

REVESTIMENTO DE INCONEL 625 SOBRE AÇO CARBONO ARBL
UTILIZANDO VARIANTES DO PROCESSO TIG VISANDO ALTA
PRODUTIVIDADE E BAIXA DILUIÇÃO

FLÁVIO JOSÉ VILLELA BRAGA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES
OUTUBRO - 2017

REVESTIMENTO DE INCONEL 625 SOBRE AÇO CARBONO ARBL
UTILIZANDO VARIANTES DO PROCESSO TIG VISANDO ALTA
PRODUTIVIDADE E BAIXA DILUIÇÃO

FLÁVIO JOSÉ VILLELA BRAGA

Dissertação de Mestrado submetido ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof.: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES
OUTUBRO - 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF** 81/2017

Braga, Flávio José Villela

Revestimento de Inconel 625 sobre aço carbono ARBL utilizando variantes do processo TIG, visando alta produtividade e baixa diluição / Flávio José Villela Braga. – Campos dos Goytacazes, 2017.

xiv, 139 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2017.

Orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Metalurgia física.

Bibliografia: f. 129-139.

1. REVESTIMENTOS 2. INCONEL 625 3. TIG (GTAW) 4. PRODUTIVIDADE 5. DILUIÇÃO I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

CDD 669.94

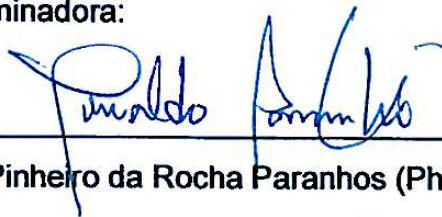
REVESTIMENTO DE INCONEL 625 SOBRE AÇO CARBONO ARBL
UTILIZANDO VARIANTES DO PROCESSO TIG VISANDO ALTA
PRODUTIVIDADE E BAIXA DILUIÇÃO

FLÁVIO JOSÉ VILLELA BRAGA

Dissertação de Mestrado submetido ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovado em 16 de outubro de 2017.

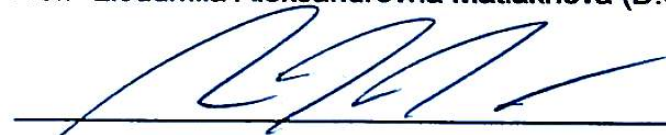
Comissão Examinadora:



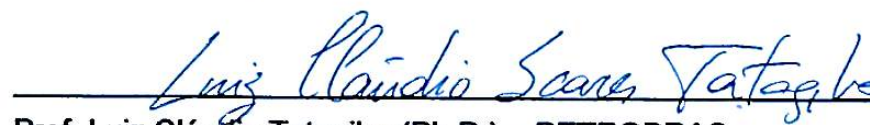
Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos (Ph.D.) – UENF - orientador



Prof.^a Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova (D.Sc.) – UENF



Prof. Marcello Filgueira (Ph.D.) – UENF



Prof. Luiz Cláudio Tatagiba (Ph.D.) – PETROBRAS

“ A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê. ”

(Arthur Schopenhauer)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz (*in memoriam*) e Eny, à minha esposa Monique, e aos meus filhos, Júlia e Gustavo, pelo amor, carinho, incentivo e total apoio para a realização desta etapa em minha formação profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai, Luiz (*in memoriam*), pelo exemplo de vida e por sempre buscar o conhecimento para a realização do bem, e à minha mãe, Eny, por sempre apoiar cada um de seus filhos na realização de seus sonhos.

A minha esposa, Monique por todo amor, carinho e compreensão durante esta jornada em que estivemos juntos e aos meus filhos, Júlia e Gustavo, por me incentivarem e contribuírem em atingir este objetivo.

Ao professor Ronaldo Paranhos pela amizade, oportunidade e orientação recebida ao longo do desenvolvimento do presente trabalho.

A SCHULZ TUBOS SOLDADOS LTDA, pelo apoio e suporte para a realização deste trabalho. Em especial ao diretor Marcelo Bueno, que foi fundamental para o início desta conquista. Também reconheço aqui o apoio recebido de toda equipe de produção, em especial a Jean Gama, Filipe Lyrio e Luciano Souza que se dedicaram com empenho notável e me deram todo suporte profissional necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos professores do LAMAV/UENF responsáveis pela minha formação acadêmica.

Ao técnico Sílvio Gonçalves do Laboratório de Metalografia por toda ajuda na preparação das amostras e realização dos ensaios de dureza.

A todos aqueles que de alguma forma fizeram parte de mais uma etapa da minha vida e que ajudaram, diretamente ou indiretamente, na elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS	x
RESUMO	xiii
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 Objetivo Geral	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2 JUSTIFICATIVAS	4
1.2.1 Importância Ambiental	5
1.2.2 Importância Econômica	5
1.2.3 Importância Tecnológica	5
1.2.4 Importância Científica	5
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES	6
2.2 PRINCIPAIS REVESTIMENTOS (LIGAÇÃO METALÚRGICA)	9
2.2.1 Revestimento soldados por explosão	9
2.2.2 Revestimento por co-laminação à quente	10
2.2.3 Revestimento por co-extrusão à quente	11
2.2.4 Revestimento por soldagem (“ <i>weld overlay</i> ”)	12
2.2.4.1 Revestimentos duros (“ <i>hardfacing</i> ”)	16
2.2.4.2 Revestimentos anti-corrosivos (“ <i>CRA weld overlay</i> ”)	18
2.3 SUBSTRATO E REVESTIMENTO	19
2.3.1 Substrato – aços Alta Resistência Baixa Liga (ARBL)	19
2.3.1.1 História dos aços ARBL	20
2.3.1.2 Elementos de liga e microligantes	22
2.3.1.3 Processamento termo-mecânico	23
2.3.1.4 Propriedades: API 5L - X65 (“ <i>overview</i> ”)	25
2.3.2 Revestimento – <i>superliga</i> de Níquel (<i>INCONEL 625</i>)	27
2.3.2.1 História das <i>superligas</i>	29
2.3.2.2 Elementos de liga	30
2.3.2.3 Microestruturas e Tratamentos Térmicos	31

