



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO (CTC)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Vitor Igor da Cunha Silva

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM
COM TECIMENTO EM ALTA FREQUÊNCIA USANDO O PROCESSO ARAME
TUBULAR

Florianópolis

2022

Vitor Igor da Cunha Silva

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS DE REVESTIMENTO POR SOLDAGEM
COM TECIMENTO EM ALTA FREQUÊNCIA USANDO O PROCESSO ARAME
TUBULAR

Dissertação submetida ao Programa de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica
Orientador: Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cunha Silva, Vitor Igor
DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS DE REVESTIMENTO POR
SOLDAGEM COM TECIMENTO EM ALTA FREQUENCIA USANDO O
PROCESSO ARAME TUBULAR / Vitor Igor Cunha Silva ;
orientador, Mateus Barancelli Schwedersky, 2022.
142 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Processo GMAW. 3.
Revestimento de alta performance. 4. Arame Tubular. 5.
Oscilação com alta frequência. I. Barancelli Schwedersky,
Mateus . II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Vitor Igor da Cunha Silva

**DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTOS DE REVESTIMENTO POR
SOLDAGEM COM TECIMENTO EM ALTA FREQUÊNCIA USANDO O
PROCESSO ARAME TUBULAR.**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Hélio Cordeiro de Miranda, Dr. Eng
Universidade Federal do Ceará

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022.

Dedico,
Aos meus pais, Euzébio e Eliana.
Ao meu irmão, Gustavo.
À minha namorada, Maria Clara
À minha querida e amada, vó Alzira (In memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que de forma singular me conduziu até aqui e por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Euzébio e Eliana e, também, ao meu irmão Gustavo, que nunca mediram esforços para me auxiliar. O amor de vocês atrelado ao enorme incentivo significaram, mesmo que de longe, minha maior força. Minha eterna gratidão por tudo que fizeram e fazem por mim. Amo vocês.

À minha namorada Maria Clara, que teve um papel de enorme importância para a finalização deste trabalho, sendo minha conselheira, incentivadora e companheira, enfrentando juntos todos os desafios e distância de casa, com muita paciência e amor. Sua força e presença foram inspiração para minha caminhada.

Ao orientador Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky, obrigado pela paciência, educação, contribuição técnica e incentivo. Sua orientação, foi sem dúvida, de enorme valia e essencial para a finalização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Régis Henrique, obrigado pela oportunidade de ingressar na equipe do LABSOLDA. Os ensinamentos ministrados ao longo do programa acrescentaram muito em meu conhecimento sobre a área.

Aos membros da banca: Prof. Dr. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, especialistas da área da soldagem, que aceitaram avaliar este trabalho.

Aos amigos e companheiros de trabalho do LABSOLDA, pelo grande apoio técnico ao longo do trabalho, pelas boas conversas e experiências proporcionadas, além de claro, as amizades feitas, são eles: Rodrigo Nogueira, Daniel Galeazzi, Alberto Bonamigo, Rafael Horn, João Cairo Alcântara, Fernando Costenaro, Isabel Mattos, Júlia Dornelles, Alisson Rosa, Ivan Pigozzo, Marcelo Okuyama, Junior Zanini, Alex Sandro Pereira, Kauê Riffel e Cláudio Schaeffer. Gostaria de ainda, deixar um agradecimento especial ao grande Cléber Guedes, famoso “Clebão”. Profissional e pessoa de enorme caráter e conhecimento, sempre disposto a auxiliar no necessário para realização da pesquisa. Muito obrigado a todos!

Aos meus amigos de Bom Despacho, Belo Horizonte, João Monlevade e Florianópolis, que ao longo da minha caminhada sempre estiveram juntos comigo, nas horas boas e ruins, me mostrando o valor real de uma grande amizade.

E mesmo que meus passos sejam falsos, mesmo que os meus caminhos sejam errados, mesmo que o meu jeito de levar a vida incomode, eu sei quem sou, e sei pelo que devo lutar. Se você acha que o meu orgulho é grande, é porque nunca viu o tamanho da minha fé! (TIÃO CARREIRO, 1970)

RESUMO

O processo MIG/MAG é amplamente utilizado na indústria para soldagem de união, para operações de revestimento e deposição de material metálico para recuperar a espessura perdida devido ao desgaste. Apesar desse processo estar presente no meio industrial há algumas décadas, ainda existem muitos exemplos de aplicações que podem ter a produtividade melhorada caso o processo seja empregado usando técnicas avançadas de mecanização. É de grande importância a escolha por procedimentos mais robustos que atendam à crescente demanda tanto da qualidade, produtividade e diminuição de custos desejada pelo setor industrial. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da técnica de revestimento com oscilação em frequência elevada, com valores de 1,5 Hz ou mais, visando possibilitar a deposição de material metálico com alta performance usando o processo MIG/MAG com arames tubulares de ligas especiais para operações de revestimento e reparo de turbinas hidráulicas. Os resultados mostraram que a etapa de parametrização do processo para cada arame é uma tarefa complexa devido ao grande número de possibilidades de combinação de diferentes ajustes do processo de soldagem e também do padrão de movimentação oscilatório. Foi possível desenvolver condições operacionais que possibilitaram obter cordões e camadas de revestimentos de alta performance, os quais possuem menor altura, baixa penetração e boa planicidade. Apesar disso, foi percebido que a espessura do material de base influencia na temperatura da poça de fusão, e caso ocorra aquecimento excessivo da peça, o processo fica susceptível ao escorrimento e geração de descontinuidades. Testes comparativos entre processos tradicionais e os de alta performance com arames tubulares também foram realizados, os resultados mostraram possibilidade de obtenção de considerável diminuição na quantidade de material depositado em cada camada, gerando diminuição de custos, menor penetração e melhor regularidade, indicando que a tecnologia de oscilação em alta frequência é promissora para utilização no reparo por revestimento de turbinas hidráulicas.

Palavras-chave: Processo GMAW. Revestimento de alta performance. Arame Tubular. Oscilação com alta frequência. CA6NM.

ABSTRACT

The MIG/MAG process is widely used in the industry for seam welding, for coating operations, and for deposition of metallic material to recover lost thickness due to wear. Although this process has been present in the industrial environment for some decades, there are still many examples of applications that can have their productivity improved if the process is employed using advanced mechanization techniques. It is of great importance to choose more robust procedures that meet the increasing demand for quality, productivity, and cost reduction desired by the industrial sector. Therefore, the present work has as its main objective the study of the weaving technique with high frequency oscillation, with values of 1.5 Hz or more, aiming to enable the deposition of metallic material with high performance using the MIG/MAG process with tubular wires of special alloys for coating operations and repair of hydraulic turbines. The results showed that the process parameterization step for each wire is a complex task due to the large number of combination possibilities of different welding process settings and also of the oscillatory movement pattern. It was possible to develop operating conditions that made it possible to obtain high performance beads and layers of coatings, which have lower height, low penetration, and good flatness. Nevertheless, it was noticed that the thickness of the base material influences the temperature of the melt pool, and if excessive heating of the part occurs, the process is susceptible to runoff and the generation of discontinuities. Comparative tests between traditional processes and those of high performance with flux-cored wires were also performed. The results showed that it is possible to obtain a considerable decrease in the amount of material deposited in each layer, generating cost reduction, less penetration and better regularity, indicating that the high frequency oscillation technology is promising for use in the repair by coating of hydraulic turbines.

Keywords: GMAW Process. High-performance coating. Tubular Wire. High Frequency Oscillation. CA6NM

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem mostrando a sequência de cordões de solda realizados em progressão horizontal para depositar uma camada de aço inox 309 na superfície da pá de turbina hidrelétrica que sofreu desgaste.....	18
Figura 2 - Região onde foram depositados cordões de solda realizados em progressão horizontal para depositar uma camada de aço inox 309 na superfície da pá de turbina hidrelétrica que estava sendo recuperada.....	19
Figura 3 - Curso da transferência metálica por curto-circuito no processo MIG/MAG convencional.....	23
Figura 4 - Oscilograma de tensão e corrente para o modo MIG convencional com curto-circuito ($I_m = 86A$ e $P = 1121 W$)	24
Figura 5 - Forma de onda de corrente do tipo retangular. Parâmetros: I_p (corrente de pulso), I_b (corrente de base), t_p (tempo de pulso), t_b (tempo de base), I_m (corrente média), T (período)	27
Figura 6 - Geometria dos cordões de solda	30
Figura 7 - (a) Soldagem com arames tubulares com proteção externa (b) Soldagem com arames tubulares autoprotetidos.....	32
Figura 8 - Taxas de deposição de arames tubulares e arame maciço	34
Figura 9 - Método de aplicação da solda e seus respectivos "ciclos de trabalho" em porcentagem.....	35
Figura 10 - Trajetórias sem e com oscilações mais utilizadas em soldagem	36
Figura 11 - Relação entre amplitude e frequência do robô Motoman DX100	37
Figura 12 - Superfície dos cordões. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz.....	39
Figura 13 - Macrografias comparativas. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz.....	39
Figura 14 - Imagens da superfície dos cordões com diferentes frequências de oscilação. Em (A) 2 Hz, em (B) 3 Hz e em (C) 4 Hz.....	41
Figura 15 - Regiões das análises macrográficas. (A) seção transversal; (B) corte longitudinal na extremidade e (C) corte longitudinal no centro do cordão	42
Figura 16 - Macrografia das amostras na região A juntamente com as medidas de reforço e penetração.....	42

Figura 17 - Macrografias das amostras na região B em (a) e na região C em (b).....	43
Figura 18 - Tocha Spinarc rotacionada em alta frequência. W = 3000 rpm	45
Figura 19 - Esquemático para nomenclatura das ligas de aço inoxidável resistentes à corrosão e resistentes à alta temperatura com base nas faixas de Ni e Cr. As letras nos círculos representam a segunda letra no sistema de designação	47
Figura 20 - Microestrutura martensítica do aço CA6NM em estado "como fundido" contendo um pouco de ferrita δ (ver setas em b). (a) e (b) atacados com reagente Ralph. (c) e (d) atacados com 15HCl - 10 ácido acético - 10HNO ₃ . (d) Mesmo campo mostrado em (c) mas	50
Figura 21 - Diagrama de fases ferro-cromo-níquel, para razão cromo/níquel igual a 3:1	51
Figura 22 - Diagrama de Transformação de Resfriamento Contínuo do aço CA6NM	51
Figura 23 - Localização dos pontos de medição da microdureza.....	53
Figura 24 - Perfil de dureza das juntas soldadas. (a) raiz da solda (b) lado superior A (c) lado superior B	54
Figura 25 - Gráfico comparativo dos valores médios de absorção energia das amostras como soldada e TTPS	54
Figura 26 - Macrografia mostrando a seção transversal de uma junta de solda e as regiões a partir das quais foi realizada a análise de microscopia óptica. T (topo); C (centro); R (raiz) e Z (ZTA).....	56
Figura 27 - Macrografia (esquerda) e imagens em mosaico obtidas pelo microscópio óptico da junta soldada (direita). (a) como soldada; (b) com TTPS.....	56
Figura 28 - Fluxograma das etapas do Trabalho	57
Figura 29 - Parâmetros dos cordões efetuados na chapa A.....	63
Figura 30 - Parâmetros dos cordões efetuados na chapa B	64
Figura 31 - Região (h) adotada para medição das alturas dos revestimentos.....	68
Figura 32 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda, onde: (W) largura, (P) penetração, (R) reforço	69
Figura 33 - Dimensões da chapa de aço carbono	71
Figura 34 - Dimensões chapa de CA6NM	72
Figura 35 - Fonte de Soldagem	73
Figura 36 - Tartilope V2 – Sistema de movimentação automática para soldagem....	74
Figura 37 - Tocha MIG/MAG Tbi 511 Aut	74

Figura 38 - Medidor de deslocamento Linear	75
Figura 39 - Sistema de Aquisição Portátil.....	75
Figura 40 - Equipamento de controle do sistema de oscilação. Em (a) potenciômetro para regulagem de frequência, em (b) botão liga/desliga, em (c) botão de sentido do movimento e em (d) display de visualização da frequência	76
Figura 41 - Equipamento de oscilação acoplado ao suporte com a tocha de soldagem	76
Figura 42 - Bancada de ensaios para realização das análises da frequência. (a) medidor de deslocamento linear, (b) sistema de oscilação da tocha e (c) SAP	78
Figura 43 - Representação do modo de regulagem da amplitude do oscilador.....	80
Figura 44 - Primeira camada de amanteigamento com E309L	81
Figura 45 - Segunda camada de revestimento com Cavitalloy sobre a camada de amanteigamento.....	81
Figura 46 - Macrografia do revestimento com duas camadas. (a) E309L e (b) Cavitalloy	81
Figura 47 - Revestimento de duas camadas com Stelloy 6 utilizando Argônio puro como gás de proteção sobre chapa de CA6NM.....	82
Figura 48 - Revestimento de duas camadas com Stelloy 6 utilizando Argônio + 2% de O2 como gás de proteção sobre chapa de CA6NM.....	82
Figura 49 - Revestimento com duas camadas de Stelloy 6 (Argônio puro como gás de proteção). (a) 1ª camada e (b) 2ª camada.....	83
Figura 50 - Revestimento de duas camadas com Stelloy 6 (Argônio + O2 como gás de proteção). (a) 1ª camada e (b) 2ª camada.....	83
Figura 51 - Revestimento com duas camadas de Durolit 21 sobre chapa de CA6NM	84
Figura 52 - Revestimento de duas camadas com Durolit 21. (a) 1ª camada esmerilhada e (b) 2ª camada	84
Figura 53 - Região do revestimento escolhida para análise	85
Figura 54 - Macografia do revestimento com uma camada de amanteigamento de (a) Cavitalloy sobre uma de (b) E309L.....	86
Figura 55 - Cordões realizados com processo MIG/MAG pulsado sinérgico variando a frequência e amplitude de oscilação	87

Figura 56 - Macrografia dos cordões realizados com pulsado sinérgico variando a frequência e amplitude de oscilação	89
Figura 57 - Aspecto superficial dos cordões variando amplitude de oscilação e velocidade de soldagem.....	90
Figura 58 - Revestimento utilizando CO2 como gás de proteção	91
Figura 59 - Cordão escolhido como parâmetro base para o revestimento (cordão 1)	92
Figura 60 - Corte transversal na amostra do revestimento	93
Figura 61 - Cordões (chapa A) realizados com Cavitalloy; 1 e 2 – Convencional, 3 e 4 – Pulsado Sinérgico	93
Figura 62 - Cordões (chapa B) realizados com Cavitalloy	94
Figura 63 - Revestimento com 1 camada e 1/2 na chapa de aço carbono	95
Figura 64 - Revestimento com 1 camada e 1/2 na chapa de CA6NM	96
Figura 65 - Ensaio de líquido penetrantes para averiguação do aparecimento de trincas	96
Figura 66 - Cordões que passaram pelos ensaios metalográficos: (a) cordão único referencial para o revestimento (b) cordões feito com revestimento.....	97
Figura 67 - Macrografia do revestimento com Cavitalloy na chapa de CA6NM. (a) duas camadas, (b) uma camada	98
Figura 68 - Sequência da parametrização dos cordões de solda realizados com Stelloy 6 (Imagem 1, imagem 2 e imagem 3).....	99
Figura 69 - Cordão padrão utilizando Stelloy 6 (seta amarela).....	99
Figura 70 - Corpos de provas com uma camada de revestimento de Stelloy 6 (imagem 1) e duas camadas de revestimento (imagem 2).....	100
Figura 71 - Trabalho realizado pela chapa de aço carbono	100
Figura 72 - Ensaio de líquido penetrante sobre o revestimento na chapa de aço carbono com Stelloy 6	101
Figura 73 - Duas camadas de revestimento com Stelloy 6 sob a chapa de CA6NM	102
Figura 74 - Ensaio de líquido penetrante sob o revestimento na chapa de CA6NM com Stelloy 6.....	103
Figura 75 - Trinca na segunda camada do revestimento de Stelloy 6 sob a chapa de CA6NM (identificada com as setas vermelhas)	103
Figura 76 - Cordão único realizado de Stelloy 6 em chapa de aço carbono	104
Figura 77 - Macrografia do revestimento com Stelloy 6 na chapa de aço carbono .	104
Figura 78 - Macrografia do revestimento com Stelloy 6 na chapa de CA6NM.....	105

Figura 79 - Cordão único de Durolit 21 escolhido como parâmetro (cordão 2) em aço carbono	106
Figura 80 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 15 mm em aço carbono	107
Figura 81 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 15 mm em CA6NM	108
Figura 82 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 12 mm	109
Figura 83 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 12 mm em CA6NM	110
Figura 84 - Ensaio de líquidos penetrantes.com 15 mm de amplitude de oscilação (a) chapa de aço carbono, (b) chapa de CA6NM para Durolit 21	111
Figura 85 - Ensaio de líquidos penetrantes.com 12 mm de amplitude de oscilação (c) chapa de aço carbono, (d) chapa de CA6NM para Durolit 21	112
Figura 86 - Macrografia do cordão padrão para o revestimento de Durolit 21	112
Figura 87 - Macrografia do revestimento de 15 mm de amplitude na chapa de aço carbono para Durolit 21	113
Figura 88 - Macrografia do revestimento de 15 mm de amplitude na chapa de CA6NM para Durolit 21	113
Figura 89 - Macrografia do revestimento com Durolit 21 em aço carbono com 12 mm de amplitude de oscilação.....	114
Figura 90 - Macografia do revestimento com Durolit 21 em CA6NM com 12 mm de amplitude de oscilação.....	114
Figura 91 - Gráfico com altura e penetração média para duas camadas de revestimento com Cavitalloy.....	116
Figura 92 - Gráfico com altura e penetração média para duas camadas de revestimento com Stelloy 6.....	117
Figura 93 - Gráfico com altura e penetração média para duas camadas de revestimento com Durolit 21	117
Figura 94 - Comparativo entre composição medida das ligas com as composições fornecidas pelos fabricantes (nominais)	120
Figura 95 - Comparativo entre processos convencionais (mecanizado e manual) e de alta performance com Cavitalloy.....	121

Figura 96 - Comparativo entre processos convencionais (mecanizado e manual) e de alta performance com Stelloy 6 (a) e Durolit 21 (b).....	122
Figura 97 - Comparação entre os perfis de revestimentos com Cavitalloy para os procedimentos de alta performance (duas camadas) com os procedimentos convencionais (duas camadas).....	123
Figura 98 - Comparação entre os perfis de revestimentos com Stelloy 6 para os procedimentos de alta performance (duas camadas) com os procedimentos convencionais (duas camadas).....	123
Figura 99 - Comparação entre os perfis de revestimentos com Durolit 21 para os procedimentos de alta performance (duas camadas) com os procedimentos convencionais (duas camadas). (a) 15mm de amplitude de oscilação e (b) 12 mm de amplitude de oscilação	124
Figura 100 - Gráfico comparando quantidade de material depositado entre processos convencionais e alta performance.....	125
Figura 101 - Gráfico comparando custo do material de adição entre processos convencionais e alta performance.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação de custo de produção entre amare sólido e “metal cored”	33
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem.....	38
Tabela 3 - Análise a diluição e das características geométricas.....	40
Tabela 4 - Análise de diluição para as amostras	44
Tabela 5 - Composição química do aço CA6NM	47
Tabela 6 - Tabela de propriedades Físicas típicas do aço CA6NM	48
Tabela 7 - Tabela de propriedades Mecânicas do aço CA6NM.....	48
Tabela 8 - Parâmetros de todos os processos realizados manualmente com arames tubulares	59
Tabela 9 - Parâmetros dos processos realizados de forma mecanizada com arames tubulares	60
Tabela 10 - Parâmetros dos primeiros cordões realizados	61
Tabela 11 - Parâmetros de velocidade de soldagem e amplitude escolhidos.....	61
Tabela 12 - Parâmetros dos cordões de solda referentes a imagem 1	65
Tabela 13 - Parâmetros dos cordões de solda referentes a imagem 2	65
Tabela 14 - Parâmetros dos cordões de solda referentes a imagem 3	66
Tabela 15 - Parâmetros dos cordões de solda do último corpo de prova	66
Tabela 16 - Composição nominal das ligas utilizadas como metal de adição	72
Tabela 17 - Valores de penetração dos cordões	89
Tabela 18 - Composição química nominal e dos depósitos efetuados com a liga Cavitalloy	118
Tabela 19 - Composição química nominal e dos depósitos efetuados com a liga Stelloy 6	118
Tabela 20 - Composição química nominal e dos depósitos efetuados com a liga Durolit 21	119
Tabela 21 - Valores para massa de meio metro e do quilograma de arame	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIG *Metal Inert Gas*

MAG *Metal Active Gas*

GMAW Gás Metal Arc Welding

ZAC Zona Afetada pelo Calor

V_s Velocidade de soldagem

I_p Corrente de pulso

I_b Corrente de base

t_p Tempo de pulso

t_b Tempo de base

T Período

I_m Corrente média

V_a Velocidade de soldagem

DBCP Distância bico de contato peça

I corrente

U Tensão

f Frequência

d_g Diâmetro da gota

d_e Diâmetro do arame eletrodo

D Constante de Destacamento

IIW International Institute of Welding

ASME The American Society of Mechanical Engineers

FCAW Flux Cored Arc Welding

CC+ Corrente contínua eletrodo positivo

CC- Corrente contínua eletrodo negativo

SAP Sistema de Aquisição Portátil

AIMM Aços inoxidáveis martensíticos macios

ASTM *American Society for Testing and Materials*

TTPS Tratamento térmico pós soldagem

LABSOLDA Laboratório de Soldagem e Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.1.3	Justificativas.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	MIG/MAG CONVENCIONAL	21
2.2	MIG/MAG PULSADO.....	25
2.3	SOLDAGEM MIG/MAG COM ARAME TUBULAR	28
2.4	TECNOLOGIA DE MECANIZAÇÃO DA SOLDAGEM.....	34
2.5	AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS.....	45
2.5.1	Aço inoxidável martensítico macio CA6NM	46
3	MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	57
3.1	MÉTODOS	57
3.1.1	Análise dos procedimentos de soldagem tradicionalmente utilizados usando soldagem aplicada de forma semiautomática	57
3.1.2	Desenvolvimento de procedimentos de soldagem de alta performance com arame maciço	60
3.1.3	Desenvolvimento de procedimentos de soldagem de alta performance com arame tubular com estudo sobre os efeitos proporcionados pelo uso do gás CO₂ puro no processo de soldagem com o arame tubular (E309L).....	62
3.1.4	Desenvolvimento de procedimentos de soldagem de alta performance com arames tubulares Cavitalloy, Stelloy 6 e Durolit 21	62
3.1.5	Medições necessárias para efetuar comparações reais entre os processos tradicionalmente usados na indústria com os de alta performance.....	67
3.2	MATERIAIS.....	70
3.2.1	Corpos de Prova (Chapas)	71

3.2.2	Arames	72
3.3	EQUIPAMENTOS	72
3.3.1	Fonte de Soldagem	72
3.3.2	Manipulador de Movimento	73
3.3.3	Tocha de Soldagem	74
3.3.4	Medidor de Deslocamento Linear	74
3.3.5	Sistema de Aquisição Portátil (SAP)	75
3.3.6	Sistema de Oscilação Senoidal	76
3.3.7	Verificação do dispositivo de movimentação da tocha de soldagem	77
3.3.8	Verificação da frequência no dispositivo de oscilação	77
3.3.9	Verificação da amplitude no dispositivo de oscilação	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1	PROCEDIMENTOS SEMIAUTOMÁTICOS COM ARAMES TUBULARES E309L, CAVITALLOY, STELLOY 6 E DUROLIT 21	80
4.2	PROCEDIMENTO MECANIZADO COM ARAMES TUBULARES E309LSi E CAVITALLOY	84
4.2.1	AVALIAÇÕES UTILIZANDO ARAME MACIÇO DE FORMA MECANIZADA COM PROCEDIMENTO DE ALTA PERFORMANCE	86
4.3	PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTO MIG/MAG MECANIZADA UTILIZANDO ARAMES TUBULARES COM OSCILAÇÃO DA TOCHA 91	
4.3.1	REVESTIMENTO COM E309L UTILIZANDO CO₂ COMO GÁS DE PROTEÇÃO	91
4.3.2	REVESTIMENTO COM CAVITALLOY	93
4.3.3	REVESTIMENTO COM STELLOY 6	98
4.3.4	REVESTIMENTO COM DUROLIT 21	105
4.4	COMPARATIVO ENTRE A ALTURA MÉDIA E PENETRAÇÃO MÉDIA UTILIZANDO O MODO SEMIAUTOMÁTICA, MECANIZADO COM E SEM OSCILAÇÃO DA TOCHA DE ALTA FREQUÊNCIA	115

4.5	COMPARAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DE CADA ELEMENTO DE LIGA E A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS MEDIDA NOS CORDÕES DE SOLDA.....	118
4.6	COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS DE PERFIS DE CADA REVESTIMENTO REALIZADO ENTRE OS MODOS CONVENCIONAIS E DE ALTA PERFORMANCE	122
4.7	AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL DEPOSITADO E CUSTO GERADO PARA CADA TIPO DE ARAME.....	124
5	CONCLUSÃO.....	126
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
	REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

As operações de revestimento usando soldagem a arco possuem um papel importante em diferentes segmentos da indústria. O revestimento é usado tanto para fabricação de novos equipamentos, como também para recuperação de equipamentos que sofrem desgaste. O Brasil se caracteriza por ter um modelo energético baseado em hidrelétricas, sendo elas responsáveis por mais de 65% conforme a publicação do balanço da matriz elétrica brasileira no ano de 2020 (Pereira, 2019). Tais fatores elevam a importância de garantir de bom funcionamento dos equipamentos geradores de energia, além de uma manutenção adequada dos mesmos.

O processo MIG/MAG é um dos principais processos de soldagem a arco usados para revestimento, por conta de sua versatilidade e características: Ampla disponibilidade de equipamentos e soldadores no meio industrial, proporcionando taxa de deposição mais elevadas do que no processo TIG, possibilidade de aplicação de forma semiautomática e mecanizada, grande variedade de ligas disponíveis no formato de arame, possibilidade de soldagem fora da posição plana.

Apesar de todas as vantagens do MIG/MAG, existe ainda uma grande possibilidade da melhoria de desempenho por meio da automatização da soldagem que permite obter excelente proveito do processo. Os principais benefícios deste processo são o aumento de produtividade por permitir maior taxa de deposição e maior velocidade de arame do que a soldagem semiautomática, aumento de produtividade por meio do aumento do ciclo de trabalho, diminuição dos índices de falhas humanas (defeitos por conta da imperícia do soldador). Além disso, um outro benefício que é menos conhecido a possibilidade da mecanização permitir menor diluição e deposição de camadas de menor espessura do obtido com soldagem semiautomática, acarretando na diminuição da quantidade de material de adição, fatores esses que são de grande importância quando se trabalha com ligas de elevado custo de aquisição, como os aços inoxidáveis ligados ao cobalto (*Cavitalloy, Stelloy 6 e Durolit 21*).

Segundo Lima (2008), a aplicação de revestimentos duros com o objetivo de reduzir o desgaste, e conseqüentemente os custos, busca o incremento da vida útil dos componentes e na redução das paradas para manutenção. Uma correta seleção do material depositado permite, dentre outras coisas, transformar elementos descartáveis por desgaste em bens de capital recuperável, aumentar a resistência e prover às superfícies susceptíveis ao desgaste características e propriedades desejadas e, em geral, aumentar a eficiência do processo.

Trabalhos anteriores realizados no LABSOLDA mostraram que a tecnologia de tecimento em elevada frequência com valores maiores ou iguais a 1,5 Hz, possibilita desenvolver procedimentos mecanizados com essas características. Não existe ampla divulgação científica desses procedimentos de soldagem de alta performance, com condições operacionais que possibilitaram obter cordões e camadas de revestimentos de alta performance, os quais possuem menor altura, baixa diluição, boa planicidade, até porque não se é comum equipamentos industriais que possibilitam a realização de tecimento com arame tubular em alta frequência. Os trabalhos realizados até agora, utilizaram exclusivamente arame maciço.

Dessa forma, dentro do contexto de uma problemática prática observada na recuperação de pás de turbinas fabricadas em CA6NM pretende-se, no presente trabalho, investigar e caracterizar a técnica de tecimento em alta frequência, ou seja, igual ou superior a 1,5 Hz como alternativa para revestimento de alta performance. Este estudo visa utilizar esta técnica como alternativa para o revestimento de peças submetidas a condições de alta performance usando arames tubulares, além disso um comparativo entre revestimentos efetuados de modo automatizado e de semiautomática serão caracterizados e avaliados.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral o estudo da técnica de tecimento em alta frequência com até 4,5 Hz, como alternativa para produzir depósitos de alta performance com o processo usando arames tubulares para operações de revestimento e reparo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar avaliação das características geométricas e de produtividade de procedimentos de soldagem desenvolvidos para aplicação semi-automática e realizar comparação com os procedimentos de alta performance (possibilitando altos valores de frequência e amplitude de oscilação) desenvolvidos ao longo do trabalho para que se tenha uma estimativa da diminuição de custos que pode ser obtida ao usar os procedimentos mecanizados com oscilação em alta frequência.

- Avaliar a aplicabilidade da técnica de soldagem mecanizada com tecimento de alta frequência para diferentes arames tubulares das ligas: 309L (AWS A5.9/A5.9: ER 309 L), Cavitalloy (EN 14700 : T ZFe9), Stelloy 6 (AWS A5.21/A5.21: ER CCoCr-A) e Durolit (AWS A5.21/A5.21: ER CCoCr-E), ponderando principalmente as características geométricas, ocorrência de descontinuidades e fatores que impactam na produtividade obtidas em cada situação.

- Avaliar e comparar a diluição geométrica com a diluição real dos revestimentos realizados com procedimentos convencionais e de alta performance.

1.1.3 Justificativas

As atividades realizadas no contexto da presente dissertação de mestrado podem ser divididas em duas frentes de trabalho com características e metodologias diferentes:

1 - A primeira frente de trabalho tem o objetivo de analisar os procedimentos de deposição de material metálico via soldagem semiautomática, os quais são utilizados atualmente no setor industrial para realizar a recuperação das superfícies desgastadas. Essa análise tem o objetivo de gerar dados e informações comparativas visando mensurar a diminuição de custo e aumento de desempenho que pode ser obtido ao se implantar procedimentos de mais alta performance.

2 - A segunda frente de trabalho consiste no estudo e desenvolvimento de procedimentos de alta performance para a deposição de material metálico usando soldagem mecanizada e oscilação em alta frequência com arames tubulares. Nos parágrafos seguintes a metodologia adotada para cada frente de trabalho será descrita e explicada.

Os procedimentos de soldagem aplicados de forma semiautomática e que são objeto de estudo do presente trabalho consistem em operações de soldagem para depositar camadas de material metálico em determinadas regiões de pás de turbinas de hidrelétricas. A superfície

onde o metal será depositado está na posição vertical, de forma que se trata de uma condição mais desafiadora do que a soldagem na posição plana. Em campo, os soldadores que realizam essa tarefa adotam a progressão horizontal como mostrado na Figura 1. O primeiro cordão depositado apresenta maior dificuldade de realização, pois existe uma tendência de escorrimento já que a superfície está na vertical, de forma que a velocidade de soldagem precisa ser controlada adequadamente para que o escorrimento não ocorra. Os cordões seguintes são de mais fácil realização, pois o cordão depositado anteriormente funciona como uma espécie de anteparo que ajuda a ancorar o metal que está sendo depositado, diminuindo a chance de escorrimento.

Figura 1 - Imagem mostrando a sequência de cordões de solda realizados em progressão horizontal para depositar uma camada de aço inox 309 na superfície da pá de turbina hidrelétrica que sofreu desgaste.



De maneira geral, são procedimentos que não apresentam desafio para realização, mas que resultam em um depósito onde a espessura da camada é relativamente elevada (entre 3 e 5 mm de espessura) e resulta em uma superfície que possui ondulação, e que necessita de operações de esmerilhamento para ser regularizada como mostrado na Figura 2, implicando em

perdas tanto pelo material que foi depositado e tem que ser removido, como também pelo custo da mão de obra para fazer esse serviço.

Figura 2 - Região onde foram depositados cordões de solda realizados em progressão horizontal para depositar uma camada de aço inox 309 na superfície da pá de turbina hidrelétrica que estava sendo recuperada.



Dentro do contexto da primeira frente de trabalho foram analisados procedimentos desenvolvidos no LABSOLDA em um trabalho de cooperação técnico-científico com uma empresa do setor de geração de eletricidade. Esses procedimentos foram desenvolvidos com o objetivo de depositar de forma semiautomática com o processo com arame tubular as seguintes ligas em arame tubular: E309L, Cavitaloy, Stelloy 6 e Durotilit 21. Para a presente dissertação foram realizadas as seguintes atividades de análise:

- Acompanhamento dos procedimentos de soldagem para determinar os aspectos relacionados à produtividade.

- Análise dos aspectos geométricos dos depósitos por meio de análise metalográfica (para verificar o aspecto da superfície, espessura da camada, análise química e nível de diluição obtido).

No caso da segunda frente de trabalho da presente dissertação, será usada uma técnica de soldagem mecanizada inovadora e desafiadora, mas que proporciona possibilidade de obtenção de procedimentos de deposição de material metálico com alta performance, podendo apresentar as seguintes vantagens: menor espessura de camada, menor diluição e melhor regularidade do depósito diminuindo a necessidade de esmerilhamento. Nessa técnica, a

soldagem também é realizada com a superfície na posição vertical, mas a progressão de soldagem é na vertical descendente usando oscilação da tocha em elevada frequência. Essa estratégia utiliza a ação da gravidade que causa o escorrimento do metal na poça de fusão para criar uma situação de soldagem particular onde a ação do arco deve ocorrer preferencialmente sobre o próprio metal da poça, e não sobre o metal de base.

A oscilação em elevada frequência tem como objetivo espalhar o metal de forma adequada e evitar que o arco fique concentrado em um único local, possibilitando que se forme uma camada com menor espessura. Para que o procedimento resulte em um depósito com as características desejadas, e livre de descontinuidades, é necessário encontrar uma combinação de parâmetros de processo que permita obter essa condição de equilíbrio. Os trabalhos anteriores realizados no LABSOLDA usando arame maciço, mostraram que a condição de equilíbrio ocorre em uma faixa de regulagem de parâmetros muito restrita, pois a maior parte da combinação de parâmetros resulta em um procedimento inadequado, resultando em falhas na continuidade da camada ou excessivo escorrimento do material da poça de fusão.

Como os trabalhos anteriores usando a referida técnica de revestimento de alta performance haviam sido realizados somente usando arames maciços, a presente dissertação tem como objetivo realizar um estudo para avaliar a aplicabilidade dessa técnica com arames tubulares. A estratégia adotada na presente dissertação consistiu principalmente na condução de um estudo que priorizou realizar uma avaliação usando diferentes tipos de consumíveis que podem ser aplicados em operações de recuperação de regiões de pás de turbinas que sofreram desgaste. As ligas avaliadas no presente trabalho foram:

- E309L (AWS A5.9/A5.9: ER 309 L)
- Cavitalloy (EN 14700 : T ZFe9)
- Steloy 6 (AWS A5.21/A5.21: ER CCoCr-A)
- Durolit 21 (AWS A5.21/A5.21: ER CCoCr-E)

Para a realização dessa avaliação, foram realizadas as seguintes atividades:

- Desenvolvimento de procedimentos convencionais (soldagem semiautomática e mecanizada) utilizando arames tubulares (E309L, Cavitalloy, Stelloy 6 e Durolit 21) com objetivo de obter resultados para se comparar com os ensaios posteriores de alta performance executados com os mesmos arames.

- Desenvolvimento de procedimentos de alta performance utilizando arame maciço E309LSi com objetivo de testar o equipamento e reproduzir os resultados de trabalhos anteriores para servir de base e parametrização para os próximos ensaios;

- Desenvolvimento de um estudo comparando o processo de soldagem na posição vertical com e sem tecimento nos sentidos descendente e ascendente;
- Análises e estudo sobre a possibilidade do nível máximo de alcance do valor da amplitude disponível no dispositivo de oscilação da tocha;
- Estudo sobre os efeitos proporcionados pelo o uso do gás CO₂ puro no processo de soldagem com o arame tubular (E309L);
- Desenvolvimento do procedimento de soldagem de alta performance com arame tubular para revestimento metálico, com os seguintes arames:
 - E309L;
 - Cavitalloy;
 - Stelloy 6;
 - Durolit 21

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como intuito a apresentação da revisão bibliográfica sobre os temas de maior pertinência para este trabalho, como os conceitos básicos da soldagem MIG/MAG convencional e sua variante MIG/MAG pulsado, as questões inerentes à automação do processo relativas a objetivo de produzir revestimentos, analisando a aplicabilidade do tecimento com oscilação em alta frequência para a tentativa de se desenvolver procedimentos depositando arames tubulares.

2.1 MIG/MAG CONVENCIONAL

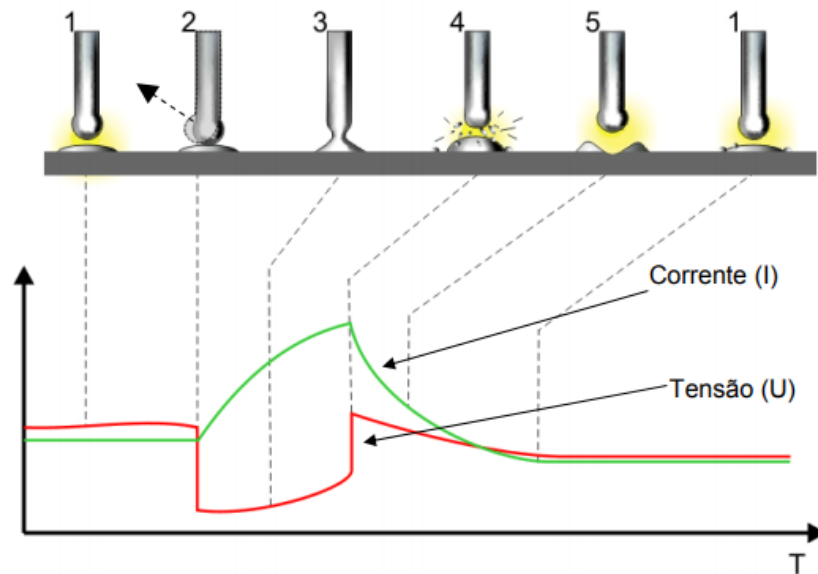
O processo MIG/MAG convencional utiliza equipamentos com a fonte de energia do tipo tensão constante, sendo a corrente uma variável dependente, fundamentalmente, da velocidade de alimentação do arame, características físicas e químicas do arame e do gás de proteção. Dentre as forças que governam o modo de transferência metálica, faz jus se destacar as forças de origem magnética, gravitacional e tensão superficial. O modo como se dá essa transferência é determinado pelo arranjo resultante dessas forças, possuindo grande influência sobre a estabilidade do processo e sobre a quantidade de respingos gerada, a possibilidade de soldagem em várias posições, a qualidade/geometria da solda e a aparência superficial do cordão. De acordo com Hermans e Ouden (1999), existe um ponto onde a estabilidade é máxima

e está diretamente ligada à oscilação da poça de fusão, assim quanto mais próxima a frequência de curto-circuito estiver da frequência de oscilação da poça mais estável será o processo. Essa transferência se caracteriza pelo contato entre a gota formada na extremidade do arame-eletrodo e a poça de fusão, formando assim a poça metálica, além de ter a particularidade por apresentar baixo valor médio de tensão.

