ASTM A387 Gr11) revestido com o eletrodo AWS ERNiCrMo-3.

Tabela 46 – Reparo 2 – Reparo de Revestimento - Tambor de coque - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.

Corpo de Prova	Local do entalhe	Temperatura de ensaio (°C)	Energia Absorvida (J)	Energia Absorvida média (J)
CP 1	ZF	-19	135	142
CP 2	ZF	-19	151	
CP 3	ZF	-19	140	
CP 4	ZF	-19	133 (descarte)	
CP 5	ZF	-19	161 (descarte)	
CP 6	ZAC	-19	390	261
CP 7	ZAC	-19	185	
CP 8	ZAC	-19	210	
CP 9	ZAC	-19	390 (descarte)	
CP 10	ZAC	-19	165 (descarte)	
CP 11	MB	-19	365	336
CP 12	MB	-19	315	
CP 13	MB	-19	330	
CP 14	MB	-19	315 (descarte)	
CP 15	MB	-19	370 (descarte)	

Fonte: Própria do autor.

Com base nos resultados dos ensaios de impacto Charpy referentes a soldagem de revestimento do tambor de coque (ASTM A387 Gr11), pode-se concluir que o procedimento de soldagem utilizado para a soldagem do revestimento com a TDC-DC está aprovado para as regiões da ZAC e ZF, uma vez que a média da energia absorvida na ZAC e ZF pelos três corpos de prova foram superiores a 54 J e não apresentaram um valor abaixo de 47 J, conforme API RP 934-A.

Tabela 47 - Reparo 3 – Reparo de Revestimento – Reator de HDT ASTM A387 Gr22 - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.

Corpo de Prova	Local do entalhe	Temperatura de ensaio (°C)	Energia Absorvida (J)	Energia Absorvida média (J)
CP 1	ZF	-30	101	101
CP 2	ZF	-30	101	
CP 3	ZF	-30	98 (descarte)	
CP 4	ZF	-30	101	
CP 5	ZF	-30	105 (descarte)	
CP 6	ZAC	-30	255	239
CP 7	ZAC	-30	211	
CP 8	ZAC	-30	260 (descarte)	
CP 9	ZAC	-30	250	
CP 10	ZAC	-30	205 (descarte)	
CP 11	MB	-30	270 (descarte)	294
CP 12	MB	-30	307	
CP 13	MB	-30	287	
CP 14	MB	-30	289	
CP 15	MB	-30	311 (descarte)	

Fonte: Própria do autor.

Com base nos resultados dos ensaios de impacto Charpy referentes a soldagem de revestimento do aço ASTM A387 Gr22 com os eletrodos AWS ER309L e ER347, pode-se concluir que o procedimento de soldagem utilizado para a soldagem do revestimento com a TDC-DC está aprovado para as regiões da ZAC e ZF, uma vez que a média da energia absorvida na ZAC e ZF pelos três corpos de prova foram superiores a 54 J e não apresentaram um valor abaixo de 47 J, conforme API RP 934-A.

Tabela 48 - Reparo 4 – Reparo de Revestimento – Reator de HDT ASTM A542 Tipo D - Resultados dos ensaios de impacto Charpy.

Corpo de Prova	Local do entalhe	Temperatura de ensaio (°C)	Energia Absorvida (J)	Energia Absorvida média (J)
CP 1	ZF	-30	82 (descarte)	87
CP 2	ZF	-30	99 (descarte)	
CP 3	ZF	-30	89	
CP 4	ZF	-30	87	
CP 5	ZF	-30	85	
CP 6	ZAC	-30	47	42
CP 7	ZAC	-30	25 (descarte)	
CP 8	ZAC	-30	33	
CP 9	ZAC	-30	47	
CP 10	ZAC	-30	200 (descarte)	
CP 11	MB	-30	255	244
CP 12	MB	-30	233	
CP 13	MB	-30	92 (descarte)	
CP 14	MB	-30	243	
CP 15	MB	-30	291 (descarte)	

Fonte: Própria do autor.

Com base nos resultados dos ensaios de impacto Charpy referentes a soldagem de revestimento do aço ASTM A542 Tipo D com os eletrodos AWS ER309L e ER347, pode-se concluir que o procedimento de soldagem utilizado para a soldagem do revestimento com a TDC-DC não foi aprovado para as regiões da ZAC, uma vez que a média da energia absorvida na ZAC pelos três corpos de prova foram inferiores a 54 J, conforme API RP 934-A.

Assim, o fato da dureza ter apresentado valores elevados, foi um indicio que a soldagem se comportou de forma diferente quando foi realizada na posição horizontal, de forma que, a soldagem de reparo do aço CrMoV promoveu alterações microestruturais que resultaram em uma ZAC de maior dureza e, conseqüentemente, menor tenacidade.

5.6 Considerações finais da TDC-DC

As soldagens com tecimento na primeira e segunda camada minimizam ou até mesmo eliminam o perfil de penetração “finger-shape”, proporcionando soldagens com perfis de penetrações uniformes.

As alterações microestruturais e de propriedades da ZAC, causadas pela técnica de deposição controlada com dupla camada não foram suficientemente avaliadas nos ambientes petroquímicos específicos (por exemplo, ensaios na presença de hidrogênio) para verificar se a dureza sozinha é a propriedade significativa que prevê possíveis surgimentos de trincas em serviço.

Os estudos de TDC-DC mostraram que é possível reduzir dureza e refinar a microestrutura da ZAC dos aços CrMo e CrMoV a níveis aceitáveis pelas normas estabelecidas para cada aplicação. Os ensaios mecânicos realizados, principalmente, tenacidade ao impacto Charpy, apresentarem excelentes resultados para a ZAC dos aços CrMo.

A técnica de alteração da energia de soldagem por dois modos (corrente e velocidade de soldagem) resulta em aspectos operacionais, características geométricas e aspectos metalúrgicos distintos.

Para a soldagem similar do aço ASTM A387 Gr11 na posição plana, a relação de energia de soldagem de 0,8 kJ/mm na primeira camada e 1,4 kJ/mm na segunda camada proporcionou adequados níveis de dureza e de refinamento de grãos. Para a soldagem dissimilar a relação foi de 0,8 kJ/mm na primeira camada e 1,6 kJ/mm na segunda.

Para a soldagem similar e dissimilar do aço ASTM A387 Gr22 na posição plana, a relação de energia de soldagem com 0,8 kJ/mm na primeira camada e 1,6 kJ/mm na segunda camada proporcionou adequados níveis de dureza e de refinamento de grãos.

Para a soldagem similar do aço ASTM A542 Tipo D na posição plana, a relação de energia de soldagem de 0,8 kJ/mm na primeira camada e 2,0 kJ/mm

na segunda camada não foi suficiente para alcançar níveis de dureza adequado, entretanto esta relação proporcionou elevado grau de refinamento de grãos. Para a soldagem dissimilar, a relação foi de 0,8 kJ/mm na primeira camada e 2,5 kJ/mm na segunda apresentou melhores valores de dureza.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e das discussões realizadas, é possível concluir de forma geral que:

- A soldagem MIG/MAG na posição plana dos aços CrMo e CrMoV utilizando a Técnica de Deposição Controlada com Dupla Camada apresenta um revenimento satisfatório da ZAC e um elevado grau de refinamento dos grãos.

Dessa forma, com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas, é possível obter as seguintes conclusões específicas:

- Foi possível avaliar e aplicar, de forma satisfatória, técnicas de soldagem que proporcionaram melhores propriedades mecânicas na ZAC dos aços CrMo e CrMoV;
- Os diagramas de decisão mostraram-se extremamente eficientes na escolha das melhores relações de parâmetros e técnicas de soldagem;
- A TDC-DC mostrou-se bastante eficaz na soldagem dos materiais envolvidos, proporcionando ZAC's mais macias e sem crescimento exagerado de grãos;
- A TDC-DC não induz a formação de zona dura localizada na interface das soldagens dissimilares submetidas ao TTPS;
- O tratamento de envelhecimento por "Step Cooling" não afetou a aplicação da TDC-DC a nível de microdureza (ZD e ZM) e microestrutura (ZACGG e ZACGF);
- O Eletrodo Protótipo (CrMoV) apresentou boas características operacionais na soldagem, entretanto, as propriedades da zona fundida não atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma API RP934-A, exclusiva para reatores de HDT;

- A aplicação da TDC-DC na posição de soldagem horizontal (ASME 2G), simulando reparo de casos práticos em tambor de coque e reatores de HDT (reparo de parede e de revestimento) dissimilar, ocorreu de forma satisfatória, proporcionando cordões estáveis e livres de defeitos;
- Para a soldagem na posição horizontal são necessários ajustes no ângulo e no posicionamento da tocha, em função do comportamento da poça.
- Para a simulação de reparo de parede em tambor de coque do aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ER80S-B2 (Reparo 1), as propriedades obtidas foram aprovadas para a ZAC, entretanto a zona fundida apresentou valores de tenacidade Charpy-V abaixo do mínimo estabelecido;
- Para a simulação de reparo de revestimento em tambor de coque do aço ASTM A387 Gr11 com o eletrodo AWS ERNiCrMo-3 (Reparo 2), as propriedades obtidas foram aprovadas para a ZAC e ZF;
- Para a simulação reparo de revestimento em reator de HDT do aço ASTM A387 Gr22 com os eletrodos AWS ER309L e AWS ER347 (Reparo 3), as propriedades obtidas foram aprovadas para a ZAC e ZF;
- Para a simulação reparo de revestimento do aço ASTM A542 Tipo D com os eletrodos AWS ER309L e AWS ER347 (Reparo 4), as propriedades obtidas não foram satisfatórias para a dureza e para a tenacidade, apresentando valores fora do permitido pela norma API RP-934A;

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Simular o desempenho em serviço das soldagens com TDC-DC.
- Levantamento da curva de temperatura de transição dúctil-frágil da zona fundida do eletrodo protótipo nas condições de como soldado e com TTPS.
- Caracterização metalúrgica da zona fundida do eletrodo protótipo em diferentes condições de tratamento térmico.
- Avaliar a resistência à corrosão dos revestimentos dissimilares.
- Aplicação da TDC-DC utilizando-se eletrodos alternativos para soldagem similar.
- Caracterização metalúrgica das regiões formadas nas interfaces dos revestimentos dissimilares das amostras submetidas ao TTPS.
- Avaliação da TDC-DC explorada na posição plana e aplicada em outras posições (horizontal, vertical e sobrecabeça).