2.3.2.4 Propriedades – Inconel 625 (“overview”)	33
2.3.3 Soldagem TIG de alta performance	37
2.3.3.1 História do processo TIG	37
2.3.3.2 Tochas (potencializando a energia de soldagem)	39
• Eletrodos de Tungstênio	39
• Soldagem TIG Multi-Catodo	41
○ Tocha TIG bi-catodo	41
• Constrição catódica do arco	43
2.3.3.3 Fontes de Soldagem (controlando o arco elétrico)	44
• Tipos de Corrente	44
• Corrente pulsada	44
• Controle Automático da Tensão do Arco (AVC) ...	46
2.3.3.4 Controles sobre o metal de adição	47
• TIG com alimentação automática de arame frio....	47
• Tecimento mecanizado (“weaving”)	48
• Tecimento eletromagnético (“oscillarc”)	49
• Arame Quente (“hot-wire”)	50
• Tocha duplo arame	53
2.3.3.5 Gases (inertes ou ativos)	54
• Extensores de proteção do gás de proteção	60
2.3.3.6 Miscelâneas (manipulação, monitoração e automação)	60
• Manipulação	61
• Monitoração	62
• Automação	64
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 MATERIAIS	65
• Metal de base	65
• Metal de revestimento	65
• Tocha de Soldagem	65
• Fonte Integrada de Soldagem	66
• Controles sobre o metal de adição	66
• Hotwire	66

• Gases	67
• Miscelâneas	67
• Avaliações de macrografias por computador	68
• LAMAV – UENF - Laboratório de Materiais Avançados	68
• TORK Controle Metrológico de Materiais LTDA	68
3.2 MÉTODO	68
3.2.1 ETAPA 1: DESENVOLVER UM APLICATIVO UTILIZANDO MICROSOFT EXCEL PARA AVALIAÇÃO GRÁFICA POR COMPUTADOR DE MACROGRAFIAS DE SOLDAS	68
3.2.2 ETAPA 2: COM BASE NO APLICATIVO AVALIAR OS RESULTADOS E ESTABELECEER OS MELHORES PARÂMETROS DE SOLDAGEM	74
3.2.3 ETAPA 3: REVESTIMENTO INTERNO DO TUBO REALIZADA COM OS PARÂMETROS ESCOLHIDOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS (experimento F)	77
• Ensaio de Análise Química por Espectrometria Ótica	78
• Ensaio de Metalografia	79
• Ensaio de Dureza	80
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1 ETAPA 1: DESENVOLVER UM APLICATIVO UTILIZANDO MICROSOFT EXCEL PARA AVALIAÇÃO GRÁFICA POR COMPUTADOR DE MACROGRAFIAS DE SOLDAS	81
4.2 ETAPA 2: COM BASE NO APLICATIVO AVALIAR OS RESULTADOS E ESTABELECEER OS MELHORES PARÂMETROS DE SOLDAGEM	86
4.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	86
4.2.2 CONSIDERAÇÕES COMUNS AOS RESULTADOS OBTIDOS..	90
4.2.3 ANÁLISE DA LARGURA DO CORDÃO ($w \rightarrow mm$)	92
4.2.4 ANÁLISE DA ALTURA DO CORDÃO ($r \rightarrow mm$)	94
4.2.5 ANÁLISE DA ÁREA DE DEPOSIÇÃO ($S_D \rightarrow mm^2$)	96
4.2.6 ANÁLISE DA ÁREA DE PENETRAÇÃO ($S_F \rightarrow mm^2$)	98
4.2.7 ANÁLISE DA DILUIÇÃO ($D \rightarrow \%$)	101
4.2.8 ANÁLISE DA TAXA DE DEPOSIÇÃO ($T_D \rightarrow kg/h$)	104

4.2.9 MÉTODO TAGUCHI PARA ESCOLHA DAS VARIÁVEIS	106
4.3 ETAPA 3: REVESTIMENTO INTERNO DO TUBO REALIZADA COM OS PARÂMETROS ESCOLHIDOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS (experimento F)	109
4.3.1 A ESCOLHA ENTRE OS MELHORES PERFIS [C1 e C2]	111
4.3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE CORDÕES JUSTAPOSTOS	112
4.3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A INSERÇÃO DO “HOT-WIRE”	113
4.3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VARIÁVEIS DE CONTROLE..	113
• Velocidade de alimentação	114
• Velocidade de soldagem	114
• Corrente de soldagem	115
• Tensão do arco	115
• Hot-wire	115
4.3.5 RESULTADOS DO REVESTIMENTO DO TUBO (experimento F)	116
4.3.6 ANÁLISE DO REVESTIMENTO (VIRTUAL MACRO)	118
4.3.7 CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DO REVESTIMENTO ...	121
4.3.7.1 ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA ÓTICA	121
4.3.7.2 ENSAIOS METALOGRAFÍCOS	121
• EXAMES VISUAIS E MACROGRÁFICOS	121
• EXAMES MICROGRÁFICOS	122
○ METAL DE BASE (MB)	123
○ ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA) ..	123
○ ZONA PARCIALMENTE DILUÍDA (ZPD)	124
○ METAL DE SOLDA (MS)	124
○ DUREZA	125
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	126
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES	127
CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da exploração de petróleo no Brasil, adaptado de GE Reports, 2014.	1
Figura 2: Engenharia de Superfície - aplicações (SEAC SIC, 2014.)	2
Figura 3: Classificação - tubos de aço resistentes à corrosão (Berg, 2009)	6
Figura 4: Espessuras obtidas com os revestimentos (ASM #06835G, 2001).....	7
Figura 5: Classificação dos Revestimentos (pelo autor)	8
Figura 6: Revestimento soldados por explosão (Pauly, 2012.)	9
Figura 7: Revestimento por co-laminação à quente (VOESTALPINE, 2016.)	10
Figura 8: Revestimento por co-extrusão à quente (SCHULZ, 2016.)	11
Figura 9: Diagrama de Schaeffler, adaptado de Kejelin, <i>et al</i> , 2016.....	12
Figura 10: Perfis desejados no cordão de solda (Gomes, 2010.)	13
Figura 11: Diluição para um passe e para dois passes sobrepostos iguais, (pelo autor)	13
Figura 12: Defeitos na interface de revestimentos (Silva (2), 2010,)	14
Figura 13: ZPD - Zonas Parcialmente Diluídas (Doody, 1992)	15
Figura 14: Comparação da taxa de deposição para revestimentos em Kg/h para os diversos processos de soldagem (Smith, 2012.)	16
Figura 15: Exemplos de revestimento duros (adaptação pelo autor)	17
Figura 16: Desenvolvimento dos Aços API 5L (Malcoln, 2007.)	21
Figura 17: Desenvolvimento dos Aços API 5L (Siciliano, 2008.)	21
Figura 18: Influência do elementos micro-ligantes na temperatura de recristalização. (Malcoln, 2007.)	22
Figura 19: Efeito dos elementos de liga na segregação central. (Malcoln, 2007.) ...	22
Figura 20: Constituintes microestruturais predominantes em aços API (Araújo, <i>et al</i> , 2008.)	23
Figura 21: Efeito da laminação e do resfriamento sobre sítios de nucleação na transformação da austenita (Araújo, <i>et al</i> , 2008.)	23
Figura 22: Tipos de aços de alta resistência produzidos para dutos (Mehmood, <i>et al</i> , 2002.)	24
Figura 23: Superligas – classificação segundo o principal elemento, adaptado de Choudhury, <i>et al</i> , 1998.	27