Há trabalhos, relatam sobre a transferência por curto-circuito ao dizer que após a ocorrência do contato entre a extremidade do arame e poça de fusão, com a passagem de carga através de um condutor, gera-se um campo magnético em torno do mesmo, o que causa a formação de forças perpendiculares ao campo e radiais ao eletrodo, direcionadas para o centro do condutor, sendo esta, conhecida como forças de Lorentz. Tal fenômeno físico corrobora para a constrição da região de acoplamento entre a gota e o arame-eletrodo, chamado de efeito *pinch* (Galeazzi, 2019). A constrição ocorre progressivamente até o colapso da ponte metálica e separação da gota e do arame-eletrodo, como mostram as etapas 3 e 4 da Figura 3. Logo após a ocorrência desse evento o arco elétrico é reaberto, com um valor de corrente elevado, gerando a emissão de respingos durante o rompimento da ponte metálica e fumos metálicos ao longo de todo processo, mostrados na etapa 4.

A maneira pela qual o metal de adição é transferido do eletrodo para a poça fundida determina a estabilidade do processo, a possibilidade de soldar fora da posição plana, o molhamento do metal de base pela poça fundida, a quantidade de respingos, a aparência do cordão de solda e sua qualidade (em termos da ausência de defeitos como poros, falta de fusão e falta de penetração (Abdalla, 2005).

Figura 3 - Curso da transferência metálica por curto-circuito no processo MIG/MAG convencional

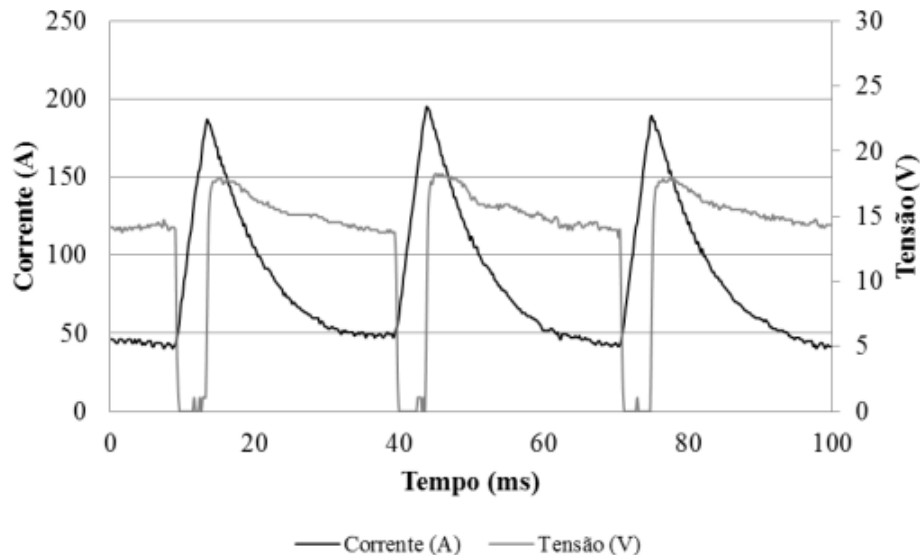


Fonte: Silva [2005]

O comportamento da corrente depende da impedância do sistema. A fonte tenta impor a tensão programada, mas devido ao curto há uma diminuição da impedância do sistema a tensão é baixa, como resposta a tentativa de imposição de tensão a corrente sobe. Nesse sistema, um dos fatores que influenciam no processo é a dinâmica de subida e descida da corrente no momento do curto-circuito, ilustrada na curva do gráfico entre os pontos 2 e 4. Essa curva pode ter uma característica de inclinação mais vertical ou mais horizontal, ou seja, uma dinâmica de corrente com uma taxa de subida e descida em Amperes por milissegundo (A/ms) mais rápida ou mais lenta.

A Figura 4, apresenta o oscilograma para uma situação onde foi regulada uma velocidade de arame de 6 m/min para o processo MIG convencional numa faixa onde transferência se dá por curto-circuito. Observa-se baixos comprimentos de arco necessários para que ocorram os curtos-circuitos. Este processo requer baixos níveis de tensão que acarreta uma baixa relação potência/velocidade de arame (Savi, 2014).

Figura 4 - Oscilograma de tensão e corrente para o modo MIG convencional com curto-circuito ($I_m = 86\text{A}$ e $P = 1121\text{ W}$)



Fonte: [Savi - 2014]

A transferência por voo livre, mais conhecida como “*spray*”, se caracteriza pelo o destacamento de pequenas gotas, da ordem do diâmetro do eletrodo, sequencialmente e em alta frequência (Amin, 1983). A corrente de transição, que depende, principalmente do diâmetro e composição do eletrodo, do seu comprimento energizado e do tipo de gás de proteção Scotti e Ponomarev (2008), é essencial para que este modo de transferência possa ocorrer, e isto acontece quando a corrente de soldagem ultrapassa um valor crítico, denominado corrente de transição.

Ao se trabalhar com valores de corrente acima da corrente de transição, as gotas são projetadas axialmente através do arco devido à ação de altas forças eletromagnéticas, sendo arrastadas da ponta do eletrodo e projetadas em alta velocidade em direção à poça de fusão de acordo com (Motta, 2002). Também relatou que por não ocorrer um contato entre os eletrodos, a transferência do material é estável e livre de salpicos, tendo como resultado um bom acabamento superficial dos cordões de solda. A trajetória de voo da gota coincide com o eixo do eletrodo, qualquer que seja a inclinação do eletrodo. Dessa maneira, a transferência goticular poderia ser empregada em qualquer posição. Entretanto, por demandar altas correntes, a alta energia imposta cria uma extensa poça de fusão, o que dificulta a soldagem fora da posição plana horizontal e de chapas finas (Rodrigues, 2019).

2.2 MIG/MAG PULSADO

De acordo com Scotti e Ponomarev (2008) o processo MIG/MAG com pulsação de corrente foi desenvolvido com o propósito de reunir as melhores características das versões por curto-circuito e goticular em um único processo, melhor dizendo, para se obter uma transferência estável e regular, provendo uma solda com baixo ou nenhum índice de respingo e bom acabamento do cordão, isto com baixo valor de corrente, que possibilita a soldagem multi-posicional e de chapas de pequena espessura, devido ao baixo aporte de energia. Tal fato é conseguido modulando-se o sinal da corrente que se alterna entre dois níveis bastante diferentes, denominada corrente de base (I_b) e corrente de pulso (I_p), onde cada uma possui seu tempo de duração, sendo eles, tempo de base (t_b) e tempo de pulso (t_p).

De acordo com Dutra e Mamani (1996), as funções das variáveis são:

Corrente de pulso (I_p): esta deve possuir um valor acima de um nível mínimo (corrente de transição), de forma a promover o destacamento de uma gota.

Tempo de pulso (t_p): depende do material e diâmetro do eletrodo e do gás de proteção, e deve ser ajustado juntamente com a corrente de pulso para produzir uma gota por pulso.

Corrente de base (I_b): a mesma é ajustada para que se obtenha uma corrente média que equilibre a velocidade de fusão do arame com sua velocidade de alimentação. O valor da corrente de base é limitado em dois patamares, um mínimo, abaixo do qual a manutenção do arco fica comprometida, ou seja, pode ocorrer a extinção do arco, e um máximo, acima do qual a transferência deixa de ser por voo livre.

Tempo de base (t_b): este deve estar ajustado conforme o diâmetro de gota pretendido de uma maneira que a soma do mesmo com o tempo de pulso, garante a fusão de uma quantidade suficiente de arame para formá-la.

De uma maneira sucinta, segundo Dutra e Ollé (1992) o modo pulsado pode ser definido como a concepção de corrente pulsada para o controle da transferência metálica não é nada mais que uma metodologia de antecipação de picos de corrente para transferir as gotas metálicas antes que ocorra o curto-circuito na peça.

É importante nesse tipo de processo a determinação dos parâmetros para a ocorrência de transferência estável pelo modo pulsado e Nogueira, Bohórquez e Zanella (2015) citam em seu trabalho que de acordo com a literatura de outros estudos já efetuados, o cálculo dos parâmetros para a ocorrência de transferência metálica estável pelo modo pulsado para uma

dada corrente média de soldagem segue uma sequência comum, tanto para arames maciços quanto para arames tubulares, podendo ser resumida da seguinte forma :

- Selecionar a corrente de pulso (I_p) acima da corrente de transição;
- Determinar o tempo de pulso através da relação $I_p^2 t_p = D$, sendo t_p o tempo de pulso e D a constante de destacamento, válido para o diâmetro de uma gota específico. Para este trabalho foi escolhido o valor de $D = 500$, de acordo com o trabalho de (Motta, 2002);
- Usar a equação ou gráfico que relacione a velocidade de arame (V_a) com a corrente média (I_m). Para este trabalho em questão, utilizou-se a equação (1).

$$V_a = K \times I_m \quad (1)$$

Sendo K uma constante determinada experimentalmente.

- Calcular o período de onda (T) da corrente pulsada, necessário para obter certo diâmetro de gota, d_g , quando se utiliza certa velocidade de arame e diâmetro do eletrodo. A equação (2) para realizar esse cálculo é derivada da relação que existe entre o volume de arame que avança durante um período de tempo e o volume da gota que será formada.

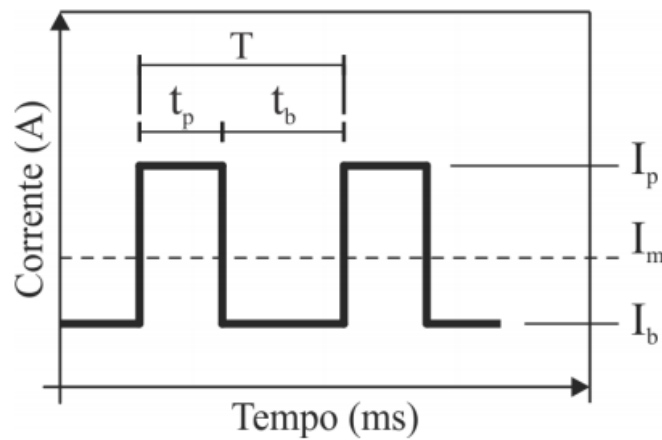
$$T = \frac{40 \cdot d_g^3}{V_a \cdot d_e^2} \quad (2)$$

Sendo “ d_g ” o diâmetro da gota (mm) e o “ d_e ” o diâmetro do eletrodo (mm). Ainda segundo Nogueira, Bohórquez e Zanella (2015), experimentos realizados no LABSOLDA indicam que a escolha do diâmetro de gota com valor 20% acima do diâmetro de arame satisfaz a maioria das aplicações, desta forma se utilizou um “ d_g ” de 1,44 mm, ou seja, com valor 20% maior do que o utilizado de 1,2 mm.

- Determinar o tempo de base sabendo que, T é o período ($t_b + t_p$) e I_m é a corrente média dada neste caso, pela a equação (3). A Figura 5 apresenta a forma de onda retangular

$$I_m = \frac{I_p t_p + I_b t_b}{t_p + t_b} \quad (3)$$

Figura 5 - Forma de onda de corrente do tipo retangular. Parâmetros: I_p (corrente de pulso), I_b (corrente de base), t_p (tempo de pulso), t_b (tempo de base), I_m (corrente média), T (período)



Quando se trata sobre o modo da transferência metálica, o principal objetivo desse processo, é proporcionar a soldagem de materiais com a transferência goticular (*spray*), evitando assim o contato físico entre o arame-eletrodo e a peça, até porque os níveis de corrente média utilizados são abaixo da corrente de transição (Essers e Gompel 1984). Curtos-circuitos, geram problemas ao processo MIG pulsado como: respingos, extinção do arco, entre outros. Com o intuito de se evitar tais problemas, faz necessário o reajuste das variáveis de soldagem, sendo elas corrente média (I_m) ou quantidade de arame, para manter o equilíbrio entre a taxa de fusão e velocidade de arame.

Como pode ser visto anteriormente, a utilização da corrente pulsada para o processo MIG/MAG proporciona benefícios para algumas aplicações. Porém, algumas poucas desvantagens são encontradas no processo, como a aplicação em campo, principalmente pela quantidade de variáveis a serem ajustadas e a falta de informação que relacionem essas variáveis, aliado à falta de preparo dos soldadores, pela falta de conhecimento sobre o procedimento e, deve-se levar em conta também o custo dos equipamentos. Em relação aos benefícios, a possibilidade de soldagem fora de posição, uma maior penetração e um cordão de solda com boa qualidade superficial e características geométricas, e ao se falar do ponto de vista prático, vale ressaltar a diminuição da quantidade de respingos, devido à não ocorrência de curtos-circuitos, esses são pontos que ficam mais evidentes ao se falar desse processo.

Com o intuito de diminuir a complexidade acerca do processo, no ajuste de variáveis de soldagem, pode-se adotar a utilização do MIG/MAG pulsado com comando sinérgico. Termo este utilizado pelo *International Institute of Welding* (IIW) na década de 70 para descrever esse método de controle do MIG/MAG pulsado, abordado de forma inicial como um

conjunto de técnicas de controle onde o valor e estrutura da corrente pulsada eram determinados com base no valor medido com um sensor da velocidade de alimentação de arame.

Tal processo foi definido por Scotti e Ponomarev (2008) como qualquer sistema pelo qual um ou mais parâmetros de pulso significativos são automaticamente modificados em função da variação de um parâmetro operacional (velocidade de alimentação ou corrente média). De tal forma que a condição de estabilidade de transferência de gotas é mantida ao longo de uma faixa de velocidade de alimentação ou nível médio de corrente. Ou seja, na maior parte dos casos, a escolha dos parâmetros é feita por controle sinérgico, de forma predeterminada, a partir de um conjunto mínimo de informações de entrada. A maior parte das fontes de soldagem que oferecem a opção do MIG/MAG pulsado apresentam programas sinérgicos para os tipos de arame mais utilizados como arame de aço ao carbono maciço, de aço inoxidável austenítico e algumas ligas de alumínio mais utilizadas, com os principais gases de proteção. O problema é que a lista é limitada e não contempla a grande variedade de ligas utilizadas para operações de revestimentos. Para as ligas na forma de arame tubular, as opções são mais limitadas ainda, sendo que, na maior parte das vezes é necessária uma escolha manual dos parâmetros quando se deseja utilizar o pulsado com o arame tubular.

2.3 SOLDAGEM MIG/MAG COM ARAME TUBULAR

De acordo com a Norma ASME Boiler & Pressure Vessel Code (*The American Society of Mechanical Engineers*) para consumíveis de soldagem (Parte II – C), o arame tubular para aços carbono atende às características definidas na seção ASME SFA 5.20 (*FCAW – Flux Cored Arc Welding*) e o arame maciço para aços carbono atende às características definidas na seção ASME SFA 5.18 (*GMAW – Gas Metal Arc Welding*). O arame tubular tipo “metal cored”, que é um tipo de arame tubular que não apresenta formação de escória durante o processo de soldagem, assim como o arame maciço, estão enquadrados na seção ASME SFA 5.18.

O arame possui em seu núcleo componentes fluxantes de metal fundido, além de materiais formadores de gases e vapores de proteção do arco e da escória que atua como cobertura protetora da poça de fusão. Tal processo, se comparado ao eletrodo revestido convencional, permite o alcance de maiores densidades de corrente que permite uma transferência metálica guiada por escória, sendo uma das vantagens que deste processo, além de possuir uma taxa de deposição equivalente ao processo MAG.

Na atualidade, existem dois tipos de arames tubulares, os que possuem a necessidade do uso de gás de proteção e os que geram seus próprios gases e escória de proteção (auto protegidos) como identificados na Figura 7. Dentro dos arames que necessitam da proteção gasosa para a execução do processo existem os do tipo “flux cored”, que pode ser rutilico ou básico; e o do tipo “metal cored” que tem como fluxo somente pó metálico, não havendo formação de escória (somente ilhas de sílica, como os arames sólidos), alguns autores como Bauné (2000) os arames do tipo “metal cored” possuem pó metálico em seu interior com a função de fundir o metal de solda juntamente com elementos contidos no interior do eletrodo para aumentar a resistência do material depositado e também desoxidá-lo.

O autor Araújo (2004) cita que basicamente o processo de soldagem com arames tubulares (*FCAW – Flux Cored Arc Welding*) se assemelha ao processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) mais comumente conhecido como MIG/MAG, (Metal Inert Gás/ Metal Active Gas) no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento, diferindo-se deste pelo fato de possuir um arame com formato tubular, contendo em seu interior um fluxo, para Gomes (2006) este fato lhe permite compartilhar o alto fator de trabalho e a taxa de deposição, característicos da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem FCAW é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo. Autores como Nogueira, Bohórquez e Zanella (2015) afirmaram que a soldagem GMAW com arame maciço e com arame tubular concorrem entre si em termos de qualidade e produtividade.

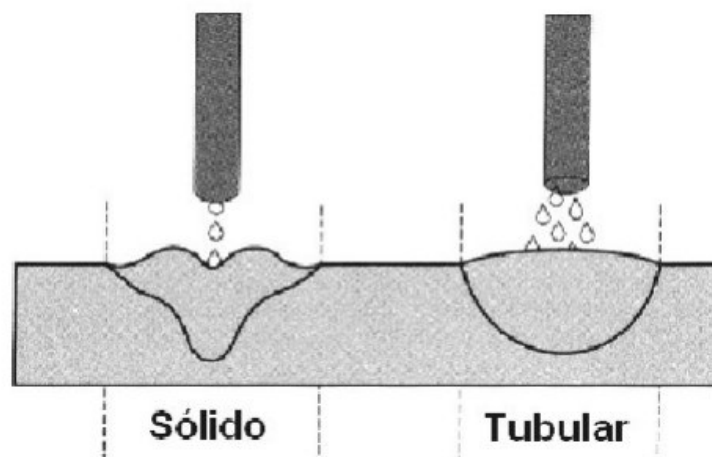
Alguns trabalhos como de Cardoso Jr *et al* (2012) e Garcia e Scotti (2011) citaram alguns fatores que contribuem para a diferença de entendimento entre os processos, dizendo que a soldagem com arame tubular é mais produtiva que a soldagem com arame maciço, porém há autores que contradizem como Souza e Ferraresi (2013) e Nogueira, Bohórquez e Zanella (2015), afirmando que além de maior rendimento na deposição, o processo GMAW com arame maciço apresentou maior regularidade de transferência metálica, uma vez que praticamente quase todo material do arame maciço fará parte do cordão de solda, conferindo maior rendimento para o arame maciço. Há trabalhos que justificam o objetivo do surgimento da soldagem com arame tubular, como o de Fortes (2004) mostrando que esse processo veio para aprimorar as propriedades mecânicas e metalúrgicas do GMAW com arame maciço, através da introdução de elementos de liga presente no fluxo.

De acordo com Barbedo (2011) processos de soldagem GMAW e FCAW são amplamente aplicados na indústria de petróleo. Ambos os processos podem ser aplicados em

uma variedade de aços, tais como baixo carbono e inoxidáveis entre outras ligas ferrosas. Outra característica importante destes dois processos é a excelente produtividade devido à possibilidade de automação dos equipamentos. Estes dois processos já são empregados a nível industrial, entretanto, as diferenças em termos microestruturais e propriedades mecânicas foram pouco exploradas a nível científico.

Em relação à geometria do cordão de solda, Barbedo (2011) citou que as diferenças entre os processos GMAW e FCAW são geradas devido, principalmente, ao comportamento do arco e da transferência metálica. Soldas realizadas com arames tubulares possuem o arco mais largo, cordões com aspecto liso e com boa penetração. Soldas realizadas com arames sólidos geram alta penetração, porém estreita, do tipo dediforme (*finger shape*). Essas diferenças podem ser observadas na Figura 6. Ao se falar sobre o posicionamento das tochas de soldagem, Araújo (2004) mostra que para o processo GMAW, a tocha deve estar totalmente alinhada para juntas em ângulo, pois um pequeno desalinhamento pode causar falta de fusão lateral, já para, o processo FCAW, devido ao arco mais largo, há uma tolerância maior para o desalinhamento da tocha, reduzindo assim, os defeitos por falta de fusão.

Figura 6 - Geometria dos cordões de solda



Fonte: [Fortes, 2004]

Uma análise comparativa da estabilidade dos processos com arame maciço e arame tubular feito por Nogueira, Bohórquez e Zanella (2015), mostrando que para correntes de soldagem acima de 110 A com arame tubular já se predominava a transferência globular enquanto com o arame maciço o modo predominante era curto-circuito. Assim sendo, perceberam que os sinais elétricos não forneciam informações suficientes para tal comparação, voltando seu trabalho para a avaliação dos efeitos morfológicos entre os cordões de cada versão.

É importante citar trabalhos efetuados como o de Brito (2019), que tem como objetivo o desenvolvimento da soldagem MIG/MAG mecanizada, que utiliza técnicas para a soldagem orbital de tubulações típicas para a indústria de petróleo e de gás, avaliando diferentes consumíveis como arames maciços e arames tubulares, ao realizar as análises sobre a estabilidade, propriedades mecânicas e produtividade dos processos. Em relação à produtividade demonstrou que o arame tubular possui maior custo de aquisição (59% maior que o maciço) e menor taxa de rendimento (cerca de 10,3% menor que o maciço), estes fatores fazem com que seu custo de aplicação seja superior ao maciço (112,4 % mais caro).

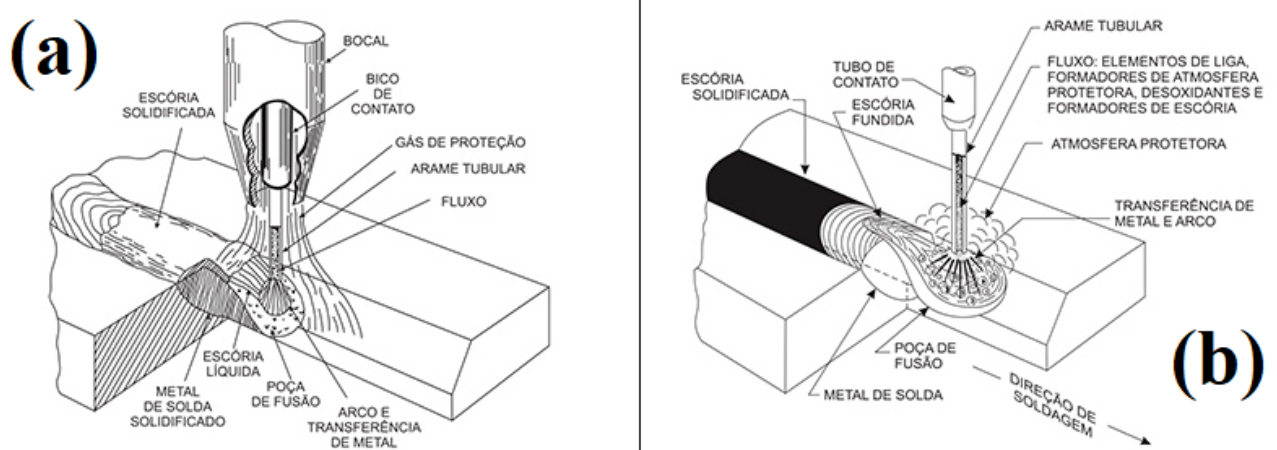
As propriedades mecânicas foram avaliadas mediante ensaio de impacto. Todos os cenários que foi observado por Brito (2019), para a soldagem de dutos, onde seu estudo era baseado, utilizando os arames maciços e tubulares, foram aprovados pela norma e concluiu-se que os corpos de prova soldados com arame maciço apresentaram maior resistência ao impacto do que soldados com arame tubular. Quanto ao tipo de gás foi constatado que quanto maior o teor de CO₂, terá menor resistência ao impacto. Em relação às características geométricas, o mesmo chegou às seguintes conclusões: o arame tubular sofreu menor influência da posição de soldagem e do teor de CO₂ quando comparado ao maciço. Os cordões que foram realizados tiveram menor penetração e maior molhabilidade, estas características as tornam mais atrativas para soldagem em tubulações.

Para Barhorst (2000) o arame tipo “metal cored” vem obtendo preferência de muitas empresas no setor industrial, devido ao fato de apresentar elevadas taxas de deposição, mínima quantidade de escória e respingo e baixos níveis de fumos, além de ser citado por (Araújo, 2004) que se é possível trabalhar com maiores correntes e velocidades de soldagem com o “metal cored” se comparado com o arame maciço, sem prejudicar a qualidade da solda.

Segundo Barbeto (2011) os arames rútilicos contêm em seu interior fluxos não metálicos, formadores de escória e estabilizadores do arco. Esses fluxos internos também têm a função de proteger e purificar o metal de solda, além de reduzir o número de respingos e controlar as características do eletrodo. Os fluxos rútilicos possuem grande quantidade de óxido de titânio (rutila) e alguns silicatos, os fluxos básicos possuem grande quantidade de carbonato de cálcio e fluoreto de cálcio (fluorita)

Os arames tubulares autoprotetidos são desenvolvidos para gerar gases de proteção a partir de elementos químicos adicionados no fluxo, similares aos eletrodos revestidos, esses não exigem proteção externa e são desenvolvidos para se aplicar tanto com corrente contínua eletrodo positivo (CC+), como com corrente contínua eletrodo negativo (CC-) Araújo (2004).

Figura 7 - (a) Soldagem com arames tubulares com proteção externa (b) Soldagem com arames tubulares autoprotégidos



Fonte: [Fortes,2004]

Os arames tubulares são mais caros do que os arames sólidos, no entanto, empregando-se programas de cálculo de custos da soldagem mais detalhados, frequentemente prova-se que a diferença de preço do consumível é mais do que compensada pelos ganhos de produtividade, especialmente quando predomina a soldagem nas posições plana e horizontal. Além disso, há outros argumentos que contribuem para o uso de arames tubulares em substituição a arames sólidos, como o risco reduzido de defeitos de falta de fusão lateral, melhor penetração, menos respingos e uma menor probabilidade de ocorrência de porosidade, pois arames tubulares mais modernos podem apresentar um teor de hidrogênio difusível muito baixo e uma alta resistência à reabsorção de umidade (Araújo, 2004).

Corroborando com o trabalho citado acima em relação aos custos, de acordo com Stridh (2000) foi citado que o custo total de produção de um componente de carro, fabricado com soldagem robotizada, utilizando-se um arame tubular tipo “metal cored” com 1,4mm de diâmetro é menor que com o uso de arame maciço de 1,0 mm de diâmetro (Tabela 1), embora não tenham sido informados os parâmetros de soldagem, nem as composições dos gases de proteção ternários utilizados.

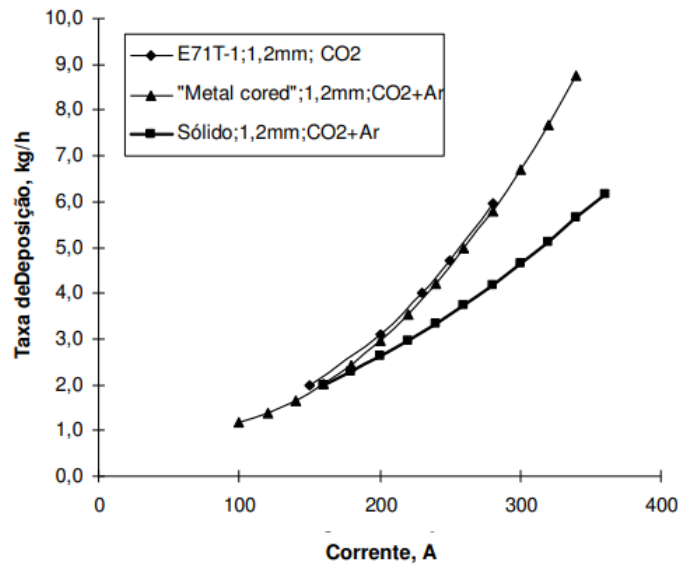
Tabela 1 - Avaliação de custo de produção entre amare sólido e “metal cored”

Componente de carro			
Comprimento total do cordão de solda: 31 cm			
	Arame sólido ø 1,0mm	“Metal cored” ø 1,4mm	Diferença
Tempo de ciclo (s)	58,6	40	-31%
Velocidade soldagem (m/min)	0,6	1,5	+150%
Tempo de soldagem (s)	31	12,4	-60%
Tempo de movimentação robô (s)	27,6	27,6	
Tempo de ciclo/unidade (s)	58,6	40	-31%
Tempo de preparação (s)	10	10	
Número de unidades/h	52	72	
	Arame sólido ø 1,0mm	“Metal cored” ø 1,4mm	
Arame consumido/unidade (kg/un)	0,014	0,014	
Preço arame (£/kg)	0,77	4,36	
Custo arame (£/un)	0,0106	0,0612	
Consumo de Gás (m ³ /un)	0,018	0,014	
Preço do gás (£/m ³)	2,47	2,83	
Custo do gás (£/un)	0,04	0,04	
Custo de energia (£/un)	0,0047	0,0047	
Custo Robô+Operador (£/h)	103,06	103,06	
Custo Robô+Operador (£/un)	1,68	1,43	
Custo Total (£/un)	1,73	1,55	

Fonte: [Stridh, 2000]

Foi ainda mostrado por Widgery (1994) ao se trabalhar com uma corrente de soldagem elevada, em equipamentos com fonte convencional de energia, as taxas de deposição com arames tubulares, incluindo o “*metal cored*”, aumentam em maior grau que aquelas com eletrodo sólido., conforme é visto na Figura 8.

Figura 8 - Taxas de deposição de arames tubulares e arame maciço



Fonte: [Widgery,1994]

Por muito tempo o processo com arame tubular enfrentou dificuldades para alcançar o nível de tenacidade exigido no metal de solda pelas modernas estruturas. Porém, tais problemas, por parte dos fabricantes começaram a serem resolvidos, fazendo com que o processo se tornasse uma excelente alternativa para alta produtividade, com qualidade. O arame tubular tem elevada taxa de deposição e, se comparada ao eletrodo revestido, tem taxa de deposição duas vezes maior na posição vertical e seis vezes na posição plana/horizontal, alcançando até 11kg/h (Machado, 1996).

2.4 TECNOLOGIA DE MECANIZAÇÃO DA SOLDAGEM

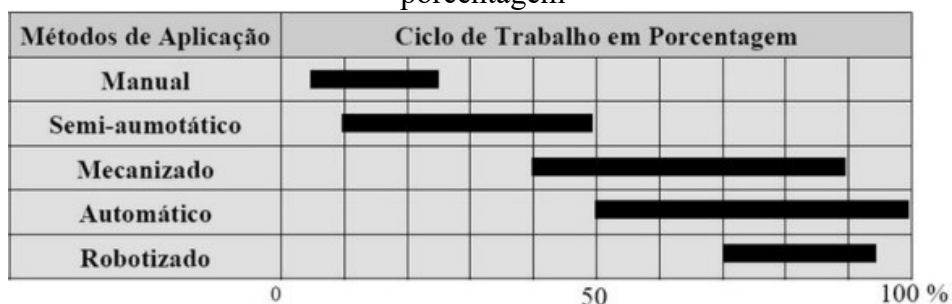
A mecanização da soldagem traz benefícios para a indústria e de acordo com Lima e Bracarense (2011) é muito conhecido que o uso da robótica na indústria aumenta a produtividade e a qualidade em muitos aspectos. Também é bem conhecido que alguns ajustes têm que ser feitos para garantir o retorno do investimento e para atingir os resultados esperados. Hoje, a robotização é conhecida como uma técnica alternativa para a produção, aumentando a competência qualitativa e quantitativa de suas indústrias. Um ponto que tem sido observado em algumas aplicações é que o procedimento inadequado para aplicação de robôs no processo de soldagem reflete em resultados insatisfatórios. Estes procedimentos são tempo excessivo para a implementação, retrabalho e má qualidade de solda.

Lima e Bracarense (2011) completam que, como regra geral, um processo automático é mais produtivo do que um processo mecanizado, que é mais do que o manual. Na soldagem, o ganho em produtividade muitas vezes está relacionado à redução do tempo com retrabalho, tempo de arco fechado e preparação para iniciar o ciclo de soldagem. Por outro lado, também como regra geral, o custo de implementação aumenta da soldagem manual para a soldagem automática, permitindo dizer que uma desvantagem da soldagem automática é seu custo inicial. Estudos detalhados de viabilidade econômica mostram que os benefícios contra os custos de implementação de tais sistemas estão se tornando satisfatórios

Os autores Lima e Bracarense (2011) ainda concluíram que todos esses fatores devem ser considerados e também as vantagens e desvantagens de cada método. A maneira mais confiável de definir o método apropriado para produzir uma determinada peça é estudar a viabilidade econômica. Isto deve ser feito porque, independentemente do grau de automação, o que se procura é a redução dos custos de fabricação. Usando sistemas automáticos isto pode ser alcançado reduzindo o número de pessoas envolvidas na soldagem, o aumento da produtividade e o aumento da qualidade, através do uso de parâmetros de processo mais racionais. Também, com sistemas automáticos, o histórico da soldagem e toda a preparação também pode ser armazenado. Isto, juntamente com a repetibilidade, permite a rastreabilidade das peças soldadas.

Para Carry e Hiward (1994), a automação dos processos tem por objetivo afastar o soldador do contato direto com a solda, com isso diminuindo ou até mesmo eliminando completamente seu envolvimento durante a operação de soldagem. Tal fato ocorre num aumento do ciclo de trabalho e conseqüentemente num aumento de produtividade, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Método de aplicação da solda e seus respectivos "ciclos de trabalho" em porcentagem



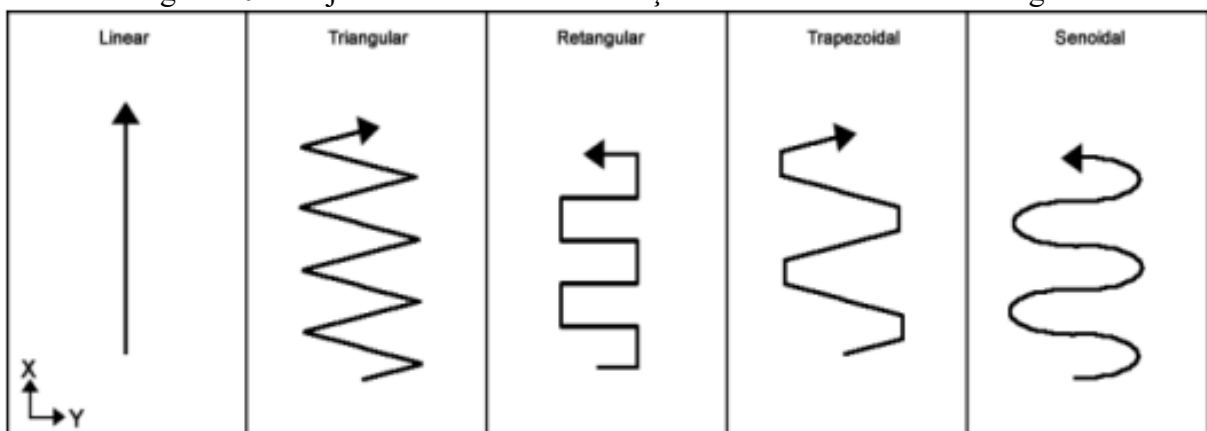
Fonte: [Carry, Hiward, 1995]

Com a inserção da Indústria 4.0 na manufatura no início do século XXI, novos avanços e tecnologias aparecem para o processo de solda. De acordo com Silva e Silva (2018), a Indústria 4.0 traz consigo a atualização das tecnologias vigentes e transformação dos processos em sistemas ciberfísicos - CPS (*Cyber-Physical Systems*). Segundo Faria (2022) na soldagem isso significa, para além da automação padrão, um controle mais flexível e dinâmico do processo, cruzando informações do método planejado com a operação real. O surgimento de diferentes formas/tecnologias de execução do processo de soldagem nos últimos tempos, puxados pelo desenvolvimento da indústria manufatureira, ampliou consideravelmente a gama de opções disponíveis para a execução da soldagem, com diversos níveis de automação/robotização, desde o processo manual puro até o processo automatizado integrado ao CPS.

As técnicas de oscilação, movimento periódico da tocha, são geralmente efetuados transversalmente à direção de soldagem, sendo que um dos objetivos é diminuir o tempo total da tarefa de revestimento por intermédio da realização de cordões mais largos, o que, conseqüentemente, reduz o número de cordões de solda. Sua aplicação controla a poça de fusão e devido ao aumento de área, contribui como forma de distribuir o calor e metal depositado na junta soldada, resultando em menor diluição, penetração e reforço (Scotti, 1991).

De acordo com Broering (2005) existem diversos tipos de trajetórias de soldagem, sendo que os mais utilizados manipuladores apresentam as formas: linear, triangular, trapezoidal e retangular. E que em função da necessidade de aplicação é possível usar outras formas como senoidal, exponencial, etc. Tais tipos de trajetórias são mostrados na Figura 10.

Figura 10 - Trajetórias sem e com oscilações mais utilizadas em soldagem

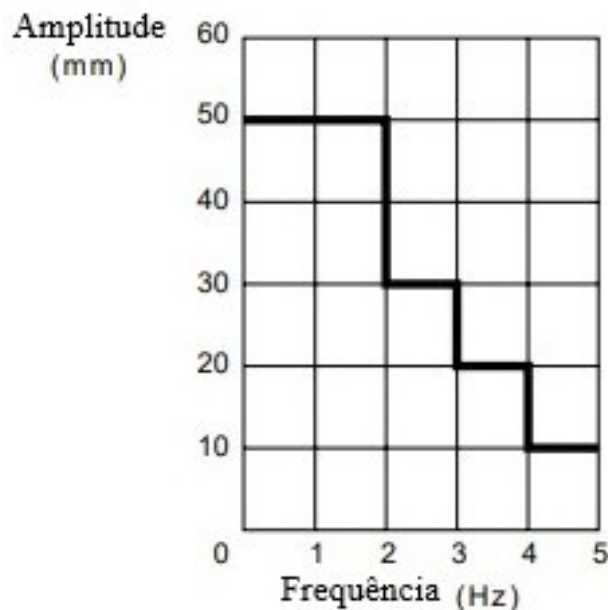


Fonte: (Carvalho, 2009)

É importante citar que a possibilidade de um tecimento com amplitudes e frequências mais elevadas não é comum ao se tratar de equipamentos disponíveis para tal função. Geralmente, se efetua o tecimento com valores mais altos de frequência e amplitudes mais baixas ou com frequência mais baixa e amplitude mais alta, uma variável sendo o inverso da outra.

O manual de operação do robô Motoman DX100 Yaskawa (2009), exemplifica tal afirmação através do gráfico presente na Figura 11, é perceptível que para valores de amplitude como 50 mm, o que pode ser considerado um valor elevado, a frequência suportada pelo o robô é de no máximo 2 Hz e para valores de frequência que também pode ser considerado elevado como 5 Hz, a amplitude que o robô permite a execução do movimento é de 10 mm, se trata de um valor teórico que o robô poderia executar, mas que na prática o robô não consegue executar a amplitude proposta, e ainda, o movimento real que o robô executa varia conforme o posicionamento relativo dos diferentes eixos. Ainda se faz relevante falar que o padrão de movimentação ao se tratar do tecimento com alta frequência, não se deve determinar que há um limite máximo ou mínimo para se afirmar como um valor alto ou baixo.