REFERÊNCIAS

- [1] - TELLES, P. C. S., **Materiais para Equipamentos de Processo**, 6. ed, Rio de Janeiro: E. Interciência, 2003.
- [2] - ASTM. **A387**: Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, ChromiumMolybdenum. United States, 2017.
- [3] - ASTM. **A542**: Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Quenched-andTempered, Chromium-Molybdenum, and ChromiumMolybdenum-Vanadium1. United States, 2013.
- [4] - BHADSHIA, H. K. D. H. e HONEYCOMBE, R., **Steels Microstructure and Properties**, 3 ed, 2006.
- [5] - AWS, **Welding Handbook: Metals and Their Weldability**, 7. ed, Vol. 4, Miami: AWS, 1997.
- [6] - COLPAERT, H., **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 4. ed, São Paulo: E. Blucher, 2008.
- [7] - API. **API RP 934C**: Materials and Fabrication of 11/4Cr-1/2Mo Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-pressure Hydrogen Service Operating at or Below 825 °F (441 °C). Washington, 2008.
- [8] - API. **API RP 934A**: Materials and Fabrication of 2 1/4Cr-1Mo, 2 1/4Cr-1Mo-1/4V, 3Cr-1Mo, and 3Cr-1Mo-1/4V Steel Heavy Wall Pressure Vessels for High-temperature, High-pressure Hydrogen Service. Washington, 2010.
- [9] - PETROBRAS. **N-133**: Soldagem - Rev. M. Brasil, 2015.
- [10] - ASME. **SECTION VIII Division 2**: Rules for Construction of Pressure Vessels. New York, 2015.
- [11] - GOMES, J. R., **Projeto e montagem de reator piloto pseudo-adiabático com aplicação em processo de hidrorrefino**. 2007. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007
- [12] - PETROBRAS, **Apostila: Processos de refino**, 1. ed, Curitiba: Unicenp, 2002.

- [13] - PASSOS, C. N.;ARAÚJO, M. A.;BRASIL, N. I. D. e CAMARGO, P. R. C., **Processos de refino**, 1. ed,
- [14] - SILVA, R. M. C. F. D., **Cinética e modelagem do reator de HDT**. 1995. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1995
- [15] - SCHLÖGL, S. M., J. Svoboda and E.V.D. Giessen. **Evolution of the methane pressure in a standard 2.25Cr–1Mo steel during hydrogen attack**, Acta Materialia, 2001.
- [16] - PARTHASARATHY, T. A., R.G. Shewmon. **Hydrogen Attack Behavior of the Heat Affected Zone of a 2.25Cr-1Mo Steel Weldment**, Metallurgical Transactions A, 1987.
- [17] - BAILEY, N., **Weldability of ferritic steels**, 1. ed, North America: ASM-International, 1994.
- [18] - IMANAKA, T., J.-i. Shimomura, S. Nakano, and K. Yasuda. **Hydrogen Attack in Cr-Mo Steels and Disbanding of Austenitic Stainless Weld Overlay**, Kawasaki Steel Technical Report: Japão, 1985.
- [19] - KAWANO, K., **Recent activities on high temperature hydrogen attack**, Idemitsu Engineering Company: Japão, 2004.
- [20] - API. **API RP 941: Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants**. Washington, 2008.
- [21] - PILLOT, S., L. COUDREUSE. **Hydrogen-induced disbonding and embrittlement of steels used in petrochemical refining**, Woodhead Publishing: France, 2012.
- [22] - SCOTT, T. E., **Pressure Vessels for Coal Liquefaction—An Overview**, American Society for Testing and Materials: Iowa, 1982.
- [23] - ASM, **Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys**, 11. ed, Vol. 1., Ohio: 1993.
- [24] - BAILEY, N.;COE, F. R.;GOOCH, T. G.;HART, P. H. M.;JENKINS, N. e PARGETER, R. J., **Welding steels without hydrogen cracking**, 2. ed, Cambridge: 1973.

- [25] - LIPPOLD, J. C., **Welding Metallurgy and Weldability**, 1. ed, New Jersey: Wiley, 2015.
- [26] - KOU, S., **Welding Metallurgy**, 2^a ed, New Jersey: J.W. Sons, 2003.
- [27] - ANTALFFY, L. P., M.B. Knowles, T. Tahara, and P.N. Chaku. **Operational life improvements in modern hydroprocessing reactors**, Digital Refining, 1999.
- [28] - MCGRATH, J. T., R.S. Chandel, R.F. Orr, and J.A. Gianetto. **A review of factors affecting the structural integrity of weldments in heavy wall reactor vessels**, Canadian Metallurgical Quarterly: Canada, 1989.
- [29] - ANTALFFY, L. P., P.N. Chaku, et al. **The potential for using high chromium ferritic alloys for hydroprocessing reactors**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002.
- [30] - GITTOS, M. F., T.G. Gooch. **The Interface below Stainless Steel and Nickel-Alloy Claddings**, Welding Research Supplement, 1992.
- [31] - TWI, **What is temper embrittlement, and how can it be controlled?**, 2013.
- [32] - OLEFJORD, I., **Temper embrittlement**, International Metals Reviews: Suécia, 1978.
- [33] - API. **API RP 571: Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry**. Washington, 2003.
- [34] - LALAM, S. H., H.K.D.H. Bhadeshia and D.J.C. MacKay. **Bruscatto factor in temper embrittlement of welds**, Science and Technology of Welding and Joining, 2000.
- [35] - DHOOGHE, A., R.E. DOLBY, et al. **A review of work related to reheat cracking in nuclear reactor pressure vessel steels**, J. Pres. Ves. & Piping: England, 1977.
- [36] - DHOOGHE, A., A. Vinckier. **Reheat Cracking-a Review of Recent Studies**, Int. J. Pres. Ves. & Piping: England, 1986.
- [37] - HIGUCHI, M., H. Sakamoto; and S. Tanioka. **A Study on Weld Repair through Half Bead Method**, IHI Engineering Review, 1980.

- [38] - Welding Technology Institute of Australia. **Temper Bead Welding**. Australia, 2006
- [39] - FARIAS, J. P., A.G.L.d. Azevedo and C.C. Silva. **EFEITO DA TÉCNICA DA DUPLA CAMADA SOBRE A TENACIDADE DE PEÇAS DE AÇO ABNT 1045**, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação: Uberlândia, 2003.
- [40] - ENGESOLDA. Universidade Federal do Ceará. **Relatório técnico: Aplicação da Dupla Camada na Soldagem de Aços ASTM A516 Gr. 70**. Fortaleza, 2008
- [41] - OLIVEIRA, G. L. G. D., **Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M E ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas**. 2013. Tese. (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2013
- [42] - CAVALCANTE, N. E., T.C. Andrade, et al. **Estudo de Procedimentos de Soldagem MIG/MAG para Aplicação de Revestimentos de Liga de Níquel Inconel 625 em Aço Estrutural ASTM A387 Gr.11**, Soldagem&Inspeção: Ceará-Brasil, 2016.
- [43] - 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-0,25V**. 2016. Tese. Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2016
- [44] - AGUIAR, W. M., **Revestimento por soldagem MIG/MAG empregando ligas de níquel para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural**. 2010. Tese. (Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010
- [45] - SILVA, C. C., V.H.C.d. Albuquerque, et al. **Evaluation of AISI 4140 Steel Repair Without Post-Weld Heat Treatment**, Journal of Materials Engineering and Performance, 2009.
- [46] - AGUIAR, W. M., **Soldagem do aço ABNT 4140 sem tratamento térmico posterior**. 2001. Dissertação. Fortaleza-Ceará, 2001
- [47] - ASME. **ASME IX - Welding, Brazing, and Fusing Qualifications: Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures**;