Figura 24: Ligas de Níquel - classificação segundo o mecanismo de endurecimento. (Lippold, <i>et al</i> , 2011.)	27
Figura 25: Diagrama das ligas de Níquel (SPECIAL METALS, 2016.)	28
Figura 26: Evolução das superligas (Reed, 2006.)	29
Figura 27: Diagrama TTT para Inconel 625. (Shoemaker, 2005.)	32
Figura 28: Material Selection Chart (NSSMC, 2016.)	33
Figura 29: Propriedades Mecânicas do Inconel 625 (SPECIAL METALS, 2016.)	34
Figura 30: Propriedades Mecânicas do Inconel 625 (SPECIAL METALS, 2016.)	34
Figura 31: Comparação - propriedades de ligas de Ni (Ren, <i>et al</i> , 2011.)	34
Figura 32: Limite de Resistência de diversas ligas (Kukuh, 2016.)	34
Figura 33: Taxa de Iso-corrosão para Inconel 625 em meio HCl (SPECIAL METALS, 2016.)	35
Figura 34: Taxa de Iso-corrosão para Inconel 625 em meio H ₂ SO ₄ (SPECIAL METALS, 2016.)	35
Figura 35: PREN de diversas ligas metálicas (Olsen, 2016.)	35
Figura 36: SCC em ambiente “sour service” (Watkins, <i>et al</i> , 1976.)	35
Figura 37: Evolução da tocha <i>TIG</i> ; adaptada de DBC, 2014.	37
Figura 38: Efeitos do ângulo do eletrodo e da distância “eletrodo-peça” para soldagem <i>TIG</i> autógena, adaptado de AWS – Welding Process, 2009.	40
Figura 39: Tocha <i>TIG</i> refrigerada à água, (Bracarense, 2000)	40
Figura 40: Tocha <i>TIG</i> bi-catodo, adaptada de Leng, <i>et al</i> , 2006 e Schwedersky (2), 2015.	42
Figura 41: Arco <i>TIG</i> Bi-catodo (Egerland, <i>et al</i> , 2015).	42
Figura 42: Pressão do arco e tensão do arco medidas para soldagem <i>TIG</i> convencional e <i>TIG</i> com contração catódica (CF- <i>TIG</i>), para diferentes correntes de soldagem, adaptado de Lohse, <i>et al</i> , 2013.	43
Figura 43: <i>TIG</i> com corrente pulsada, (ESAB (1), 2014.)	45
Figura 44: Efeitos do <i>TIG</i> com corrente pulsada (TOPWELL, 2016.)	45
Figura 45: <i>TIG</i> com controle automático da voltagem (AVC) - (ESAB (2), 2013.)	46
Figura 46: <i>TIG</i> : metal de adição (radial e tangencial) - (SAF, 2014.)	47
Figura 47: Trajetórias de Tecimento na soldagem (Scotti, 1991.)	48
Figura 48: <i>TIG</i> – oscilação eletromagnética do arco (Larquer, <i>et al</i> - 2016.)	49
Figura 49: <i>TIG</i> – arame quente (“hot wire”), adaptado de Lucas (2), 1990.	53

Figura 50: <i>TIG</i> – tocha duplo arame (Lucas (1), 1994.)	54
Figura 51: <i>TIG</i> – gases de proteção (Moyer, <i>et al</i> , 2010).	55
Figura 52: Característica estática na soldagem <i>TIG</i> , com diferentes % de hidrogênio no gás de proteção (argônio; DEP = 4 mm; CC-) (Tusek, <i>et al</i> , 2000.)	56
Figura 53: Tensão do arco utilizando soldagem <i>TIG</i> , com diferentes gases de proteção (Ar, diferentes %H + Ar, He; DEP = 3 mm; CC-), Schwedersky (1), 2011... ..	56
Figura 54: Área da seção transversal do cordão em função do % de Hidrogênio na soldagem <i>TIG</i> , com diferentes % de hidrogênio no gás de proteção (argônio) - (Hooijmans, 1994.)	57
Figura 55: Efeito do % de H ₂ no argônio para diferentes níveis de corrente na quantidade de metal fundido para o processo <i>TIG</i> (aço inox 18/8; DEP= 3,5mm; V _s =0,3 m/min; CC- (Tusek, <i>et al</i> , 2000.)	58
Figura 56: Quantidade de metal fundido para soldagem <i>TIG</i> em função de diferentes gases de proteção – DEP=3mm, (Schwedersky (1), 2011.)	58
Figura 57: Seções transversais dos cordões cortados a 100 mm do início da soldagem (Schwedersky (1), 2011.)	58
Figura 58: Seções transversais dos cordões cortados a 150 mm do início da soldagem (Schwedersky (1), 2011.)	58
Figura 59: Perfil de penetração plotado a partir da média dos valores de penetração e largura dos cordões, para diversas condições de soldagem (corrente e gases de proteção), adaptado de Schwedersky (1), 2011.	59
Figura 60: Variação percentual média (entre as 3 condições de corrente) da largura do cordão para soldagem <i>TIG</i> em função de diferentes gases de proteção – DEP=3mm, adaptado de Schwedersky (1), 2011.	59
Figura 61: Variação percentual média (entre as 3 condições de corrente) da penetração do cordão para soldagem <i>TIG</i> em função de diferentes gases de proteção – DEP=3mm, adaptado de Schwedersky (1), 2011.	59
Figura 62: <i>TIG</i> - extensores de proteção gasosa (“ <i>trailing gas</i> ”) – (HFT, 2016.)	60
Figura 63: Manipuladores de Soldagem, adaptado de SENAI-SP, 1997.	62
Figura 64: Soldagem <i>TIG</i> com Câmera de Vídeo (“ <i>visioarc</i> ”), adaptado de (SAF, 2014.)	63
Figura 65: Soldagem com robô, adaptado de POWERMIG, 2016.	64
Figura 66: Recursos utilizados na Soldagem (SAF, 2014.)	66