Figura 11 - Relação entre amplitude e frequência do robô Motoman DX100



Fonte: Adaptado do (Manual robô Motoman DX100, 2009)

Com o objetivo de comparar as posições plana e vertical de soldagem Carvalho (2009) em seu trabalho que teve como intuito diminuir o tempo de operações de revestimento em paredes d'água de usinas termelétricas, através da execução de cordões mais largos utilizando

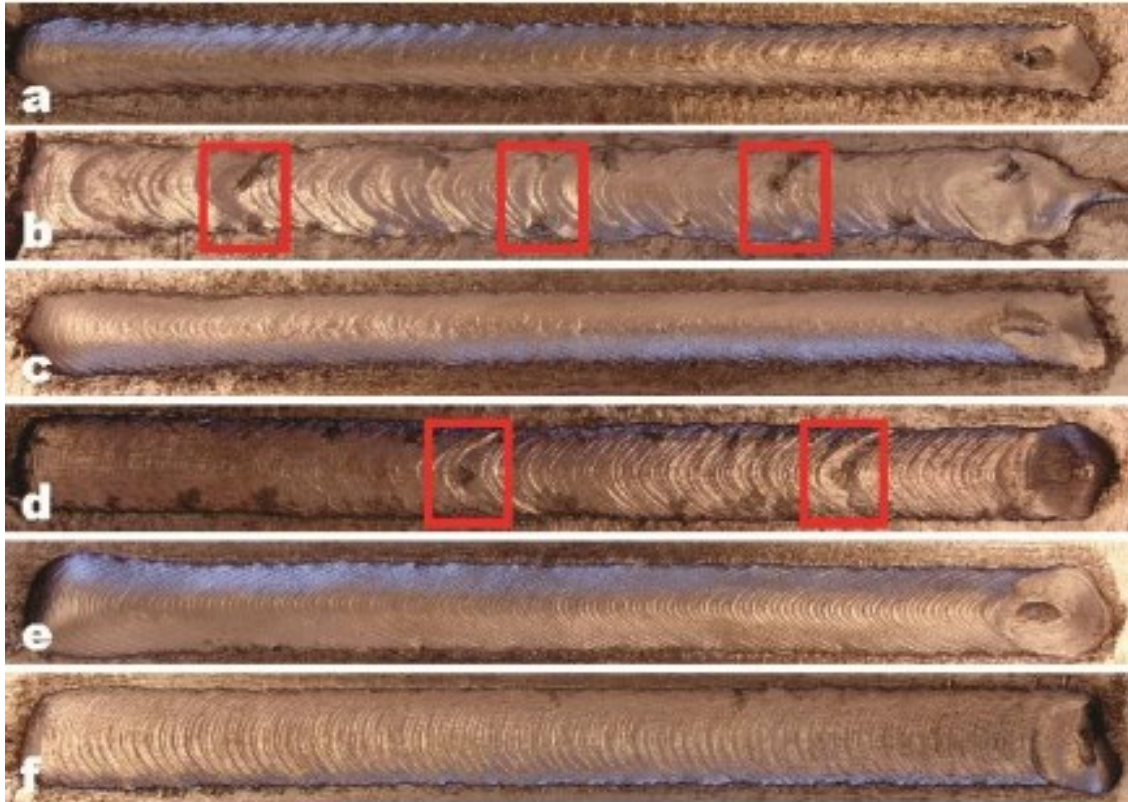
o tecimento (triangular), com os parâmetros mostrados na Tabela 2. Realizou ensaios que variaram também, a velocidade de oscilação sendo adotadas as frequências com os seguintes valores de 1,5, 2,5 e 3,5 Hz. Os seis cordões analisados são apresentados na Figura 12, e os ensaios na posição plana com 1,5, 2,5 e 3,5 Hz representados por (a), (c) e (e), respectivamente, mostram que com o aumento da frequência de oscilação da tocha se reduz a incidência de mordeduras nos cordões. Isto proporciona maior uniformidade e qualidade de soldagem. Os cordões realizados na posição vertical representados por (b), (d) e (f), respectivamente, apresentam mudanças significativas quanto à geometria ao se comparar com o revestimento realizado na mesma frequência de oscilação da tocha na posição plana. Tem-se também alterações na sustentação da poça metálica para as distintas frequências. Em (b) e (d) destacam-se regiões onde ocorreu o escorrimento da poça, resultando em falha no cordão de solda. Já em (f) onde se tem maior frequência de oscilação, houve sustentação da poça metálica ao longo do cordão. As macrografias comparativas dos corpos de prova serão apresentadas na Figura 13 e as características geométricas e diluição dos corpos de provas na Tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem

Parâmetros	Unidade	Valor
Arame	-	E309L
Diâmetro	mm	1,0
Velocidade de arame	m/min	10
Corrente	A	200
Vazão do gás	l/min	15
Velocidade de soldagem	cm/min	40
Amplitude	mm	10
Tipo de oscilação	-	Triangular
DBCP	mm	15

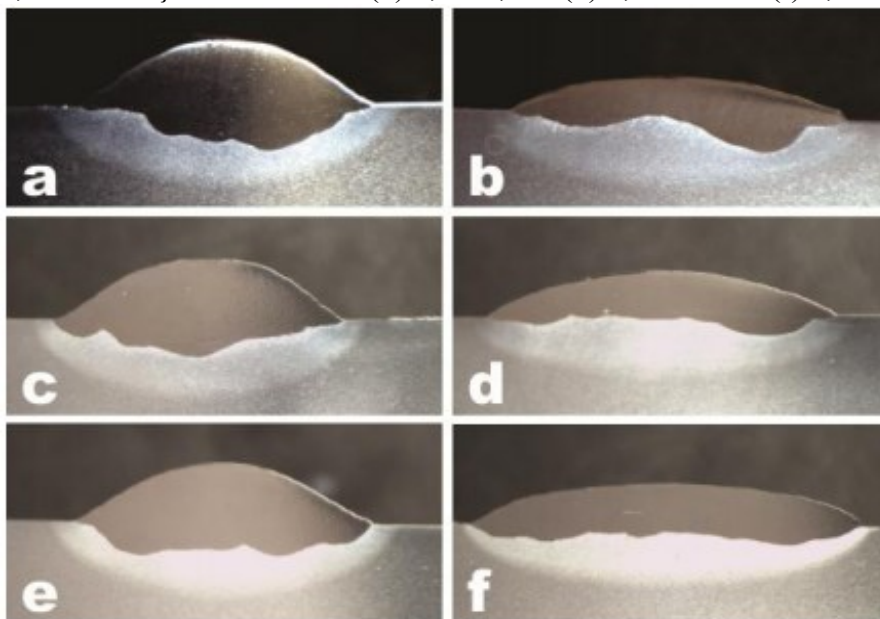
Fonte: Adaptada de [Carvalho, 2009]

Figura 12 - Superfície dos cordões. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz



Fonte: [Carvalho, 2009]

Figura 13 - Macrografias comparativas. Posição plana: em (a) 1,5 Hz, em (c) 2,5 Hz e em (e) 3,5 Hz. Posição vertical: em (b) 1,5 Hz, em (d) 2,5 Hz e em (f) 3,5 Hz



Fonte: [Carvalho, 2009]

Tabela 3 - Análise a diluição e das características geométricas

Posição	Frequência (Hz)	Diluição (%)	Reforço (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
Plana	1,5 (amostra a)	38,2	2,5	12,0	1,9
	2,5 (amostra c)	35,5	2,4	12,1	1,6
	3,5 (amostra e)	34,8	2,3	12,2	1,4
Vertical	1,5 (amostra b)	32,1	1,3	13,4	1,4
	2,5 (amostra d)	29,4	1,8	14,9	0,9
	3,5 (amostra f)	27,4	1,6	16,2	0,8

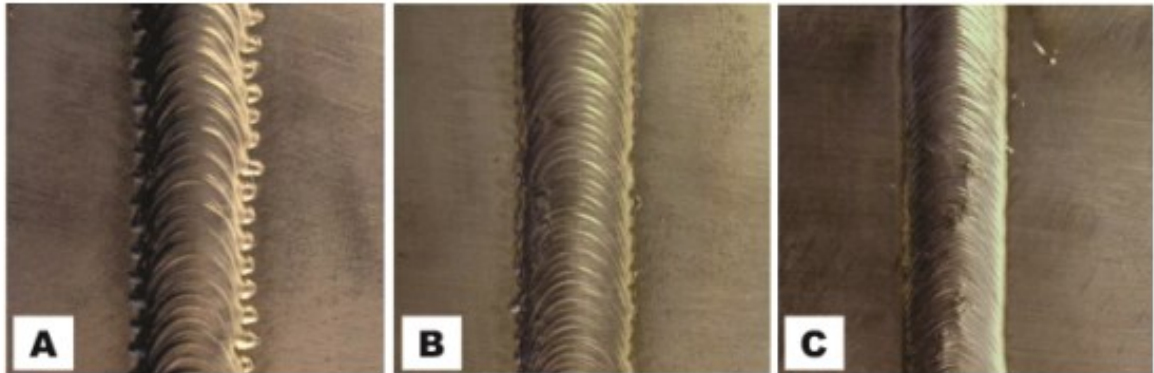
Fonte: Adaptada de [Carvalho, 2009]

De acordo com o trabalho de Carvalho (2009), com relação à diluição nota-se que os cordões realizados na posição vertical apresentam menor percentual. Verificando os resultados dentro de cada uma das posições tem-se que com o aumento da frequência de oscilação da tocha há redução sistemática da diluição. Quanto às características geométricas dos cordões, os resultados na posição vertical possuem menor reforço, maior largura e menor penetração. Todas essas características são desejáveis em um revestimento, pois é possível o preenchimento de uma área com menor quantidade de material e menor número de cordões. Com o aumento da frequência de oscilação da tocha os cordões possuem maior largura e menor penetração.

A partir dos resultados que foram obtidos a respeito da comparação entre a posição plana e vertical, iniciou os estudos da influência da frequência de oscilação da tocha sobre o revestimento, adotando a posição vertical como padrão, devido ao fato de ter apresentado características mais indicadas para o processo. Teve o cuidado de realizar a soldagem dos cordões em uma mesma distância das extremidades do corpo de prova e sempre com a chapa de aço na temperatura ambiente, eliminando assim, a influência térmica, que ocasionaria maior penetração, e fazendo com que o calor gerado pela soldagem fosse distribuído da mesma forma em todas situações.

Adotando os mesmos parâmetros da Tabela 2, variando unicamente a frequência de oscilação da tocha, foi possível obter os cordões que serão mostrados na Figura 14, com o cuidado para não ocorrer a variação da distância do bico de contato para a peça (DBCP), uma vez que, essa variação pode acarretar em diferença da penetração.

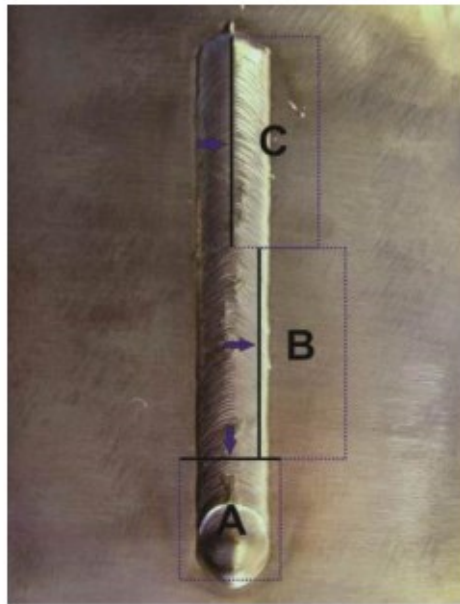
Figura 14 - Imagens da superfície dos cordões com diferentes frequências de oscilação. Em (A) 2 Hz, em (B) 3 Hz e em (C) 4 Hz



Fonte: [Carvalho, 2009]

Ao analisar a imagem do trabalho de Carvalho (2009) de forma preliminar, para frequências de oscilação menores aparecem defeitos conhecidos como mordeduras, que são decorrentes de uma menor amplitude de oscilação da tocha em relação à velocidade de soldagem aplicada. Então fica compreendido que para frequências maiores de oscilação é possível realizar o revestimento com velocidades de soldagem mais altas. Como somente o aspecto superficial dos cordões foi analisado, chegou à conclusão que ensaios com frequência de 4 Hz apresentaram melhor qualidade. No mesmo trabalho, após a análise superficial demonstrada e discutida anteriormente, deu-se início às análises macrográficas, sendo importante ressaltar que na grande maioria das vezes é observada apenas a macrografia da seção transversal do cordão, porém foram efetuados mais dois cortes longitudinais, sendo um na extremidade e outro no meio do cordão de solda, como ilustra a Figura 15. Através destes cortes é possível a análise das características geométricas em uma extensão maior do cordão, e avaliar de melhor forma a diluição, penetração e reforço. As setas que são mostradas na imagem, indicam as regiões onde foram realizados o lixamento e polimento das amostras.

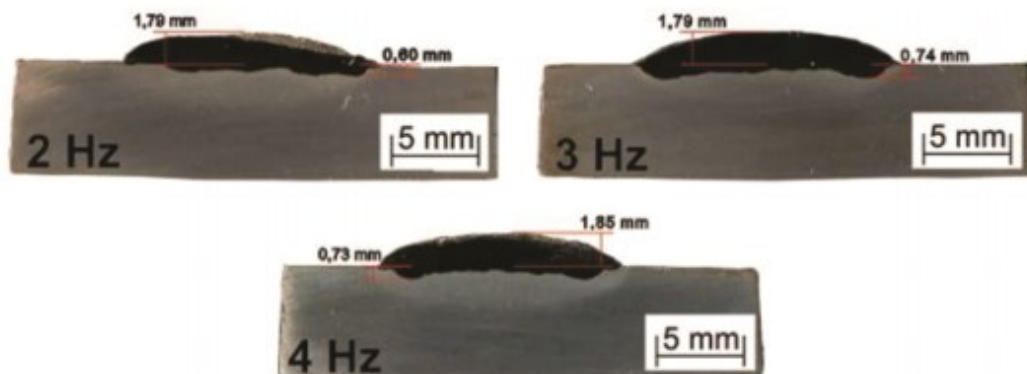
Figura 15 - Regiões das análises macrográficas. (A) seção transversal; (B) corte longitudinal na extremidade e (C) corte longitudinal no centro do cordão



Fonte: [Carvalho, 2009]

Ao desmembrar a imagem acima e analisar de forma isolada, a parte A representada pela Figura 16, é perceptível que a amostra com 2 Hz de frequência apresentou menor valor de penetração, 0,60 mm, já a amostra de 4 Hz de frequência teve um valor de penetração de 0,73 mm. Em uma análise de forma comparativa, poderia se dizer que a amostra com 2 Hz seria mais satisfatória para a realização do revestimento, entretanto somente com essa comparação em relação ao valor da penetração, tornaria a análise incompleta, plausível de erros.

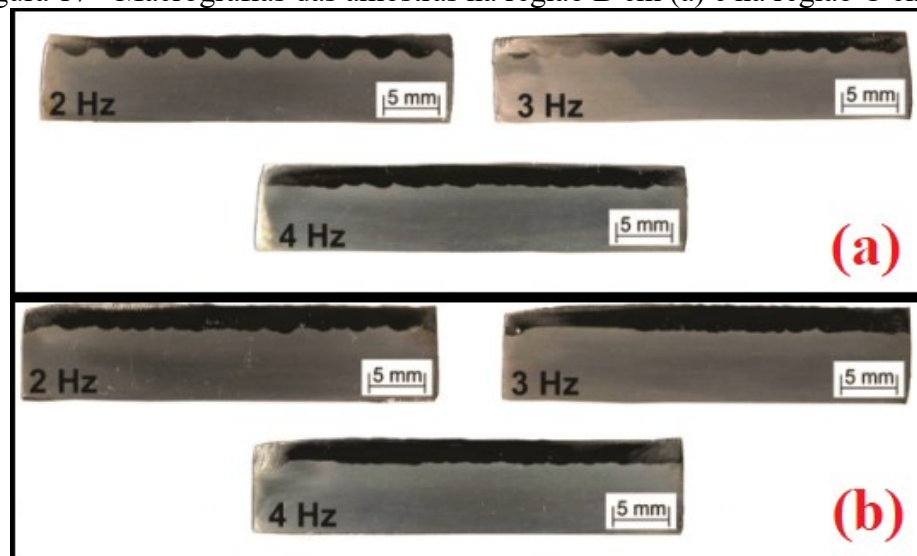
Figura 16 - Macrografia das amostras na região A juntamente com as medidas de reforço e penetração



Fonte: [Carvalho, 2009]

De acordo com Carvalho (2009) em suas análises a respeito das macrografias das seções longitudinais, que são apresentadas na Figura 17, onde ainda se divide em figura 17 (a) para a região B e (b) para a região C. É possível notar que quanto maior a frequência de oscilação maior é a uniformidade no perfil do metal depositado. Há uma variação de penetração, principalmente nas amostras de 2 e 3 Hz da região B (a), não desejável para o processo de revestimento, uma vez que, indica a não uniformidade da soldagem.

Figura 17 - Macrografias das amostras na região B em (a) e na região C em (b)



Fonte: [Carvalho, 2009]

Na mesma linha de raciocínio e análises que foram feitas anteriormente, as características da diluição também se alteraram significativamente em cada uma das três regiões analisadas, valores estes que serão mostrados na Tabela 4. É possível perceber que nas regiões A e B tem-se a redução dos valores da diluição com o aumento da frequência de oscilação da tocha, enquanto na região C ocorre o inverso, ou seja, o aumento da diluição. Entretanto, fica perceptível de uma maneira geral, que através do valor médio da diluição nas três regiões, o aumento da frequência de oscilação da tocha de soldagem provoca a redução da diluição total do revestimento.

Após todo este estudo apresentado por Carvalho (2009), o próprio chegou à conclusão que de acordo os dados apresentados, que um depósito com maior frequência de oscilação proporciona maior uniformidade e a composição química do cordão de solda é mais constante, bem como os teores de cromo, que está relacionado com a resistência à corrosão dos aços

inoxidáveis, quanto menor esse teor mais suscetível é o metal a ataques químicos. Para adquirir resistência à corrosão os aços devem possuir um teor de cromo acima de 10%.

Tabela 4 - Análise de diluição para as amostras

Frequência (Hz)	Diluição (%)			Valor médio
	A	B	C	
2	25,2	17,3	27,3	23,3
3	24,5	15,0	29,2	22,9
4	19,5	9,4	31,4	20,1

Fonte: Adaptada [Carvalho, 2009]

É importante ainda ressaltar sobre outra variante moderna do processo MIG/MAG, uma tecnologia denominada pelo fabricante *Spinarc*. De acordo com Santos (2019) que em seu trabalho abordou sobre tal tecnologia, afirmando que nesse processo se utiliza uma tocha de soldagem cuja rotação do arame-eletrodo é realizada de forma automática, em alta frequência variando de 500 a 5500 rpm, onde a força centrífuga impulsiona pequenas gotas fundidas angularmente, criando um cordão de solda consistente e sólido. A física associada ao processo permite a soldagem fora de posição com arame de núcleo metálico no modo de transferência por spray, a rotação do arame permite a utilização de altas velocidades de avanço, e as taxas de deposição a elas relacionadas, em todas as posições. Os fabricantes da tocha *Spinarc* (Figura 18) afirmaram que como benefício da moderna variante do processo MIG/MAG, pode-se citar ganhos relacionados à produtividade, como possibilidades da redução do ângulo do chanfro e também ganhos relacionados a propriedades mecânicas/metalúrgicas, aliados a uma menor suscetibilidade a defeitos como a falta de fusão.

Figura 18 - Tocha Spinarc rotacionada em alta frequência. $W = 3000$ rpm



Fonte: (Santos, 2019)

Há trabalhos como o de Yang *et al* (2009) que avaliaram os efeitos da velocidade de rotação arame-eletrodo com técnicas de chanfro estreito na posição horizontal. Eles puderam concluir que o processo de soldagem com velocidades de rotação entre 5 e 20 Hz resulta em um processo estável, pelo qual não foram observados problemas com relação à falta de fusão nem com o fluxo da poça de solda. Ao passo de que a velocidade de rotação aumentou para valores superiores a 20 Hz, os pesquisadores observaram a presença de falta de fusão em ambas as paredes laterais, juntamente com um "salto de parede lateral" do arco elétrico.

2.5 AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Os aços inoxidáveis martensíticos, são essencialmente ligas ternárias de Fe – Cr – C, tendo a possibilidade de adição de pequenas quantidades de outros elementos de liga, como: Mo, Ti, N, Ni, Mn, Al, entre outros, com teor de cromo variando entre 11,5 – 18 % e 0,1 – 0,25 % de C, capazes de serem endurecidos por têmpera. O Cromo é considerado o elemento mais importante dessa liga, já que é ele quem garante aos aços inoxidáveis resistência à corrosão. Estes aços, ainda possuem outras características como resistência mecânica e custo relativamente baixo. A classificação como inoxidáveis é em função do teor de Cromo, este que desenvolve um filme de óxido passivo junto à superfície, suficiente para conferir resistência à

oxidação, à tração, à fadiga e requisitos moderados de resistência à corrosão até mesmo em temperaturas próximas de 600°C.

Os tratamentos térmicos desse tipo de aço se assemelham aos realizados em aços carbono e baixa liga. O aço primeiramente é austenitizado, após esta etapa é resfriado em uma taxa suficiente para produzir martensita e em seguida realiza-se o revenimento para aumentar a tenacidade e aliviar tensões. Segundo Smith (1993) há uma diferença significativa entre os aços baixa liga e os aços inoxidáveis martensíticos é que o último possui teor de cromo suficiente para garantir a formação de martensita.

São diversas as aplicações para este tipo de aço e, dentre elas estão; turbinas de vapor, motores a jato, turbinas a gás e equipamentos para usinas hidrelétricas, entre outras várias áreas de aplicações.

Estudos de desenvolvimento dos aços inoxidáveis martensíticos macios (AIMM), tiveram início década de 60, devido à necessidade de aumentar a limitada soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos, para fabricação e reparo de turbinas hidráulicas, além de, aumentar a resistência à cavitação durante a operação desses equipamentos mediante a redução do teor de carbono e adição adequada de níquel (Henke, 1998).

A composição química dessas ligas contém um teor máximo de carbono de 0,08%, 12 a 17% de Cr, 3,5 a 6% de Ni e até 2,5% de Mo. Estes aços permitem obter uma estrutura totalmente martensítica mesmo para velocidades de resfriamento muito lentas, da ordem de 30 horas, durante a têmpera. Componentes com até 1000 mm de espessura apresentam estrutura 100% martensítica após resfriamento ao ar (Pereira, 2007).

Um dos fatores fundamentais que ocasionaram o desenvolvimento de tais ligas foi a necessidade de se diminuir defeitos causados durante a solidificação, tais como segregações, trincas à frio e à quente, além de micro-rechupes. Isto ocasionava defeitos nas peças fundidas com baixa soldabilidade, sendo prejudicial as operações de soldagem durante a fabricação ou reparo da peça (Gracioso, 2003). Da categoria citada acima, é importante ressaltar o aço CA6NM, um dos mais utilizados na fabricação de componentes de turbinas hidráulicas, que será utilizado como material base no estudo conduzido neste trabalho.

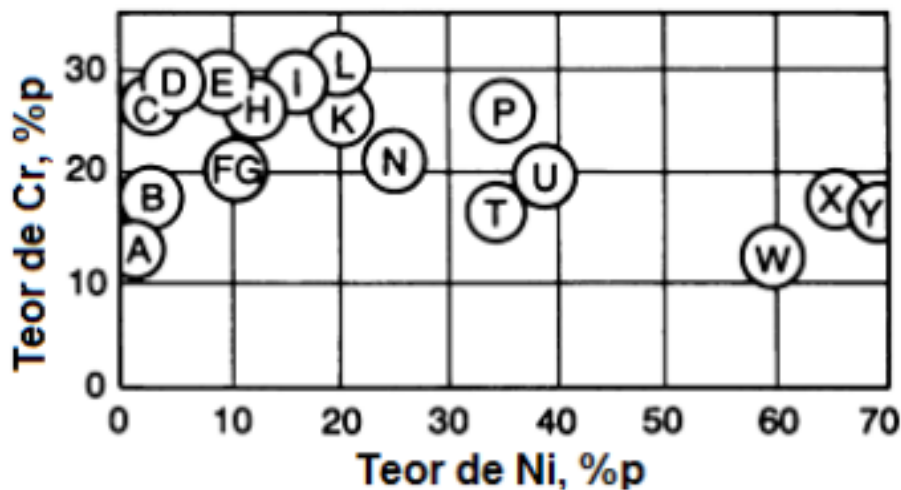
2.5.1 Aço inoxidável martensítico macio CA6NM

O CA6NM é um aço inoxidável martensítico macio fundido, classificado segundo a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como A743 grau CA-6NM. Sua

resistência à corrosão é proveniente da adição de Ni e Mo. A adição de Ni visa inibir a formação de ferrita delta e o Mo para aumentar a resistência à corrosão e melhorar a temperabilidade (ASM,1996).

A primeira letra desta especificação, denota o seu uso para resistir à corrosão (C) ou para resistir à alta temperatura (H). A segunda letra classifica nominalmente os teores de cromo e níquel, com o correspondente aumento do teor de níquel, a designação é alterada de A a Z. Os números que seguem as duas primeiras letras indicam o máximo teor de carbono de sua percentagem em peso (%/100). Finalmente, os elementos de liga presentes são indicados pela primeira letra correspondente de cada elemento. Assim a designação para o CA6NM refere-se a um aço resistente a corrosão com 13% de Cr contendo no máximo 0,06% de C, ligado com níquel e molibdênio. A Figura 19 ilustra graficamente este sistema de designação da liga com base nos teores de Cr e Ni, como dito acima.

Figura 19 - Esquemático para nomenclatura das ligas de aço inoxidável resistentes à corrosão e resistentes à alta temperatura com base nas faixas de Ni e Cr. As letras nos círculos representam a segunda letra no sistema de designação



Fonte: (ASM – 1993)

De acordo com a norma ASTM A 743-93 o aço inoxidável corresponde a uma liga com a composição química apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do aço CA6NM

Elemento	% em peso
----------	-----------

Carbono	0,06 máx.
Manganês	1,00 máx.
Silício	1,00 máx.
Enxofre	0,03 máx.
Fósforo	0,04 máx.
Cromo	11,5 – 14,0
Níquel	3,4 – 4,5
Molibdênio	0,4 – 1,0

Fonte: [ASTM A 743, 1993]

As propriedades físicas serão apresentadas na Tabela 6 e as propriedades mecânicas na Tabela 7, ambas para o aço CA6NM.

Tabela 6 - Tabela de propriedades Físicas típicas do aço CA6NM
AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO MACIO CA6NM

Propriedades Físicas		
Módulo de Elasticidade (GPa)		199,95
Densidade (g/cm ³)		7,69
Resistividade Elétrica ($\mu\Omega\cdot m$, a 21° C)		0,78
Ponto de Fusão aproximado		1510
Permeabilidade Magnética		Ferromagnético
Condutividade Térmica	a 100° C	14,5
	a 538° C	16,7
Coeficiente linear médio de expansão térmica	21 a 100° C	6,0
	($\mu in/in \cdot ^\circ F$) 21 a 538° C	7,0

Fonte: [Steel Casting Handbook, 2004]

Tabela 7 - Tabela de propriedades Mecânicas do aço CA6NM
AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO MACIO CA6NM

Propriedades Mecânicas à temperatura ambiente		
Propriedade	Valores típicos	Mínimos requeridos
Limite de resistência à tração (MPa)	830	755
Limite de Escoamento (0,2%, Mpa)	690	550
Alongamento, em 2in (%)	24	15
Redução de área (%)	60	35
Dureza Brinell (HB)	268	285 (máximo)

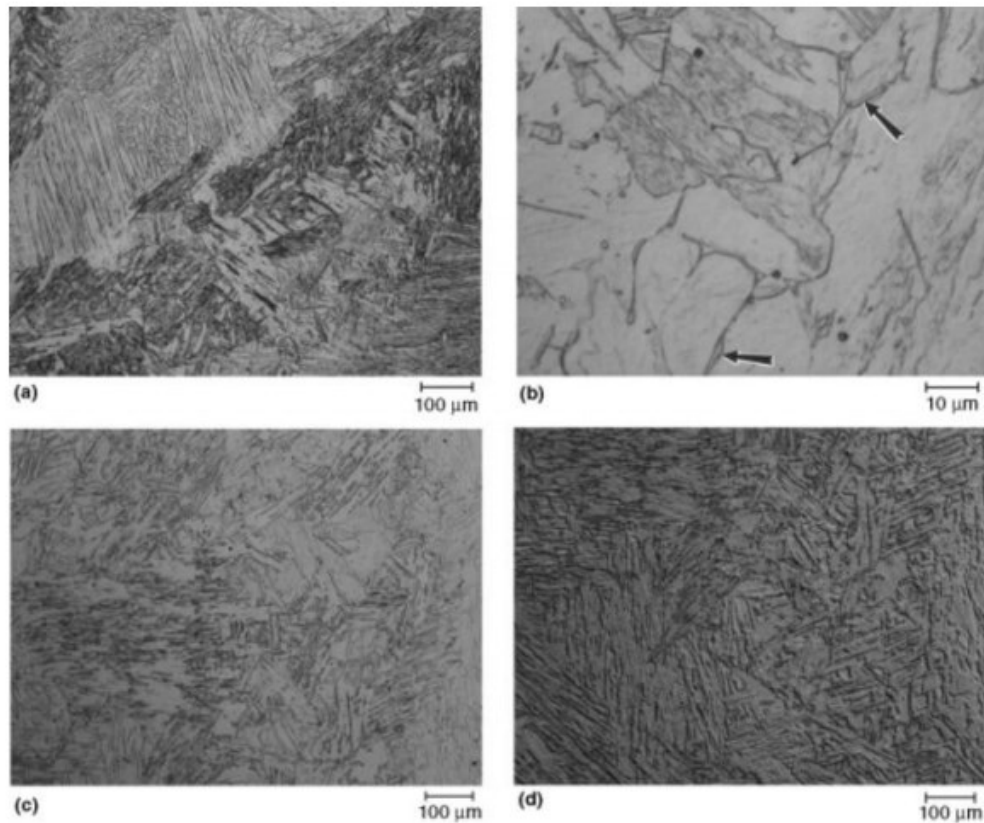
Fonte: [Steel Casting Handbook, 2004]

Os tratamentos térmicos realizados no aço CA6NM possuem grande importância para obtenção das microestruturas desejadas, além de garantir as propriedades mecânicas, levando

em consideração que o CA6NM é utilizado no estado temperado e revenido. Para a têmpera as temperaturas de austenitização normalmente empregadas variam entre 950 e 1050°C, ocorrendo a homogeneização dos elementos segregados, dissolução de carbonetos e decomposição da ferrita delta oriunda do material bruto de fundição. A temperatura de austenitização não deve ser baixa para não resultar em baixos valores de tenacidade pela não dissolução de carbonetos, porém também não deve ser alta para evitar o crescimento dos grãos austeníticos. O revenimento deste material, apesar de possuir baixo teor de carbono, é importante e utilizado com a finalidade de aumentar a ductilidade e tenacidade, esta última que depende da formação de martensita revenida e de uma austenita finamente distribuída. A austenita citada, sendo estável mesmo em temperaturas próximas a -196°C, se forma em temperaturas próximas a 600°C.

A formação de uma martensita de baixo carbono “macia e tenaz”, tanto no metal de solda quanto na zona termicamente afetada (ZTA), o baixo teor de ferrita delta (que reduz o risco do crescimento do grão), além do fato de apresentar uma menor tendência à fissuração provocada pelo hidrogênio graças à presença de austenita residual, são os principais fatores que proporcionam a melhor soldabilidade de tais aços Folkhard (1988). A Figura 20 mostra a estrutura martensítica do aço CA6NM no estado “como fundido”.

Figura 20 - Microestrutura martensítica do aço CA6NM em estado "como fundido" contendo um pouco de ferrita δ (ver setas em b). (a) e (b) atacados com reagente Ralph. (c) e (d) atacados com 15HCl - 10 ácido acético - 10HNO₃. (d) Mesmo campo mostrado em (c) mas



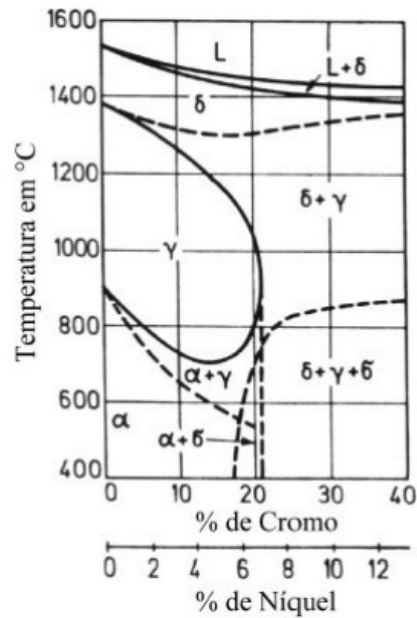
Fonte: (ASM, 2004)

No diagrama pseudo-binário mostrado na Figura 21, que é obtido através de uma seção vertical do diagrama Fe-Cr-Ni para uma relação fixa de Cr/Ni de 3:1, é possível observar que a transformação α/γ para o aço em questão que contém aproximadamente 12% de Cr e 4% de Ni é finalizada em temperaturas superiores a 700°C (Folkhard, 1988).

De acordo com Crawford (1974), os parâmetros de tratamento térmico permitem, relativamente às suas propriedades, como dureza máxima ou baixo coeficiente de expansão, entre outras. A Figura 22 ilustra a representação do diagrama de Transformação de Resfriamento Contínuo do aço CA6NM retirada do estudo de Crawford (1974), que exhibe as curvas diversas representando o início de transformações de seus constituintes. É possível de se perceber que mesmo com taxas de resfriamento extremamente lentas, tempos da ordem de 30 horas, não há formação de outro microconstituente além da martensita, pois nenhuma outra curva de transformação de austenita envolvendo ferrita, perlita ou bainita está presente no diagrama. Ainda segundo Crawford (1974) bons resultados com relação à redução de dureza

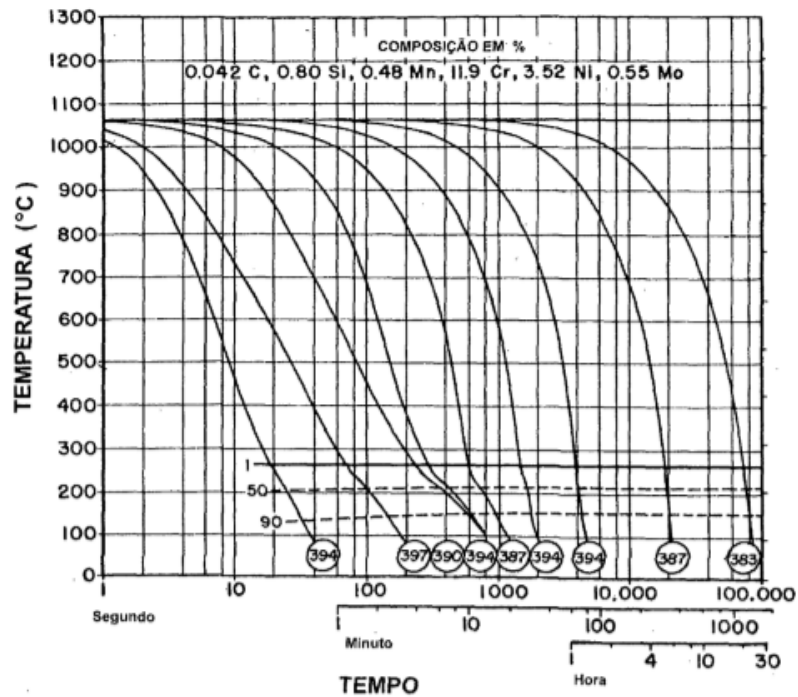
máxima, objetivando evitar o fenômeno da corrosão sob tensão, são obtidos com a realização de um duplo revenido, o primeiro a 670°C e o segundo entre 550 e 600°C.

Figura 21 - Diagrama de fases ferro-cromo-níquel, para razão cromo/níquel igual a 3:1



Fonte: Adaptado de (Folkahard, 1988)

Figura 22 - Diagrama de Transformação de Resfriamento Contínuo do aço CA6NM



Fonte: (Crawford, 1974)

O trabalho de Silva *et al* (2017) teve como objetivo o estudo dos os efeitos do tratamento térmico pós soldagem (TTPS) sobre as propriedades microestruturais e mecânicas do CA6NM, soldado com processo de arame tubular usando como material de adição o E410NiMoT1-4-1 de 1,6mm de diâmetro e sendo escolhido como gás de proteção com (75% de Ar e 25% de CO₂) e comparando com as características encontradas na junta como soldada. O tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) deste material é aplicado para garantir uma tensão residual mínima do componente e aumentar a tenacidade. A baixa tenacidade reduz a vida útil da peça e acelera o processo de cavitação.

Como foi dito anteriormente, as análises efetuadas no trabalho em questão se basearam nos resultados de ensaios relativos às propriedades mecânicas e microestruturais do aço CA6NM soldado com arame tubular. Para a avaliação das propriedades mecânicas realizaram testes de microdureza e testes de impacto. A Figura 23 ilustra a localização das medidas de microdureza, incluindo o metal de base, o metal de solda e a zona afetada pelo calor.

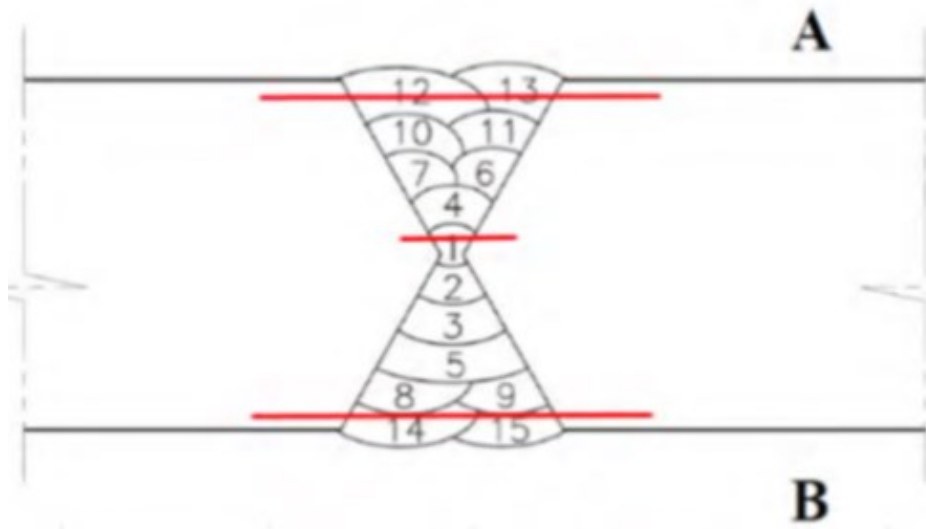
Ainda no trabalho de Silva *et al* (2017) os valores de microdureza Vickers apresentados nos gráficos da Figura 24, mostraram que todas as regiões da junta soldada com TTPS apresentam valores de dureza inferiores aos da junta como soldada, provavelmente associado ao alívio de tensão e à têmpera da martensita durante o TTPS. Além disso, é observada uma distribuição mais suave dos valores de dureza entre as diferentes regiões com TTPS, tornando os valores de dureza do metal de solda próximos ao da metal base. No caso do material da junta como soldada, os valores de dureza do metal de solda são consideravelmente mais altos do que os do metal de base.