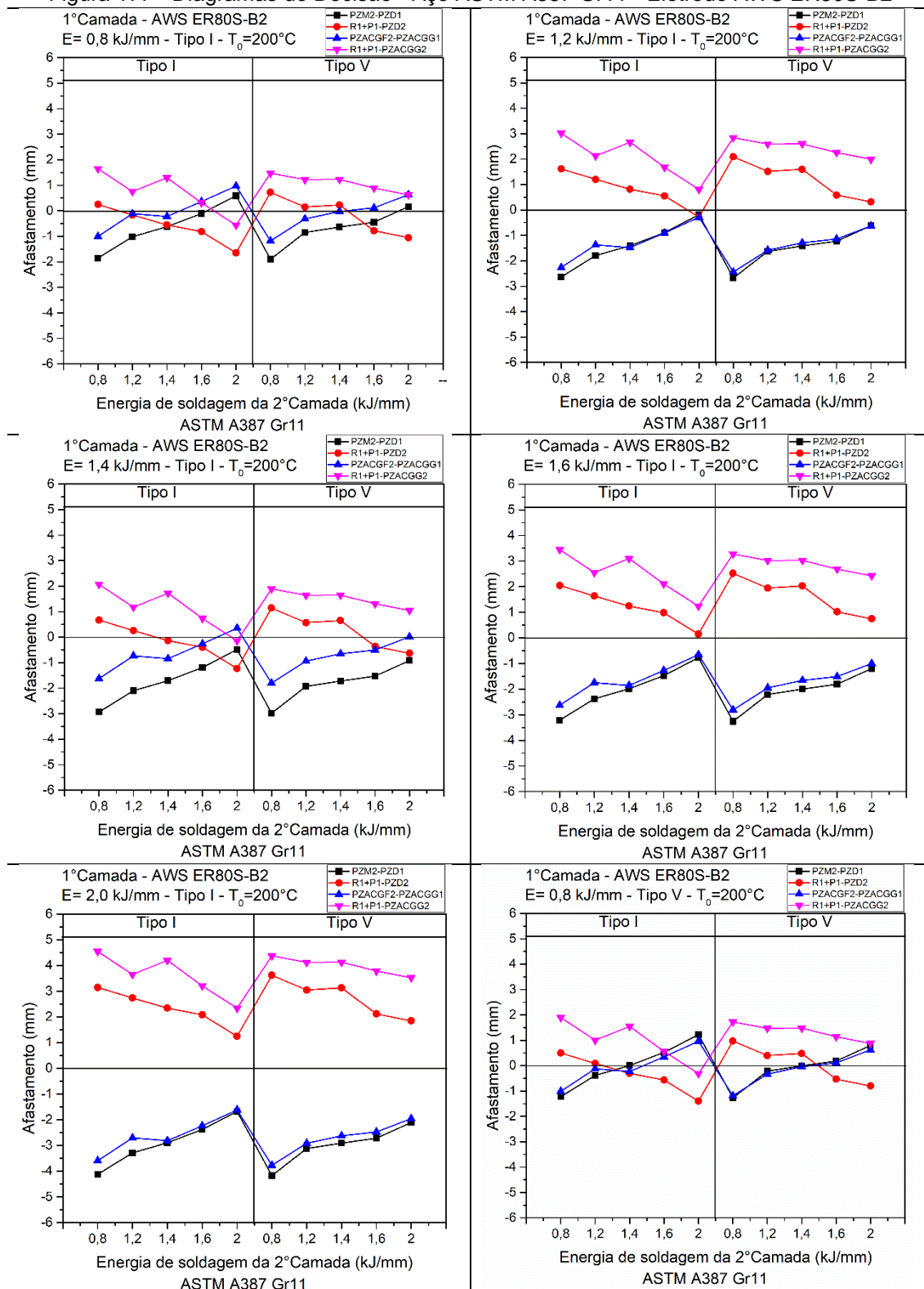
Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators. New York, 2015.

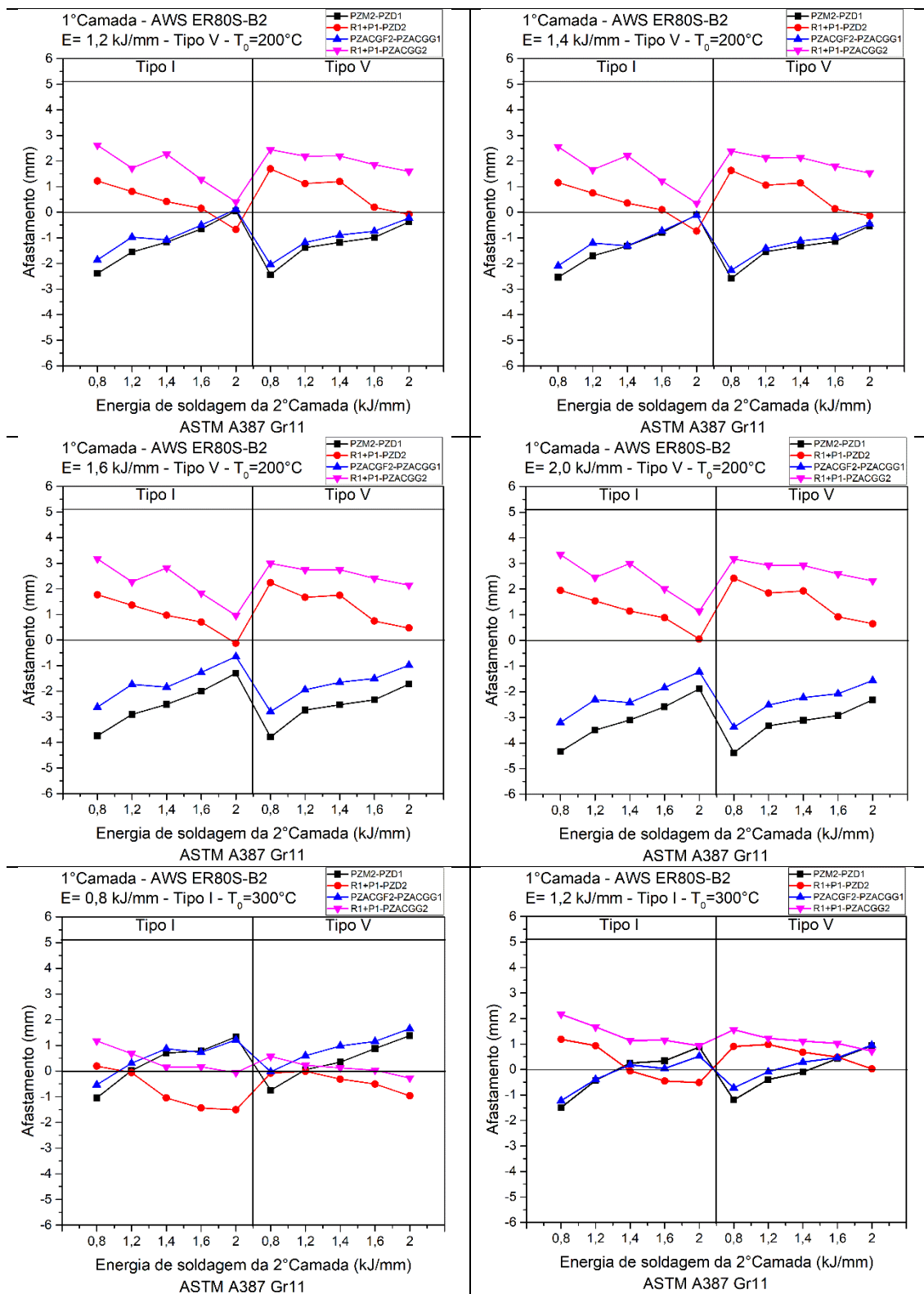
- [48] - AGUIAR, W. M., J.P. Farias and C.C. Silva. **Efeito da técnica da dupla camada sobre a microestrutura e tenacidade da ZAC do aço ABNT 4140 recuperado por soldagem**, ABCM: Uberlândia, Minas Gerais, 2003.
- [49] - AZEVEDO, A. G. L. D., **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045**. 2002. Dissertação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2002
- [50] - CRUZ, R. L. D. S., **Avaliação dos efeitos da técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM A516 Grau 60**. 2006. Dissertação. Fortaleza, Ceará, 2006
- [51] - ASTM. **A182**: Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service. EUA, 2012.
- [52] - AWS. **A5.28**: Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. United States of America, 2005.
- [53] - AWS. **A5.14**: Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods. United States of America, 2005.
- [54] - AWS. **A5.9**: Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods. United States of America, 2006.
- [55] - ASTM. **E384**: Standart Test Method for Microindentation hardness of Materials. Philadelphia, 2016.
- [56] - DNV. **OFFSHORE STANDARD-F101**: Submarine Pipeline Systems. 2012.
- [57] - MIRANDA, E. C. D., C.C. Silva, et al. **Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio**, Soldagem & Inspeção: Brasil, 2015.
- [58] - FRATARI, R. Q., M.M.A.M. Schvartzman and A. Scotti. **Otimização dos parâmetros de tecimento para confecção de amanteigamento em chapas de aço ao carbono pelo processo TIG com arame AWS ER309L**, Soldagem e Inspeção: Brasil, 2010.