Figura 67: Tocha “HOTWIRE”, pelo autor.	67
Figura 68: Equipamentos de Manipulação (NETSU), pelo autor.	67
Figura 69: Macrografia de um cordão de solda, pelo autor.	69
Figura 70: <i>VIRTUAL MACRO</i> - Definição das linhas e áreas, pelo autor.	71
Figura 71: <i>VIRTUAL MACRO</i> – Linhas de tendência e suas equações, pelo autor..	72
Figura 72: <i>VIRTUAL MACRO</i> –Linhas e Áreas a serem mensuradas, pelo autor. ..	73
Figura 73: Plano de revestimento [a] e Plano de amostragem [b], pelo autor.	78
Figura 74: Visão geral do <i>VISUAL MACRO</i> , pelo autor.	81
Figura 75: Campo de informações gerais do <i>VISUAL MACRO</i> , pelo autor.	82
Figura 76: Grade cartesiana do <i>VISUAL MACRO</i> , pelo autor.	83
Figura 77: “Zoom” aplicado à Grade cartesiana do <i>VISUAL MACRO</i> , pelo autor. ...	84
Figura 78: Cálculo de áreas do <i>VISUAL MACRO</i> , pelo autor.	84
Figura 79: Causa e efeito das variáveis primárias de soldagem (Modenesi, 2007.).	86
Figura 80: Diagrama de apresentação dos experimentos, pelo autor.	87
Figura 81: Morfologia dos cordões de solda do Grupo I, com tensão (T) e velocidade de soldagem (V_s) fixas, corrente (I) e velocidade de alimentação (V_A) variáveis, e avaliados com o <i>VISUAL MACRO</i> , pelo autor.	88
Figura 82: Morfologia dos cordões de solda do Grupo II, com tensão (T) e velocidade de alimentação (V_A) fixas, corrente (I) e velocidade de soldagem (V_s) variáveis, e avaliados com o <i>VISUAL MACRO</i> , pelo autor.	89
Figura 83: Modelo de Gráficos e Análise Sintética, pelo autor.	91
Figura 84: Largura do cordão [w] em função dos parâmetros de solda, pelo autor...	92
Figura 85: Altura do cordão [r] em função dos parâmetros de solda, pelo autor. ...	94
Figura 86: Área de Deposição [S_D] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.	96
Figura 87: Área de Penetração [S_F] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.	98
Figura 88: Penetração [p] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.	99
Figura 89: Comparações entre as Penetrações [p] obtidas, pelo autor.	100
Figura 90: Diluição [D] em função dos parâmetros de soldagem, pelo autor.	101
Figura 91: Resultados da diluição em trabalho similar (Deitos, 2016).	103
Figura 92: Taxa de deposição [T_{DS}] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.	104

Figura 93: Experimento C1, pelo autor.	108
Figura 94: Experimento C2, pelo autor.	108
Figura 95: Equipamento de soldagem: [a] lança, tocha, bobina, hotwire e câmera, [b] carro de movimentos combinados (rotação e translação), [c] visão lateral da tocha, pelo autor.	109
Figura 96: Equipamento de soldagem: [a] vista frontal da montagem; [b] visão posterior da soldagem, a partir da lança de sustentação; [c] vista frontal da soldagem, pelo autor.	109
Figura 97: [a] Painel de controle, [b] detalhe do arame quente saindo da tocha “hot-wire” e [c] execução da soldagem de revestimento	110
Figura 98: Visão durante a soldagem da deflexão do arco elétrico como resultado da polaridade controlada sobre a bobina de indução: [a] arco defletido para a esquerda; [b] arco sem deflexão; arco defletido para a direita.	110
Figura 99: Experimentos C1 e C2, pelo autor.	111
Figura 100: Considerações sobre a geometria e número de camadas para cordão isolado e cordões justapostos, pelo autor.	112
Figura 101: Visão geral do aplicativo <i>VIRTUAL MACRO</i> - revestimento helicoidal de tubo utilizando “GTAW – arco oscilante + gás Ar com 5% H ₂ + hot-wire”.	116
Figura 102: Grade cartesiana de processamento do aplicativo <i>VIRTUAL MACRO</i> para o revestimento helicoidal da superfície interna de um tubo de aço, pelo autor.	117
Figura 103: Detalhe ampliado da região de avaliação (4º cordão), pelo autor.	117
Figura 104: Resultados comparativos - diluição obtidas em diversos trabalhos.	120
Figura 105: Resultados comparativos - taxa de deposição em diversos trabalhos.	120
Figura 106: Ensaio Metalográficos, pelo autor.	122
Figura 107: Caracterização do MB, ZTA e MS e plano para dureza.	122
Figura 108: Micrografia do Revestimento – MB, pelo autor.	123
Figura 109: Micrografia do Revestimento – ZTA, pelo autor.	123
Figura 110: Micrografia do revestimento F – ZPD, pelo autor.	124
Figura 111: Micrografia do revestimento F – MS, pelo autor.	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aços para tubos API 5L – Graus X52 a X120 (API 5L, 2008)	26
Tabela 2: Composição química da liga <i>UNS N06625</i> (ASTM B446, 2014).	30
Tabela 3: Microestruturas, fases e efeitos dos elementos nas ligas de Ni (Mankins, <i>et al</i> , 1990. e Stoloff, 1990.	31
Tabela 4: Propriedades Mecânicas da liga <i>UNS N06625</i> , (ASTM B446, 2014).	33
Tabela 5: Seleção do eletrodo <i>TIG</i> , adaptado de INFOSOLDA, 2016.	39
Tabela 6: Tipos de corrente e seus efeitos para <i>TIG</i> , (ESAB (1), 2014.)	44
Tabela 7: Composição química do metal de base (Laboratório TORC-RJ)	65
Tabela 8: Composição Química do arame de solda ER NiCrMo-3	65
Tabela 9: Plano de amostragem.	76
Tabela 10: Resultados dos experimentos de soldagem	106
Tabela 11: Resultados da seleção pelo Método Taguchi	107
Tabela 12: Efeitos de I , V_A e V_s sobre as variáveis de resposta.....	113
Tabela 13: Composição química do revestimento (Laboratório TORC-RJ)	121
Tabela 14: Durezas (HV): MB – ZTA – ZPD – MS	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