Os testes de impacto foi o Charpy V-Notch conduzidos a -20°C, este ensaio requer um mínimo de três amostras para cada região: ZTA e metal de solda na superfície e no centro. As regiões em análises explicadas da seguinte maneira, sendo ZTA1 (entre 1/2 e 1/4 da espessura da junta soldada do lado esquerdo da ZTA), ZTA2 (entre 1/2 e 1/4 da espessura da junta soldada do lado direito da ZTA), S (3/4 da espessura da solda), e SS (1,5 mm da superfície do material), regiões mostradas no gráfico da Figura 25 (Silva et al., 2017). Neste gráfico os resultados de Charpy V-Notch de diferentes regiões, das juntas de solda como soldada e com TTPS. É interessante observar que os resultados do metal de solda para ambas condições são essencialmente os mesmos, perto de 27J, indicando que o TTPS afeta significativamente esta propriedade, apesar de valores de dureza mais baixos apresentados pelo material nesta condição. Este resultado é surpreendente considerando a microestrutura com a presença de austenita retida no metal de solda do material com TTPS. De acordo com Bilmes *et al* (2001),

a austenita retida é termicamente, mas não mecanicamente estável. Em seu estudo foi proposto que as partículas de austenita retida sofrem transformação martensítica durante a propagação de fissuras no teste Charpy, atuando como absorvedores de energia. Esta transformação, mecanicamente induzida na zona plástica, deve absorver energia adicional, aumentando assim efetivamente a tenacidade.

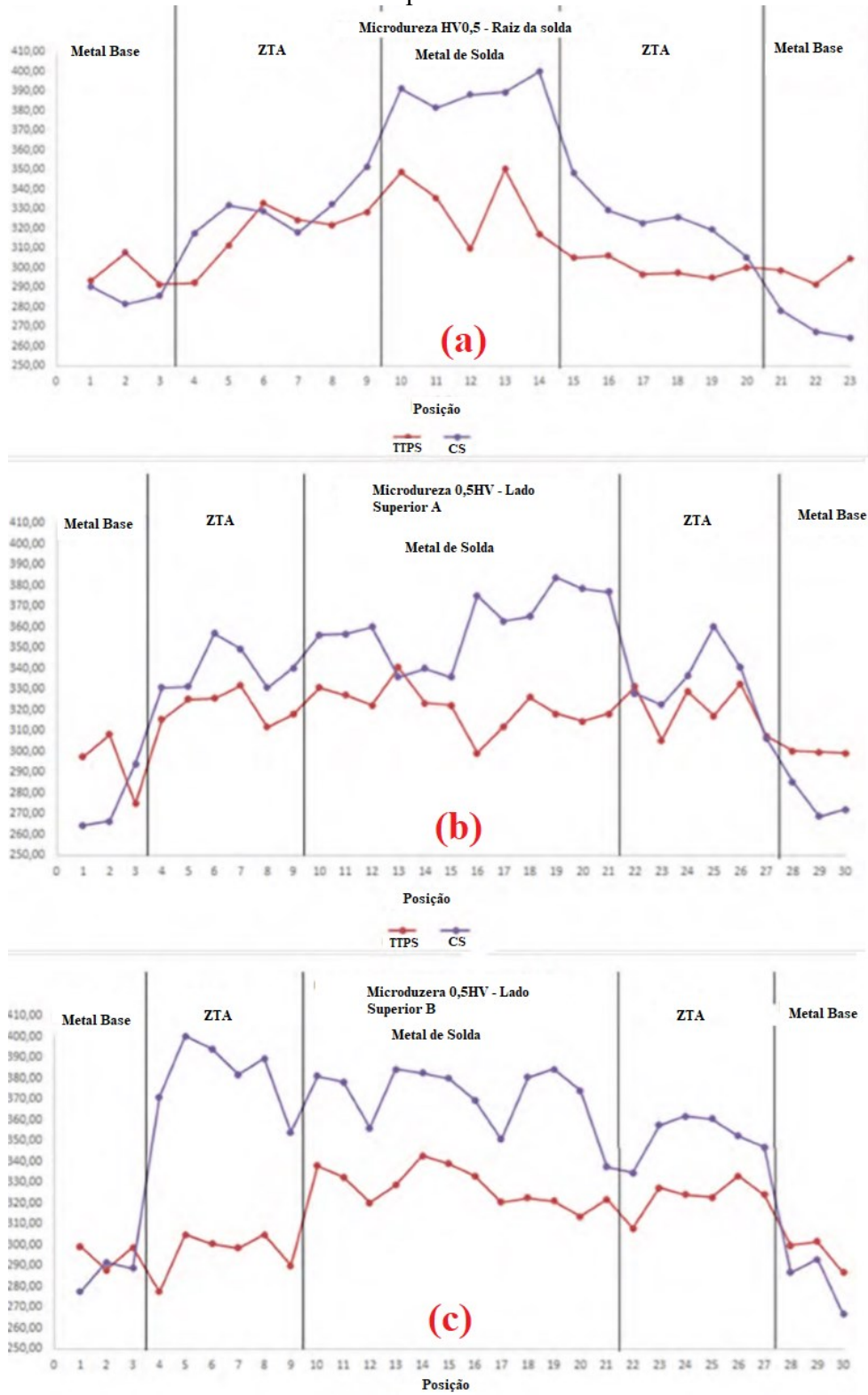
É válido ressaltar que a tenacidade é a propriedade mais importante no processo de qualificação de uma junta soldada de aço CA6NM e deve ter um valor mínimo de 27J. Assim, ambas as juntas seriam aprovadas de acordo com este critério (Silva *et al.*, 2017).

Figura 23 - Localização dos pontos de medição da microdureza



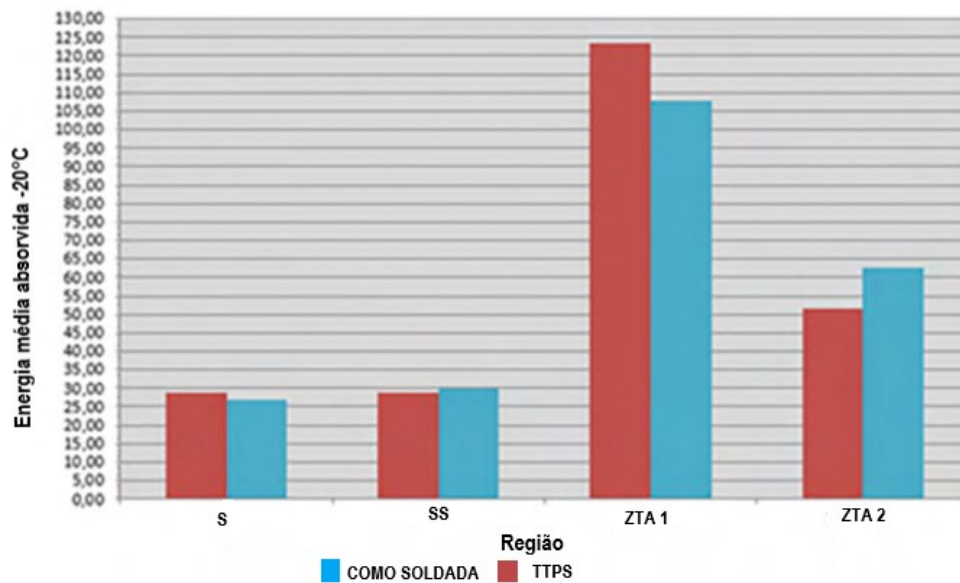
Fonte: [Silva et al, 2017]

Figura 24 - Perfil de dureza das juntas soldadas. (a) raiz da solda (b) lado superior A (c) lado superior B



Fonte: Adaptado de [Silva et al, 2017]

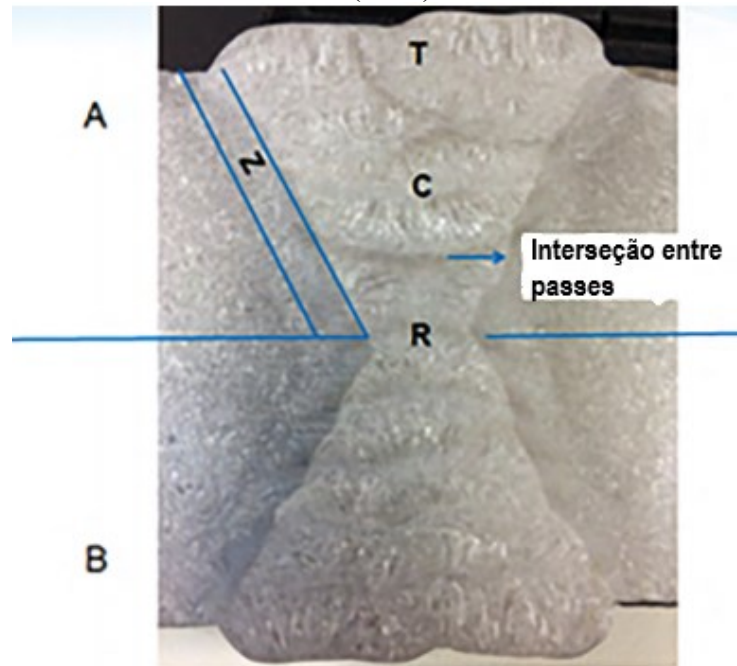
Figura 25 - Gráfico comparativo dos valores médios de absorção energia das amostras como soldada e TTPS



Fonte: Adaptado de [Silva et al, 2017]

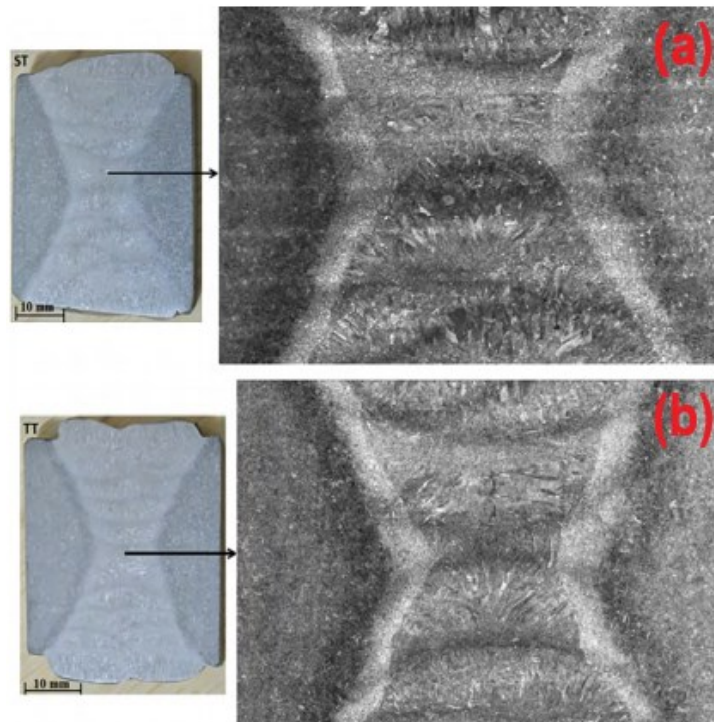
Para as análises de microestrutura, as amostras foram submetidas aos procedimentos usuais de preparação metalográfica, como: corte, esmerilhamento, polimento e ataque químico com o reagente Vilella (consiste em 5 g de ácido pícrico, 2,5 ml de HCl e 90 ml de álcool etílico). As análises foram focalizadas em quatro regiões de cada junta, como indicado na Figura 26, raiz, centro, topo e zona afetada pelo calor. A Figura 27 ilustra os mosaicos das juntas de solda obtidos por meio de um microscópio óptico. Há 120 figuras com ampliação de 50x criando um mosaico, para melhor visualização das juntas de solda e sua integridade. Os mosaicos mostram uma junta de solda livre de defeitos, tais como trincas, porosidade, inclusões de escória, falta de fusão e falta de penetração.

Figura 26 - Macrografia mostrando a seção transversal de uma junta de solda e as regiões a partir das quais foi realizada a análise de microscopia óptica. T (topo); C (centro); R (raiz) e Z (ZTA)



Fonte: Adaptado de [Silva et al, 2017]

Figura 27 - Macrografia (esquerda) e imagens em mosaico obtidas pelo microscópio óptico da junta soldada (direita). (a) como soldada; (b) com TTPS



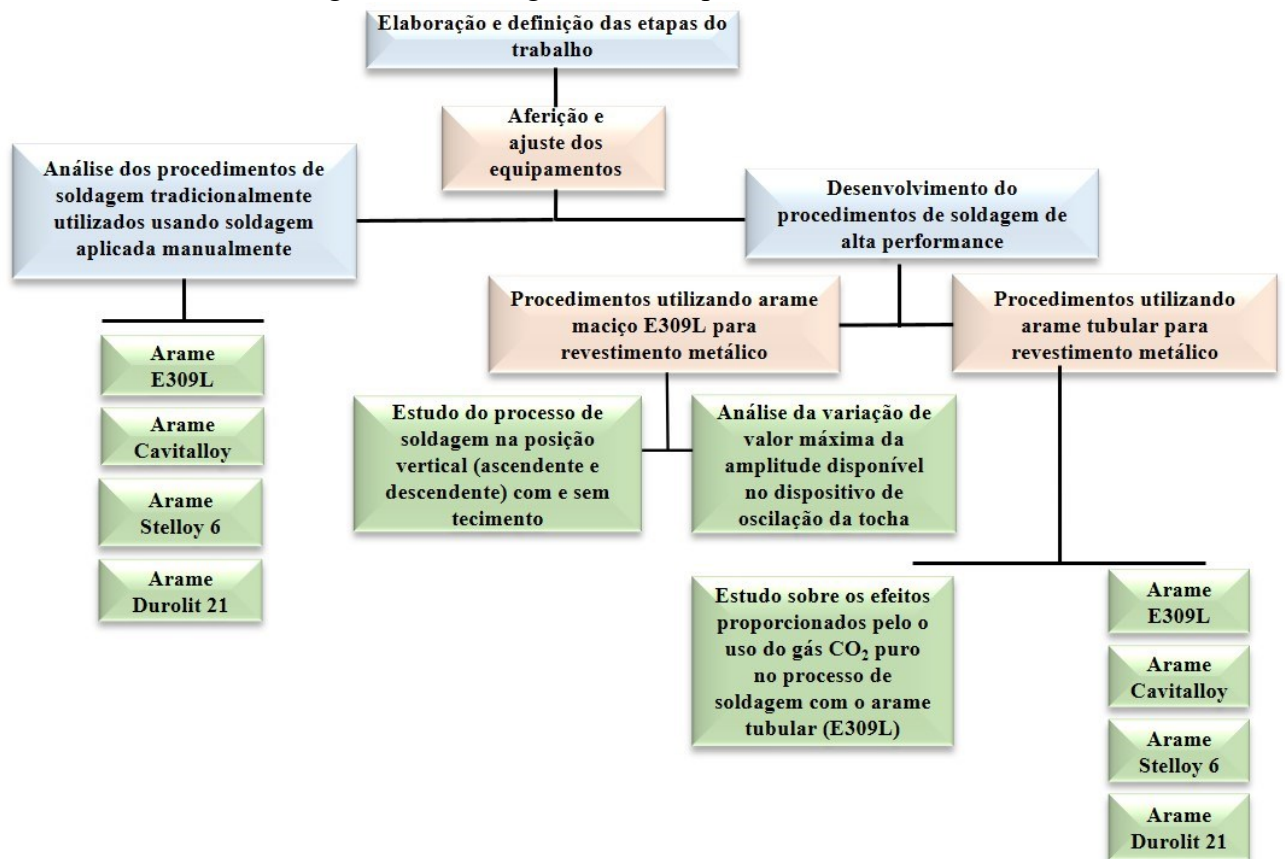
Fonte: [Silva et al, 2017]

3 MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

3.1 MÉTODOS

O fluxograma da Figura 28 resume as principais etapas e atividades realizadas no presente trabalho, e a metodologia será detalhada nos itens seguintes.

Figura 28 - Fluxograma das etapas do Trabalho



3.1.1 Análise dos procedimentos de soldagem tradicionalmente utilizados usando soldagem aplicada de forma semiautomática

A análise dos procedimentos de soldagem aqui desenvolvidos para aplicação semiautomática destes materiais utilizados convencionalmente na indústria são procedimentos que foram efetuados em outros trabalhos pelo LABSOLDA, onde se gerou uma série de técnicas visando a aplicação semiautomática, com o intuito de avaliar os revestimentos em relação à espessura das camadas depositadas, a diluição e produtividade resultantes. Dito isso,

deu-se início ao processo de soldagem do tipo semiautomática, sendo o primeiro arame utilizado como metal de adição o arame tubular E309L, com o objetivo de se efetuar uma camada de amanteigamento, visando a utilização de um material menos propenso ao trincamento e de menor custo comercial, por isso a escolha do arame de aço inoxidável austenítico AWS A5.9. Como substrato foi utilizado uma chapa de aço fundido CA6NM, a superfície da placa fundida em aço CA6NM foi esmerilhada por completo no local a ser depositado o material por soldagem. Feito isso, foi fixada mediante pontos de solda sobre suporte, para que essa superfície plana ficasse na vertical. O processo escolhido foi o MIG/MAG convencional (controle de tensão), com arame de 1,2 mm de diâmetro na direção horizontal, filetados, ou seja, com ausência de oscilação da tocha.

Da mesma forma que para a camada de amanteigamento, as soldas com o Cavitalloy para a segunda camada de revestimento foram realizadas filetadas, na posição horizontal, entretanto, desta vez a transferência metálica foi por voo livre, utilizando corrente pulsada, ou seja, imposição de corrente, em vez de tensão, tornando mais fácil o ajuste da corrente média, que exige o ajuste dos parâmetros da corrente pulsada e da velocidade do arame, para isto foi utilizado o programa sinérgico para esse tipo de material de eletrodo, disponível na fonte.

Com a finalização da avaliação dos corpos de prova com os arames citados anteriormente, a próxima etapa a ser adotada foi a análise da liga Stelloy 6 (liga ER CCoCr – A). A liga Stelloy 6 foi escolhida para os testes, pois existem vários relatos de outros trabalhos indicando que a mesma apresenta desempenho muito melhor do que aquele dos aços inoxidáveis com adição de Co (como o Cavitalloy, por exemplo), tanto na resistência à cavitação, quanto à resistência ao desgaste por abrasão, que são requisitos importantes para revestimentos sujeitos a estes mecanismos de desgastes. Para esse arame, foram realizados dois testes, sendo o primeiro com Argônio como gás de proteção e o segundo, com Argônio+2% de O₂, essas operações foram comparadas em relação aos aspectos operacionais e características das soldas obtidas. Para ambos os procedimentos foram efetuadas duas camadas de revestimento com a liga Stelloy 6.

Para finalizar essa etapa, o último arame utilizado foi o Durolit 21 (ER CCoCr-E), de forma semiautomática, novamente a escolha dessa liga se deu devido à sua maior resistência à cavitação do que a liga Cavitalloy, a qual pode ser descrita como um aço inoxidável que possui aproximadamente 10% de cobalto. Para isso, foram escolhidas ligas à base de cobalto, que possuem mais de 60% desse elemento em sua composição química, mesmo que o custo de aquisição das ligas à base de cobalto seja mais elevado do que o Cavitalloy. Para as ligas à base

de cobalto existe a possibilidade de maior durabilidade quando expostas às condições reais que as pás das turbinas operam, compensando assim o maior investimento com aquisição dos consumíveis. Há também o motivo de que a liga Stelloy 6 apresentou tendência a produzir trincas a frio quando uma segunda camada de material era aplicada, outro bom fator de se avaliar a soldagem semiautomática com a liga Durolit 21. A Tabela 8, resume os principais parâmetros utilizados para a efetuação de cada revestimento com processo semiautomático com os arames tubulares que foram usados como metais de adição no trabalho.

Tabela 8 - Parâmetros de todos os processos realizados manualmente com arames tubulares

	Arame Utilizado	Nº de camadas	Va (m/min)	Im (A)	Um (V)	Vs (cm/min)	Gás de proteção	Variante processual
1	E309L	1	8,0	185	27,5	54	CO ₂ puro	MIG/MAG Convencional
	Cavitalloy	1	5,1	130	20,7	26	Flex (Ar + 2% O ₂)	MIG/MAG Pulsado
2	Stelloy 6	2	5,0	220	27,0	46	Ar puro	MIG/MAG Convencional
3	Stelloy 6	2	5,0	220	27,0	46	Flex (Ar + 2% O ₂)	MIG/MAG Convencional
4	Durolit 21	2	5,0	174	25,0	46	Flex (Ar + 2% O ₂)	MIG/MAG Convencional

Após análise do processo realizado de forma semiautomática, é importante aqui ressaltar que o seguinte passo efetuado, foi com o processo mecanizado sem oscilação (filetados) da tocha com frequências (1,5 Hz – 4,5 Hz) e amplitudes (10 mm – 25 mm) elevadas, será realizada com os equipamentos que não conseguem executar movimentos com frequências e amplitudes consideradas altas, como os procedimentos de alta performance conseguem. Os materiais depositados continuaram os mesmos, E309L e Cavitalloy, como fora no procedimento de revestimento semiautomático, anteriormente relatado, tendo como parâmetros praticamente os mesmos que foram utilizados no processo semiautomático, entretanto com o robô tartilope. O metal de base foi a placa de CA6NM, que teve ao longo de toda sua superfície diferentes métodos de soldagem, destacando a região escolhida para ser avaliada no trabalho, na qual ocorreu a deposição de uma camada de Cavitalloy sobre uma camada de amanteigamento de E309L. Os parâmetros utilizados podem ser vistos na Tabela 9. O procedimento foi executado para se obter mais uma amostra de revestimento com as ligas citadas, conseguindo efetuar uma outra análise comparativa entre os processos (semiautomático, mecanizado e alta performance) em relação as diferentes características geométricas que cada procedimento pode conseguir.

Tabela 9 - Parâmetros dos processos realizados de forma mecanizada com arames tubulares

	Arame Utilizado	Nº de camadas	V _a (m/min)	I _m (A)	U _m (V)	V _s (cm/min)	Gás de proteção	Variante processual
1	E309L	1	7,5	185	23,5	40	CO ₂ puro	MIG/MAG Convencional
	Cavitalloy	1	6,0	152	24,0	37	Flex (Ar + 2% O ₂)	MIG/MAG Pulsado

3.1.2 Desenvolvimento de procedimentos de soldagem de alta performance com arame maciço

Os primeiros testes foram feitos com arame maciço (E309LSi) para iniciar a parametrização que pudesse ao menos gerar cordões livres de defeitos, com a intenção de adquirir conhecimento prático sobre o funcionamento da técnica de soldagem com tecimento em alta frequência usando um arame com o qual já havia sido desenvolvido procedimentos de soldagem satisfatórios em trabalhos anteriores, facilitando assim o posterior desenvolvimento de procedimentos usando os arames tubulares. Os ensaios com arames maciços foram feitos somente sobre chapas de aço carbono A36 na posição horizontal, sendo utilizados como materiais de adição por serem de baixo valor comercial em comparação com as ligas de cobalto, e após conseguir uma certa constância de resultados deu-se início aos testes com arames tubulares (E309L, Cavitalloy, Stelloy 6 e Durolit 21), para estes foram efetuados testes usando as duas chapas determinadas como metal de base (aço carbono e CA6NM).

Este tópico dará início a abordagem de alguns testes necessários para o trabalho, como material de adição foram utilizados arames maciços. Foram ensaios visando abordar diferentes posições e sentidos de soldagem, relatando os procedimentos efetuados para chegar a resultados com a variação nos valores da amplitude e frequência do equipamento que executa a oscilação da tocha.

Os testes propostos ocorrem com o objetivo principal de se avaliar a penetração obtida variando a frequência e amplitude impostas pelo oscilador utilizado, ocorreram também alterações no sentido da soldagem, porém parâmetros como velocidade de soldagem (V_s), velocidade de arame (V_a) e corrente média (I_m) foram constantes, sendo as duas últimas provenientes da programação já existente no modo MIG/MAG pulsado sinérgico, que pré-estabelecem tais valores.

O arame utilizado em tal procedimento foi o E309LSi, maciço de 1,0 mm de diâmetro, o gás de proteção escolhido foi o *StarGold+SS* (95% Ar + 3% CO₂ + 2% N₂), geralmente indicado para soldagem de aços inoxidáveis com o processo MIG/MAG pulsado. Tais valores estão indicados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros dos primeiros cordões realizados

	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	I_m (A)	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Sentido
Cordão 1	6,4	30	150	1,5	15	Descendente
Cordão 2	6,4	30	150	3,0	15	Descendente
Cordão 3	6,4	30	150	4,5	15	Descendente
Cordão 4	6,4	30	150	0	0	Descendente
Cordão 5	6,4	30	150	3,0	15	Ascendente
Cordão 6	6,4	30	150	0	0	Ascendente

Após análise dos cordões quanto às suas características superficiais, se viu necessário a realização de uma averiguação mais detalhada da penetração, como principal análise, além da possibilidade de ter análises como da zona fundida, zona termicamente afetada (ZTA), diluição, altura e reforço dos cordões utilizando diferentes parâmetros para cada um deles com a ajuda do software analisador de imagens *Image-Pro Plus* ideal para tal função, mensurando as dimensões dos cordões.

Após finalizar os testes variando alguns parâmetros como foi dito anteriormente e entendendo que haveria um limite máximo para a amplitude de oscilação, foi proposto a realização destes ensaios para avaliação tanto da formação quanto da qualidade superficial do cordão com amplitudes tão elevadas, no caso, o valor máximo possível para o oscilador projetado pelo o LABSOLDA. Os parâmetros utilizados foram praticamente os mesmos do item anterior, porém, alterando os valores de amplitude (20 – 25 mm) e da sua velocidade de soldagem (V_s). Na Tabela 11 são mostrados os parâmetros escolhidos para cada um dos três cordões que foram realizados, com os valores das duas variáveis citadas anteriormente, cordões estes que serão identificados e apresentados no tópico de resultados.

Tabela 11 - Parâmetros de velocidade de soldagem e amplitude escolhidos

Cordão	Amplitude (mm)	V_s (cm/min)
1	20	30
2	25	25
3	25	35

3.1.3 Desenvolvimento de procedimentos de soldagem de alta performance com arame tubular com estudo sobre os efeitos proporcionados pelo uso do gás CO₂ puro no processo de soldagem com o arame tubular (E309L)

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, uma das propostas realizadas foi a avaliação dos resultados obtidos ao se executar o revestimento com gás CO₂ puro como gás de proteção. Um dos motivos que levaram a realizar tal ensaio foi com a intenção de efetuar cordões isentos de descontinuidade. Dentre eles levando em conta o motivo já citado, de se evitar descontinuidades, foram realizados testes de soldagem com o gás CO₂. Os parâmetros utilizados foram velocidade de soldagem (V_s) de 30 cm/min, velocidade de arame (V_a) de 6,4 m/min, tensão (U) de 28,0 V, frequência de oscilação (f) de 1,5 Hz, DBPC (distância bico de contato peça) de 12 mm e sentido da soldagem sendo na posição vertical descendente puxando com ângulo da tocha de 10°. As avaliações pretendidas sobre esse processo serão baseadas na verificação da falta de continuidade nos cordões (característica da morfologia) e através da análise metalográfica (macrografia). Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes microestruturais que compõe o metal.

Para encontrar os valores de penetração e diluição geométrica do revestimento utilizou o *software Image-Pro Plus*®. Após mensurar os valores necessários para a diluição geométrica no software, eles são introduzidos na equação (4), que tem como função calcular essa taxa, a transformando em valor percentual. Porém como se trata de uma soldagem de revestimento, que se caracteriza por ter cordões sobrepostos uns aos outros, fica difícil a certeza dos valores encontrados tanto para a penetração quanto para a diluição, devido à probabilidade que haja muitos de erros de medição, assim se considera um valor médio para a penetração encontrada e para a diluição geométrica que o cálculo envolve o valor da área total do revestimento.

3.1.4 Desenvolvimento de procedimentos de soldagem de alta performance com arames tubulares Cavitalloy, Stelloy 6 e Durolit 21

Nas etapas anteriores dos testes de soldagem realizados, estava-se utilizando o arame tubular E309L de 1,2 mm, com composição química e diâmetro diferentes do escolhido para os testes que serão relatados na sequência. O primeiro arame em questão é o Cavitalloy, com 1,3 mm de diâmetro, uma liga especial de aço inoxidável austenítico ao cobalto projetada de forma

mais específica para o emprego em regiões sujeitas à erosão por cavitação. Primeiramente o tipo de processo escolhido para começar os testes utilizando o arame/eletrodo Cavitalloy foi o processo MIG/MAG convencional, com o controle de tensão. Já para os outros dois cordões realizados nesta primeira etapa, escolheu o processo pulsado sinérgico, essa programação para tal arame se encontra na fonte utilizada, onde foi feita a escolha de uma corrente média (I_m) gerando uma velocidade de arame (V_a) correspondente. A escolha pelos dois tipos de processos foi justamente para avaliar as possíveis características que iriam resultar nos cordões para este arame.

A Figura 29 demonstra os valores de cada variável tanto pré-selecionada para o processo convencional como as que são geradas automaticamente pelo o processo sinérgico. Entre elas estão velocidade de soldagem (V_s), velocidade de arame (V_a), corrente média (I_m), altura de arco (a), tensão (U), tensão média (U_m), K_s (dinâmica de descida) e K_d (dinâmica de subida). O gás utilizado para todos os procedimentos foi o StarGold Flex (98% de Ar e 2% de O_2), a frequência e amplitude do tecimento foram as mesmas para todos os processos, sendo elas respectivamente 1,5 Hz e 15 mm.

Figura 29 - Parâmetros dos cordões efetuados na chapa A

<p>Cordão 1</p> <p>Mig/Mag convencional; $V_s = 25$ cm/min, $V_a = 5,6$ m/min $K_s = 70$, $K_d = 40$; $I_m = 171$ A, $U = 28$ V</p>	<p>Cordão 2</p> <p>Mig/Mag convencional; $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 6,4$ m/min $K_s = 70$, $K_d = 40$; $I_m = 171$ A, $U = 28$ V</p>
<p>Cordão 3</p> <p>Mig/Mag pulsado sinérgico; $V_s = 25$ cm/min, $V_a = 5,3$ m/min $a = -2$; $I_m = 160$ A, $U_m = 27$ V</p>	<p>Cordão 4</p> <p>Mig/Mag pulsado sinérgico; $V_s = 30$ cm/min, $V_a = 5,6$ m/min $a = -2$; $I_m = 170$ A, $U_m = 29$ V</p>

Após essa primeira fase de testes preliminares, adequando os parâmetros e escolhendo o melhor ensaio a se utilizar, foi dada continuidade nos mesmos, escolhendo para todos os outros quatro testes o MIG/MAG convencional. A Figura 30, também demonstra os parâmetros escolhidos para cada um dos cordões realizados, sendo efetuado mais uma vez ajustes necessários para garantir a precisão do ensaio e gerar cordões com as características desejadas.

Figura 30 - Parâmetros dos cordões efetuados na chapa B

Cordão 1	Cordão 2
<p>Mig/Mag convencional; $V_s = 30 \text{ cm/min}$, $V_a = 6,4 \text{ m/min}$ $K_s = 70$, $K_d = 40$; $U = 28 \text{ V}$</p>	<p>Mig/Mag convencional; $V_s = 30 \text{ cm/min}$, $V_a = 7,4 \text{ m/min}$ $K_s = 70$, $K_d = 40$; $U = 29 \text{ V}$</p>
Cordão 3	Cordão 4
<p>Mig/Mag convencional; $V_s = 30 \text{ cm/min}$, $V_a = 8,4 \text{ m/min}$ $K_s = 70$, $K_d = 40$; $U = 30 \text{ V}$</p>	<p>Mig/Mag convencional; $V_s = 30 \text{ cm/min}$, $V_a = 9,4 \text{ m/min}$ $K_s = 70$, $K_d = 40$; $U = 32 \text{ V}$</p>

A próxima etapa consistiu em realizar a soldagem de revestimento com os parâmetros já escolhidos como foi dito anteriormente em uma chapa de aço carbono e então efetuar o procedimento com duas camadas revestimento, porém a primeira camada foi efetuada com aproximadamente oito cordões e a segunda camada de revestimento com a metade do número de cordões da primeira camada com o mesmo sentido da primeira (direita para esquerda).

Após o revestimento realizado na chapa de aço carbono, a etapa seguinte de testes foi a realização da soldagem com os mesmos parâmetros em uma chapa de CA6NM, a metodologia também será a mesma citada anteriormente, a diferença se dá pela espessura e composição química das chapas em questão, já que a chapa de aço carbono é bem menos espessa quando comparada com a de CA6NM, com a finalização da soldagem de revestimento, uma das avaliações necessária foi a inspeção com o objetivo de avaliar o aparecimento de trincas, efetuada através do ensaio de líquido penetrante.

Dando sequência ao trabalho, após a realização de testes de soldagem mecanizada MIG/MAG utilizando um oscilador de alta frequência com outros tipos de materiais de adição (arame/eletrodo), essa etapa será utilizada o arame classificado como AWS A 5.21: ER CCoCr – A, conhecido nominalmente como Stelloy 6, arame este que possui nome e fabricante diferente, mas com a composição química muito próxima à do Stellite 6. Esta liga se destaca por sua versatilidade, sendo utilizada para a aplicação de revestimento em materiais que exigem resistência ao desgaste.

Visto que serão abordadas duas dessas ligas baseadas no Stellite, alterando o nome comercial de acordo com cada um dos fabricantes. As propriedades físicas, químicas e

mecânicas, se mantém as mesmas, tanto para o Stelloy 6 quanto para o Durolit 21 (Stellite 21) que será citado mais à frente.

Primeiramente foram feitos cordões de forma isolada para se conseguir a melhor parametrização do processo. Essa metodologia exigiu um bom número de tentativas variando os parâmetros, com o objetivo de se chegar ao melhor resultado. Como os primeiros testes geraram resultados inadequados, novos cordões foram feitos, com diferentes parâmetros. Após várias tentativas, foi possível a formação de cordão com boa qualidade superficial, tornando este o cordão padrão para o revestimento realizado posteriormente, que será mostrado mais à frente.

A Tabela 12 mostra os parâmetros utilizados para cada um dos cordões que estão representados na imagem 1 da Figura 68, e assim será em sequência também para as imagens 2 e 3 da Figura 68 serão mostradas na Tabela 13 e Tabela 14. Na Tabela 15, serão mostrados os parâmetros dos cordões do último corpo de prova. Para todos esses processos o gás utilizado foi o StarGold Flex, já citado em testes anteriores. Esses testes são primordiais para se chegar aos resultados esperados e, também, para demonstrar os erros de parametrização que se encontram ao longo do processo de busca da melhoria contínua sobre a soldagem em questão. As escolhas dos parâmetros, são provenientes de testes previamente realizados já no laboratório ou em estudos efetuados, que utilizaram o mesmo arame ou similar ao escolhido nesse trabalho.

Tabela 12 - Parâmetros dos cordões de solda referentes a imagem 1

Imagem 1	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	Tensão (V)	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)
Cordão 1	5,0	30	27,0	15	1,5
Cordão 2	5,6	30	27,0	15	1,5
Cordão 3	6,0	30	27,0	15	1,5
Cordão 4	5,8	30	27,0	15	1,5

Tabela 13 - Parâmetros dos cordões de solda referentes a imagem 2

Imagem 2	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	Tensão (V)	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)
Cordão 1	6,0	30	28,0	15	1,5
Cordão 2	6,4	30	28,0	15	1,5
Cordão 3	8,0	30	30,0	15	1,5

Tabela 14 - Parâmetros dos cordões de solda referentes a imagem 3

Imagem 3	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	Tensão (V)	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)
Cordão 1	8,0	30	32,0	15	1,5
Cordão 2	7,5	30	30,0	15	1,5
Cordão 3	7,0	30	29,0	15	1,5

Tabela 15 - Parâmetros dos cordões de solda do último corpo de prova

	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	Tensão (V)	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)
Cordão 1	7,0	30	28,0	15	1,5
Cordão 2	6,8	30	28,0	15	1,5
Cordão 3	6,5	30	28,0	15	1,5

O cordão padrão relatado acima, foi efetuado com velocidade de arame (V_a) de 6,5 m/min, velocidade de soldagem (V_s) de 30 cm/min e uma tensão (U) de 28,0 V e corrente média (I_m) aferida na fonte de 184 A, amplitude de oscilação de 15 mm, frequência de oscilação de 1,5 Hz, a distância bico de contato peça (DBCP) determinada com 12 mm, sentido de soldagem continuou na descendente puxando com o ângulo da tocha de 10°. Esses foram os valores adotados para todos os cordões realizados no processo de revestimento que será mostrado em sequência (tanto para chapa de aço carbono quanto para a de CA6NM). Então, após tomada a decisão dos parâmetros a serem utilizados, foi dado início à soldagem de revestimento, soldagem essa com o objetivo da realização de duas camadas. Após a soldagem realizada em chapa de menor espessura de aço carbono, o objetivo para a próxima etapa seria de se fazer a soldagem em uma chapa com maior espessura (aproximadamente 30mm) e a chapa em questão foi a de CA6NM, repetindo o processo já realizado de forma semiautomático, porém agora, de forma mecanizada e com oscilador de alta frequência, para avaliar o aparecimento ou não de trincas nos cordões de solda e de outras discontinuidades.

A primeira etapa dos testes com o arame Durolit 21, mais uma liga a base de cobalto, se deu com a realização de um cordão único, como adotados pelos testes anteriores, para ser o modelo parametrizado para os revestimentos que virão a seguir. Teve um cordão escolhido como padrão, por ter apresentado melhor qualidade superficial, dentro do desejado para a continuação do processo MIG/MAG Convencional, estabelecendo as variáveis da seguinte maneira: velocidade de soldagem (V_s) de 30cm/min, velocidade de arame (V_a) de 7,0 m/min, tensão de 28,0 V, amplitude de oscilação de 15 mm, frequência de oscilação de 1,5 Hz, a distância bico de contato peça (DBCP) determinada com 12 mm, sentido de soldagem

continuou na descendente puxando com o ângulo da tocha definido com 10° e corrente média (I_m) de 183 A. O gás utilizado é o mesmo para o processo com Stelloy 6, o StarGold Flex.

Após essa parametrização, a próxima etapa realizada foi o revestimento contendo duas camadas, a primeira com seis cordões e a segunda com cinco. As variáveis desse revestimento foram idênticas as selecionadas para o cordão único. Com a persistência da ocorrência de descontinuidades nos cordões, principalmente ao se realizar duas camadas de revestimento, e com foco na segunda camada, foi proposto repetir o mesmo teste, na chapa de CA6NM. Novamente as variáveis permaneceram as mesmas, tendo como diferença a composição química e espessura do material de base. Os defeitos encontrados nos revestimentos realizados nas chapas de aço carbono, novamente foram identificados no revestimento da chapa de CA6NM, levando à uma nova mudança da metodologia adotada. Sabendo que a quantidade de variáveis é grande e ao avaliar tal problema, definiu-se por diminuir essa amplitude de oscilação na qual estava sendo utilizada, praticamente em todos os cordões e revestimentos que foram feitos anteriormente. A amplitude de 15 mm foi diminuída para 12 mm. O primeiro teste com essa nova amplitude (única variável alterada), foi um revestimento que mais uma vez, feito com duas camadas, a primeira camada contendo seis cordões e a segunda camada com cinco cordões.