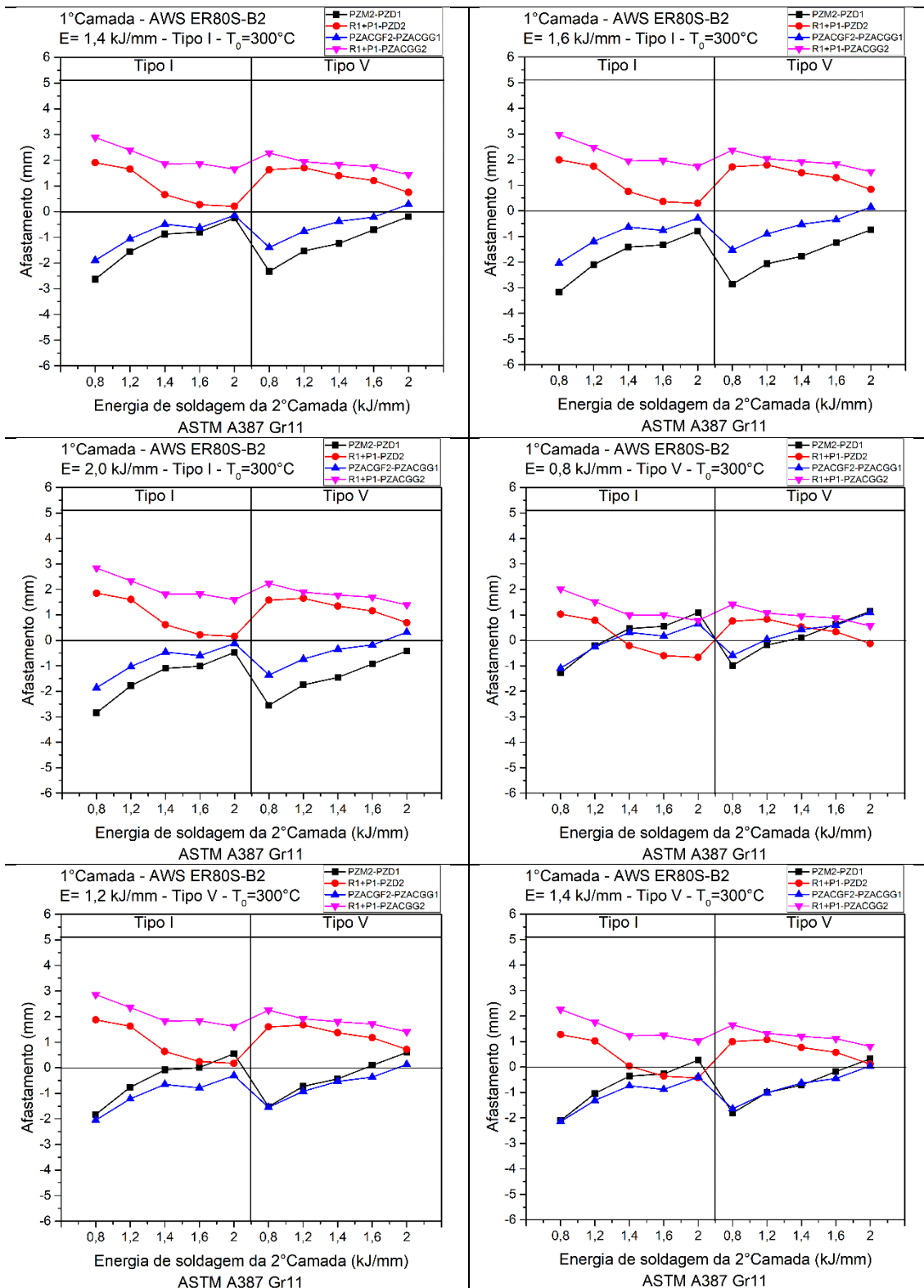
- [59] - SILVA, C. C., E.C.d. Miranda, et al. **Minimização de Defeitos em Revestimentos de Superligas de Níquel Depositada Pelo Processo TIG com Alimentação de Arame Frio: Soldagem e Inspeção**, Brasil, 2014.
- [60] - SCOTTI, A. e PONOMAREV, V., **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**, 1. ed, São Paulo: 2008.
- [61] - LIN, M. L., T.W. EAGAR. **Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry** WELDING RESEARCH SUPPLEMENT 1985.
- [62] - PINHEIRO, P. H. M., **Efeitos da temperatura de interpasse sobre as alterações metalúrgicas e propriedades mecânicas de juntas dissimilares do aço astm a182-f22 soldadas com ligas de níquel**. 2014. Dissertação. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014
- [63] - MARQUES, P. V., P.J. Modenesi. **Algumas Equações Úteis em Soldagem**, Soldagem e Inspeção: São Paulo, 2014.
- [64] - MODENESI, P. J., **Introdução à Metalurgia da Soldagem**, 1. ed, Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- [65] - ALORAIER, A. S., S. JOSHI, J.W.H. PRICE, and K. ALAWADHI. **Hardness, Microstructure, and Residual Stresses in Low Carbon Steel Welding with Post-weld Heat Treatment and Temper Bead Welding**, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A: Kuwait, 2014.
- [66] - DIETER, G. E., **Mechanical Metallurgy**, SI metric ed, Singapore: M.-H. Book, 1988.
- [67] - KEJELIN, N. Z.;BUSCHINELLI, A. J. A. e POPE, A. M., **Influence of Welding Parameters on the Formation of Partially Diluted Zones of Dissimilar Metal Welds: Soldagem & Inspeção**, ABS: São Paulo. p. 195-203, 2007.
- [68] - OLDEN, V., P.E. Kvaale, et al. **THE EFFECT OF PWHT ON THE MATERIAL PROPERTIES AND MICRO STRUCTURE IN INCONEL 625 AND INCONEL 725 BUTTERED JOINTS**, OMAE - The 22nd International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering: Cancun, Mexico, 2003.
- [69] - WILSON, A. D., C.R. Roper;, K.E. Orie;, and F.B. Fletcher. **PROPERTIES AND BEHAVIOR OF MODERN A387 Cr-Mo STEELS**, Serviceability of Petroleum, Process, and Power Equipment: Pennsylvania, 1992.

APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE DECISÃO

Figura 177 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr11 - Eletrodo AWS ER80S-B2