A - amplitude

ANSI - *American National Standards Institute*

API - *American Petroleum Institute*

Ar - argônio (gas)

ARBL - Alta Resistência Baixa Liga

AVC - *Automatic Voltage Control*

AWS - *American Welding Society*

CA - Corrente Alternada

CAD - computer aided design (Desenho Assistido por Computador)

CAM - *computer-aided manufacturing* (Manufatura Assistida por Computador)

CC - Corrente Contínua

CC- - Corrente Contínua Negativa

CC+ - Corrente Contínua Positiva

CCC - Cúbica de Face Centrada

CFC - Cúbica de Face Centrada
CF-TIG - *cathode focussed TIG*
CIM - Célula Integrada à Manufatura
CNC - Comando Numérico Computadorizado
CO₂ - Dióxido de Carbono (ou anidrido carbônico)
C_p - calor específico do arame
CRA - *Corrosion Resistance Alloy*
Cr_{eq} – *Cromo Equivalente*
CVD - *Chemical Vapor Deposition*
D - diâmetro do arame
D - diluição %
DEP - Distância Eletrodo-Peça
f - frequência
GMAW - *Gas Metal Arc Welding*
GTAW - *Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*
H₂ - Hidrogênio (gas)
H₂S - Ácido Sulfídrico
He - Hélio (gas)
HSLA - *High Strenght Low Alloy*
i - corrente elétrica
L - comprimento do arame sob influência
LBW - *Laser Bean Welding*
LCC - laminação controlada convencional
LE - Limite de Escoamento
LR - Limite de Resistência
MAG - *Metal Active Gas*
MB - Metal de Base
MIG - Metal Inert Gas
Ni_{eq} - Niquel Equivalente
MS - Metal de Solda
N₂ - Nitrogênio (gas)
P - penetração da solda
PAW - *Plasma Arc Welding*

PREN - *Pitting Resistance Equivalent Number*
PSL – *Product Specification Level*
PVD - *Physical Vapor Deposition*
r - altura do reforço de solda
R - resistência elétrica
r/w - razão reforço/largura
RA - resfriamento acelerado
S - área da seção transversal do arame
SAW - *Submerged Arc Welding*
SCC - *Stress Corrosion Cracking*
t_{PL} - tempo de parada lateral
TCC - Tetragonal de Corpo Centrado
TCP - Fases Topologicamente Compactas
TIG - *Tungsten Inert Gas.*
TMCP - *Thermo-Mechanical Controlled Processing*
TTT - Transformação Temperatura-Tempo
V - tensão
V_c - velocidade combinada
V_o - velocidade de oscilação
V_s - velocidade de soldagem
W - largura do cordão de solda
ZF - Zona de fusão
ZPD - Zonas Parcialmente Diluídas
ZTA - Zonas Termicamente Afetadas (ZTA)
 δ - densidade do arame (***Kg/m³***)
 ΔT - variação da temperatura do arame
 ρ - resistividade do material
v - velocidade do arame (***m/s***)
 \dot{Q}_t – fluxo de energia devido a diferença de temperatura (calor sensível)
 \dot{Q}_t – fluxo de energia devido ao efeito Joule (resistência elétrica)
 \dot{m} - fluxo de massa

RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é inserido no contexto do desenvolvimento de tecnologias de soldagem de alta produtividade e de baixa taxa de diluição para aplicação em aço carbono ARBL (API 5L X65) usando revestimento com a liga resistente a corrosão Inconel 625 (weld overlay). Foi utilizado o processo *TIG* mecanizado, potencializado com um conjunto de variantes tecnológicas, destacando-se, a oscilação eletromagnética do arco elétrico, o uso de gases de proteção aditivados ($\text{Ar}+5\%\text{H}_2$) e a inserção de arame quente na poça de fusão. A técnica de soldagem aplicada opera com alto fluxo de energia do arco elétrico, mas também com grande área de contato, resultando em uma baixa potência específica ou baixa densidade superficial. Esta técnica permite incrementar a taxa de deposição e reduzir a taxa de diluição. Para se conhecer o efeito das variáveis de entrada (corrente, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem), foi desenvolvido o aplicativo *VIRTUAL MACRO* que se mostrou adequado para mensurar a geometria do cordão de solda (largura, altura, área de deposição, área de penetração, diluição e taxa de deposição). Um conjunto de amostras foi produzido para determinar o efeito dos parâmetros de soldagem, de forma a melhor atender às prerrogativas de baixa diluição com alta taxa de deposição. Numa primeira etapa, utilizando-se somente duas variantes (oscilação eletromagnética e gases de proteção aditivados), processou-se os resultados utilizando o *VIRTUAL MACRO*, os quais foram interpretados pelo método de Taguchi. Foi possível obter diluição menor que 10% e taxa de deposição maior que 3,5 kg / h. Observou-se que a velocidade de alimentação do arame é que principalmente contribui para o duplo objetivo (baixa diluição e alta taxa de deposição). Levando-se em consideração as correlações de causa e efeito e os parâmetros de soldagem aplicados na etapa anterior, foi acrescentada uma terceira variante (“*hot-wire*”), realizando-se o revestimento interno de um tubo de aço carbono. Concluiu-se que a aplicação integrada das três variantes tecnológicas, incrementou a taxa de deposição em mais de 25%, atingindo-se o patamar de 4,7 kg/h, bastante superior aos indicados na literatura e reduziu-se a diluição para o patamar de 8%.

ABSTRACT

The general purpose of this work is inserted in the context of the development of high productivity and low dilution rate welding technologies for application in HSLA carbon steel (API 5L X65) using Inconel 625 corrosion resistance alloy clad (weld overlay). It was used the mechanized *TIG* process, potentiated with a set of technological variants, highlighting, the electromagnetic oscillation of the electric arc, the use of potentialized protection gases (Ar + 5% H₂) and the insertion of hot wire in the fusion pool. The applied welding technique operates with high energy flow of the electric arc, but also with large contact area, resulting in a low specific power or low surface density. This technique allows to increase the deposition rate and reduce the dilution rate. In order to know the effect of the input variables (current, feed velocity and welding speed), the *VIRTUAL MACRO* software application was developed, which was adequate to measure the weld bead geometry (width, height, deposition area, penetration, dilution and rate of deposition). In a first step, using only two variants (electromagnetic oscillation and potentialized shielding gases), the results were processed using the *VIRTUAL MACRO*, which were interpreted by the Taguchi method. It was possible to obtain a dilution of less than 10% and a deposition rate of more than 3.5 kg / h. It was observed that the feed rate of the wire is mainly contributing to the double objective (low dilution and high deposition rate). Taking into account the cause and effect correlations and the welding parameters applied in the previous step, a third variant (hot-wire) was added to welding the inner coating of a carbon steel tube. It was concluded that the integrated application of the three technological variants increased the deposition rate by more than 25%, reaching a level of 4.7 kg / h, much higher than those indicated in the literature and reducing the dilution to the level of 8%.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A maior parte das reservas brasileiras de petróleo está em campos marítimos. O advento da descoberta do “*pré-sal*” tem levado as nossas atividades de exploração a atingirem profundidades cada vez maiores (Figura 1). Atuar na metalurgia dos materiais empregados neste cenário de águas ultra profundas é uma área estratégica, no sentido de estender os limites de projeto da engenharia (tubos e equipamentos), quer seja no campo da resistência mecânica, quer seja no da resistência à corrosão.