3.1.5 Medições necessárias para efetuar comparações reais entre os processos tradicionalmente usados na indústria com os de alta performance

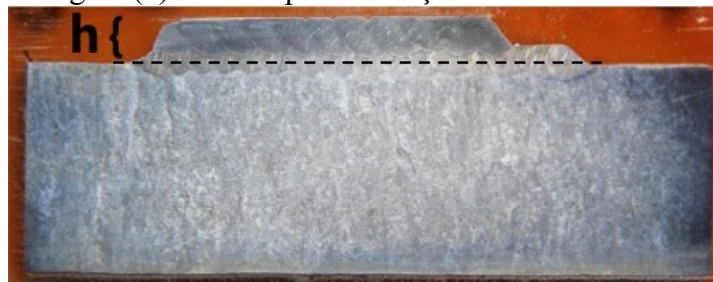
O cálculo da altura do revestimento (espessura) com duas camadas apresentado foi feito através do corte realizado na seção transversal das amostras. Para a análise comparativa em que serão avaliadas as alturas dos cordões de solda entre os revestimentos que foram executados de forma semiautomática e mecanizada com os procedimentos de alta performance (oscilação com alta frequência), a metodologia adotada se procedeu da seguinte forma: após a amostra passar por todos os processos de preparação metalográfica, com os cordões de solda dos revestimentos bem revelados, foi traçado uma linha na superfície do corpo de prova, perpendicular à altura do revestimento e, após isso, com o auxílio do software *Image-Pro Plus 6.0* onde é possível mensurar esses valores com bastante confiabilidade, a altura (h) foi calculada para efetuar as comparações de bastante importância para os resultados que serão demonstrados em tópicos à frente.

Será nessa parte que os processos mais robustos, com alta performance, serão efetivados e estudados, como exemplo o processo de revestimento com arames tubulares, será

realizado com um oscilador que permite o uso de altos valores de frequência, este equipamento possui característica de poder selecionar elevadas frequências de movimentação da tocha. No módulo de frequência os valores podem ser configurados na faixa de 0 a 30 Hz, porém neste trabalho variaram entre com valores máximos no intervalo de 1,5 – 4,5 Hz. Para essa etapa os corpos de provas e arames serão os mesmos da etapa anterior, diferenciando-se em relação as variáveis escolhidas e a tecnologia embarcada no processo de soldagem. É válido salientar que para ambas as etapas os arames (material de adição) utilizados, eram bem guardados em uma estufa estruturada para a função de garantia de estocagem, em um ambiente seco, livre de umidade, evitando assim que fatores extras fossem prejudiciais ao processo.

Para a análise comparativa em que serão avaliadas as alturas dos cordões de solda entre os revestimentos que foram executados de forma semiautomática e mecanizada com os procedimentos de alta performance (oscilação com alta frequência), a metodologia foi a seguinte: após a amostra passar por todos os processos de preparação metalográfica, com os cordões de solda dos revestimentos bem revelados, foi traçado uma linha na superfície do corpo de prova, perpendicular à altura do revestimento e, após isso, com o auxílio do software *Image-Pro Plus 6.0* onde é possível mensurar esses valores com bastante confiabilidade, a altura (h) foi medida (Figura 31).

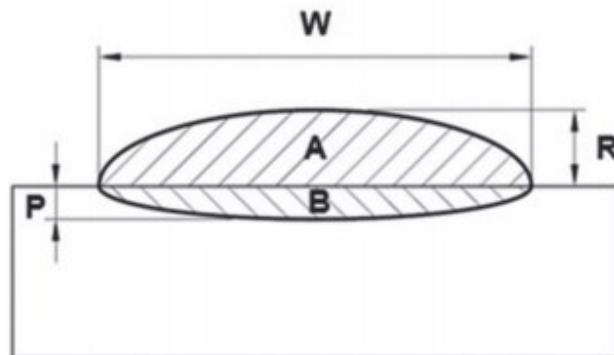
Figura 31 - Região (h) adotada para medição das alturas dos revestimentos



O perfil geométrico do cordão de uma soldagem de revestimento é mostrado na Figura 32, retirada do trabalho de Gomes *et al.* (2011) onde a largura de cordão é (W), o reforço é (R), a penetração é (P) e diluição é (D), que fazem parte das medidas necessárias para o efetuação dos cálculos através da equação (4) . A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o processo de revestimento permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo, ou seja, garantindo boa produtividade.

$$D = \frac{B}{A + B} \times 100 (\%) \quad (4)$$

Figura 32 - Perfil geométrico desejado do cordão de solda, onde: (W) largura, (P) penetração, (R) reforço



Ao término dos procedimentos citados acima, foram realizados os cortes de forma transversal nos corpos de provas com revestimentos, pela cortadora metalográfica (*Cut-off*), para as análises subsequentes. Todos, sem exceção de arame, passaram pelo mesmo processo de preparação após os cortes, sendo eles: lixamento, polimento e ataque químico com o reagente Marble (4g CuSO₄ + 20ml HCl + 20ml H₂O), bem eficiente para revelar estruturas dos aços inoxidáveis.

Como foi dito anteriormente um dos métodos adotados no trabalho de bastante importância é de se mensurar o valor da altura (espessura) e penetração dos revestimentos e após conseguir encontrar os valores para cada um dos revestimentos tanto dos procedimentos convencionais quanto dos procedimentos de alta performance, foram estabelecidas comparações dos valores médios encontrados para tais características dos cordões de solda dos revestimentos, foram medidos vinte pontos bem definidos na no cordão de solda, sendo eles variando de valores menores e maiores encontrados na macrografia, para a altura e penetração de cada procedimento efetuado, gerando os valores finais propícios para realizar o comparativo e se chegar a um resultado concreto.

A utilização de metodologias de avaliação da confiabilidade de peças é determinante para evitar falhas imprevistas, é importante de ter o controle do seu processo e conseguir tomar as decisões certas sobre o desempenho proporcionado por cada liga utilizada usada como metal de adição no revestimento, observando as particularidades da microestrutura de um material. O ensaio de espectrometria proporciona tal fato, efetuando a análise química dos cordões prestando como análise de resultados: ao fim do processo, deve-se dedicar atenção ao estudo

dos resultados, observar se o material está de acordo com a especificação própria ou se encontra similar aos diversos tipos de materiais presentes em normas e catálogos. Assim, se optou por avaliar e comparar as composições químicas medidas dos procedimentos efetuados com suas composições nominais.

Uma outra metodologia aqui analisada e que merece destaque se trata sobre a análise comparativa dos perfis geométricos dos revestimentos obtidos com cada um dos procedimentos efetuados no trabalho. Tem relação direta com a altura dos mesmos, porém há fatores como os procedimentos efetuados com processos convencionais, todos tiveram suas duas camadas de revestimento esmerilhadas, para realização do ensaio de líquido penetrantes e também para a deposição da segunda camada ser mais uniforme. Assim foram traçados pontos em torno de todo o revestimento conseguindo um esboço do perfil de cada revestimento, podendo assim compará-los e efetuar as corretas conclusões.

Avaliar a quantidade de material depositado em relação a área total do depósito em (kg/m^2) foi outra análise pertinente necessária, sendo de certa forma conjunta com os custos de soldagem para cada arame utilizado para os revestimentos dessa relação. Para encontrar um metro (100 cm) de cordão foi necessário medir o valor da largura total dos cordões e dividir pelo número de cordões executados. O valor encontrado dessa divisão será a largura média de cada cordão. Então, para se efetuar um metro linear de cordão, dividiu-se um metro pela largura média do cordão, assim chegando ao número de cordões necessários. Após isso se multiplica pelo tempo necessário para se fazer um metro de cordão (100 cm), utilizando como referência a velocidade de soldagem (cm/min), para se ter o tempo total necessário para depositar um metro quadrado. Dando sequência ao método adotado, se multiplicou o valor da velocidade de arame (m/min) adotada para cada tipo de liga utilizada pelo tempo total já encontrado, assim encontramos a resultante desta multiplicação tida como a quantidade total em metros de arame gasto. Tendo esses valores calculados, cada liga teve meio metro de arame cortado e pesado em balança de precisão resultando em uma massa (g) que ao ser multiplicada pelo valor total em metros para cada arame se encontrou o valor final em quilogramas por metro quadrado. Com esses valores finais obtidos e sabendo o valor por quilo de cada um dos arames, foi possível obter o custo em relação à quantidade final de material depositado.

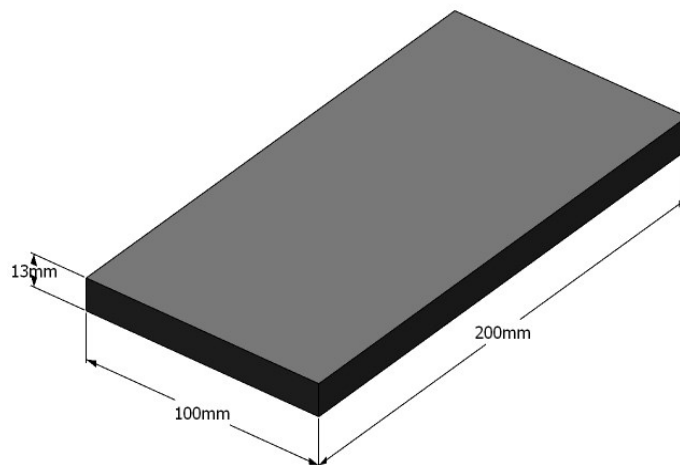
3.2MATERIAIS

3.2.1 Corpos de Prova (Chapas)

Para este trabalho, foram escolhidos e utilizados dois tipos de material de base. O primeiro foi do tipo barra chata de aço carbono (SAE 1020), possuindo dimensões de 200 mm x 100 mm x 13mm e o segundo, a chapa de aço inoxidável martensítico macio CA6NM, com as dimensões de 400 mm x 400 mm x 30 mm. A limpeza de ambos os corpos de prova ocorreu através da utilização do primeiramente o disco de desbaste e, logo após, finalizando com o disco flap. A chapa de aço carbono, era fixada na posição vertical, sobre a bancada com o auxílio de duas presilhas metálicas móveis, com ajustes através de quatro parafusos, dois para cada presilha.

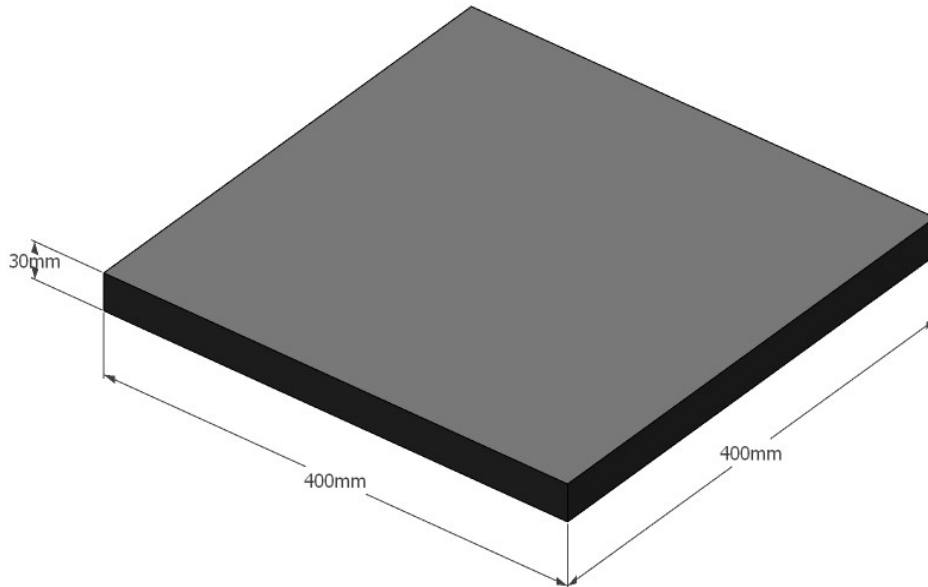
As soldagens foram realizadas sobre a chapa de aço carbono (Figura 33). Sua fixação na bancada se deu pela utilização de duas pequenas presilhas, uma na parte superior e outra na parte inferior da chapa, que eram apertadas com dois parafusos de fixação em cada uma das duas extremidades. Esse método de fixação foi escolhido por facilitar o trabalho que se teria com a necessidade de se pontear as chapas na bancada toda vez que fosse iniciar novos procedimentos.

Figura 33 - Dimensões da chapa de aço carbono



As soldagens executadas sobre as chapas de CA6NM (Figura 34), tiveram algumas diferenças em relação à chapa de aço carbono, primeiramente são as dimensões da mesma como citado anteriormente e suas características físicas, por serem chapas pesadas, sendo necessário cuidado para seu manuseio e posicionamento na bancada. Para essas chapas, foi efetuado o ponteamto de solda das mesmas, na estrutura metálica da bancada de soldagem.

Figura 34 - Dimensões chapa de CA6NM



3.2.2 Arames

Os arames utilizados neste trabalho, tem diferentes composições química e funcionalidades, foram usados arame maciço E309LSi e quatro tipos de arames tubulares, sendo eles: E309L, Cavitalloy, Stelloy 6 e Durolit 21.

A Tabela 16 demonstra a composição nominal de cada arame/eletrodo utilizado no estudo.

Tabela 16 - Composição nominal das ligas utilizadas como metal de adição

Nome/ Elemento de liga	C(%)	Co(%)	Mo(%)	Cr(%)	Mn(%)	Si(%)	Cu(%)	Ni(%)	Fe(%)
<i>E309LSi</i>	0,027	-	0,21	23,2	1,72	0,72	0,75	13,3	Bal.
<i>E309L</i>	0,016	-	0,12	23,0	1,93	0,39	0,75	13,0	Bal.
<i>Cavitalloy</i>	0,19	11,6	0,28	18,7	9,6	1,6	0,04	0,16	Bal.
<i>Stelloy 6</i>	1,2	Bal.	1,0	28,5	1,0	2,0	-	3,0	3,0
<i>Durolit 21</i>	0,25	Bal.	5,5	28,0	1,0	2,0	-	2,5	2,0

3.3EQUIPAMENTOS

3.3.1 Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem utilizada em todos os ensaios foi a DigiPlus A7 C3 600 (Figura 35), é uma fonte eletrônica multiprocesso, transistorizada, chaveada no secundário do

transformador da estrutura de potência mostrada com capacidade máxima de corrente de 600 A. Fonte micro processada que consegue trabalhar tanto em modo corrente contínua quanto em corrente alternada, além de outros programas como modo sinérgico. É possível operar com diversas modalidades de soldagem efetuando o controle do arco e transferência metálica.

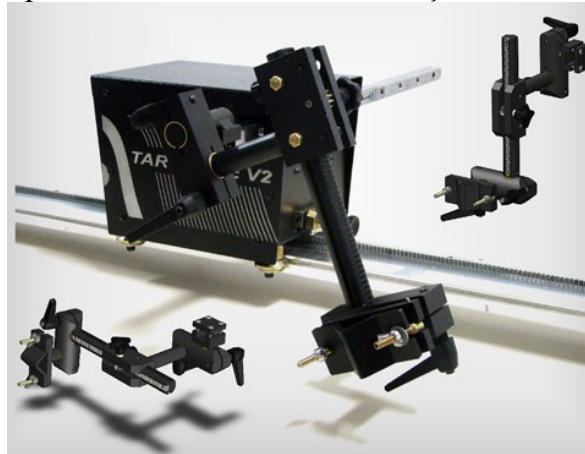
Figura 35 - Fonte de Soldagem



3.3.2 Manipulador de Movimento

O manipulador que foi utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho foi o Tartilope V2, ilustrado na Figura 36, fabricado pela SPS (Sistema e processos de Soldagem). Esse manipulador robótico, possui deslocamento automático com dois graus de liberdade, o que torna possível a execução da movimentação para o “eixo X” longitudinal e para o “eixo Y” transversal. Segundo a própria fabricante, essa movimentação em dois graus de liberdade permite que o equipamento realize a soldagem usando tecimento, que se caracteriza pela movimentação oscilatória da tocha de soldagem em sentido transversal do deslocamento. Para este trabalho o tecimento do tartilope não foi utilizado, pois o equipamento não tem dinâmica suficiente para realizar tecimento com amplitude e frequência elevada simultaneamente e sem de um mecanismo adequado que permitiu trabalhar com frequências de oscilação mais elevadas.

Figura 36 - Tartílope V2 – Sistema de movimentação automática para soldagem



3.3.3 Tocha de Soldagem

A tocha usada no processo de soldagem MIG/MAG para os ensaios realizados foi a TBi 511 Aut, ilustrada na Figura 37. Essa tocha apresenta capacidade de corrente de até 450 A com a capacidade de trabalhar com arames/eletrodos de 1 a 1,6 mm de diâmetro. Ainda atrelado a tocha, está o sistema de refrigeração a água.

Figura 37 - Tocha MIG/MAG Tbi 511 Aut



3.3.4 Medidor de Deslocamento Linear

O uso do medidor de deslocamento linear, transdutor linear Burster (Figura 38) teve como objetivo, aferir se o valor de amplitude estimado e definido para o processo de soldagem, na oscilação da tocha que engloba o conjunto (oscilador + tartílope) estava realmente de acordo e com os mesmos valores. Esse aparelho é um sensor de deslocamento potenciométrico com aplicação para medição direta, teste e monitoramento de deslocamentos mecânicos.

Figura 38 - Medidor de deslocamento Linear



O medidor tem como especificações técnicas, uma faixa de medição de 50 mm, não linearidade de até 0,05% do F.S (valor final de escala) e resolução de 0,01 mm. As medições foram realizadas através do sistema de aquisição portátil (SAP), onde o sistema realiza a leitura do sinal de tensão e o transforma em unidade de comprimento.

3.3.5 Sistema de Aquisição Portátil (SAP)

O sistema de aquisição portátil (SAP), Figura 39, ferramenta essa para análise dos processos de soldagem. Através desse sistema, é possível rastrear o processo de soldagem, obter dados de produtividade, analisar a transferência metálica, dinamizar a inspeção de soldagem, entre outras funcionalidades, além de permitir a conseguir uma leitura instantânea das grandezas corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás para até duas estações de soldagem, com tempo configurável de até 600 s, com taxa de amostragem de 5000 pontos por segundo para cada variável (Manual do Sistema de Aquisição de Dados, Imc soldagem, 2014).

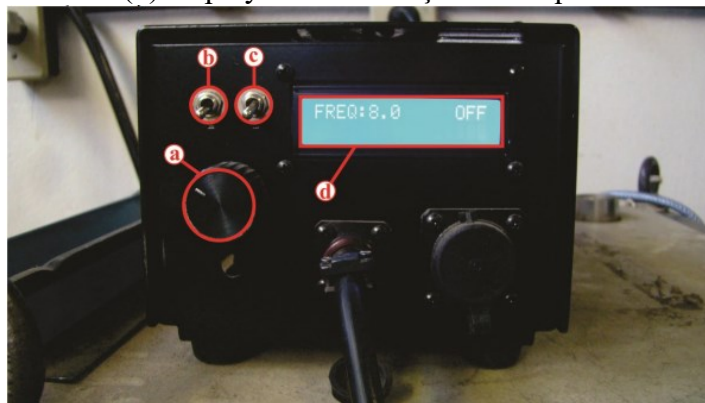
Figura 39 - Sistema de Aquisição Portátil



3.3.6 Sistema de Oscilação Senoidal

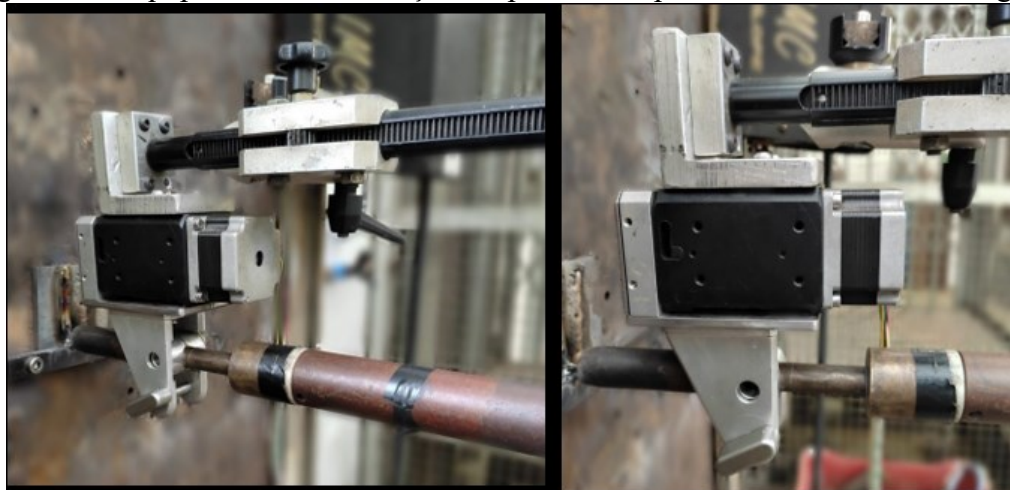
O sistema de oscilação senoidal foi utilizado para a realização de soldagens com frequência de oscilação que variam entre os valores de 0 e 30 Hz, com incremento de 0,1 Hz. Não é sabido se o equipamento funciona corretamente em todas os valores de frequência possíveis, porém para os valores almejados para esse trabalho que variaram entre 1,5 a 4,5 Hz, foi observado o bom funcionamento do mesmo. O equipamento é composto por duas partes, a primeira é o gabinete de controle eletrônico ilustrado na Figura 40 e a segunda é o sistema mecânico que integra o motor e a parte mecânica mostrado na Figura 41. O equipamento da Figura 40 é encarregado pelo ajuste de frequência para que ela se mantenha constante durante todo o processo de oscilação da tocha, executado com trajetória senoidal.

Figura 40 - Equipamento de controle do sistema de oscilação. Em (a) potenciômetro para regulagem de frequência, em (b) botão liga/desliga, em (c) botão de sentido do movimento e em (d) display de visualização da frequência



Fonte: Adaptado (Ferrari, 2020)

Figura 41 - Equipamento de oscilação acoplado ao suporte com a tocha de soldagem



O equipamento de oscilação possui a capacidade de transformação do movimento rotacional em movimentos lineares alternados por meio de componentes mecânicos, uma vez que, através de um parafuso acoplado ao módulo, que tem com função permitir o emprego de valores entre 0 e 25 mm de amplitude. O movimento senoidal, no sentido da soldagem e perpendicular à junta, é interpolado de forma que a trajetória da tocha se assemelha a uma onda senoidal por sobre a junta, que tem como característica de sua trajetória passar mais tempo na extremidade do cordão depositado do que no centro do mesmo.

3.3.7 Verificação do dispositivo de movimentação da tocha de soldagem.

A verificação do dispositivo de movimentação da tocha de soldagem foi realizada estabelecendo uma distância em centímetros que o Tartílope iria percorrer em 60 segundos, uma vez que a unidade de medida da velocidade de soldagem (V_s) se dá em cm/min. A distância determinada foi de 30 cm e duas velocidades de soldagem foram pré-determinadas para os testes: 30 cm/min e 60 cm/min, no sentido vertical de cima para baixo, seria o percurso do Tartílope. Foram medidos e marcados três pontos em linha reta vertical, cada um com a distância de 10 cm um do outro, para se garantir maior controle sobre a distância determinada.

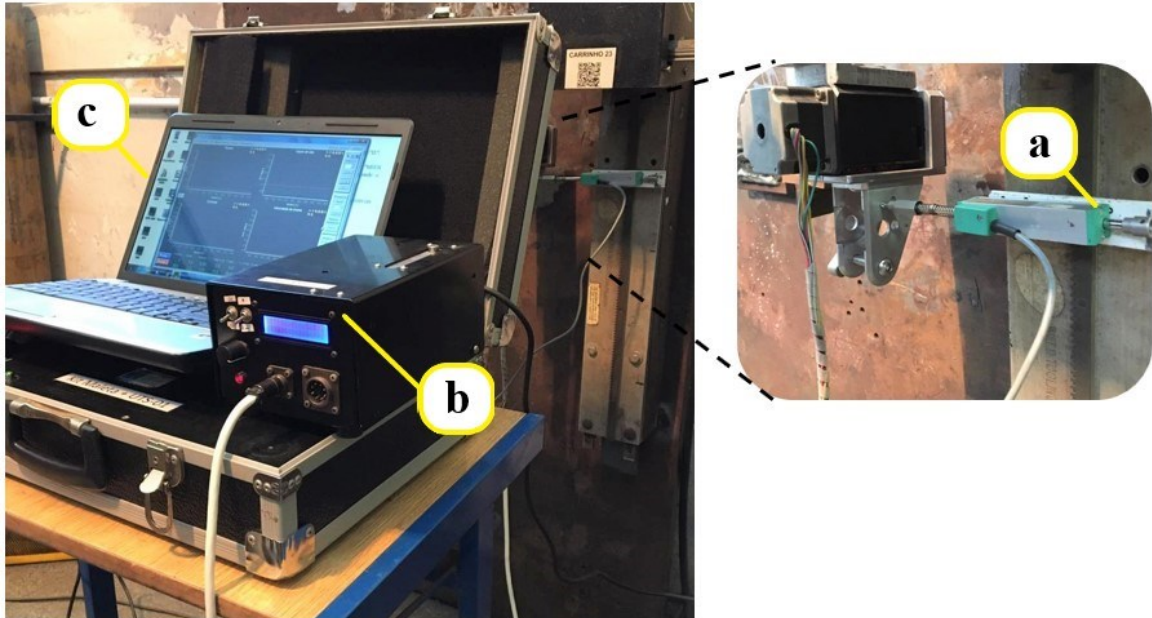
A cronometragem do tempo foi feita com aplicativo de tempo disponível no celular, sendo iniciado assim que o Tartílope era acionado para percorrer a distância estabelecida. Ao todo foram cinco medições para (30 cm/min) e cinco medições para (60 cm/min). A média para a primeira velocidade foi de 60,4 segundos e para a segunda velocidade de 120,33 segundos. Foi possível então afirmar que, mesmo com a presença dos possíveis erros de medição, pode-se considerar que o equipamento estava verificado e confiável para uso.

3.3.8 Verificação da frequência no dispositivo de oscilação

Para que fosse possível dar início aos testes de soldagem variando sua frequência, se fez necessário a averiguação do módulo de oscilação que seria utilizado. Uma vez que, para se ter a certeza de que a frequência escolhida no equipamento fosse de valor igual ao de seu módulo, gerando a oscilação da tocha de soldagem. A Figura 42, identifica os equipamentos que foram precisos, para executar tal função, que são: o medidor de deslocamento linear, o sistema de aquisição portátil (SAP) e o sistema de oscilação de tocha. Os limites mínimo e

máximo para a frequência foram de 1,5 até 4,5 Hz, valores estes que se encontram dentro da faixa escolhida para os testes que serão realizados no trabalho.

Figura 42 - Bancada de ensaios para realização das análises da frequência. (a) medidor de deslocamento linear, (b) sistema de oscilação da tocha e (c) SAP



Foi empregado um aumento no valor das medições de 0,5 Hz a cada teste e, em conjunto, os valores de amplitude também foram alterados, com 5, 10, 15, 20 mm, regulagem feita com paquímetro. O ponto de medição do deslocamento do módulo de oscilação, foi definido por ser no suporte da tocha, local no qual a tocha era fixada para a realização da soldagem. Este suporte, permitiu de forma muito eficiente devido a sua superfície plana, um excelente contato entre ele e o medidor de deslocamento linear, evitando assim possíveis erros nas medições.

O medidor foi fixado de forma bem segura, na bancada, local este que garantia que ele não sofresse movimentos indesejados, ou seja, mantendo sua estabilidade ao longo dos testes e garantindo que o medidor no momento que estivesse em repouso, sua haste de movimento, estivesse na posição neutra, sem nenhum alongamento ou pressão na mola que faz parte da execução do seu movimento. O medidor de deslocamento foi conectado ao Sistema de Aquisição Portátil (SAP) denominado como SAP V0. Se fez necessária a utilização do mesmo, porque somente esse equipamento possui um canal calibrado para utilização do medidor de deslocamento linear. O canal utilizado em questão é o da vazão de gás. É preciso de aproximadamente 5 segundos para que o módulo de oscilação entre em movimento no qual a

frequência selecionada esteja estabilizada, tempo esse de espera, proveniente da existência de uma rampa de aceleração no motor de passo, fazendo com que o módulo de oscilação entre em movimento na frequência desejada. Com o módulo já estabilizado e em movimento, deu início a aquisição através do SAP, com o tempo máximo de 30 segundos para todos os testes. Após esses testes, ficou bem entendido e se concluiu que a porcentagem de erro nos valores pré-estabelecidos e os reais são mínimos, o que garante que o módulo de oscilação está bem configurando e é possível confiar em seus valores.

3.3.9 Verificação da amplitude no dispositivo de oscilação

Os métodos realizados para as averiguações e ajustes adotados no tópico anterior para a frequência, foram igualmente adotados para o mesmo objetivo, porém com outra variável, a amplitude de oscilação. Valores estes para amplitude de 5, 10, 12, 15 e até 25 mm. Com o objetivo claro da análise de que com o aumento da frequência os valores de amplitudes também resultariam em algum acréscimo do valor em relação ao estabelecido. O Ajuste e determinação dessa variável, no qual o módulo transforma o movimento unidirecional rotacional em movimentos lineares alternados por meio de componentes mecânicos ocorre de maneira que o paquímetro é configurado com a metade do valor da amplitude, em seguida, a haste que mede a dimensão de profundidade do paquímetro é apoiada na lateral do módulo de oscilação e, com a ajuda de uma chave Allen o ajuste da amplitude é realizada (Figura 43).

Ao longo dos ensaios e testes realizados com os resultados obtidos com a averiguação do dispositivo, é possível analisar que a medida que se tem o aumento da frequência de oscilação o valor da amplitude também sofre esse aumento, o que acarreta ainda mais na importância de que os valores pré-estabelecidos selecionados, sejam correspondentes aos reais, uma vez que, a sobreposição dos cordões está atrelada diretamente ao sistema de oscilação. Porém, os valores reais obtidos, na grande maioria dos processos ficaram dentro da faixa limite de aceitação, o que acarretou na garantia do uso do equipamento, com confiabilidade de que os valores de amplitude estavam sendo coerentes para o processo aplicado.

Figura 43 - Representação do modo de regulagem da amplitude do oscilador



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados encontrados durante os procedimentos adotados neste trabalho. As análises realizadas tiveram como base inicial outros trabalhos já previamente concluídos, com a utilização de variantes do processo MIG/MAG como o modo convencional, pulsado e pulsado sinérgico, abordando os resultados acerca de características geométricas, metalográficas e químicas dos revestimentos.

4.1 PROCEDIMENTOS SEMIAUTOMÁTICOS COM ARAMES TUBULARES E309L, CAVITALLOY, STELLOY 6 E DUROLIT 21

Para os processos manuais os resultados obtidos serão apresentados a partir da primeira camada do revestimento semiautomático mostrado na Figura 44, atuando como camada de amanteigamento livre de defeitos superficiais, pode-se observar que ficou bastante uniforme, com baixa distância entre picos e vales. A altura de reforço da camada foi de aproximadamente 4,0 mm. Na Figura 45 é mostrada a camada de Cavitalloy depositada sobre o amanteigamento obtido com E309L. A altura de reforço da camada (medida a partir da superfície da camada de amanteigamento) foi de 4,5 a 5,0 mm.

Figura 44 - Primeira camada de amanteigamento com E309L



Figura 45 - Segunda camada de revestimento com Cavitalloy sobre a camada de amanteigamento



A Figura 46 apresenta a imagem macrográfica dos revestimentos realizados anteriormente, revelando revestimentos livres de defeitos de soldagem e com bom acabamento superficial, os valores de medições encontradas para a altura e diluição do revestimento foram de 6,61 mm e 25,2% para segunda camada, respectivamente.

Figura 46 - Macrografia do revestimento com duas camadas. (a) E309L e (b) Cavitalloy



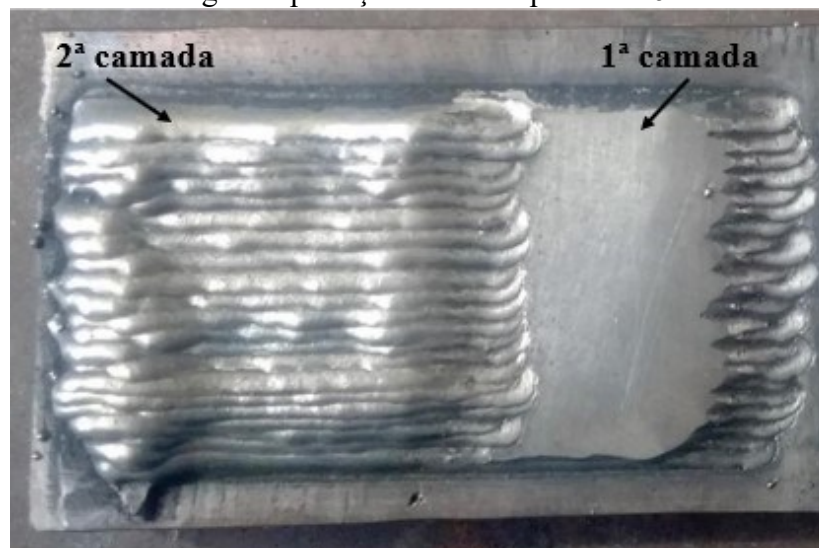
Com a finalização da avaliação dos corpos de prova com os arames citados anteriormente, a próxima etapa a ser adotada foi o ensaio com a liga Stelloy 6 (liga ER CCoCr

– A), porém com uma diferença em relação ao ensaio anterior, uma vez que, o processo de soldagem para esse arame ocorreu apenas no modo semiautomático. Com o Stelloy 6, como já foi dito, foram realizados testes com dois tipos de gases, provando que ambos são satisfatórios no que diz respeito à uniformidade. Foi notada uma pequena diferença a favor da mistura Ar + 2%O₂ (Figura 48) em relação ao processo com argônio puro (Figura 47), pois com ela foi possível obter melhor molhamento dos cordões, o que resultou em melhor regularidade da camada depositada.

Figura 47 - Revestimento de duas camadas com Stelloy 6 utilizando Argônio puro como gás de proteção sobre chapa de CA6NM



Figura 48 - Revestimento de duas camadas com Stelloy 6 utilizando Argônio + 2% de O₂ como gás de proteção sobre chapa de CA6NM



Para o revestimento utilizando somente o Argônio puro como gás de proteção a macrografia é identificada na Figura 49, os valores de altura e diluição do foram de 5,57 mm e

24% para segunda camada, já para o revestimento que teve como gás de proteção Argônio + O₂, que sua macrografia da seção transversal é mostrada na Figura 50, teve como valores 6,23 mm e 35,2% para segunda camada.

Figura 49 - Revestimento com duas camadas de Stelloy 6 (Argônio puro como gás de proteção). (a) 1ª camada e (b) 2ª camada

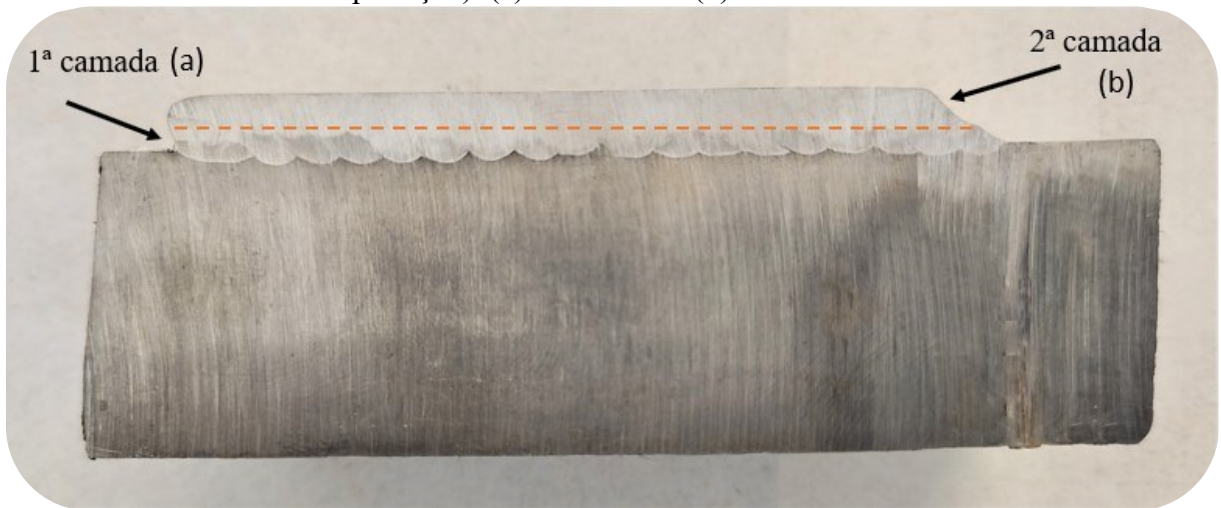
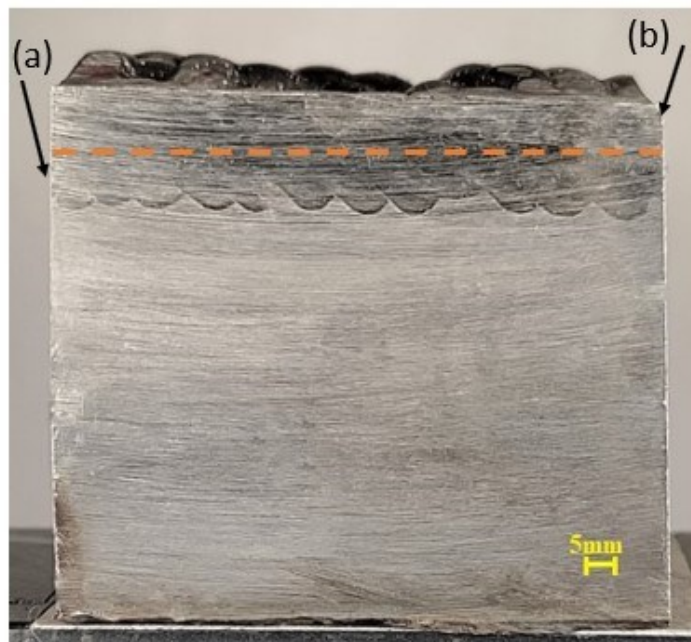


Figura 50 - Revestimento de duas camadas com Stelloy 6 (Argônio + O₂ como gás de proteção). (a) 1ª camada e (b) 2ª camada



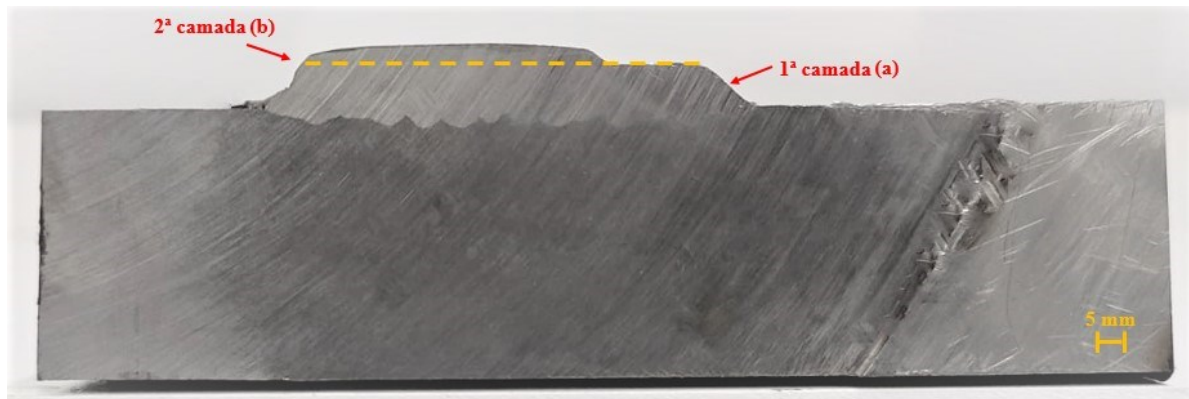
Para finalizar esta etapa com processos manuais, o ultimo arame utilizado foi o Durolit 21(a liga ER CCoCr-E), como ilustra a Figura 51, com resultado satisfatório livre de trincas.