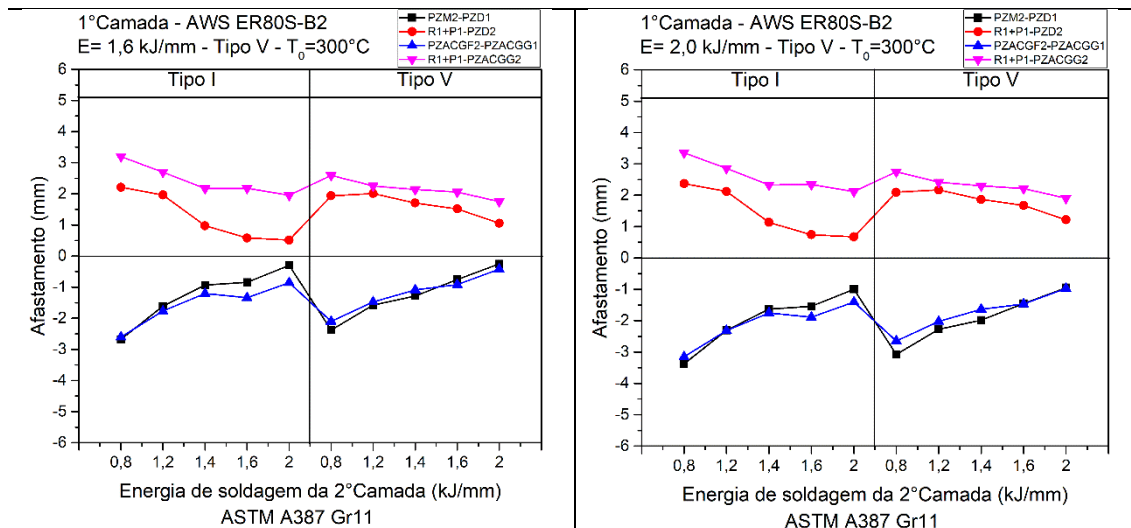
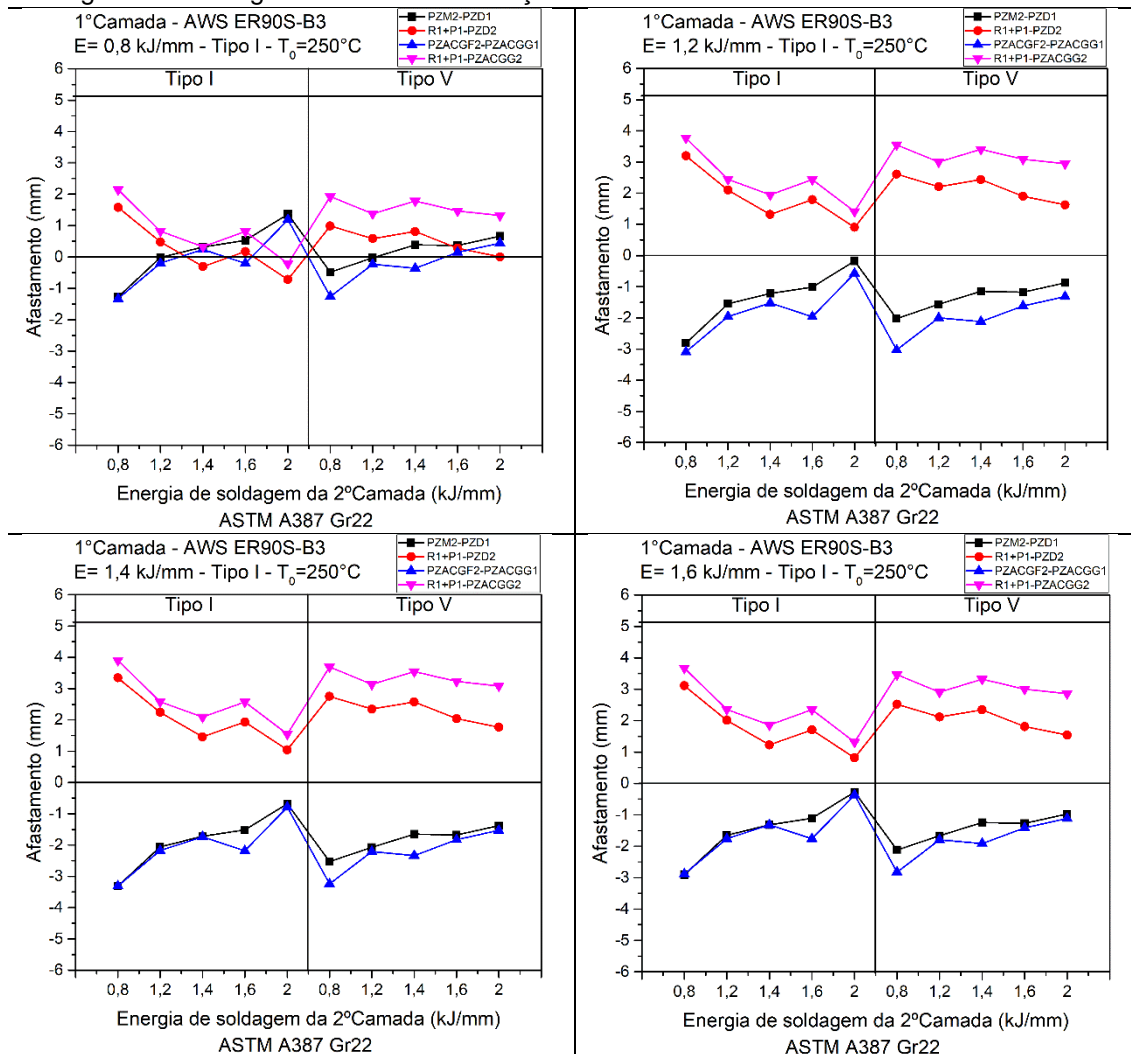
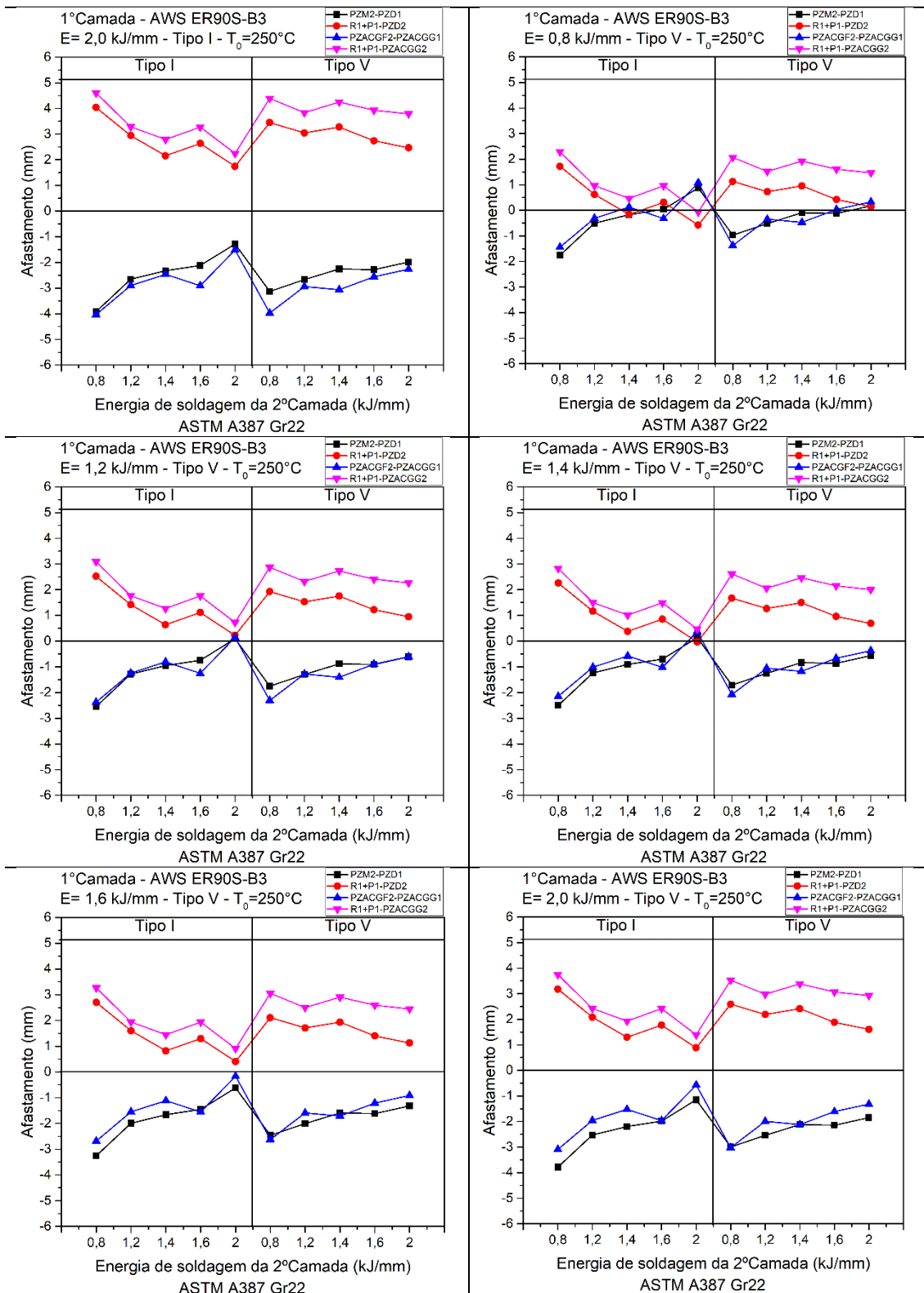
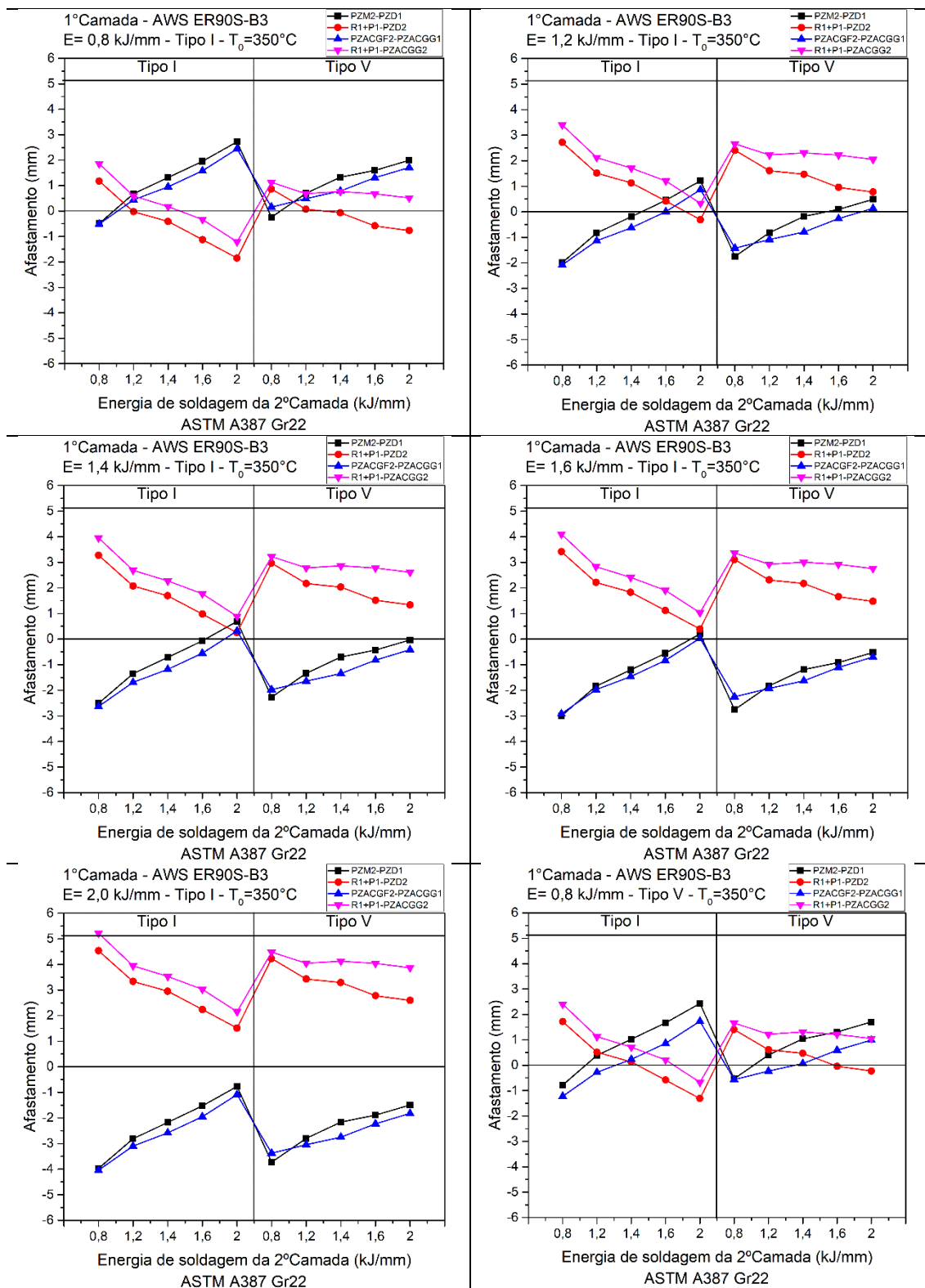


Figura 178 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr22 - Eletrodo AWS ER90S-B3