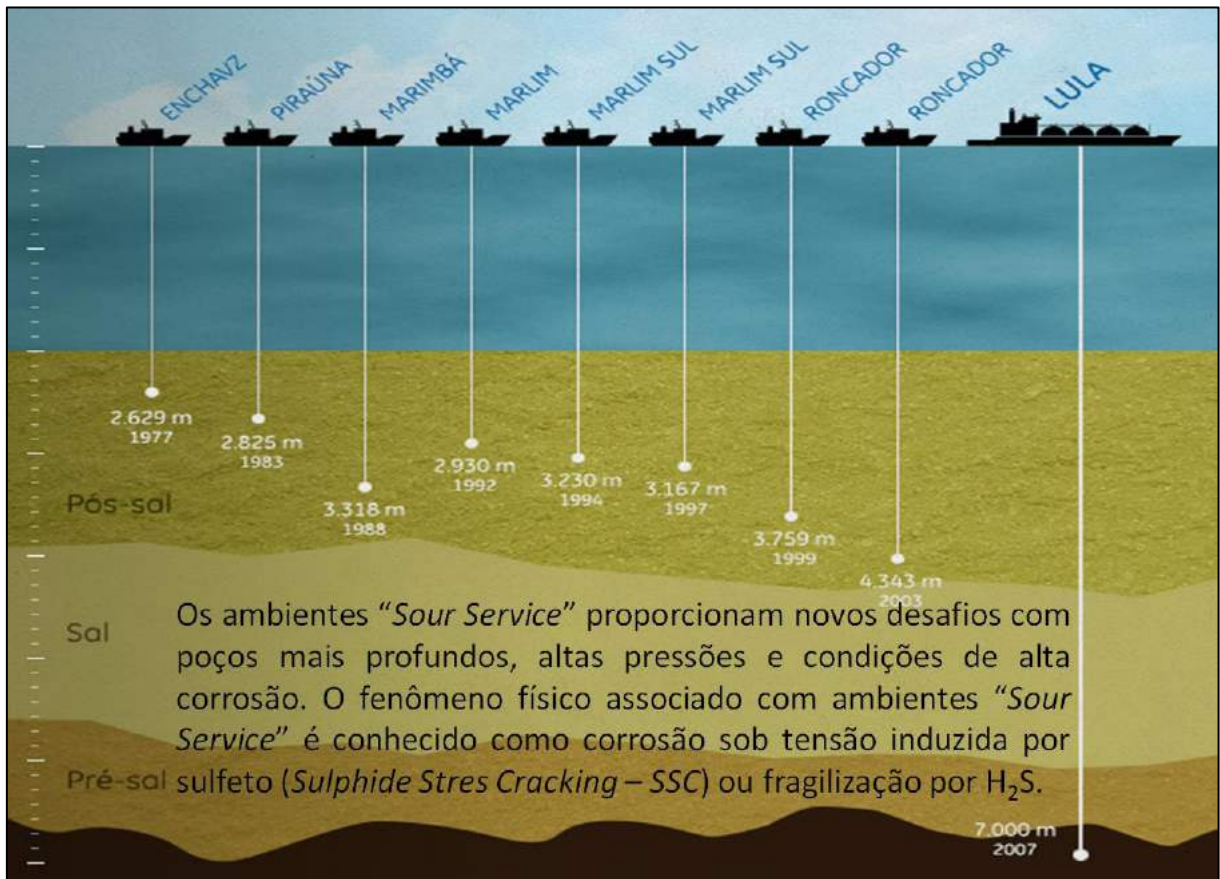


Figura 1. Evolução da exploração de petróleo no Brasil, adaptado de GE Reports, 2014.

Revestimento por soldagem pertence hoje à ciência denominada “Engenharia de Superfície”, a qual trata da aplicação de tecnologia, tradicional ou inovadora, para modificar as propriedades de componentes e materiais, criando um novo material composto, que combinem as características desejáveis da superfície com outras, inerentes do material de base, numa mesma peça, tornando-se uma ferramenta valiosa para alcançar esses objetivos, facilitando a seleção de materiais ideais, viabilizando economicamente e criando produtos inovadores. (SEAC SIC, 2014. e ASM #06835G, 2001).

Para novos projetos, há uma variedade de tipos de combinações de materiais e processos de fabricação (Figura 2), para atender a maioria dos componentes de aço, sendo esta uma opção comprovada para sistemas de produção corrosivos.