Figura 51 - Revestimento com duas camadas de Durolit 21 sobre chapa de CA6NM



O revestimento com a liga Durolit 21, teve sua análise e os valores encontrados de acordo com a imagem da Figura 52, foram de 8,11 mm e 26% para segunda camada, para altura e diluição respectivamente.

Figura 52 - Revestimento de duas camadas com Durolit 21. (a) 1ª camada esmerilhada e (b) 2ª camada



4.2 PROCEDIMENTO MECANIZADO COM ARAMES TUBULARES E309LSI E CAVITALLOY

Após análise do processo realizado de forma semiautomático, o seguinte passo ficou para o processo mecanizado sem oscilação da tocha, utilizando o mesmo arame e procedimento. Como forma de análise do procedimento acima citado, a região escolhida para comparação de

altura e quantidade de material depositado foi a (4) da Figura 53. Essa região conta com a deposição de cordões com processo mecanizado (tártilope V2), com uma camada de revestimento de Cavitalloy sobre uma camada de amanteigamento de E309L, que fica mais evidenciada como mostrado na macrografia da Figura 54.

Figura 53 - Região do revestimento escolhida para análise

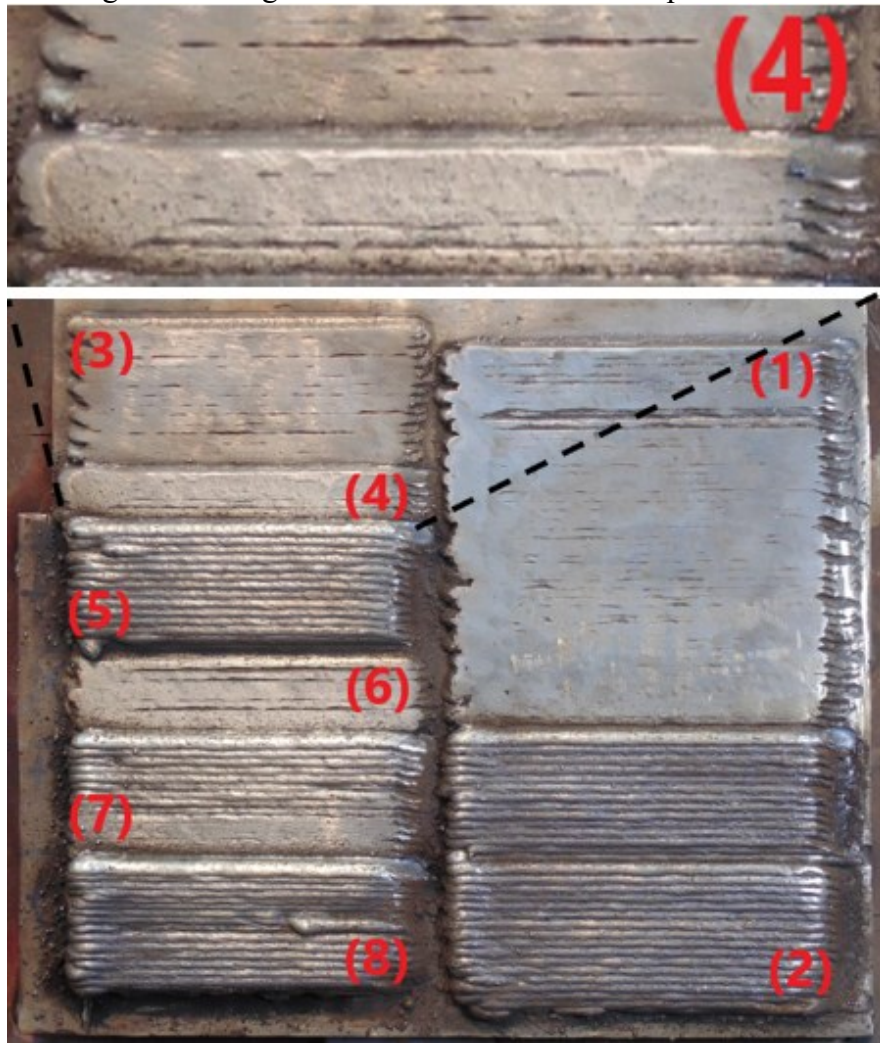
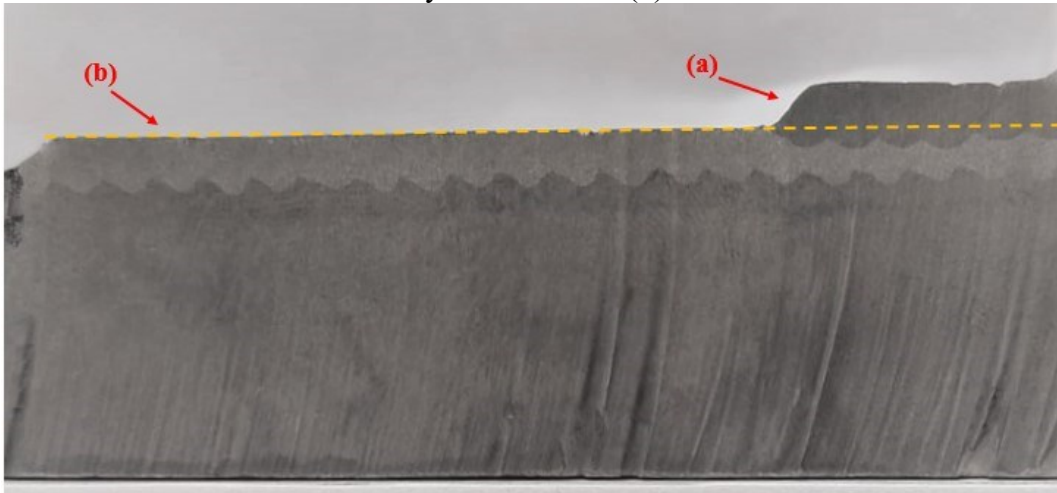


Figura 54 - Macografia do revestimento com uma camada de amanteigamento de (a) Cavitalloy sobre uma de (b) E309L

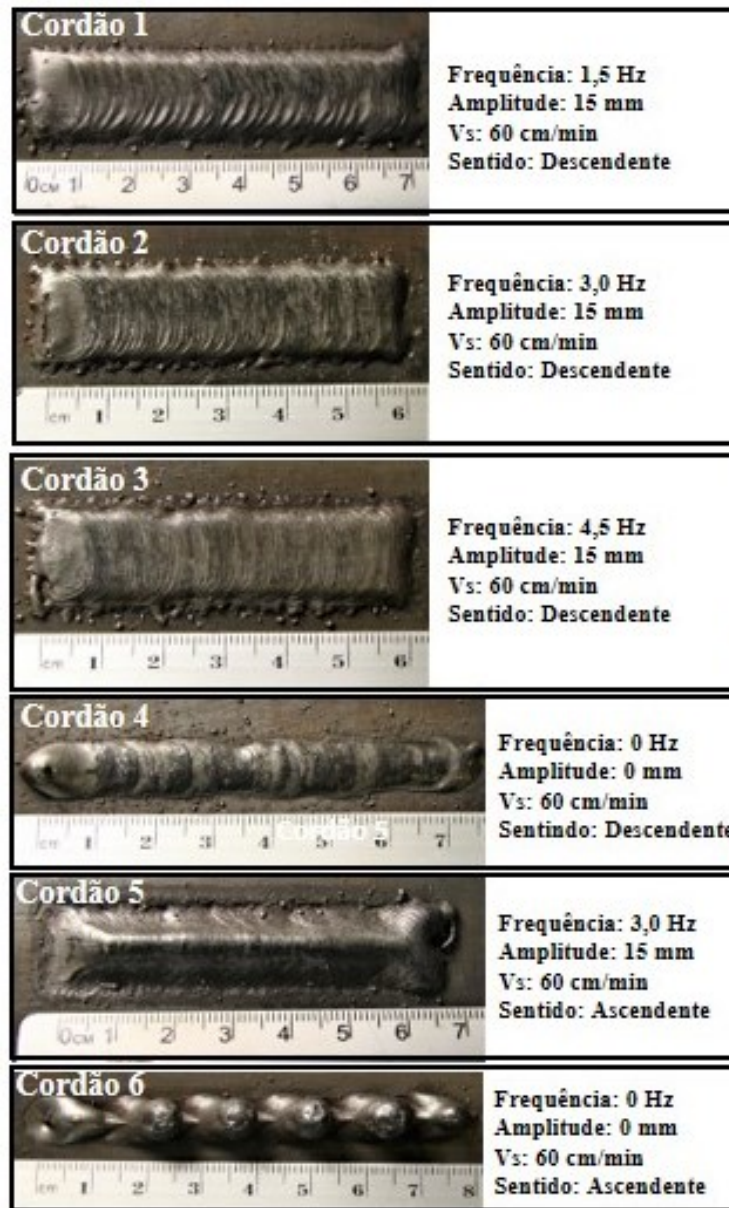


Para o revestimento com uma camada de amanteigamento de E309LSi e uma segunda camada de Cavitalloy depositada por cima, de forma mecanizada, os valores de altura e área total foram de 8,11 mm e 332 mm².

4.2.1 AVALIAÇÕES UTILIZANDO ARAME MACIÇO DE FORMA MECANIZADA COM PROCEDIMENTO DE ALTA PERFORMANCE

Os primeiros procedimentos analisados e seus resultados obtidos, foram demonstrados anteriormente, de forma semiautomática e mecanizada (tartilope), não sendo possível a oscilação em alta frequência, com o equipamento aqui utilizado para tal fim. Então neste capítulo, os resultados obtidos relatam sobre os primeiros procedimentos com o equipamento que permitiu promover a oscilação em alta frequência. A Figura 55, ilustra todos os cordões realizados com base em parâmetros retirados de trabalhos que já utilizaram arames maciços para mesma função, sendo possível a visualização das características superficiais de cada um deles.

Figura 55 - Cordões realizados com processo MIG/MAG pulsado sinérgico variando a frequência e amplitude de oscilação



Como foi dito anteriormente, esses testes visaram a análise da geometria dos cordões, e ao ver as imagens dos cordões 1, 2 e 3 nota-se, que foi possível a formação de cordões com bons aspectos superficiais, apresentando ainda pouca quantidade de respingos, além de não apresentarem descontinuidades e nenhum grau de concavidade no centro do cordão. Ao contrário do que se espera em uma soldagem de união onde se busca ter alta penetração, afim de assegurar a resistência da junta que fora soldada, a soldagem de revestimento tem como perfil geométrico desejado maiores larguras do cordão, baixas penetrações e que sejam baixos os percentuais de diluição.

Ao analisar os outros três cordões sendo eles 4, 5 e 6 ficou visível a diferença que há quando primeiramente se zeram os valores tanto de amplitude como de frequência do oscilador. Os cordões 4 e 5 não apresentaram descontinuidades e também baixo incidência de respingos, porém para o cordão 4, é notável que houve grande escorrimento do material depositado, onde pouca quantidade de material ficou no cordão, pelo fato de não ter sido aplicado tectimento com variação da amplitude e frequência no oscilador da tocha. O cordão 5, apesar de ser na ascendente, não houve grande escorrimento do material depositado, mas sim pode ser visto a formação de certa convexidade no centro do cordão, provavelmente caracterizado pelo sentido de movimentação da tocha que foi escolhido para esse cordão que com a oscilação da tocha, ao passar pelo centro do cordão depositou maior quantidade de material nesta região.

O cordão 6 ao contrário de todos os outros apresentou, descontinuidades, ao longo de toda sua superfície e que apesar de não ter sido efetuado a oscilação da tocha, tendo a frequência e amplitude zeradas, além do sentido de soldagem ser na ascendente, obteve um cordão de péssima qualidade.

A Figura 56 apresenta a macrografia de cada um desses cordões, com ênfase na penetração dos mesmos. Com os valores de penetração que foram medidos nos cordões realizados, percebe-se que os cordões 4, 5 e 6 tiveram valores bem maiores quando se comparados com os cordões 1, 2 e 3, uma vez que os cordões 4, 5 e 6 tiveram alteração tanto no sentido da soldagem, quanto na frequência e amplitude realizada pelo o oscilador. Os valores encontrados nos cordões já especificados anteriormente, fogem do que se é esperado na teoria em relação a utilização da soldagem por revestimento como foi citado no trabalho de Gomes *et al* (2011), levando em conta métodos de otimização do processo de soldagem realizados pelos mesmos, requer que os parâmetros do processo (velocidade de alimentação, tensão, velocidade de soldagem e DBCP) e respostas de interesse (penetração, diluição, largura do cordão, entre outras) sejam bem conhecidos, para que se possa chegar a resultados dentro do esperado, como os que eles chegaram com uma penetração $P = 0,87 \pm 0,22\text{mm}$, os valores de penetração serão mostrados na Tabela 17.

Figura 56 - Macrografia dos cordões realizados com pulsado sinérgico variando a frequência e amplitude de oscilação

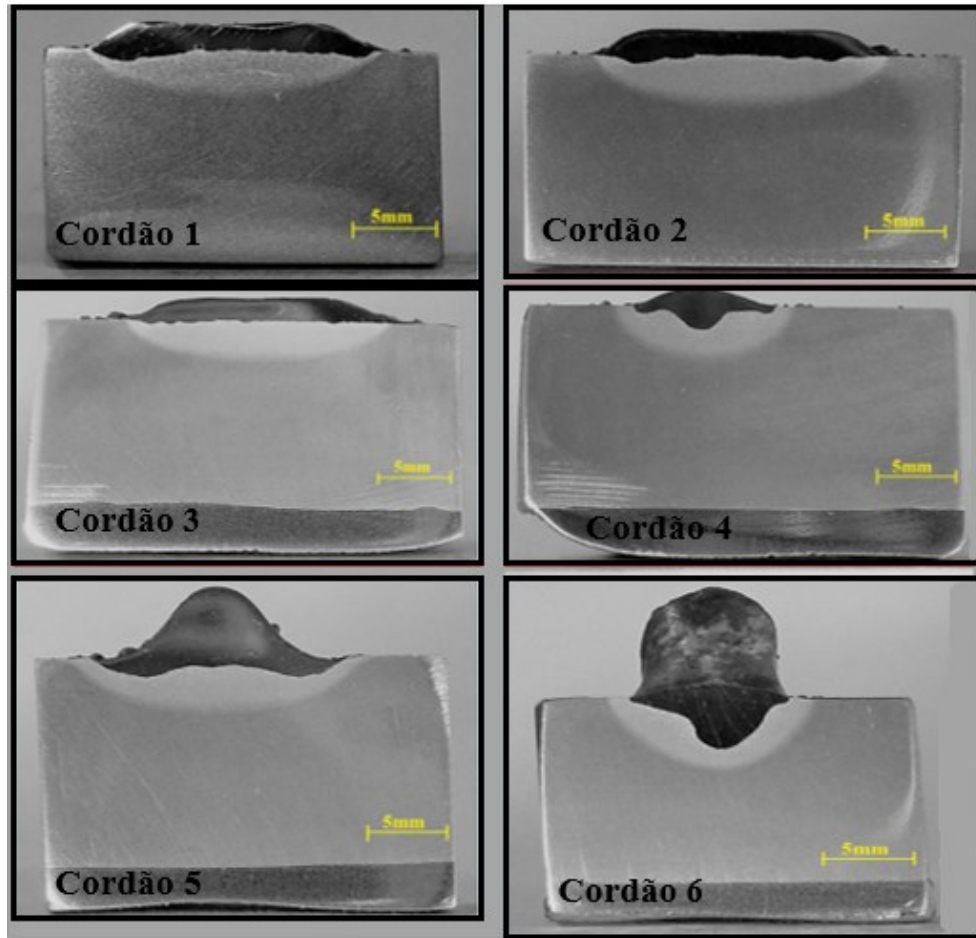


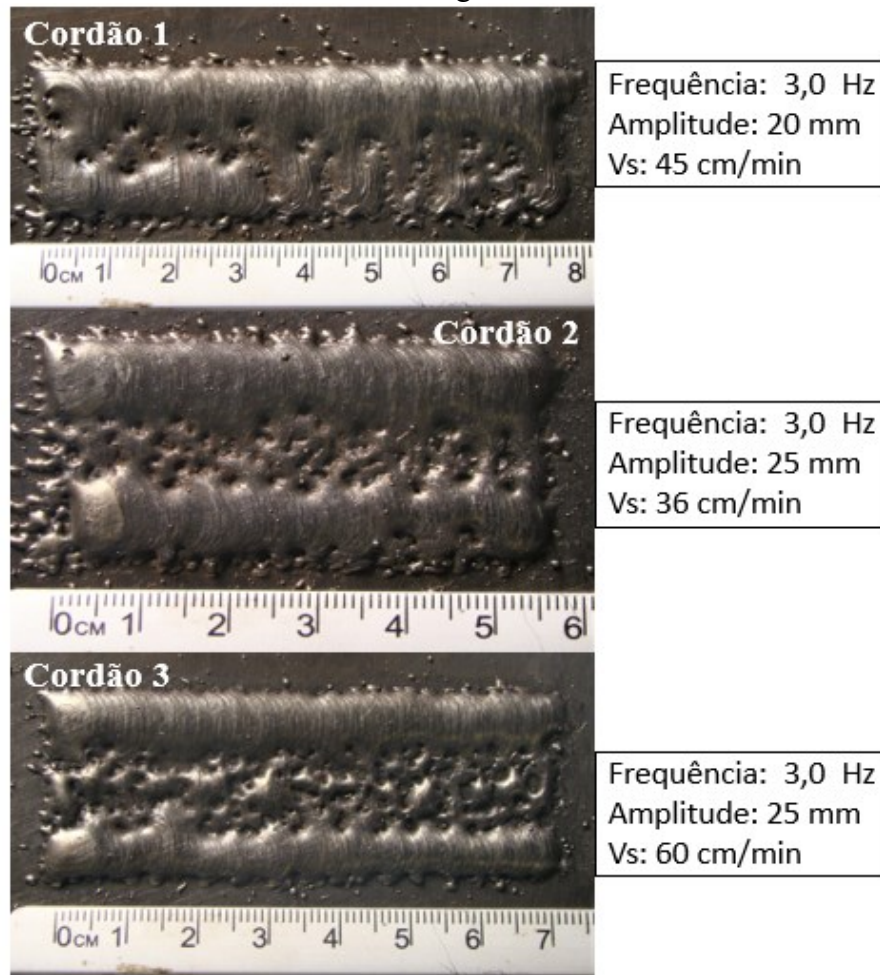
Tabela 17 - Valores de penetração dos cordões

Cordão	Penetração (mm)
1	0,76
2	0,58
3	0,29
4	1,61
5	1,20
6	3,66

Entendendo que haveria um limite máximo para a amplitude de oscilação, foi proposto a realização destes ensaios para avaliação tanto da formação, quanto da qualidade superficial do cordão com amplitudes tão altas, no caso, o valor máximo possível para o oscilador projetado pelo LABSOLDA. Os cordões serão identificados e apresentados na Figura 57, podendo ser

visivelmente percebido suas características superficiais, com grande quantidade de descontinuidades.

Figura 57 - Aspecto superficial dos cordões variando amplitude de oscilação e velocidade de soldagem



O motivo de tais características provavelmente foi movimento senoidal do tecimento proveniente da oscilação da tocha que permanece maior tempo na extremidade do cordão do que no centro do mesmo, isso de um modo geral para os três cordões. Ao se analisar, um por um fica nítido a diferença entre os três e que quanto maior a velocidade de soldagem (V_s) e amplitude, mais evidente é a característica de formação de descontinuidades ao centro do cordão, pelo motivo que a passagem da tocha pelo centro ser mais rápida e depositando praticamente quase nenhum material neste local, o que é visto no cordão 3.

4.3 PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTO MIG/MAG MECANIZADA UTILIZANDO ARAMES TUBULARES COM OSCILAÇÃO DA TOCHA

4.3.1 REVESTIMENTO COM E309L UTILIZANDO CO₂ COMO GÁS DE PROTEÇÃO

Ao longo do trabalho foram executados diversos ensaios, com a modificação constante de vários parâmetros, tendo a finalidade de se encontrar entre eles, os que poderiam garantir um cordão de solda com boa característica geométrica, livre principalmente de descontinuidades. Levando em conta o motivo de se evitar descontinuidades, o gás CO₂ obteve bons resultados, utilizando o arame tubular E309L para a soldagem de revestimento que será mostrada a seguir na Figura 58.

Figura 58 - Revestimento utilizando CO₂ como gás de proteção



Se for levado em conta a característica superficial do cordão, é possível perceber que não ocorreu defeito de descontinuidade no revestimento. Porém, há a necessidade de se fazer

uma análise mais detalhada do cordão em si, podendo ser avaliados os aspectos micro e macroscópicos do mesmo. Para conseguir chegar aos melhores parâmetros do revestimento realizado e demonstrado anteriormente, testes preliminares foram feitos e, o cordão base que garantiu principalmente melhor qualidade superficial, foi escolhido, é válido salientar que os parâmetros do cordão escolhido de forma isolado, foram os mesmos usados para fazer o revestimento.

Após a escolha do cordão 1 (Figura 59) como base para mensurar e calcular as dimensões, encontrando os valores de penetração (P) e diluição (D) do mesmo, sendo assim os valores respectivos para cada um foi 1,08 mm e 36,2%. Para o cálculo dos valores tanto da penetração quanto para diluição se utilizou o mesmo método que Gomes *et.al* (2011). Os valores da diluição foram calculados mediante a equação (4).

A Figura 60, identifica a amostra na qual foi realizado o corte transversal feito nos cordões de solda, já com suas dimensões mensuradas. Os valores de penetração (P) e diluição geométrica (D) quando mensurados e calculados no revestimento como um todo, foram respectivamente 1,88 mm e 53,9%.

Figura 59 - Cordão escolhido como parâmetro base para o revestimento (cordão 1)

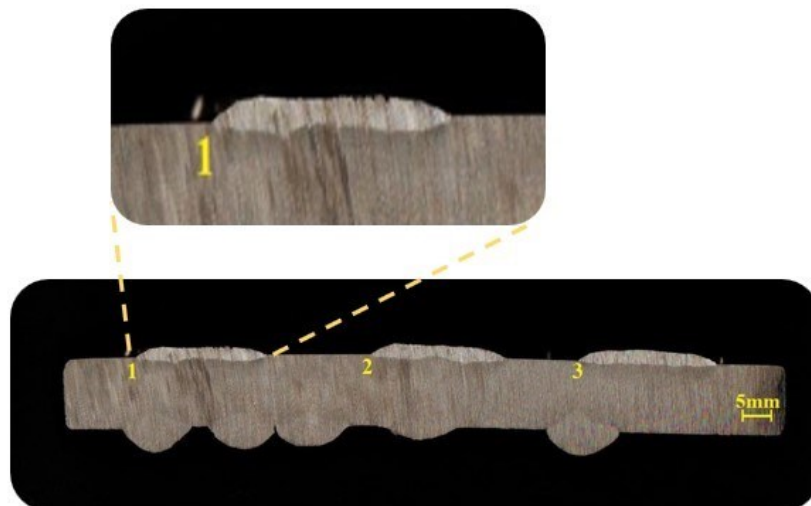
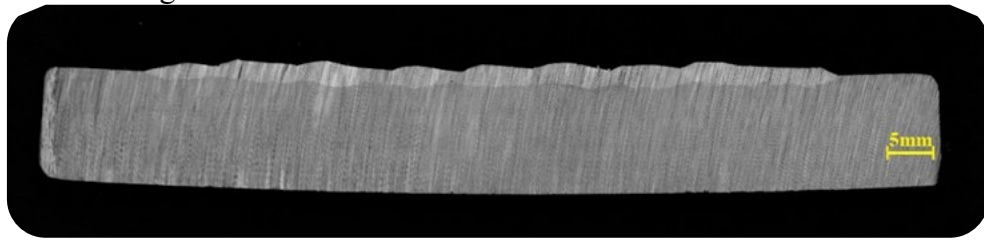


Figura 60 - Corte transversal na amostra do revestimento



4.3.2 REVESTIMENTO COM CAVITALLOY

Os revestimentos realizados com a liga Cavitalloy serão aqui bem detalhados e demonstrados. Primeiramente, os cordões com diferentes parâmetros e processos são mostrados na Figura 61.

Figura 61 - Cordões (chapa A) realizados com Cavitalloy; 1 e 2 – Convencional, 3 e 4 – Pulsado Sinérgico



É perceptível que os cordões de uma certa maneira, apresentaram bom acabamento superficial, sendo que apenas os cordões 3 e 4 tiveram a presença de algumas descontinuidades. Já os cordões 1 e 2, não apresentaram tal defeito de descontinuidade, feitos com processo MIG/MAG convencional, um dos motivos da escolha de tal processo foi para conseguir avaliar

a possibilidade da soldagem com o arame Cavitalloy com controle de tensão. Foi observado que sim, era possível e que tais cordões apresentaram o que pode-se considerar bons resultados.

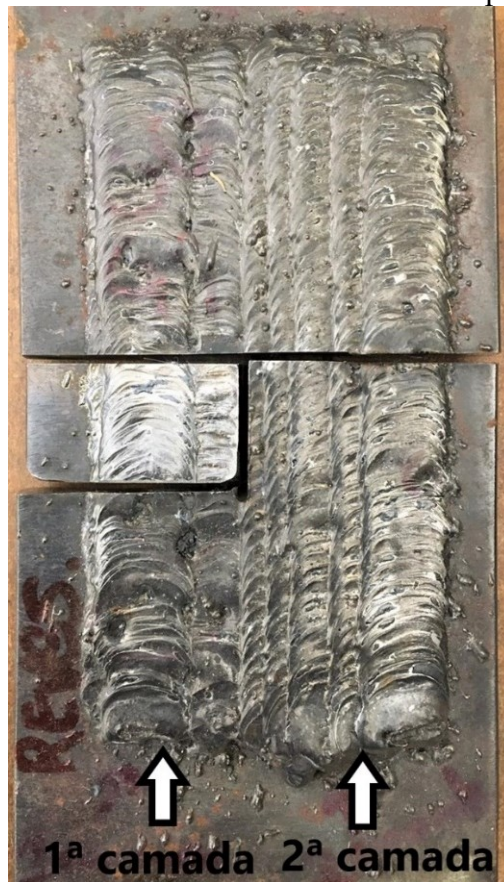
O processo convencional foi escolhido por ter gerados cordões dentro dos padrões geométricos desejados e não apresentar defeitos. A Figura 62 mostra a imagem dos cordões, o cordão escolhido como base para a realização do revestimento foi o de número 3, por apresentar melhor acabamento superficial e menor espessura, características bem desejadas para se efetuar o revestimento. E a partir dessa escolha, deu-se início na próxima etapa dos testes.

Figura 62 - Cordões (chapa B) realizados com Cavitalloy



Com a definição do cordão padrão, o revestimento foi efetuado com os mesmos parâmetros do mesmo e pode ser visto na Figura 63. É possível perceber que os resultados obtidos com o cordão de forma isolada não se repetiram para o revestimento, na primeira camada de revestimento ocorreu em sua grande maioria descontinuidades dos cordões e isso se reflete também na segunda camada, é uma consequência, já que ao se sobrepor os cordões defeituosos da primeira camada, a deposição naquela área também fica prejudicada.

Figura 63 - Revestimento com 1 camada e 1/2 na chapa de aço carbono



Para o procedimento na chapa de CA6NM, os cordões realizados na segunda camada apresentaram melhor acabamento superficial, com baixo índice de descontinuidades na superfície dos mesmos (Figura 64). Quando comparados com a primeira camada, é plausível inferir que a espessura do metal de base influencia em tal fator, uma vez que a chapa de CA6NM, não esquenta da mesma maneira e sofre os efeitos como a chapa de aço carbono e isso possa ter sido fundamental para melhor acabamento e menor índice de defeitos no revestimento com a chapa de CA6NM.

Figura 64 - Revestimento com 1 camada e 1/2 na chapa de CA6NM



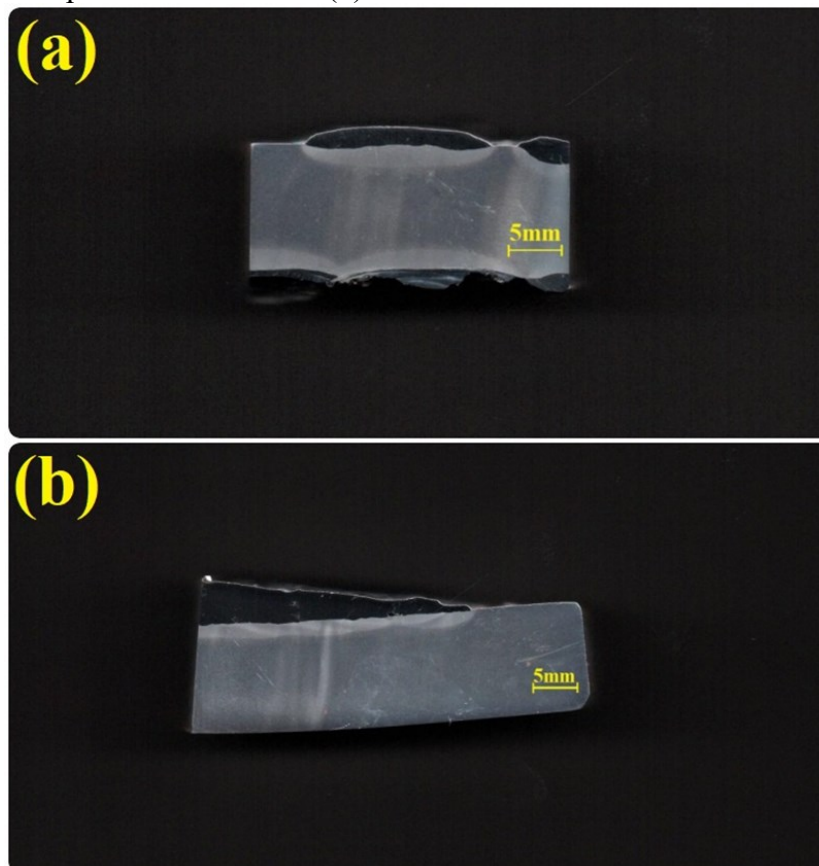
Após a finalização das duas camadas de revestimento e a realização do ensaio de líquido penetrante como mostra Figura 65, foi possível perceber que não houve o aparecimento de trincas à frio na superfície do revestimento.

Figura 65 - Ensaio de líquido penetrantes para averiguação do aparecimento de trincas



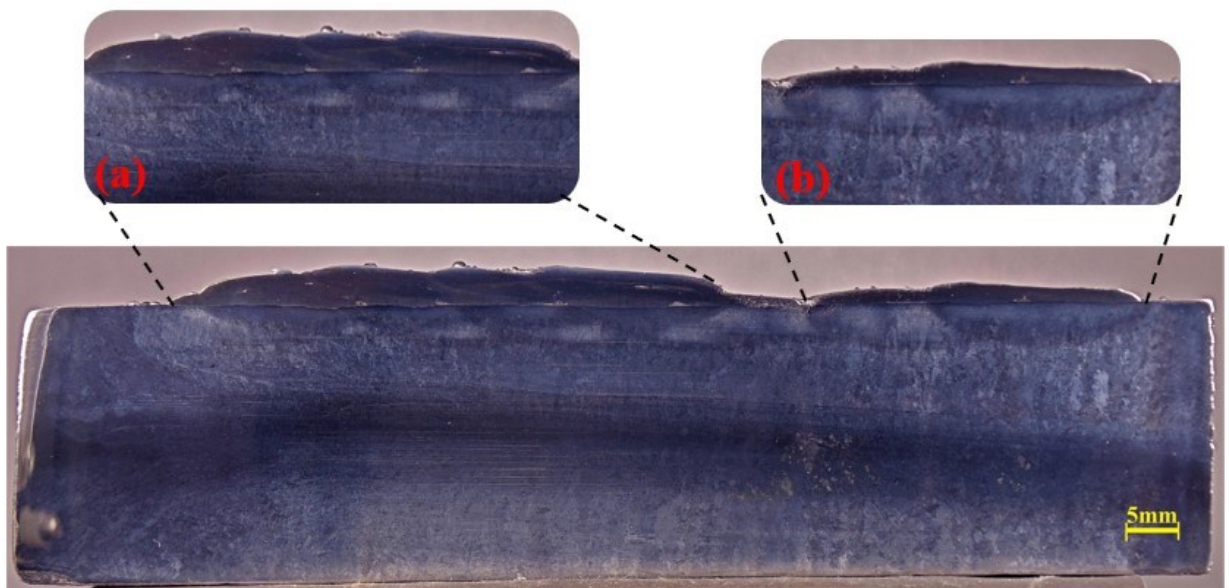
Uma outra análise necessária se faz através de ensaios metalográficos, de modo que pequenos pedaços dos corpos de provas soldados mostrados anteriormente foram retirados. Uma amostra do cordão realizado de forma única, dos revestimentos feitos na chapa de aço carbono e de CA6NM. Os resultados dessas análises serão mostrados na Figura 66. Após a finalização de tais ensaios, foi calculado a diluição desses cordões e avaliado os valores de cada. Para o cordão da imagem (a) a diluição e penetração calculada foram de 19,7 % e 0,584 mm, já para os cordões de revestimento da imagem (b) de 13,5 % e 0,518 mm. Os baixos valores de diluição e penetração já eram esperados, sendo mostrado por Carvalho (2015) que a aplicação de uma alta frequência na oscilação da tocha controla a poça de fusão e torna mais suave o ciclo térmico de soldagem, e aumenta a área devido à realização de cordões mais largos com o auxílio do tecimento nesse caso, longitudinal, contribui positivamente com a distribuição de calor, resultando em menor penetração, diluição e reforço, sendo essas as características já citadas anteriormente desejáveis para o processo de revestimento.

Figura 66 - Cordões que passaram pelos ensaios metalográficos: (a) cordão único referencial para o revestimento (b) cordões feito com revestimento



As características provenientes dos cordões, tanto o cordão único quanto o revestimento realizado, ambos em chapa de aço carbono, foram encontradas para o revestimento na chapa de CA6NM. Os valores encontrados para a diluição e penetração desse revestimento que conta com uma camada e meia de material depositado, foram baixos, bem semelhantes aos dois anteriores, com a diluição sendo menor ainda. Encontrou-se valores de 7,85% para diluição geométrica do revestimento e 0,629 mm de penetração. A Figura 67 mostra macrografia do revestimento em questão, sendo possível observar que houve revestimento de uma camada em (a) e duas camadas em (b) e que a análise principal que será averiguada, onde foi medido apenas o revestimento com duas camadas de Cavitalloy, uma vez que os outros corpos de provas revestidos com Stelloy 6 e Durotil 21, foram realizados com a mesma quantidade de camadas.

Figura 67 - Macrografia do revestimento com Cavitalloy na chapa de CA6NM. (a) duas camadas, (b) uma camada



4.3.3 REVESTIMENTO COM STELLOY 6

Na Figura 68 é possível observar que a imagem 1 apresenta cordões com péssima qualidade superficial, com grande quantidade de descontinuidade. Na imagem 2, teve uma progressão na qualidade superficial dos cordões, e ocorreu o aparecimento de descontinuidades no cordão 1, porém os cordões 2 e 3, começaram a apresentar características superficiais próximas ao esperado, assim ao começar os cordões identificados na imagem 3, foram tomados

como referências os problemas evidenciados nos primeiros cordões. Os cordões da imagem 3 ficaram todos com boa característica superficial e sem a presença de discontinuidades, e qualquer um dos três poderia ser escolhido como padrão para o revestimento. Porém mais uma etapa de teste foi feita e nela se escolheu o cordão padrão. Esse cordão está indicado com a seta, mostrado na Figura 69.

Figura 68 - Sequência da parametrização dos cordões de solda realizados com Stelloy 6 (Imagem 1, imagem 2 e imagem 3)



Figura 69 - Cordão padrão utilizando Stelloy 6 (seta amarela)



A Figura 70 apresenta a chapa de aço carbono com a primeira camada de revestimento e a também a chapa com a segunda camada. Tanto no primeiro quanto no segundo corpo de prova (material base) no segundo e terceiro cordão no sentido direita para esquerda, houve a presença de descontinuidades em grande quantidade o que provavelmente se deve a sobreposição da segunda camada sobre a primeira camada (afetada pela temperatura do substrato). É válido ressaltar, que não houve o aparecimento de trincas, problema esse que vinha sendo comum em ensaios realizados de forma semiautomática em chapas de CA6NM após a realização de duas camadas de revestimento. É possível dizer que, pela espessura da chapa de aço carbono, com sua menor espessura resultou em menores taxas de resfriamento e menor restrição da solda, a Figura 71 ilustra o que foi dito anteriormente.

Figura 70 - Corpos de provas com uma camada de revestimento de Stelloy 6 (imagem 1) e duas camadas de revestimento (imagem 2)

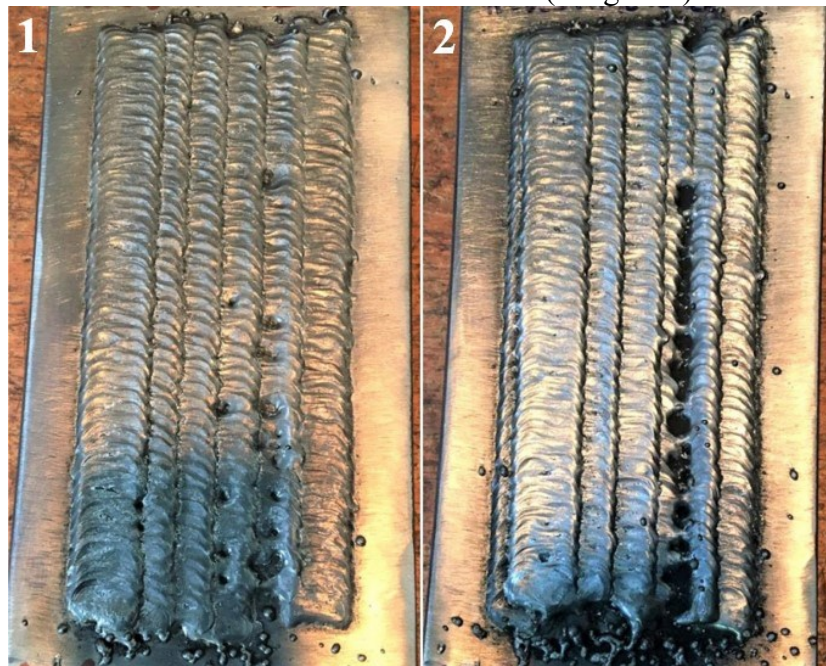


Figura 71 - Trabalho realizado pela chapa de aço carbono



O não aparecimento de trincas como dito, foi comprovado após a realização do ensaio não destrutivo de líquido penetrante (LP) sobre o revestimento na chapa de aço carbono, que será mostrado na Figura 72. Porém após a soldagem realizada nessa chapa com menor espessura de aço carbono, o objetivo para a próxima etapa seria de se fazer a soldagem em uma chapa com maior espessura (aproximadamente 30mm) e a chapa em questão foi a de CA6NM, repetindo o processo já realizado de forma semiautomática, porém agora, de forma mecanizada e com oscilador de alta frequência, para avaliar o aparecimento ou não de trincas nos cordões de solda e de descontinuidades. Na Figura 73 será apresentada a soldagem de revestimento feita sobre essa chapa de CA6NM, com duas camadas de revestimento utilizando também o Stelloy 6.