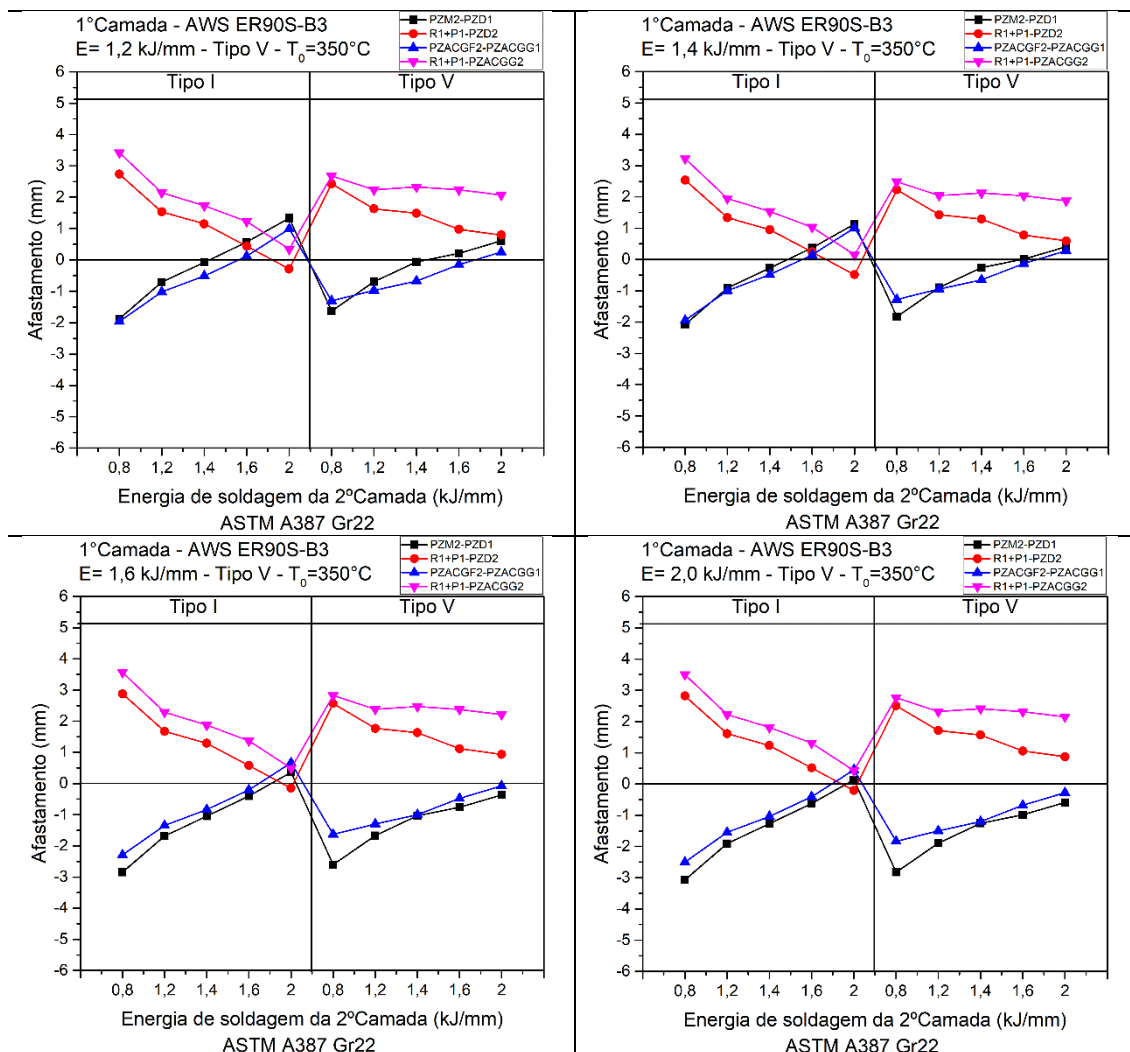
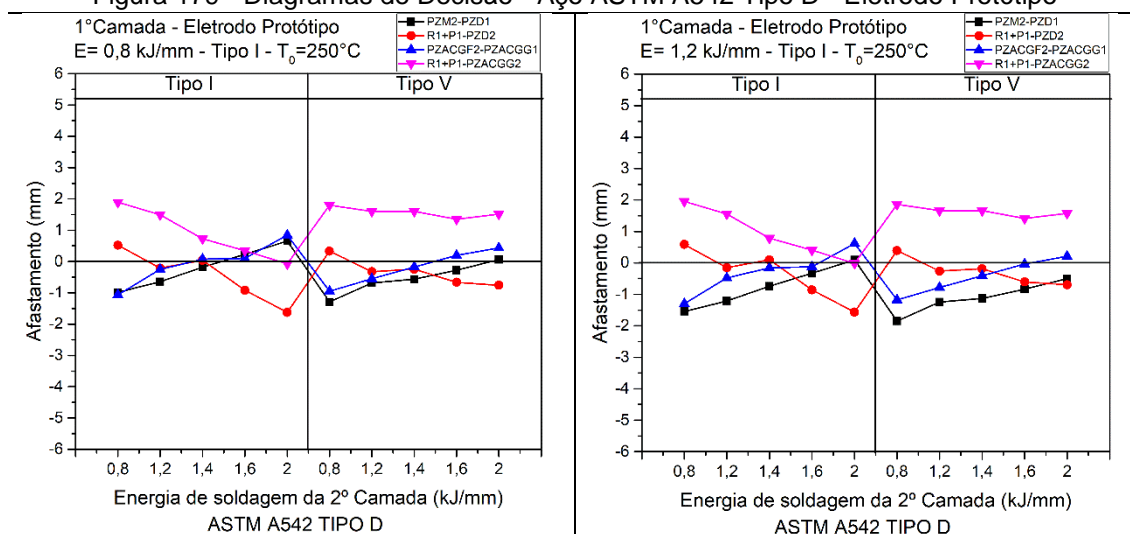
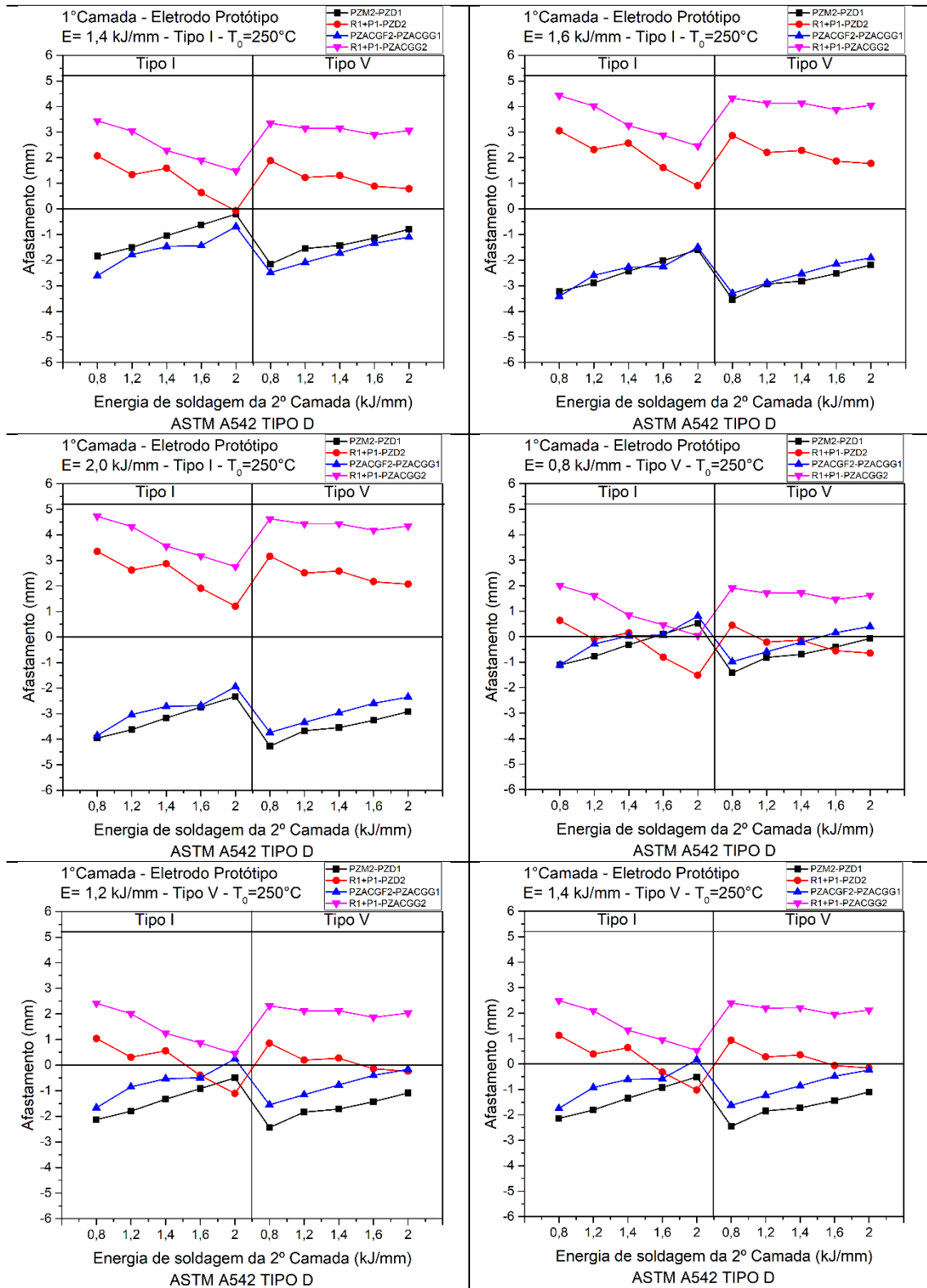
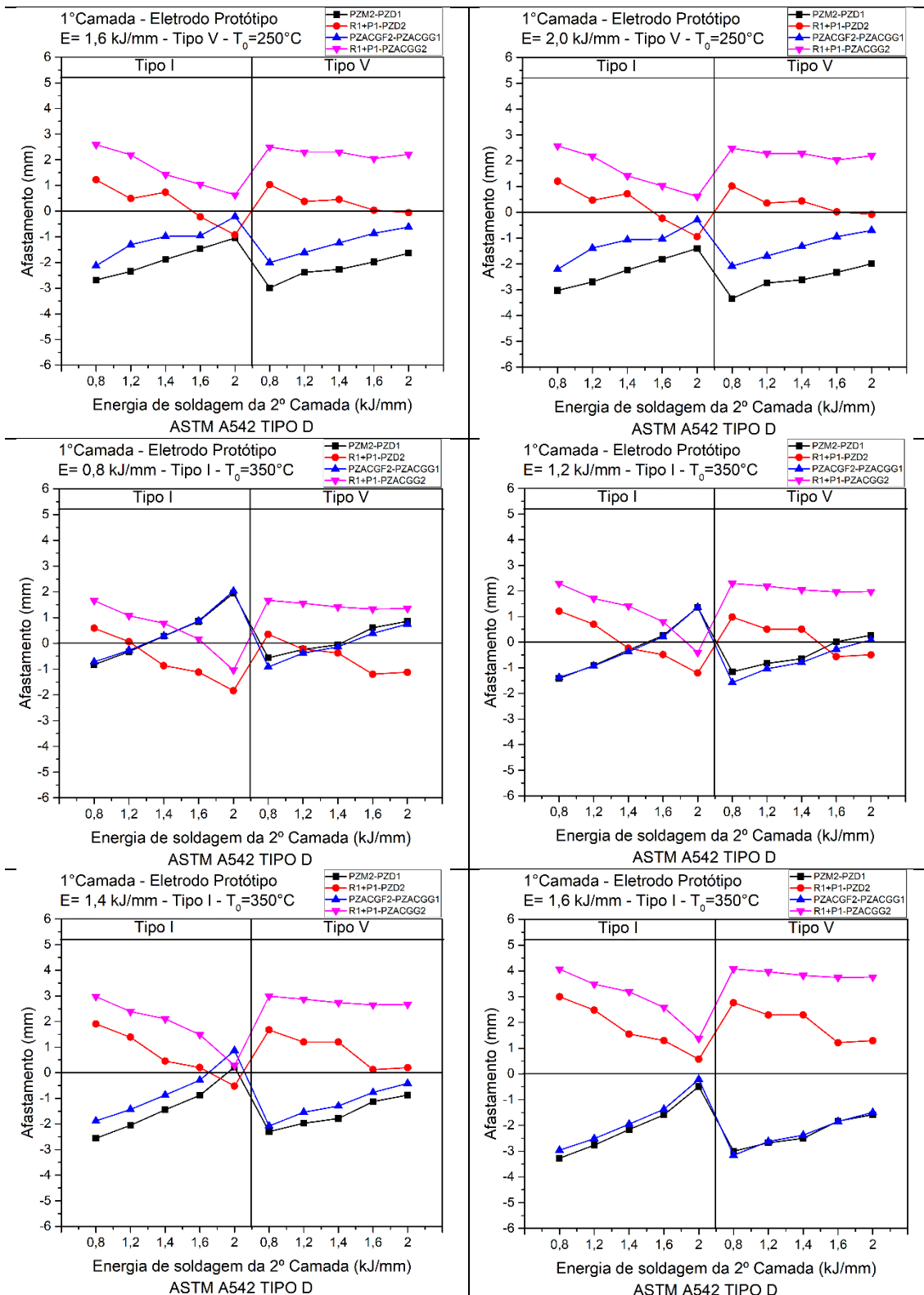
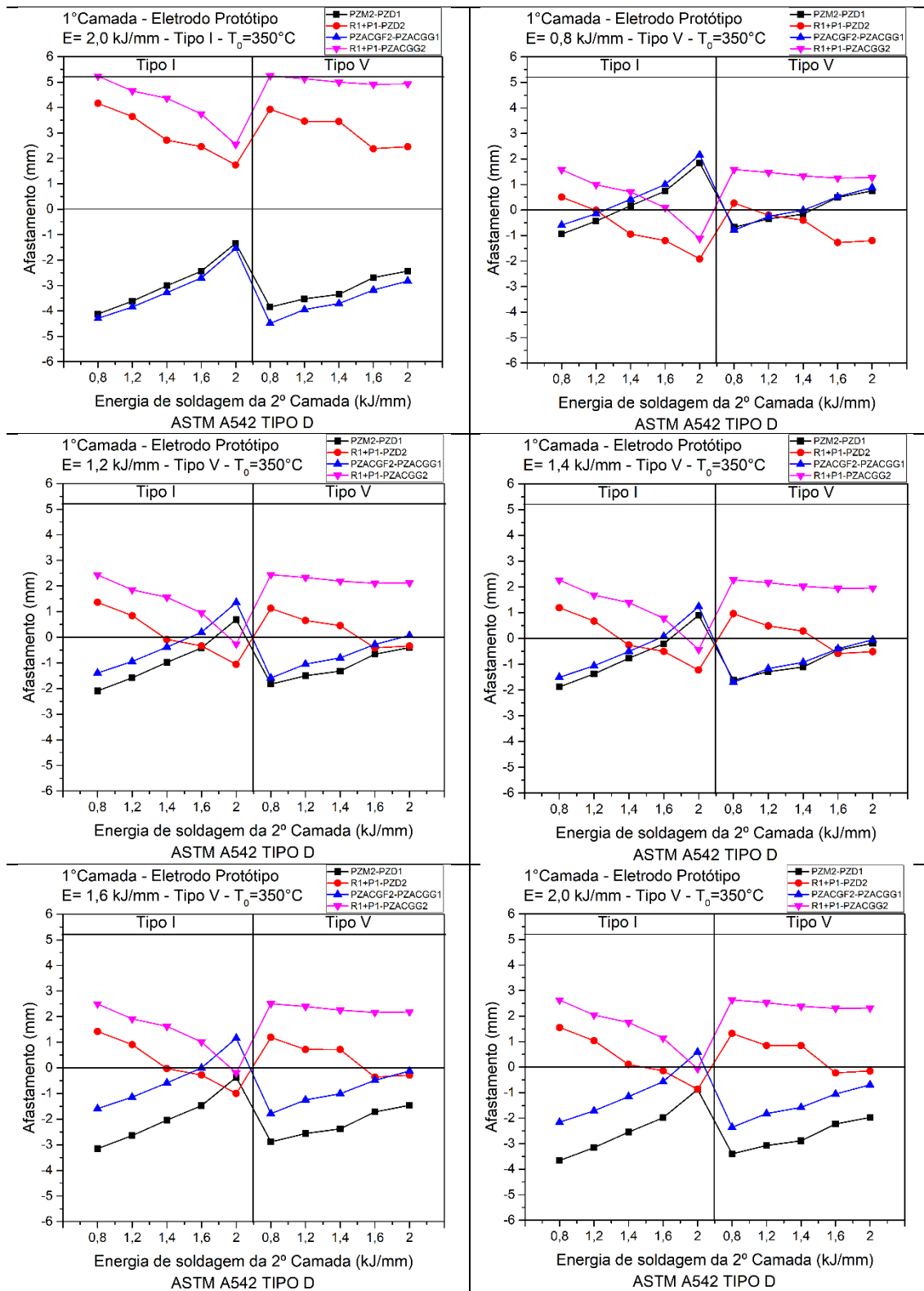


Figura 179 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A542 Tipo D - Eletrodo Protótipo



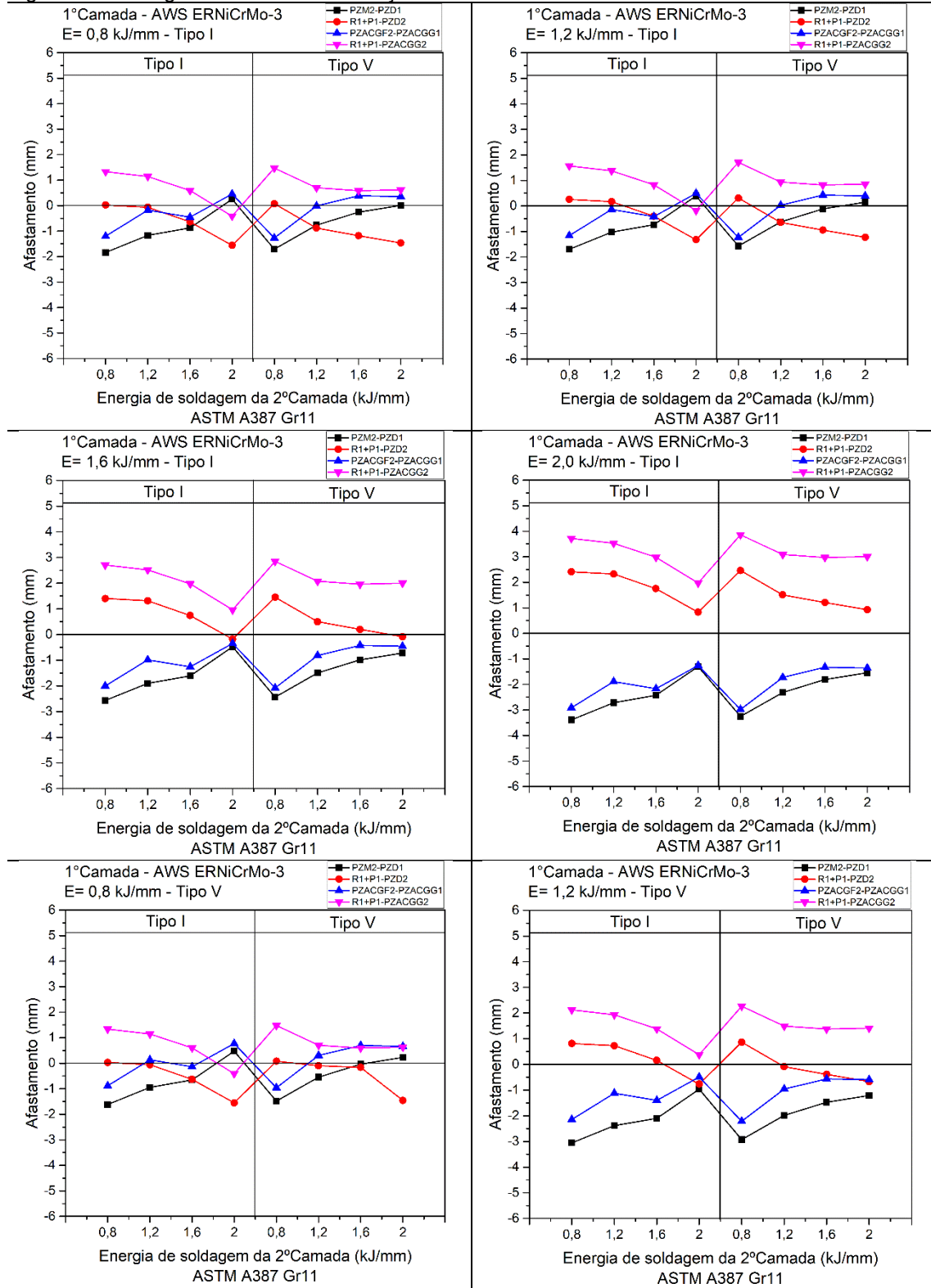






Fonte: Própria do autor.