Figura 72 - Ensaio de líquido penetrante sobre o revestimento na chapa de aço carbono com Stelloy 6

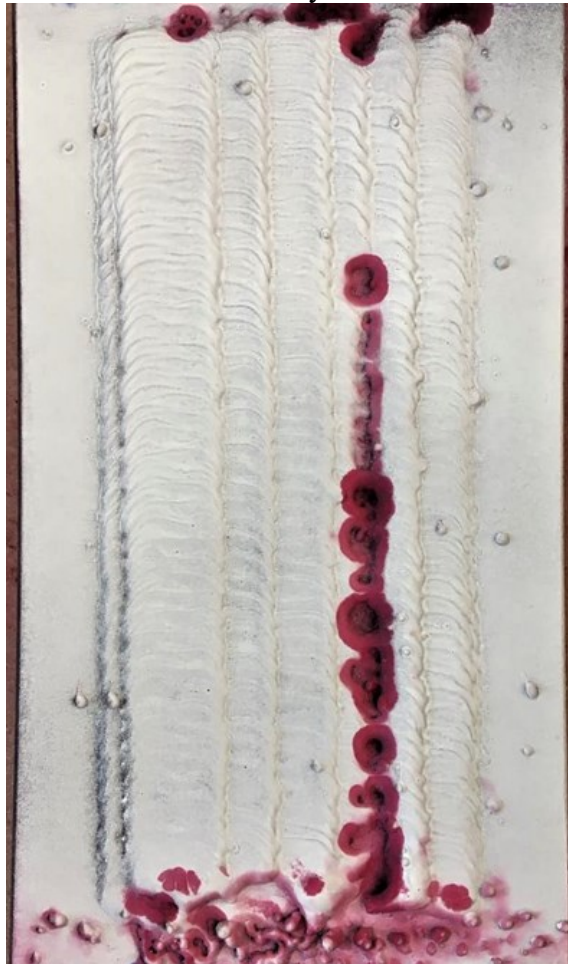


Figura 73 - Duas camadas de revestimento com Stelloy 6 sob a chapa de CA6NM

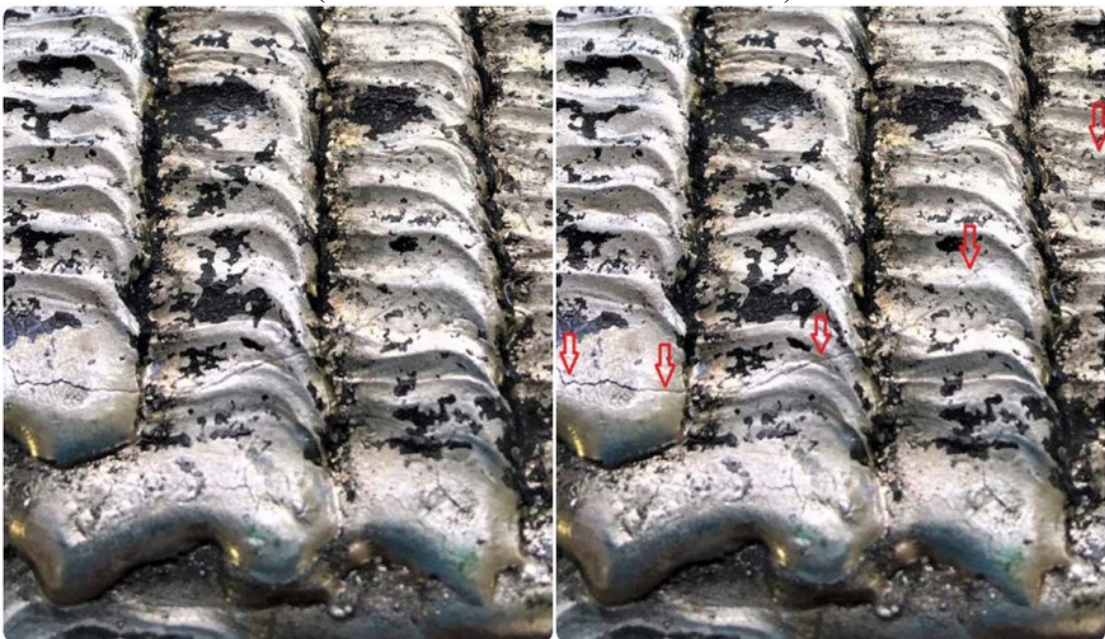


Ao se realizar uma inspeção visual da superfície da camada não foi detectado o aparecimento tanto de trinca quanto de descontinuidade. Porém, o problema que estava sendo recorrente ao se realizar a soldagem de forma semiautomática com o mesmo material de adição e o mesmo material de base, voltou a ocorrer, o aparecimento de trincas, e ao que tudo indica, é uma trinca à frio que será melhor identificada na Figura 74, novamente com a realização do ensaio de líquido penetrante (LP). A trinca se iniciou no final do último cordão no sentido direita para esquerda da segunda camada de revestimento e teve fim no quarto cordão com mesmo sentido. Ao contrário da chapa de aço carbono, a chapa de CA6NM com sua maior espessura tem um esfriamento mais rápido, podendo ser um dos motivos do aparecimento da trinca. A Figura 75 apresenta a trinca com imagem aproximada e a identifica.

Figura 74 - Ensaio de liquido penetrante sob o revestimento na chapa de CA6NM com Stelloy 6



Figura 75 - Trinca na segunda camada do revestimento de Stelloy 6 sob a chapa de CA6NM (identificada com as setas vermelhas)



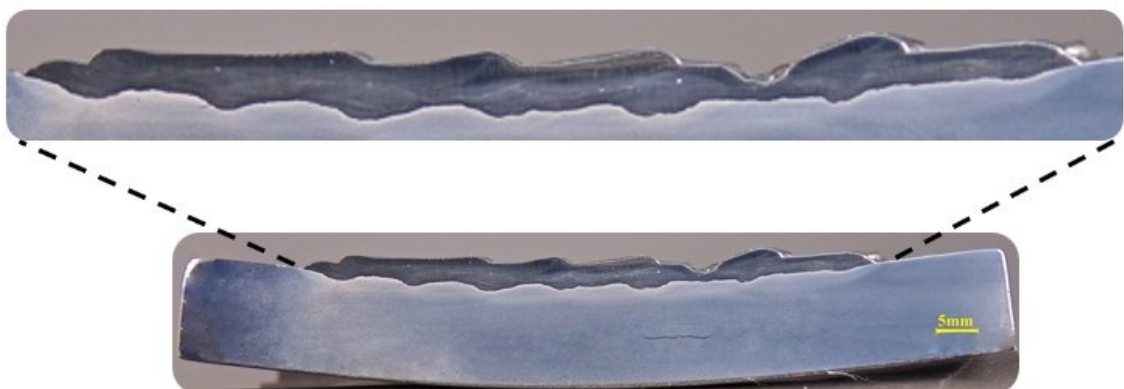
A Figura 76 demonstra a macrografia do cordão único efetuado e escolhido como padrão, livre defeitos como falta de fusão, poros, descontinuidades. Os valores calculados para diluição e penetração para o mesmo foram os seguintes: 30,2% e 0,740 mm respectivamente. Para o revestimento da chapa de aço carbono, como mostra a Figura 77, os valores de diluição e penetração foram de 38,27% e 3,10 mm.

Para as duas figuras já relatadas anteriormente (Figura 67) e também para a Figura 78, é importante salientar que as manchas e riscos foram provenientes do corte efetuado pela cortadora metalográfica, sendo que principalmente na Figura 78, onde a ocorrência dos defeitos causados pelo corte foram mais abrangentes, provavelmente por ter sofrido certo revenimento ou austenitização, devido a temperatura que se obteve durante o corte.

Figura 76 - Cordão único realizado de Stelloy 6 em chapa de aço carbono



Figura 77 - Macrografia do revestimento com Stelloy 6 na chapa de aço carbono



Tal problema não ocasionou influência sobre os objetivos do trabalho de identificar e calcular os valores de diluição e penetração. Assim, continuando com a mesma linha de

raciocínio anterior, os valores encontrados para diluição e penetração para o revestimento efetuado com duas camadas na chapa de CA6NM (Figura 78), foram de 21,9% e 1,02 mm.

Figura 78 - Macrografia do revestimento com Stelloy 6 na chapa de CA6NM

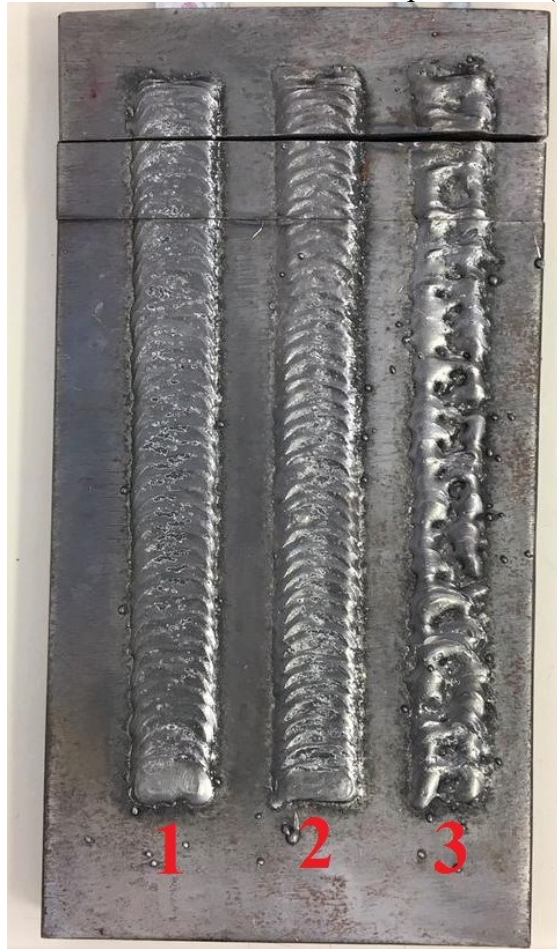


4.3.4 REVESTIMENTO COM DUROLIT 21

A liga ER CCoCr-E, denominada por seu fabricante como Duroлит 21, que será utilizada nesse capítulo para a soldagem de revestimento, é uma liga de menor teor de carbono, e que emprega molibdênio ao invés de tungstênio para endurecer por solução sólida. O motivo do uso dessa liga é referente ao fato, de testar a eficiência da mesma em conferir resistência a meios corrosivos, sendo que o molibdênio presente e o fato de maior parte do cromo estar em solução, sendo afirmado na literatura que essa liga tem maior resistência à corrosão quando se comparada com o Stelloy 6.

O procedimento efetuado primeiramente para este arame teve o resultado como pode se perceber na Figura 79, com cordões únicos, no qual o escolhido foi o de número 2, por demonstrar menor espessura e largura considerada mais adequada para o revestimento. Com o resultado obtido, anteriormente falado, se efetuou o revestimento com duas camadas. A primeira camada ficou isenta de descontinuidades, porém, a segunda houve novamente esse tipo de problema, identificados na Figura 80. O sentido da soldagem partiu da direita para esquerda em ambas camadas.

Figura 79 - Cordão único de Durolit 21 escolhido como parâmetro (cordão 2) em aço carbono



Na Figura 81 é possível observar o revestimento de duas camadas, entretanto, com oito cordões em cada camada sobre a chapa de CA6NM. Ao contrário do esperado, mais uma vez a ocorrência de descontinuidades foi em grande quantidade, o que fez, principalmente, na segunda camada de revestimento ter um péssimo acabamento superficial dos cordões. O mais interessante de se observar é que, o primeiro e último cordão, no sentido utilizado da direita para a esquerda, obtiveram uma boa qualidade superficial, livre praticamente como um todo dessa descontinuidade, essa falta de material depositado para realização do cordão, o que poderia garantir, se assim fosse o procedimento, um revestimento dentro dos resultados esperados.

Figura 80 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 15 mm em aço carbono



Figura 81 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 15 mm em CA6NM



Com o resultado conseguido alterando a amplitude de oscilação, ocorrendo a diminuição desse valor e, ficando evidente que, estava sendo uma das principais causas da ocorrência da falta de continuidade nos cordões (revestimento), mais um teste foi feito, seguindo a mesma sequência adotada para os outros arames, alterando o material de base para a chapa de CA6NM. O corpo de prova identificado na Figura 82, mostra que o mesmo problema inicial que vinha sendo constante, no caso as discontinuidades, no primeiro momento não ocorreu, é que na imagem os cordões apresentaram pequenos poros, podendo atribuir esses defeitos pela contaminação do metal de solda, que estão presentes ao longo de sua superfície, que não sejam confundidos com respingos.

A Figura 83 demonstra o revestimento, também, com duas camadas, utilizando dos mesmos parâmetros e com 12 mm de amplitude de oscilação. A primeira camada contém seis cordões e a segunda camada, que foi realizada mais ao centro da primeira camada, contendo quatro cordões. O resultado encontrado e conseguido foi dentro do esperado, principalmente o

acabamento superficial dos cordões que compõe o revestimento, e ao contrário do que se obteve com o Stelloy 6, a ocorrência de trincas a frio, nesse revestimento com o Durolit 21, não houve nem descontinuidades, tampouco trincas.

Figura 82 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 12 mm

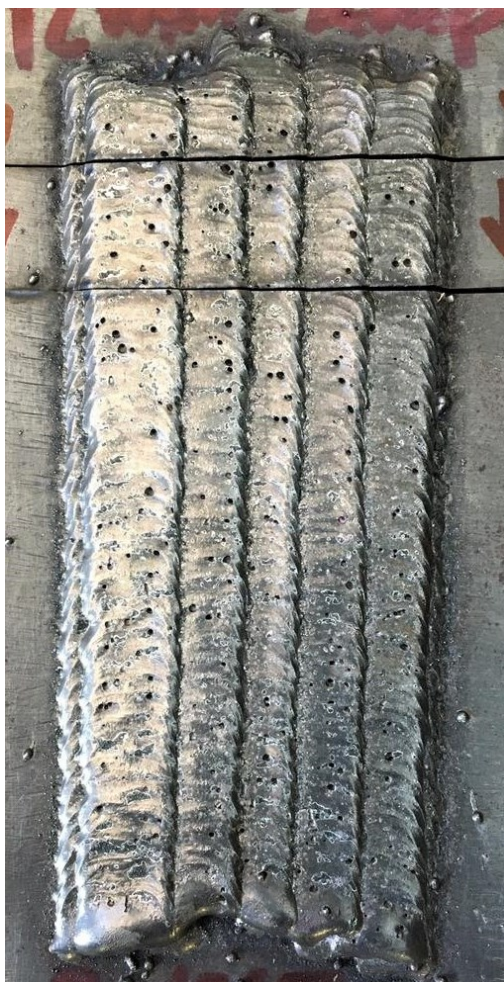


Figura 83 - Revestimento com Durolit 21 de duas camadas com amplitude de oscilação de 12 mm em CA6NM



A sequência dos resultados se decorreu através da realização de ensaios de líquidos penetrantes, como fora adotado nos tópicos anteriores, sendo assim, para os revestimentos com 15 e 12 mm, tanto para as chapas de aço carbono quanto para as chapas de CA6NM. É possível identificar o ensaio para as amplitudes de 15 mm, na Figura 84. Para a amplitude de oscilação de 12 mm, a Figura 85 apresenta o ensaio realizado, é perceptível que para a chapa de aço carbono (c), a superfície dos cordões não ocorreu descontinuidades, porém apresentou grande incidência de poros, já a superfícies dos cordões no revestimento da chapa de CA6NM, não sofreu com descontinuidades e a presença dos poros foi em pequena quantidade, não sendo relevante para caracterizar algum tipo de problema.

Figura 84 - Ensaio de líquidos penetrantes com 15 mm de amplitude de oscilação (a) chapa de aço carbono, (b) chapa de CA6NM para Durolit 21

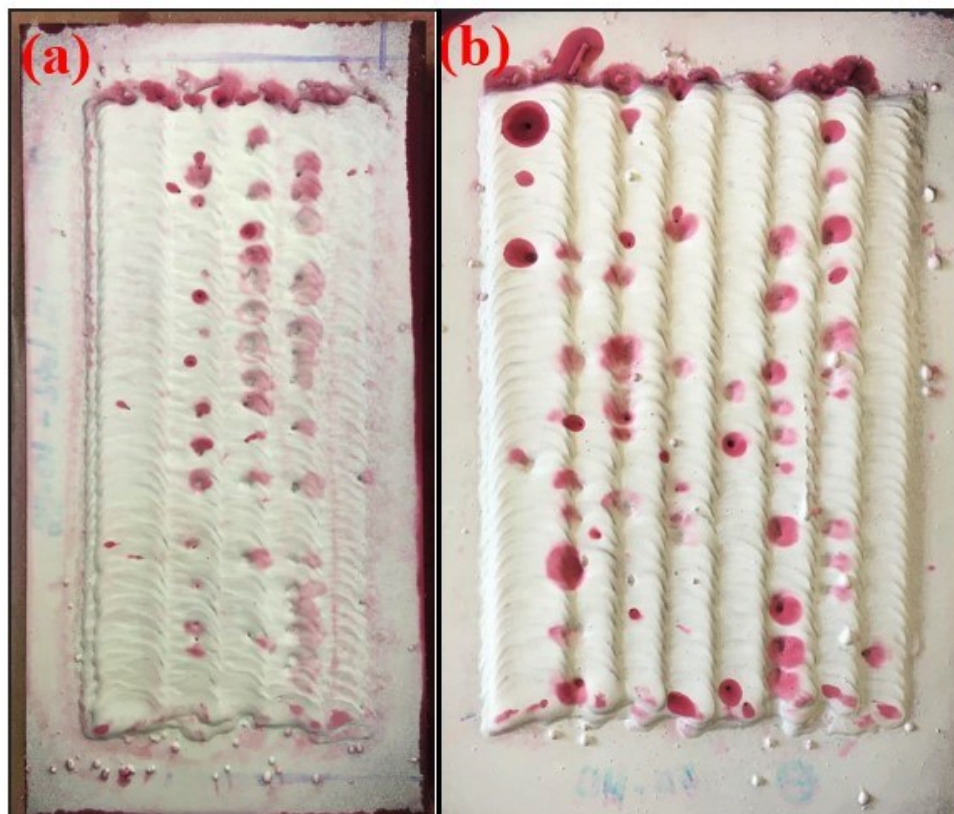
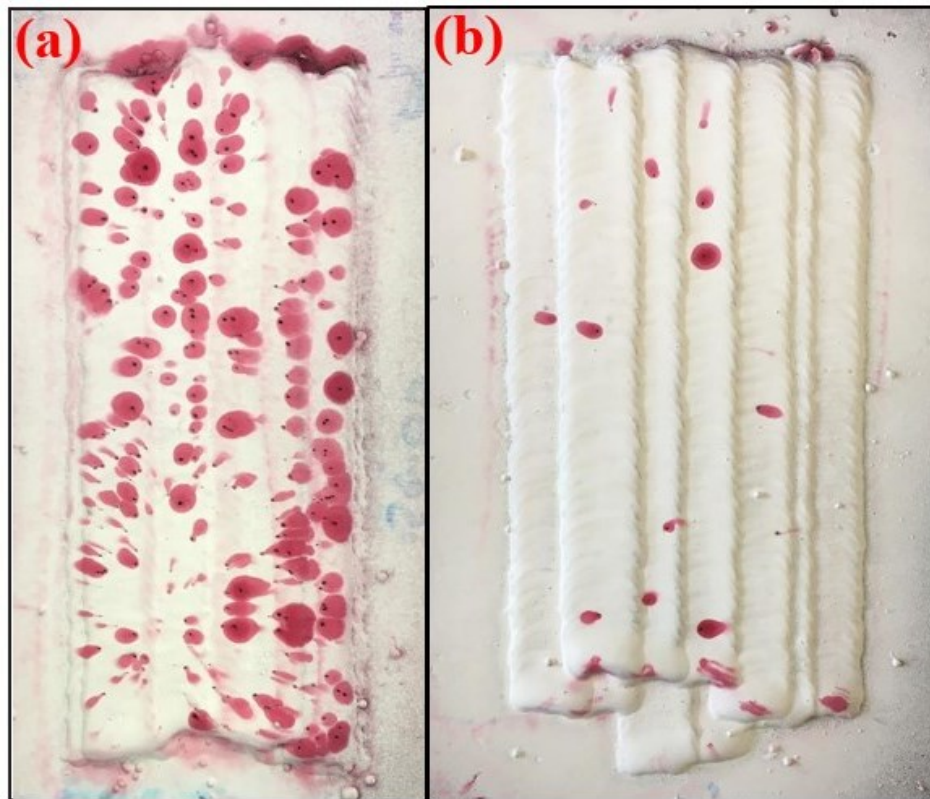
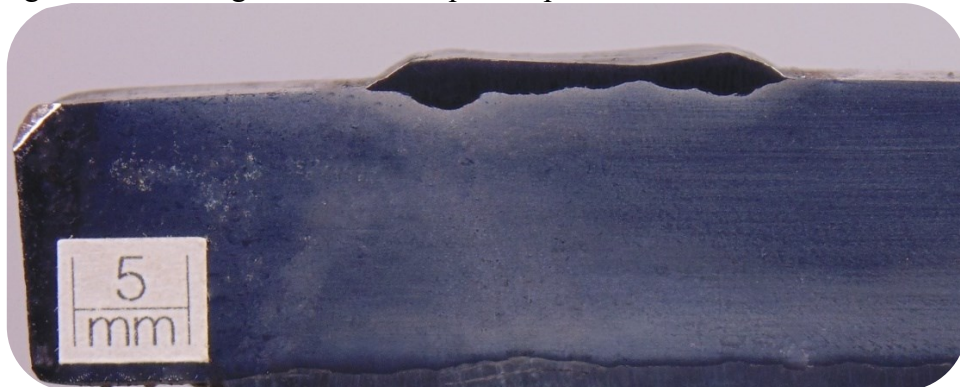


Figura 85 - Ensaio de líquidos penetrantes.com 12 mm de amplitude de oscilação (c) chapa de aço carbono, (d) chapa de CA6NM para Durolit 21



A preparação metalográfica, mais uma vez, teve os mesmos procedimentos previamente adotados. O primeiro corpo de prova a ser preparado e avaliado foi o cordão realizado de forma isolada com 15 mm de amplitude de oscilação, ilustrado na Figura 86. De acordo com os cálculos, sua diluição e penetração obtiveram os seguintes valores 47,5% e 1,12 mm.

Figura 86 - Macrografia do cordão padrão para o revestimento de Durolit 21



O primeiro revestimento analisado, foi o realizado na chapa de aço carbono com a amplitude de oscilação de 15 mm, podendo ser visto sua macrografia na Figura 87. Com os

valores calculados de diluição e penetração de 30,36% e 1,55 mm. Logo após, as medições foram para o revestimento na chapa de CA6NM encontrando, de acordo com os cálculos, da análise macrográfica identificada na Figura 88, valores de 18,2% e 1,20 mm para diluição e penetração, respectivamente.

Figura 87 - Macrografia do revestimento de 15 mm de amplitude na chapa de aço carbono para Durolit 21

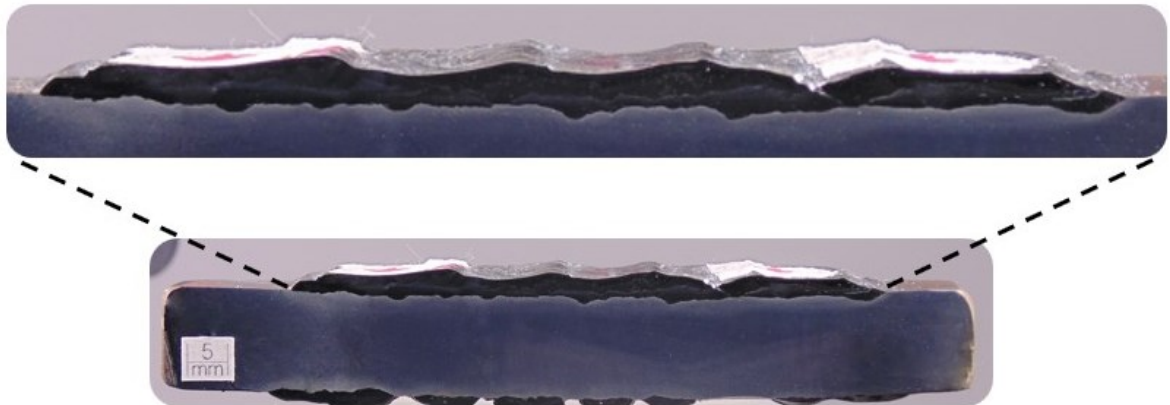


Figura 88 - Macrografia do revestimento de 15 mm de amplitude na chapa de CA6NM para Durolit 21



A alteração no valor da amplitude de oscilação executada pelo oscilador mecânico, diminuindo o mesmo, de 15 mm para 12 mm, foi uma das alternativas encontradas para diminuir a incidência de descontinuidades na superfície dos cordões soldados, como já foi dito, e realizada essa modificação se encontrou os valores para diluição e penetração do revestimento feito na chapa de aço carbono e na chapa de CA6NM, identificadas pela Figura 89 (aço carbono)

e Figura 90 (CA6NM). Sendo assim, os valores encontrados para o o depósito do revestimento em aço carbono para diluição foram de 43,8% e penetração com 2,04 mm, já para o depósito do revestimento sobre a chapa de CA6NM os valores foram de 27% para diluição e 0,963 de penetração.

Figura 89 - Macrografia do revestimento com Durolit 21 em aço carbono com 12 mm de amplitude de oscilação

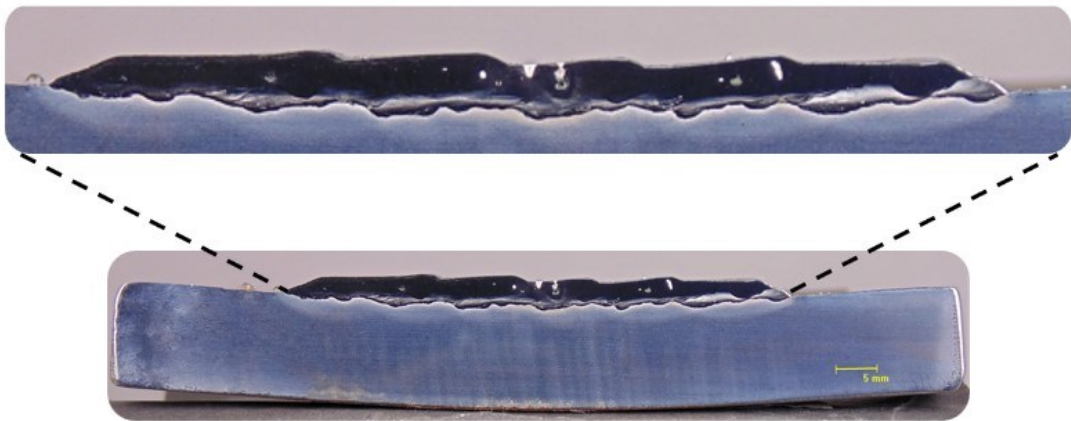
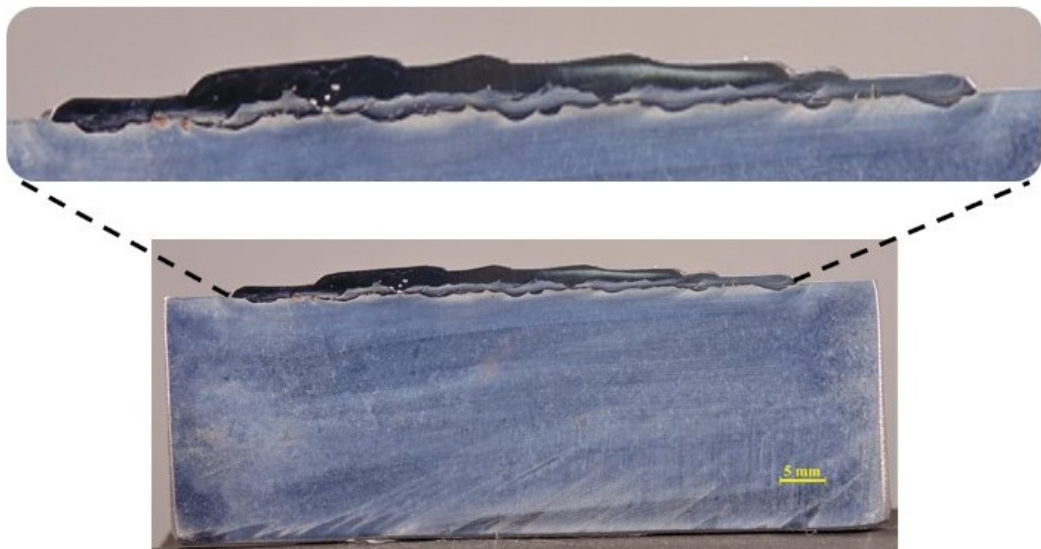


Figura 90 - Macografia do revestimento com Durolit 21 em CA6NM com 12 mm de amplitude de oscilação



Como houve para este arame duas amplitudes de oscilação, o cálculo da altura e área total do revestimento, foi feito para as duas, tanto com 15 mm quanto com 12 mm, de amplitude. Para o ensaio com 15 mm os valores encontrados foram de 3,17 mm de altura e área total de 354 mm².

4.4 COMPARATIVO ENTRE A ALTURA MÉDIA E PENETRAÇÃO MÉDIA UTILIZANDO O MODO SEMIAUTOMÁTICA, MECANIZADO COM E SEM OSCILAÇÃO DA TOCHA DE ALTA FREQUÊNCIA

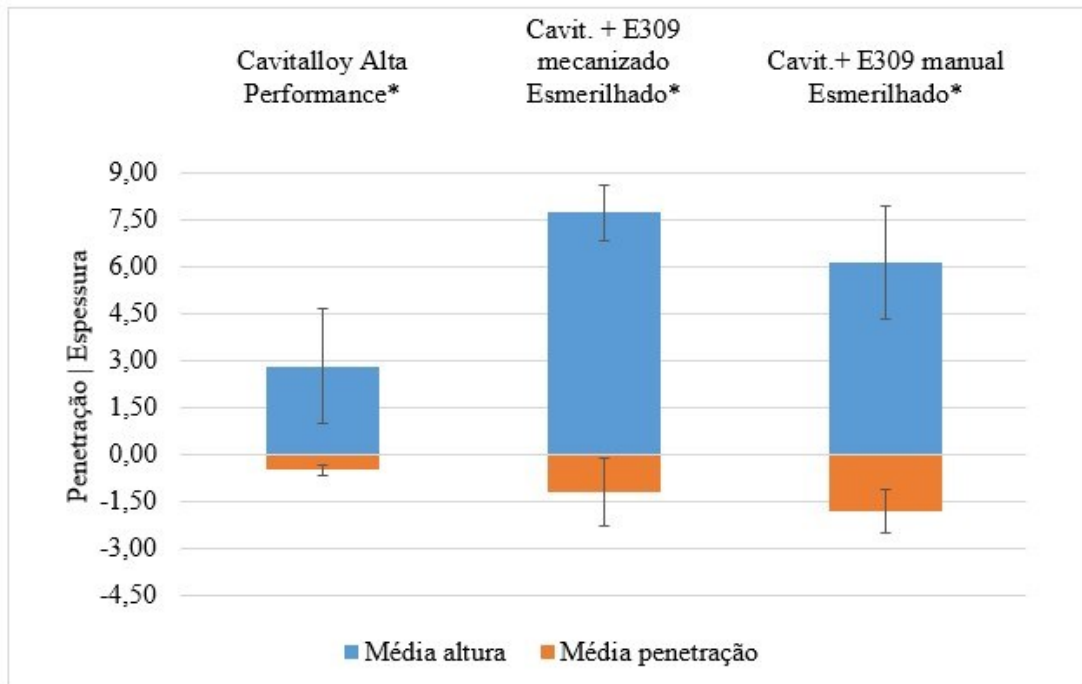
Este tópico apresenta os resultados da comparação de altura média dos revestimentos principal foco a ser analisado e também para penetração média de cada um dos procedimentos realizados de forma convencional comparando-os com os de alta performance. Serão comparados os aspectos geométricos dos revestimentos realizados nas chapas de CA6NM, as quais tinham sempre a mesma espessura, devido ao fato que esse material de base e os resultados das soldagens sobre o mesmo, é a base deste estudo.

Ao se observar o gráfico para o revestimento com a liga Cavitalloy (Figura 91), é perceptível que o procedimento de alta performance obteve baixos valores de altura (espessura) e penetração médias quando comparados com os procedimentos convencionais, mesmo estes tendo suas duas camadas esmerilhadas para o depósito do material de adição. O revestimento efetuado com Stelloy 6 (Figura 92) obteve entre os arames utilizados nos procedimentos de alta performance o menor valor médio de espessura de camadas depositadas, mesmo sendo realizado com 15 mm de amplitude, mesmo possuindo parâmetros iguais ao do processo com Durolit 21 (Figura 93), se conseguiu um valor médio para duas camadas entre 1,2 e 1,5 mm de espessura, interessante para o revestimento efetuado.

Em casos como o do arame Durolit 21, em que foi proposto utilizar duas amplitudes diferentes de 12 mm e 15 mm, é possível de se analisar que no procedimento com a amplitude de 15 mm o valor da altura média é maior quando comparado com o procedimento com 12 mm. Como os parâmetros (velocidade de soldagem e arame, frequência, DBCP) para efetuar cada um deles foram iguais, divergindo somente no valor da amplitude pré-estabelecida, era esperado que para amplitude de 12 mm os valores de altura média fossem maiores, uma vez que menor amplitude de oscilação deveria gerar uma maior deposição de material por unidade de área quando se comparado com um valor de maior amplitude, visto que se a velocidade de soldagem fosse variada de um processo para o outro seria esperado que a quantidade de material fundido por área fosse menor para a amplitude de 15 mm, porém aqui foi visto que isso não ocorreu. Ou seja, para o revestimento com 12 mm de amplitude, foi o procedimento com melhor resultado, reduzindo a quantidade de material depositado, gerando ganho de produtividade e ganho ao se tratar do valor final do processo.

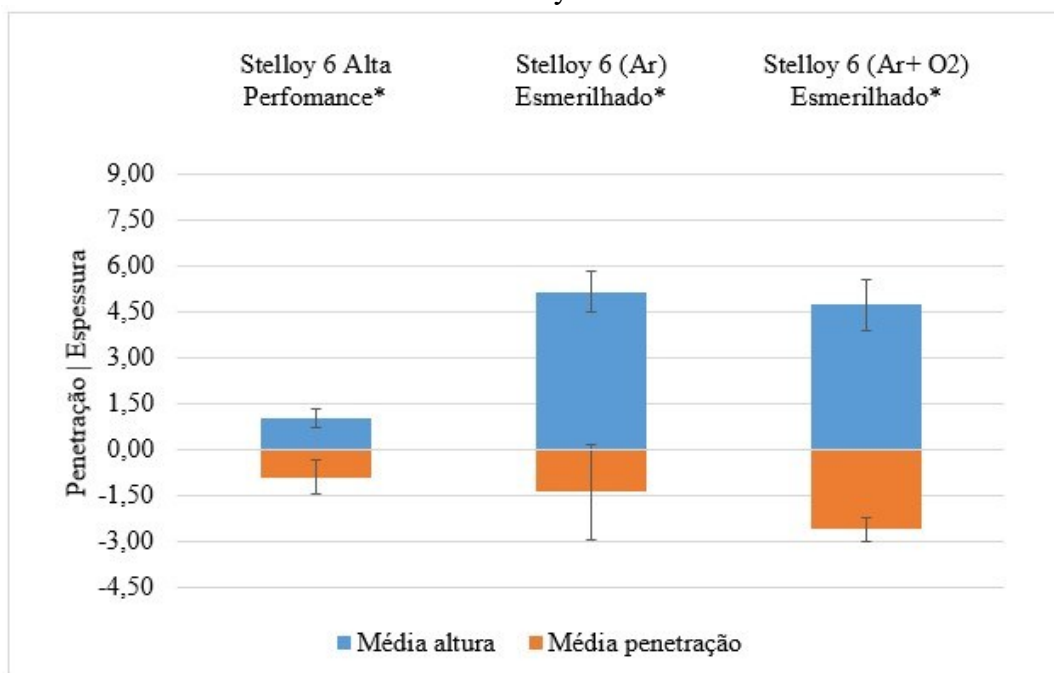
Os valores encontrados para espessura (altura média) e penetração média dos revestimentos medidos são exibidos nos gráficos já citados, sendo factível perceber que os procedimentos de alta performance conseguiram valores muito reduzidos em relação aos convencionais. As medições mostram que os procedimentos de alta performance possibilitaram aplicar camadas com espessura significativamente menores para todas as ligas testadas. Isso possibilita a diminuição de custos com a aquisição de consumíveis, especialmente quando se considera a aplicação de ligas de elevado custo. Além disso, os resultados mostram que a profundidade de penetração dos procedimentos de alta performance também é significativamente menor do que os procedimentos aplicados de forma semiautomática.

Figura 91 - Gráfico com altura e penetração média para duas camadas de revestimento com Cavitalloy



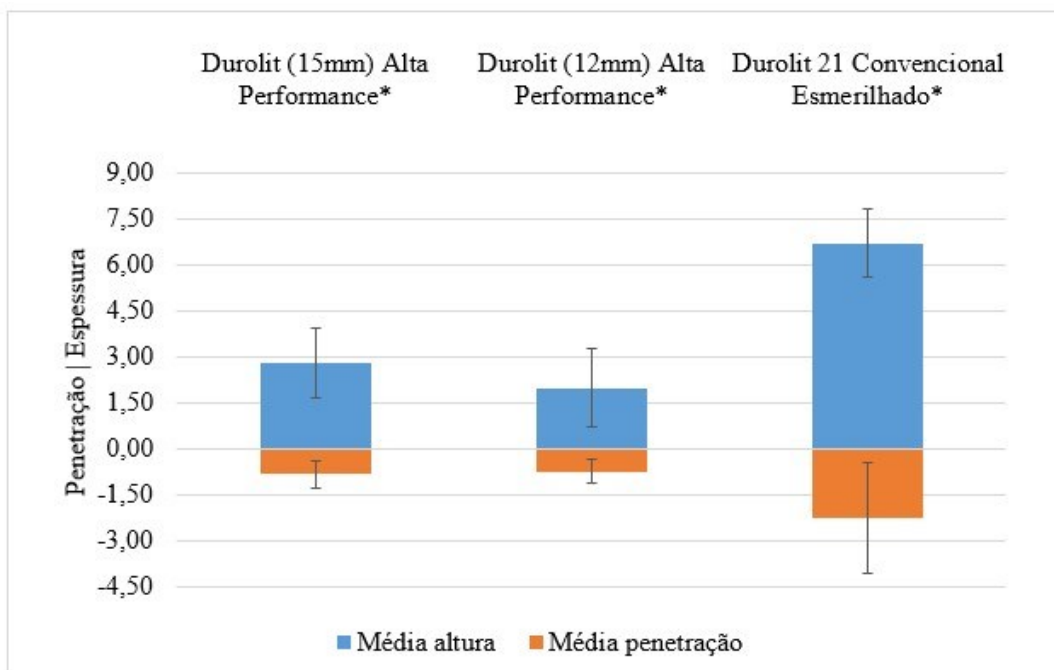
*revestimentos com duas camadas

Figura 92 - Gráfico com altura e penetração média para duas camadas de revestimento com Stelloy 6



*revestimentos com duas camadas

Figura 93 - Gráfico com altura e penetração média para duas camadas de revestimento com Durolit 21



*revestimentos com duas camadas

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DE CADA ELEMENTO DE LIGA E A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS MEDIDA NOS CORDÕES DE SOLDA

Neste tópico do trabalho, será realizada a análise comparativa das composições químicas fornecidas pelos fabricantes e as composições químicas medidas na superfície do depósito por meio do ensaio de espectrometria, sendo apresentado para a liga Cavitalloy na Tabela 18, para a liga Stelloy 6 na Tabela 19 e para a liga Durolit 21 na Tabela 20. Os valores nominais para a porcentagem de cobalto um dos principais elementos de liga para esses arames, são estabelecidos pela diferença do valor total (100%) com os valores somados (%) dos outros elementos de liga, assim sendo, para o Stelloy 6 foi de 58,75% e para o Durolit 21 de 60,3%, para o elemento ferro na liga Cavitalloy sua porcentagem foi de 57,83%. O Cavitalloy por ser um aço austenítico inoxidável ligado ao cobalto, fica perceptível que a quantidade de cobalto em suas composições (nominal e medida) é bem menor ao se comparar com as outras duas ligas à base de cobalto. Além de ser demonstrada as composições químicas já citadas acima, outra comparação efetuada foi entre a composição medida, destacando a diferença entre os processos convencionais e os de alta performance, onde cada liga utilizada no processo teve a medição por espectrometria.