Figura 180 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr11 - Eletrodo AWS ERNiCrMo-3



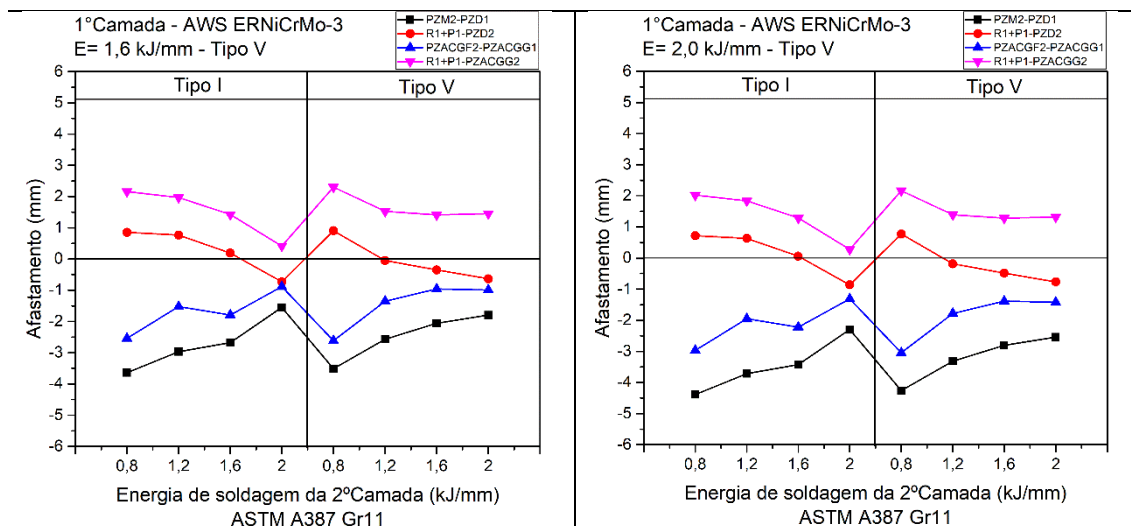
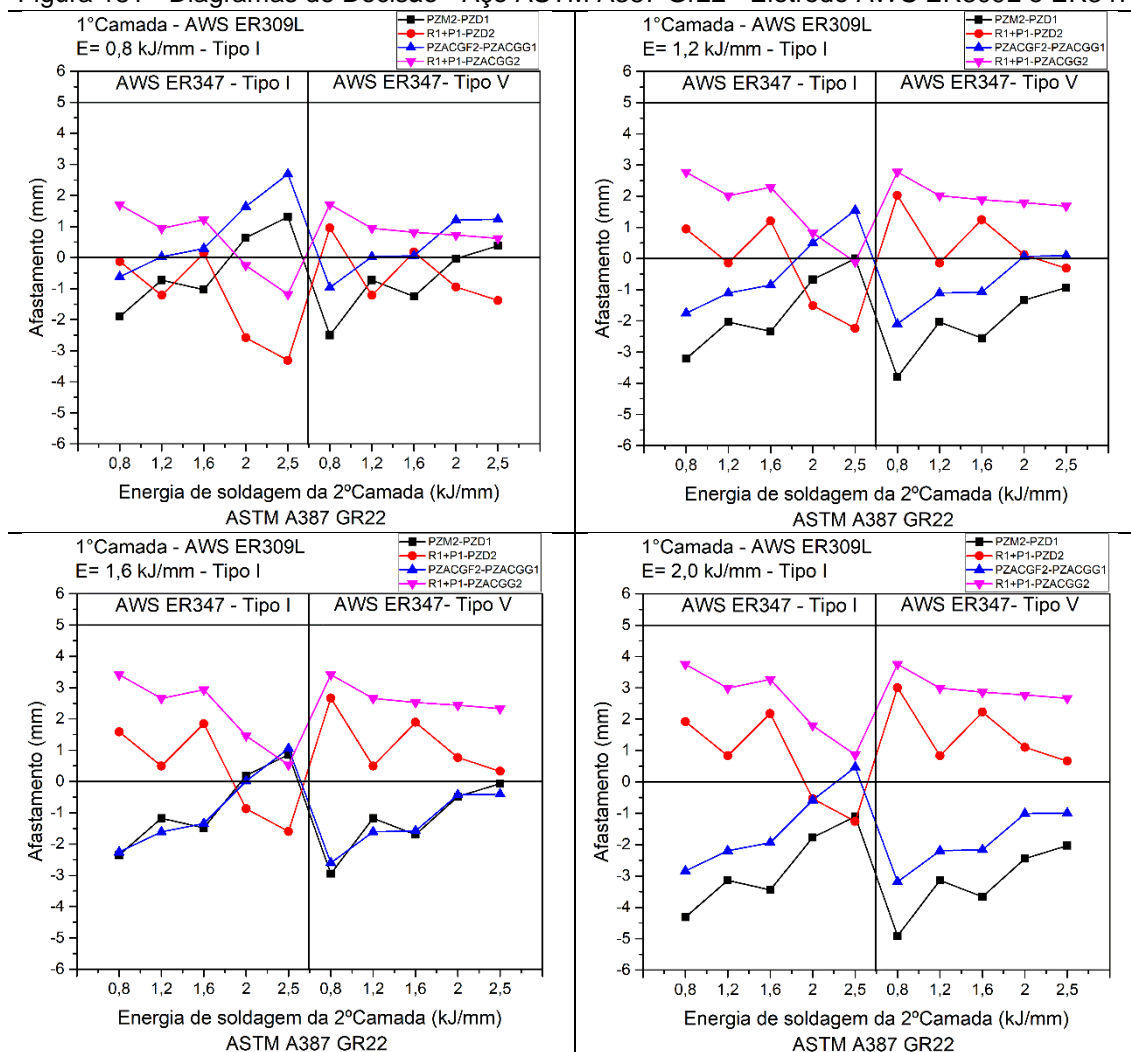
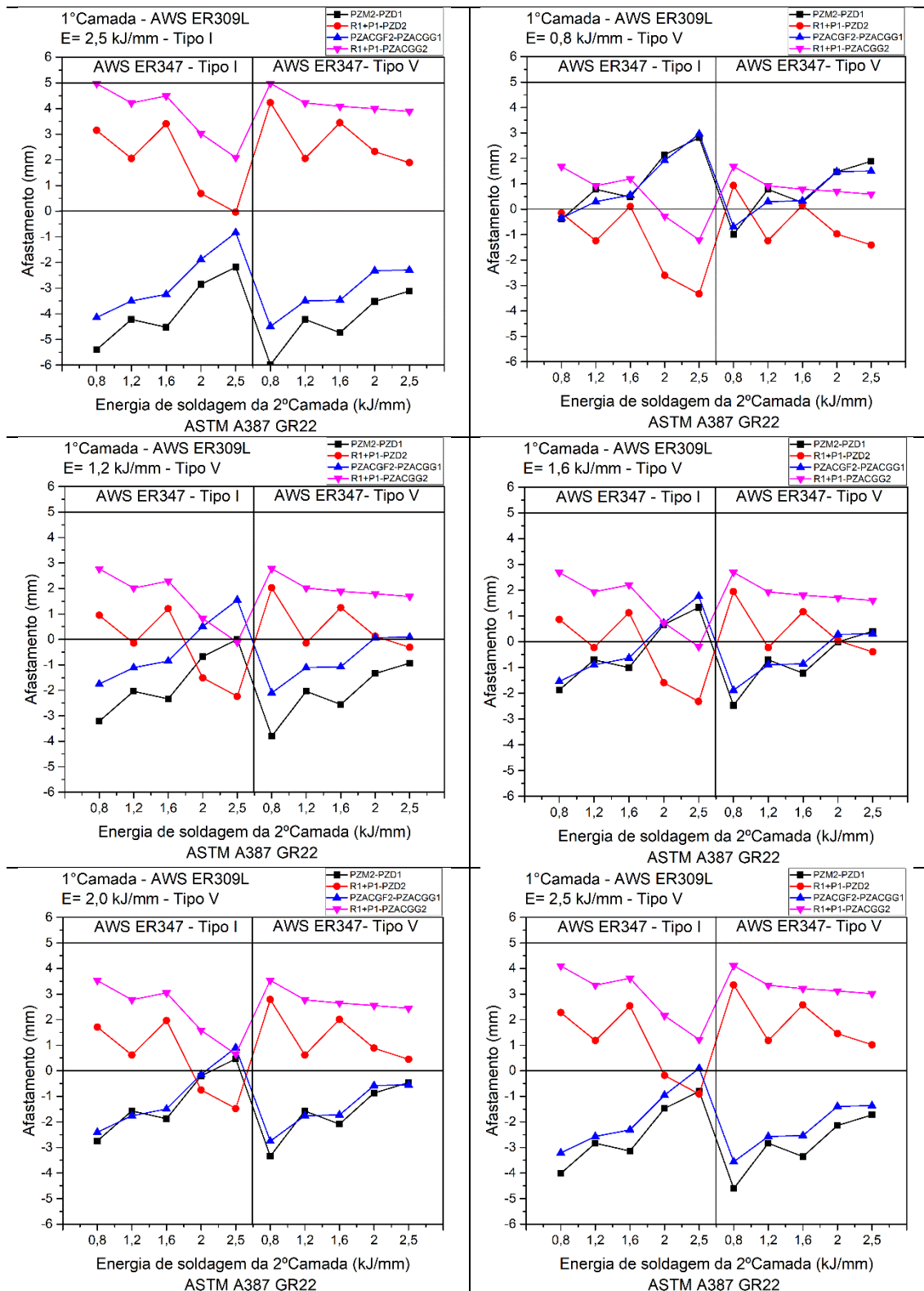


Figura 181 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A387 Gr22 - Eletrodo AWS ER309L e ER347





Fonte: Própria do autor.

Figura 182 - Diagramas de Decisão - Aço ASTM A542 Tipo D - Eletrodo AWS ER309L e ER347