Tabela 18 - Composição química nominal e dos depósitos efetuados com a liga Cavitalloy

Nome/Elemento de liga	C(%)	Co(%)	Mo(%)	Cr(%)	Mn(%)	Si(%)	Cu(%)	Ni(%)	Fe(%)
Cavitalloy (Nominal)	0,19	11,6	0,28	18,7	9,6	1,6	0,04	0,16	57,83 (Bal)
Cavitalloy - Convencional semiautomático)	0,13	9,65	0,17	18,87	5,95	1,02	0,018	3,11	59,2
Cavitalloy - Convencional (mec.)	0,16	11,92	0,2	17,86	7,27	0,92	0,017	0,52	58,1
Cavitalloy - Alta performance	0,14	11,23	0,18	18,24	8,31	0,99	0,037	0,66	59,3

Tabela 19 - Composição química nominal e dos depósitos efetuados com a liga Stelloy 6

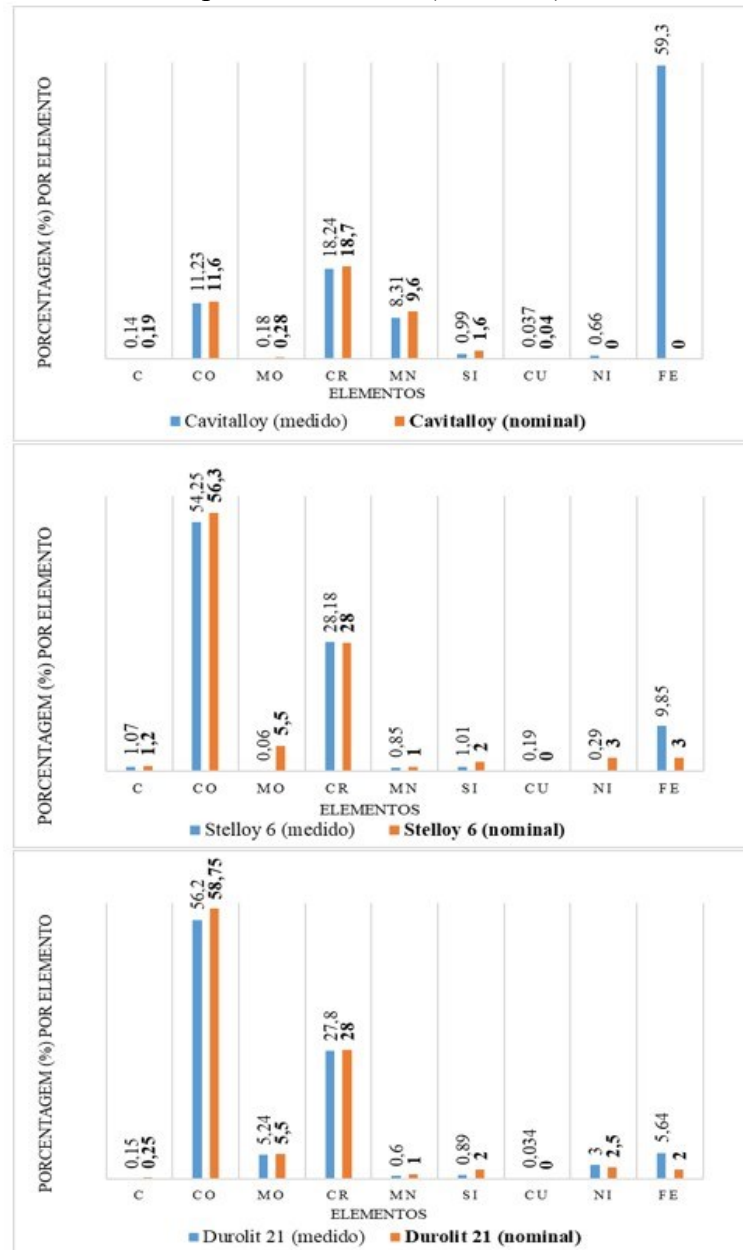
Nome/Elemento de liga	C(%)	Co(%)	Mo(%)	Cr(%)	Mn(%)	Si(%)	Cu(%)	Ni(%)	Fe(%)
Stelloy 6 (Nominal)	1,2	56,3 (Bal)	5,5	28,0	1,0	2,0	-	3,0	3,0
Stelloy 6 - Convencional	1,14	53,2	0,075	28,92	0,91	1,53	0,17	0,55	9,79
Stelloy 6 - Alta performance	1,07	54,25	0,06	28,18	0,85	1,01	0,19	0,29	9,85

Tabela 20 - Composição química nominal e dos depósitos efetuados com a liga Durolit 21
Nome/Elemento de liga C(%) Co(%) Mo(%) Cr(%) Mn(%) Si(%) Cu(%) Ni(%) Fe(%)

<i>Nome/Elemento de liga</i>	<i>C(%)</i>	<i>Co(%)</i>	<i>Mo(%)</i>	<i>Cr(%)</i>	<i>Mn(%)</i>	<i>Si(%)</i>	<i>Cu(%)</i>	<i>Ni(%)</i>	<i>Fe(%)</i>
<i>Durolit 21 (Nominal)</i>	0,25	58,75 (Bal)	5,5	28,0	1,0	2,0	-	2,5	2,0
<i>Durolit 21 - Convencional</i>	0,18	55	5,31	27,52	0,6	0,97	0,03	3,08	6,97
<i>Durolit 21 - Alta performance</i>	0,15	56,2	5,24	27,8	0,6	0,89	0,034	3,0	5,64

Analisando graficamente (Figura 94) as composições químicas de cada elemento de liga dos arames, uma vez que os metais de base, tem em suas estruturas um grande percentual do elemento Fe, os valores medidos de cobalto para os três arames, ficaram bem próximos dos valores nominais. Outro fator importante de analisar, se trata do teor de cromo, índices na superfície dos revestimentos estão próximos a 20%, isto faz com que o revestimento tenda a ter maior resistência à corrosão e erosão (Carvalho, 2015). Além desses elementos citados, ao observar todos os que compõem a análise efetuada, se encontram com valores próximos, ou seja, pode-se dizer que em relação à composição química dos revestimentos, o resultado foi satisfatório e dentro do esperado.

Figura 94 - Comparativo entre composição medida das ligas com as composições fornecidas pelos fabricantes (nominais)



É importante a averiguação do comparativo entre os processos distintos, porém com o mesmo material de adição, como demonstram as figuras (Figura 95 e Figura 96) para os arames Cavitalloy, Stelloy 6 e Durolit 21. Com os valores medidos por espectrometria, ficou nítido que para ambos os processos (convencionais – mecanizado e semiautomático) e (alta performance) os valores das composições químicas foram muito próximos. O principal intuito dessa análise era avaliar a composição química das camadas para comprovar que os procedimentos de alta performance apresentam em sua superfície uma composição química mais favorável (com menor diluição do metal de base) do que os procedimentos elaborados para aplicação

semiautomática. Essa convicção de que os procedimentos desenvolvidos utilizando o tectimento em alta frequência poderiam ter menor diluição surgiu do fato de os cordões depositados dessa forma sempre apresentaram menor profundidade de penetração. Porém, os resultados das análises químicas mostram que os teores dos principais elementos de liga foram semelhantes para as diferentes metodologias de deposição dos materiais selecionados, de forma que a análise indicou que os revestimentos depositados pelos procedimentos de alta performance não apresentaram diluição significativamente menor do que os procedimentos desenvolvidos para aplicação semiautomática. Isso pode ser justificado já que o volume de metal depositado em cada camada é muito menor para os revestimentos de alta performance e mesmo que o volume de material de base fundido em cada cordão seja menor, a diluição fica em um nível que tende a não ser significativamente menor do que o procedimento semiautomático.

Figura 95 - Comparativo entre processos convencionais (mecanizado e manual) e de alta performance com Cavitalloy

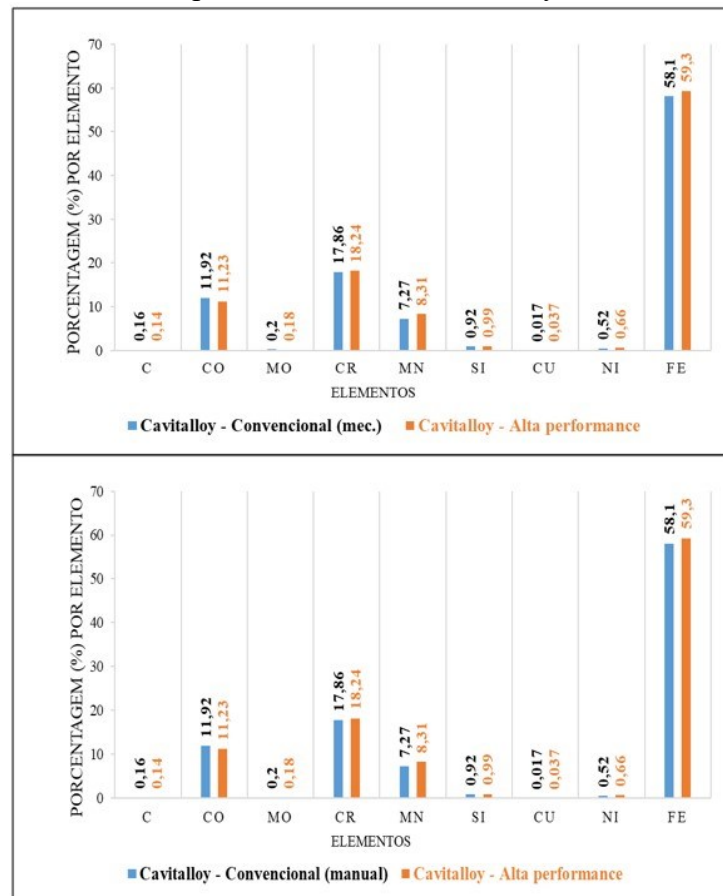
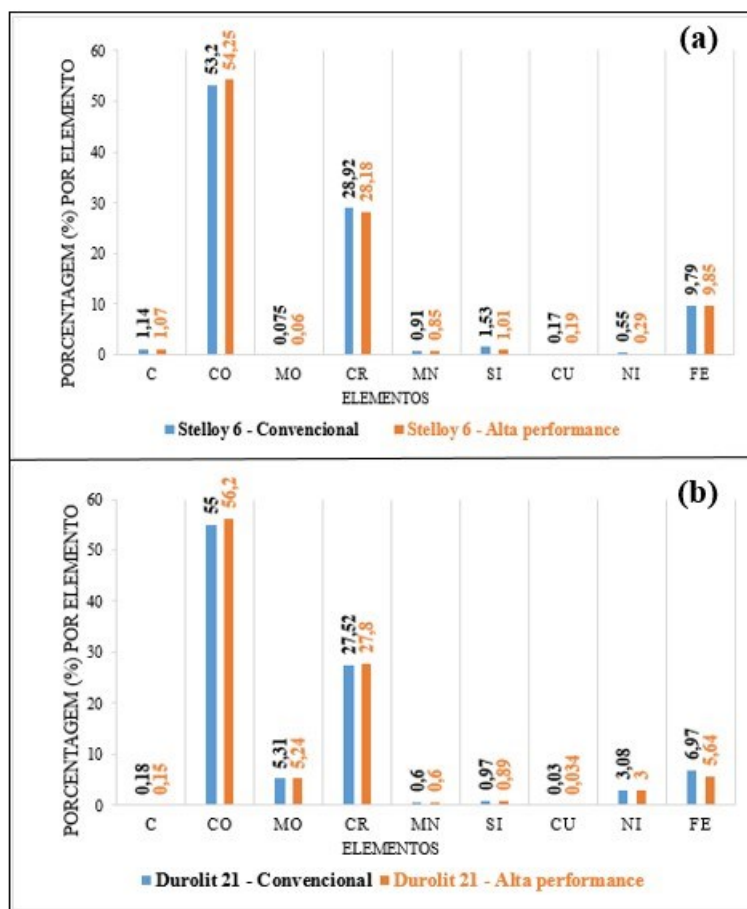


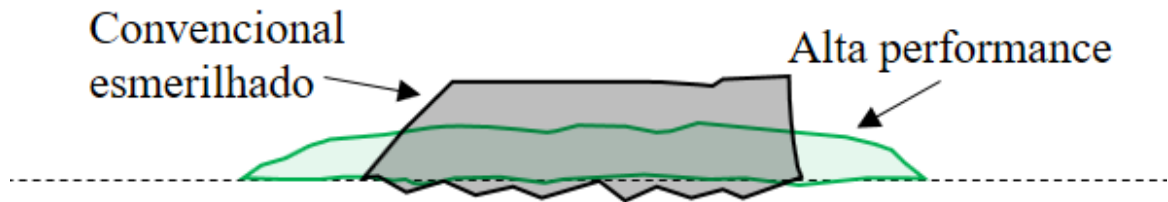
Figura 96 - Comparativo entre processos convencionais (mecanizado e manual) e de alta performance com Stelloy 6 (a) e Durolit 21 (b)



4.6 COMPARATIVO ENTRE OS TIPOS DE PERFIS DE CADA REVESTIMENTO REALIZADO ENTRE OS MODOS CONVENCIONAIS E DE ALTA PERFORMANCE

Este tópico trata da comparação do perfil geométrico entre os revestimentos realizados com os modos convencionais em relação aos modos de alta performance. Os primeiros cordões a serem comparados foram os de Cavitalloy através da Figura 97, sendo possível perceber a espessura do revestimento realizado de forma convencional mecanizada (tartilope) é significativamente maior em relação ao revestimento efetuado com o procedimento de alta performance, além claro da penetração, mesmo que não seja tão efetiva quanto à diferença vista na espessura, o valor para o procedimento de alta performance se mostrou menor quando comparado com o procedimento convencional. Ainda que os procedimentos tenham sido diferentes gerando revestimentos com perfis não semelhantes, é possível de se estabelecer tal comparação, como citada acima.

Figura 97 - Comparação entre os perfis de revestimentos com Cavitalloy para os procedimentos de alta performance (duas camadas) com os procedimentos convencionais (duas camadas)



As comparações continuam para os corpos de prova que geraram os perfis dos revestimentos como podem ser vistos nas figuras (Figura 98 e Figura 99), mais uma vez, fica perceptível ao analisar os perfis que tanto para o procedimento com Stelloy 6 quanto para o Durolit 21, os revestimentos efetuados de forma convencional, demonstram maior espessura (altura) do que os procedimentos de alta performance. Em relação a penetração, para o Stelloy 6 é possível de se afirmar que para os procedimentos convencionais os valores também são maiores que ao se comparar com os procedimentos de alta performance, porém para o Durolit 21 como mostra a imagem da Figura 99, a penetração para ambos os casos demonstrados, tanto com 12 mm quanto com 15 mm, tem valores próximos, mesmo que em alguns pontos a penetração sendo maior para o processo convencional.

É válido salientar que os revestimentos realizados com os procedimentos convencionais tiveram suas duas camadas esmerilhadas e, ainda assim, demonstraram ser menos efetivos ao se comparar os valores de suas espessuras, sendo que tal procedimento elimina parte do material depositado. E quanto a largura dos revestimentos, é bem possível de se confirmar que mesmo que todos os procedimentos estivessem com a mesma largura, os procedimentos de alta performance continuariam a demonstrar camadas com menor espessura e penetração, indo totalmente a favor do que se espera para tal processo.

Figura 98 - Comparação entre os perfis de revestimentos com Stelloy 6 para os procedimentos de alta performance (duas camadas) com os procedimentos convencionais (duas camadas)

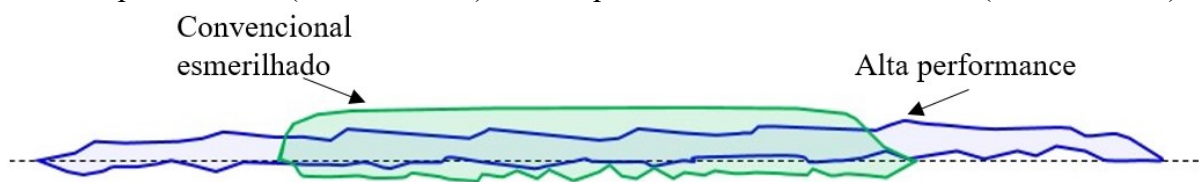
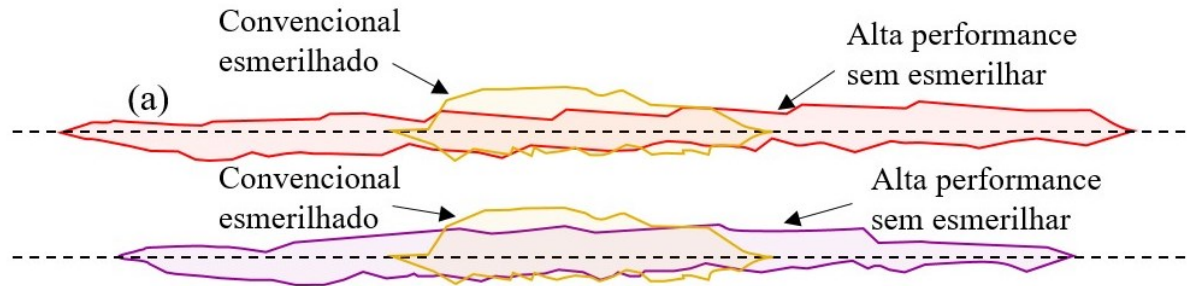


Figura 99 - Comparação entre os perfis de revestimentos com Durolit 21 para os procedimentos de alta performance (duas camadas) com os procedimentos convencionais (duas camadas). (a) 15mm de amplitude de oscilação e (b) 12 mm de amplitude de oscilação



4.7 AVALIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL DEPOSITADO E CUSTO GERADO PARA CADA TIPO DE ARAME

Neste tópico do trabalho foram avaliados e comparados os custos de soldagem e também a quantidade de material depositado associados a cada um dos testes efetuados.

As operações de revestimento com ligas à base de cobalto (Stelloy 6 e Durolit 21) e para liga (Cavitalloy) com presença em certa quantidade do elemento possuem custos relativamente elevados e geralmente o custo final de um produto ou serviço é um fator de extrema importância e determinante para tomada de decisões no âmbito da engenharia. Sendo assim, foi realizado os cálculos que aqui serão demonstrados. Na Figura 100, é possível analisar que para se efetuar o depósito de um metro quadrado de material para todos os arames utilizados como materiais de adição, os processos realizados de forma convencional consumiram uma quantidade de material muito maior quando comparados com os processos de alta performance. Garantido que os processos denominados de alta performance realmente possibilitam o depósito de menor quantidade de material por área.

A quantidade de material depositado é considerada uma das variáveis que influenciam diretamente no custo final do processo de soldagem, sendo assim é possível perceber sobre o gráfico apresentado na Figura 101, os processos de alta performance obtiveram custos em relação à quantidade de material depositado por m^2 muito menores quando comparados aos processos convencionais, podendo ser considerado que mais uma vez que os processos efetuados com alta frequência e amplitude de oscilação possibilitam depositar uma camada de menor espessura.

A Tabela 21 apresenta os valores em quilograma para cada meio metro de arame e o valor fornecido pela fabricante do quilograma, também para cada um dos arames.

Tabela 21 - Valores para massa de meio metro e do quilograma de arame

Tipo de arame	Massa para 0,5 m de arame (kg)	Valor do kg (R\$)
Cavitalloy	0,00453	390,00
Stelloy 6	0,00425	1264,00
Durolit 21	0,00387	1264,00

Figura 100 - Gráfico comparando quantidade de material depositado entre processos convencionais e alta performance

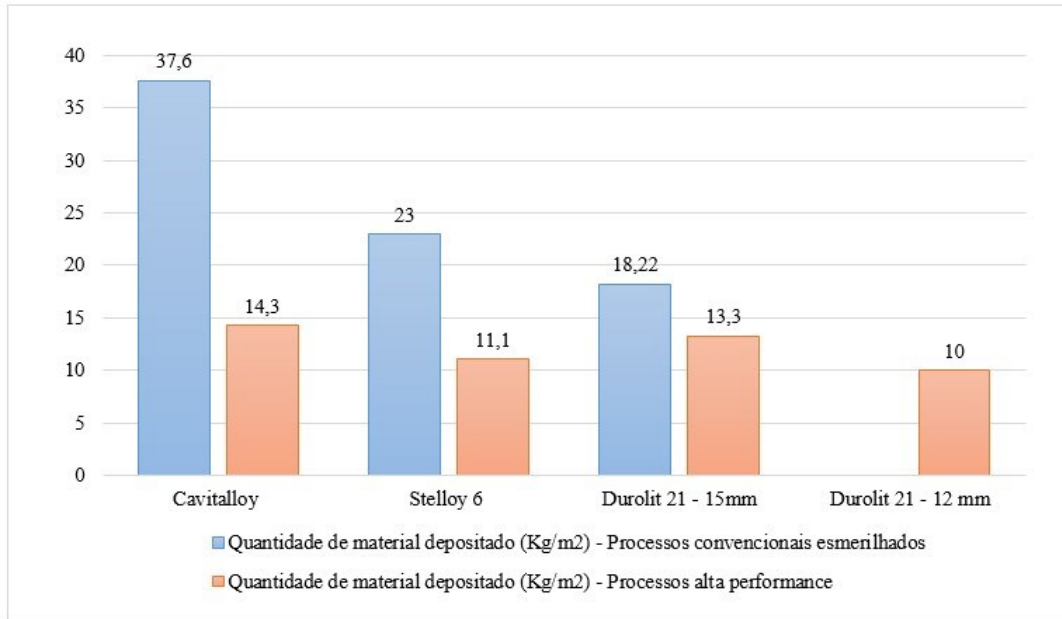
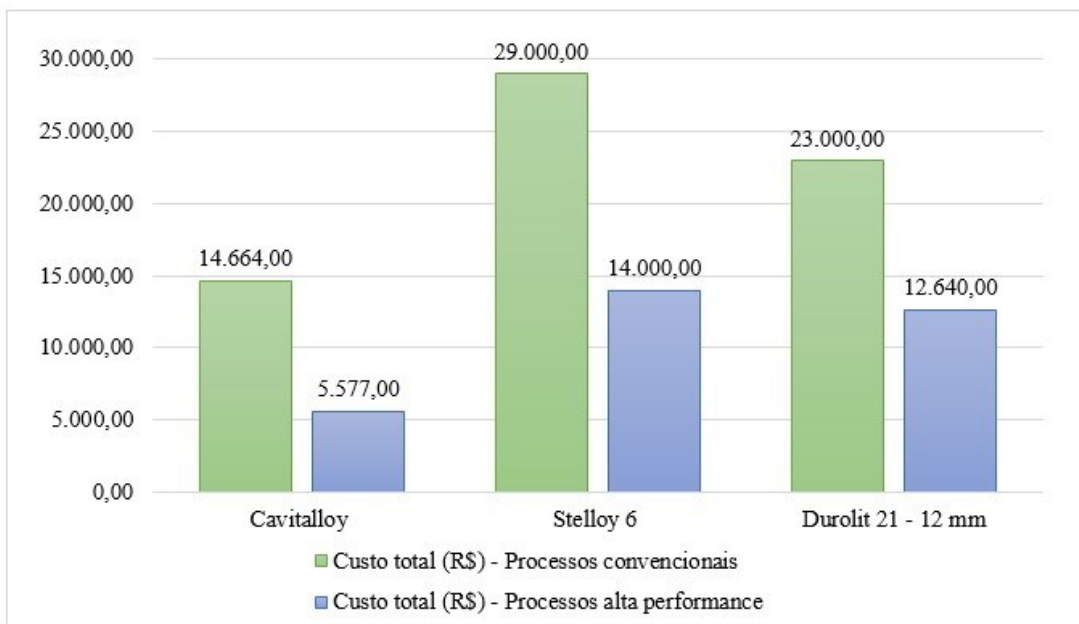


Figura 101 - Gráfico comparando custo do material de adição entre processos convencionais e alta performance



5 CONCLUSÃO

Com a possibilidade da aplicação de oscilação da tocha em alta frequência para revestimentos realizados em posições de maior dificuldade de operação (posição vertical), o trabalho mostrou que é possível produzir depósitos utilizando arames tubulares proporcionando vantagens como a capacidade de aplicar camadas de revestimento com baixa espessura e penetração.

Foi factível concluir que alguns dos revestimentos ficaram livres de defeitos de soldagem, como falta de fusão, mordeduras, poros, trincas e descontinuidades dos cordões, além de executarem um processo com baixo índice de respingos na deposição dos cordões, que diretamente evita desperdícios e danos nos equipamentos automatizados utilizados. Por outro lado, se verificou que para obter uma parametrização totalmente livre de defeitos com arame tubular não é tão fácil quanto para o arame maciço, de forma que dentro das limitações de recursos do presente trabalho não foi possível desenvolver procedimentos de soldagem totalmente livres de defeitos para todas as ligas testadas.

Foi possível obter cordões isolados livre de defeitos para todas as ligas testadas, porém, ao realizar a soldagem de vários cordões aplicados um sobre o outro para formar uma camada, foi observado a formação de descontinuidades. Esse problema foi atribuído em parte às mudanças de temperatura do material de base (a chapa vai aquecendo durante a soldagem) tendendo a causar maior probabilidade de escorrimento do metal da poça. Apesar disso, em alguns casos ocorreu falta de descontinuidade mesmo em situações onde a temperatura de interpasse estava controlada, revelando assim que a parametrização desenvolvida ainda não é robusta o suficiente.

É complementado que existe uma ampla possibilidade de combinação de parâmetros que podem ser explorados em trabalhos futuros, tanto do ponto de vista que se refere a utilização de diferentes parâmetros de movimentação (velocidade de soldagem, amplitude, e frequência do tecimento), como também nos parâmetros relacionados ao ajuste do processo (velocidade de arame, variante do processo GMAW, altura do arco, gás do processo, etc).

Há a necessidade de se ter um dispositivo que forneça um avanço preciso de maneira consistente para regular a sobreposição dos diferentes cordões, já que o grau de dificuldade em posicionar de forma suficientemente precisa o próximo cordão ao lado do cordão anterior é grande, com o dispositivo disponível e utilizado no trabalho (tartilope), sendo essa regulagem da sobreposição foi efetuada somente pela vista do controlador do dispositivo.

Outra conclusão importante foi que os procedimentos desenvolvidos com a técnica de alta performance na maior parte dos casos apesar de apresentar uma penetração baixa, não necessariamente se apresenta como procedimentos de baixa diluição, devido ao fato de que já que o volume de metal depositado em cada camada é muito menor para os revestimentos de alta performance e mesmo que o volume de material de base fundido em cada cordão seja menor, a diluição fica em um nível que tende a não ser significativamente menor do que o procedimento semiautomático.

Foi possível com a avaliação da quantidade de material depositado por metro quadrado (kg/m^2) que os processos de alta performance possuem reais vantagens em relação aos processos convencionais. Dessa forma, a utilização da técnica tende a viabilizar a aplicação em grandes áreas de camada de baixa espessura com ligas de elevado custo como as ligas a base de cobalto, o que gera grande economia no custo de material de adição, mesmo não conseguindo quantificar a quantidade total de materiais gastos na deposição dos procedimentos convencionais, devido ao esmerilhamento das duas camadas que dê certo ocasionaria em maior diferença nos resultados finais da espessura das camadas e nos custos dos procedimentos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Averiguar a possibilidade de adoção de uma matriz DOE (*Desing of Experiments*) mais abrangente, para cada tipo de material de adição, determinando qual melhor procedimento a seguir e aprofundar os estudos sobre o material de adição escolhido, ou seja, parametrizar de maneira correta um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo;

Escolher somente um tipo de arame (E309L, Cavitalloy, Stelloy 6 e Durotil 21) e avaliar o melhor processo MIG/MAG para cada um dos arames (convencional, pulsado, modo misto, pulsado com pulsação térmica);

Estudar de forma detalhada a influência causada pela temperatura do material de base durante o processo de soldagem sobre o escorrimento da poça fundida.

Avaliar possíveis análises metalúrgicas, como análise em MEV, mapeamento da dureza e microdureza de toda a região soldada, além de micrografias poderiam fornecer dados e informações valiosas sobre a microestrutura das diferentes regiões dos cordões de solda realizados;

Pesquisar a viabilidade de pré-aquecer os metais de base (chapa) antes do revestimento. Com isto, durante a soldagem a chapa se conseguir efetuar cordões livres de defeitos, como trincas e falta de continuidade, se atendendo para as características metalúrgicas e de diluição;

Avaliar a possibilidade de aplicação de diferentes processos (distinto do MIG/MAG), como TIG, plasma, PTA, utilizando a tecnologia de oscilação em alta frequência na posição vertical descendente, observando se a execução de revestimentos livres de defeitos com tais processos é possível.

REFERÊNCIAS

RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/user/Zotero/storage/JRC42JHC/Pereira%20-%202019%20-%20Bento%20Costa%20Lima%20Leite%20de%20Albuquerque%20J%C3%BAnior.pdf>.

Acesso em: 15 out. 2021.

LIMA, Aldemi Coelho. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar.** 2008. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

Lancaster, J.F. (1986) *The Physics of Welding*, Pergamon Press & International Institute of Welding (IIW), 340p.

M. J. M. Hermans and G. Ouden, **“Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding,”** *Weld. J.*, vol. 78, no. 4, pp. 137–141, 1999.

GALEAZZI, Daniel. **Soldagem MIG/MAG Orbital com Sensoriamento Laser: Análise e Melhorias de Condições Operacionais para Aumento da Confiabilidade.** 2019. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

ABDALLA, F. E. S. **Aplicação das Variantes MAG Pulsado e MAG Pulsado Térmico com Arame Maciço em Soldas de Revestimento do Tipo “Lining”.** 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz.** 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SAVI, B. M. **Desenvolvimento Tecnológico para Soldagem MIG de Ligas de Alumínio 5083 H116**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

AMIN, M. Pulse Current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. **Metal Construction**, nº 15, pp. 272- 278, 1983.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1ª ed. São Paulo: Artliber Editora. 2008.

MOTTA, M. F. **Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagens de Revestimentos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RODRIGUES, Arthur Gondim. **Desenvolvimento de um Sistema Flexível de Alimentação Dinâmica Aplicado em Soldagem MIG/MAG**. 2019. 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

DUTRA, J. C.; MAMANI, L. G.; GOHR JUNIOR, Raul. **Desenvolvimento de um Programa Computacional para Controle Sinérgico de Processo de Soldagem MIG/MAG**. In: XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, X Congresso Latino-Americano de Soldagem e II Congresso Mercosul de Soldagem., 1996, Blumenau - SC. XXII ENTS. São Paulo – SP. Associação Brasileira de Soldagem, 1996. v. I. p. 401-409

DUTRA, J. C.; OLLÉ, L. F.; KIRST, E. R. **Uma Contribuição ao Estudo da Seleção de Variáveis na Soldagem Mig/Mag Pulsada**. In: XVIII Encontro Nacional da Tecnologia da Soldagem, IX Congresso Latino-Americano e III Íbero-Americano de Soldagem., 1992, Rio de Janeiro - RJ. XVIII ENTS. São Paulo - SP: Associação Brasileira de Soldagem, 1992. v. 2. p. 925-942.

NOGUEIRA, Romário Mauricio Urbanetto; BOHÓRQUEZ, Carlos Enrique Niño; ZANELLA, Igor Giacomelli. Comparação da Estabilidade do Arco e da Variabilidade da Geometria de Soldas obtidas pelos Processos MIG/MAG e Arame Tubular. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 191-204, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2002.07>.

CIRINO, Luciano Machado. **Análise crítica de formas de onda de corrente e métodos de controle no processo MIG/MAG Pulsado CC/CA**. 2020. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

ESSERS, W.; VAN GOMPEL, M. R. M. **Arc control with pulsed GMA welding**. *Welding Journal*, v. 63, p. 26-32, 1984. ISSN 0043-2296.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and Pressure Vessel Code. Section II – C, vol 49, SFA-5.18 e SFA 5.20, Edition 2001 Addenda 2003.

DE ARAÚJO, Welerson Reinaldo. **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**. 2004. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

GOMES, E. B. **Análise do comportamento da soldagem por curto circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi**. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

GARCIA, R. P., & SCOTTI, A. (Abr/Jun de 2011). **Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva** entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular). *Soldagem @ Inspeção*, 16(2), 146-155

SOUZA, Claudio Ivanei de; FERRARESI, Valtair Antonio. Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição

horizontal. **Soldagem & Inspeção**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 268-280, set. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-92242013000300009>.

FORTES, C. **Apostila Arames Tubulares**, ESAB BR, 2004. 103.

BARBEDO, Nancy Del Ducca. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

BRITO, Uallas Henrique de Oliveira de. **Investigações em Processo e Automação como Contribuição para a Soldagem MIG/MAG Orbital no LABSOLDA - UFSC**. 2019. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

BAUNÈ, E.; BONNET, C.; LIU, S., Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable Part 1 – **Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable** as Basicity Indicator, *Welding Journal*, March, pp. 57s-64s, mar 2000.

BARHORST, S., **Metal Cored Electrode Basics**, *The American Welder*, p 13-15 nov 2000.

STRIDH, Lars-Erik. Newly-developed Consumable Makes Thin-plate **Welding More Effective**. *Svetsaren*, Göteborg, Sweden, vol. 55, n. 3, p. 14-16, 2000.

WIDGERY, David. **Tubular Wire Welding**. First published, England, Woodhead Publishing Limited, 1994, p. 1-25.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas conexas: Processos**. Porto Alegre: Próprio Autor, 1996. 477 p.

LIMA II, E. J., & BRACARENSE, A. (2011). **Arc Welding Automation**. *Arc Welding*. doi:10.5772/27714

CARRY, Hiward (1995). **Arc Welding Automation** 1. Ed. New York: Marcel DeKer, Inc. 527p.

SCOTTI, A. **Process Modelling to Establish Control Algorithms for Automated GMAW**. PhD Thesis, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science, UK, 1991.

BROERING, C. E. **Desenvolvimento de Sistemas para a Automatização da Soldagem e do Corte Térmico**. Florianópolis: Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, Fev, 2005. p. 96.

YASKAWA MOTOMAN. HP20D-A80 DX100 Operator's Manual. Ohio– USA, 2020. Disponível em: https://www.motoman.com/getmedia/823e83c4-8db7-4a4f-aca7-fc108a5fba47/dx100_controller.pdf.aspx. Acesso em: 22 de nov. 2021.

CARVALHO, Renon Steinbach. **Tecnologias para Execução de Revestimentos Via Soldagem Automática das Paredes D'Água de Usinas Termelétricas**. 2015. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SANTOS, Arthur Gustavo Moreira. **Análise da Influência da Rotação do Eletrodo no Processo MIG/MAG e Estudo para Aplicação em Soldagem Narrow Gap**. 2019. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

Yang CL, Guo N, Lin SB, Fan CL, Zhang YQ. **Application of rotating arc system to horizontal narrow gap welding**. Science and Technology of Welding and Joining. 2009;14(2):172-177. <http://dx.doi.org/10.1179/136217108X388651>.

SMITH, W. F. Structure and Properties do Engineering Alloys. 2. ed. Singapore: **McGraw Hill**, 1993.

HENKE, Sérgio Luiz. **Desenvolvimento de procedimento de soldagem do aço inoxidável martensítico tipo CA-6NM sem tratamento térmico posterior**. 1998. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

PEREIRA, Aldo Santos. **Desenvolvimento de Procedimento de Reparo por Soldagem em Aços Inoxidáveis Martensíticos, com Metal de Adição Similar sem Tratamento Térmico Posterior**. Florianópolis, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, p04.

GRACIOSO, J.F.R. **Efeito das condições de têmpera na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico fundido CA6NM**.2003.219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa pós-graduação Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003

ASTM A 743 - 93 Standard specification for castings, iron-chromium, iron chromium-nickel, corrosion resistant, for general application.

Steel Founders' Society of America. **Steel Castings Handbook: Supplement 8 - 92 High Alloy Data Sheets Corrosion Series**, 2004.

ASM - International ASM Handbook: **Welding, Brazing and Soldering** – 1993

FOLKHARD, Erich. **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. Austria: Springer-Verlag Wien, 1988. 279 p.

Bilmes PD, Solari M, Llorente CL. **Characteristics and effects of austenite resulting from tempering of 13Cr-NiMo martensitic steel weld metals**. Materials Characterization. 2001;46(4):285-296. [http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803\(00\)00099-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00099-1)
» [http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803\(00\)00099-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00099-1)

ASM INTERNATIONAL. - ASM Handbook: Metallography and Microstructure - 2004

CRAWFORD, James. D. CA-6NM an update. **In: 29th ANNUAL STEEL FOUNDER'S SOCIETY OF AMERICA TECHNICAL AND OPERATING CONFERENCE**, Nov. 1974.

AKHTAR, A. **Materials Technology for Turbine Performance**. Water Power and Dam Construction. - v.38, n.8, 1986

ASM Specialty Handbook, **Stainless Steel**, 2th ed, 1996, pg. 66.

FERRARI, Daniel Cristiano. **Processo TIG com Movimentação Oscilatória Longitudinal da Tocha para Mitigação de Humping**. 2020. 235p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020

GOMES, José Henrique de Freitas et al. Otimização de múltiplos objetivos na soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arame tubular inoxidável austenítico. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, p. 232-342, 2011.

MOREIRA, Alcindo Fernando et al. **Efeito da adição de co2 na atmosfera protetora em processos de soldagem com arame tubular AWS E309LT-1**. Universidade Estadual Paulista, v. 10, 2012.

TAKEYAMA, R. R. **Caracterização de revestimentos de Ligas à base de Co modificadas pela adição de carbonetos de tungstênio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MOREIRA, Eduardo Ferracin. **Efeitos da adição de Al₂O₃ na liga stellite 6 para a realização de revestimento superficial pelo processo GTAW-P**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2019.

R. Cardoso Jr., A. Q. Bracarense, F. R. Campos, C. S. Souza, D. M. Silveira, and V. de F. C. Lins, “**Avaliação da Soldagem Multipasse de Chapas Espessas de Aços Inoxidáveis Lean 139 Duplex UNS S32304** soldadas pelos processos SMAW, GMAW e FCAW – Parte 1: Propriedades Mecânicas” *Soldag. Inspeção*, vol. 17, no. 4, pp. 306–316, 2012.

Silva GV, Silva GC. **Virtual prototyping of an automotive manufacturing cyber-physical system based on artificial neural network**. *Journal of Production and Automation*. 2018;1(2):41-58.

Faria, ICS, Filleti, RAP, Helleno, AL. **Evolução dos processos de automação em células de soldagem: uma revisão de literatura**. *Soldagem & Inspeção*. 2022;27:e2704

Pereira, M.F.D., 2019. Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Júnior 32.