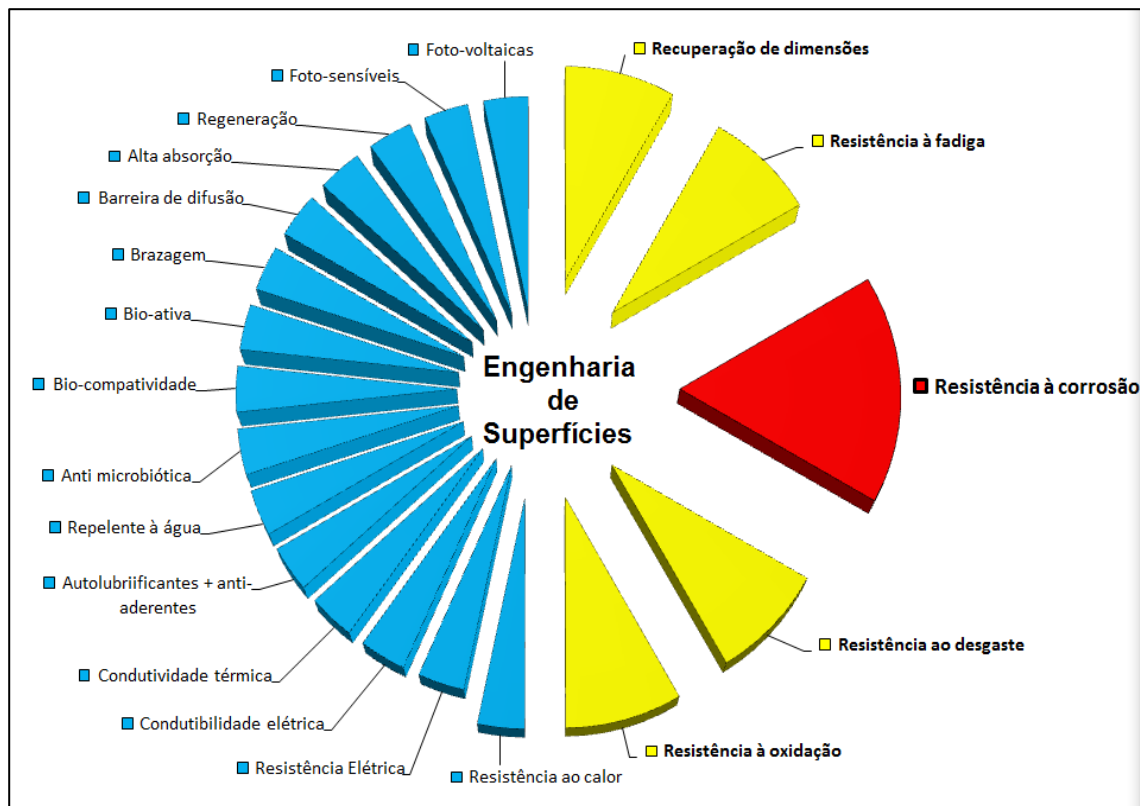


Figura 2. Engenharia de Superfícies – aplicações (SEAC SIC, 2014.)

As propriedades do metal de base e do revestimento dependem da composição química e da microestrutura obtida, influenciadas, por sua vez, pelos parâmetros do processo de deposição e pela composição do metal de adição e do metal de base. (TWI (1), 2016.)

Neste contexto, os revestimentos de aços com ligas de alta resistência à corrosão, são algumas das mais adequadas técnicas para se obter tais compósitos. (Davis (2), 1994).

Os recentes desenvolvimentos dos aços ARBL (alta resistência e baixa liga) potencializaram as propriedades mecânicas dos materiais de base de baixo custo, que revestidos com ligas de níquel, altamente resistente à corrosão, constituíram uma atraente solução que está sendo cada vez mais utilizada na indústria de produção de petróleo e gás em um ambiente que envolva tensões dinâmicas, alta pressão e corrosão naftênica em temperaturas altas ou corrosão por cloretos e compostos de enxofre, ou ainda, corrosão em “sour service” (H₂S e CO₂) em baixas temperaturas.

Frequentemente, revestimentos com liga de níquel do tipo *Inconel 625* são utilizados para proteger a superfície de componentes de aço carbono, e mais recentemente, tem se tornado uma das soluções mais viáveis na indústria de petróleo e gás, especialmente devido a sua tenacidade aliada a elevada resistência a corrosão. (Lippold, *et al*, 2011.)

O revestimento por soldagem (*“weld overlay”*) é, portanto, um processo onde uma camada de uma liga metálica é depositada sobre uma base metálica diferente (soldagem dissimilar), com o objetivo de obter propriedades, em geral, mecânicas e químicas, e dimensões desejadas, podendo se definir como principal resultado, a criação de superfícies com características especiais. Estes revestimentos de solda, comumente chamados de *“cladding”*, com espessura variando entre 2 e 20 mm, podem ser obtidos utilizando-se uma variedade de processos de soldagem. (Smith, 2012.)

O grande desafio tecnológico é se obter a união metalúrgica das duas ligas, com **alta produtividade** (alta taxa de deposição), mas, de forma antagônica, se obter a **mínima diluição**, através de mínimo aporte térmico, preservando-se conjuntamente as características físico-químicas do revestimento e as propriedades mecânicas do metal de base. (TWI (2), 2016.)

O processo de soldagem *TIG* caracteriza-se por ser um dos processos de mais fácil controle das variáveis da soldagem, principalmente por permitir um controle independente da fonte de calor e do material de adição, resultando em menor penetração e menor diluição, sem escórias e livre dos respingos, e solda praticamente todos os metais industrialmente utilizados, inclusive metais dissimilares; como desvantagens: taxas de deposição inferiores em relação a outros processos. (Marques, *et al*, 2011.)

Variantes do processo *TIG* são incrementos tecnológicos desenvolvidos nos últimos anos, com base em forte automação, visando aumentar a qualidade e a produtividade deste processo de soldagem. Dentre outras variantes, considerando-se as condicionantes de baixa diluição e alta taxa de deposição, destacam-se: Controle Automático da Voltagem - *AVC* (*“Automatic Voltage Control”*), Oscilação eletromagnética controlada do arco voltaico (*“oscilarc”*), Soldagem com Arame Quente (*“hot-wire”*) e o uso de gases aditivados, notadamente Argônio com Hidrogênio. (Kahlich, 2010) e (Egerland, *et al*, 2015)

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho está inserido no contexto do desenvolvimento de tecnologias de soldagem de alta produtividade, utilizando o processo *TIG* mecanizado, com o uso das variantes tecnológicas citadas abaixo, objetivando explorar as potencialidades destes recursos para fins de revestimentos de aço carbono com a liga *Inconel 625*, através da determinação da influência das variáveis de processo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma ferramenta de análise quantitativa para estimar rapidamente a geometria, a diluição e a taxa de deposição, unicamente a partir de imagens macrográficas da interface característica de soldas dissimilares, usando os recursos do Microsoft Excel.
- Determinar o efeito das variáveis do processo de soldagem, utilizando a ferramenta acima, notadamente a clássica influência da corrente, da voltagem e da velocidade, e estender a compreensão do uso das variantes do processo de soldagem *TIG*, descritas abaixo, mas com o objetivo de correlacionar e obter baixa diluição com alta taxa de deposição.
 - o efeito do tecimento (“*weaving*”), com o uso da variante Oscilação Eletromagnética Controlada do Arco Voltaico (“*oscilarc*”)
 - o efeito do uso de gases aditivados, notadamente Argônio com Hidrogênio,
 - o efeito da variante Soldagem com Arame Quente (“*hot wire*”), mas com objetivo de obter e correlacionar baixa diluição com alta taxa de deposição;
- Avaliar e caracterizar a combinação das variantes acima na produção de revestimentos com foco na mínima diluição e máxima taxa de deposição.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O desenvolvimento deste trabalho de pesquisa sobre REVESTIMENTO DE INCONEL 625 SOBRE AÇO CARBONO UTILIZANDO VARIANTES DO PROCESSO *TIG* VISANDO ALTA PRODUTIVIDADE E BAIXA DILUIÇÃO trará interesses nos seguintes aspectos:

1.2.1 Importância Ambiental

- Redução do risco de acidente ambiental, principalmente na exploração de petróleo em águas profundas, com foco nos riscos associados à corrosão;
- Melhor sustentabilidade ambiental e redução dos custos do ciclo de vida, e consequentemente redução na extração de matérias-primas;

1.2.2 Importância Econômica

- Redução dos custos com matérias-primas, dos custos de instalação, de inspeção e de manutenção, em ambientes críticos, devido à redução de peso e ao aumento do ciclo de vida;
- Economia adicional nos custos operacionais, uma vez que a injeção de inibidor de corrosão não é necessária
- Redução de custos energéticos na produção devido ao aumento de produtividade e qualidade.

1.2.3 Importância Tecnológica

- Identificação de novas rotas e incrementos tecnológicos desenvolvidos nos últimos anos visando aumentar a qualidade, a automação e a produtividade deste processo de soldagem para o aproveitamento de variantes do processo *TIG*:
 - Uso de Gases Inertes aditivados com Hidrogênio
 - Oscilação Eletromagnética (*oscilarc*),
 - Soldagem com Arame Quente (*hot wire*)
- Compreensão dos efeitos combinados destas variantes para se obter uma soldagem com baixa diluição e alta produtividade.
- Colaborar com o desenvolvimento de pesquisas e aplicações de soldagem atualizadas com o estado da arte de equipamentos e recursos atuais.

1.2.4 Importância Científica

- Aprimorar o conhecimento sobre as tecnologias de revestimentos, avaliando e caracterizando propriedades físicas e mecânicas tanto do revestimento, como dos efeitos provocados no metal de base.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIES

Os **revestimentos de soldagem** evoluíram ao longo do tempo e são importantes processos para assegurar melhor sustentabilidade ambiental e redução dos custos de ciclo de vida na indústria atual.

Pertencem hoje à “ciência” denominada “Engenharia de Superfície”, tornando-se uma ferramenta valiosa para alcançar esses objetivos, facilitando a seleção de materiais ideais e design de produtos inovadores. A Engenharia de Superfície abrange uma ampla gama de processos, mas nem todos podem ser classificados propriamente como soldagem. (SEAC SIC, 2014.)

A engenharia de superfícies consiste em desenvolver e aplicar processos que confirmam a uma determinada peça ou componente as propriedades desejadas por meio do controle das características de sua superfície. A engenharia de superfícies trata da aplicação de tecnologia, tradicional ou inovadora, para modificar as propriedades de componentes e materiais, criando um novo material composto que combina as características desejáveis da superfície e do material de base numa mesma peça. (ASM #06835G, 2001).

Para tubos de aço, uma classificação típica com relação aos tipos de revestimentos, conforme Figura 3, refere-se à forma de ligação entre o substrato e a superfície, separando-se aquelas metalurgicamente ligadas (“*clad*” e “*overlay*”), daquelas mecanicamente ligadas por interferência mecânica (“*lining*”). (Berg, 2009).

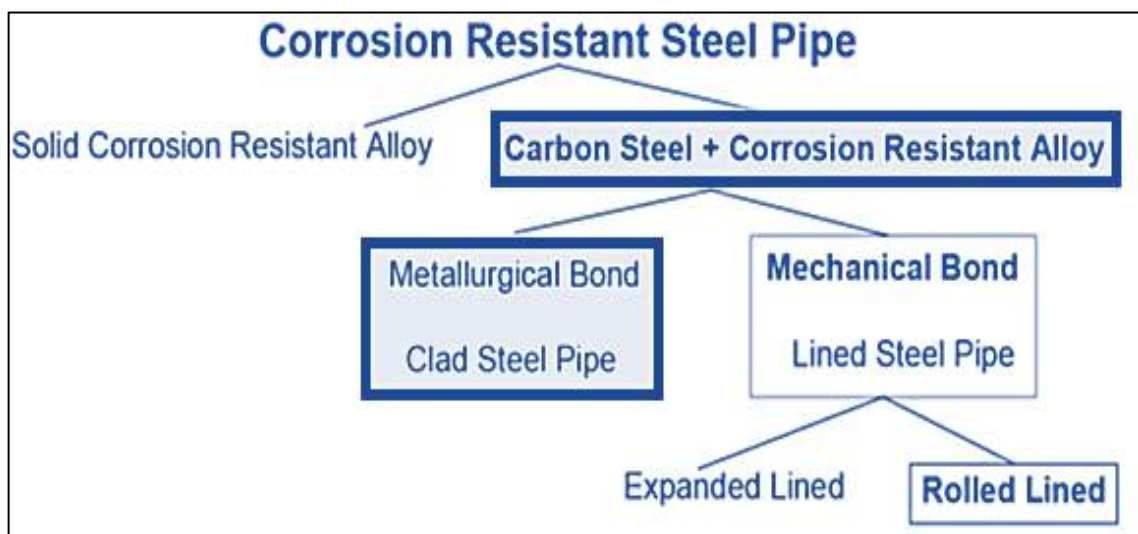


Figura 3. Classificação - tubos de aço resistentes à corrosão. (Berg, 2009).

Entende-se por “substrato” (metal base) + “superfície” (revestimento) como sendo partes de um sistema integrado, motivo pelo qual recomenda-se incluir a engenharia de superfícies desde o início, e projetar o componente, prevendo e incluindo, o tratamento superficial que irá ser aplicado nele. Assim, mediante a engenharia de superfícies é possível, por exemplo, compatibilizar materiais de baixo custo com materiais com propriedades especiais (tais como elevada resistência à fadiga, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, baixo atrito, ou a resposta a determinados estímulos) com meios nos quais sua aplicação direta é inviável. (Bell, 1990).

A Figura 4 mostra que, numa extremidade da escala, encontram-se os processos onde ocorrem espessuras de revestimentos de dimensão iônica, ou seja, que afetam a composição química e as propriedades de apenas uma fina camada, pela modificação da superfície existente a uma profundidade de 0,0001-0,01 mm.

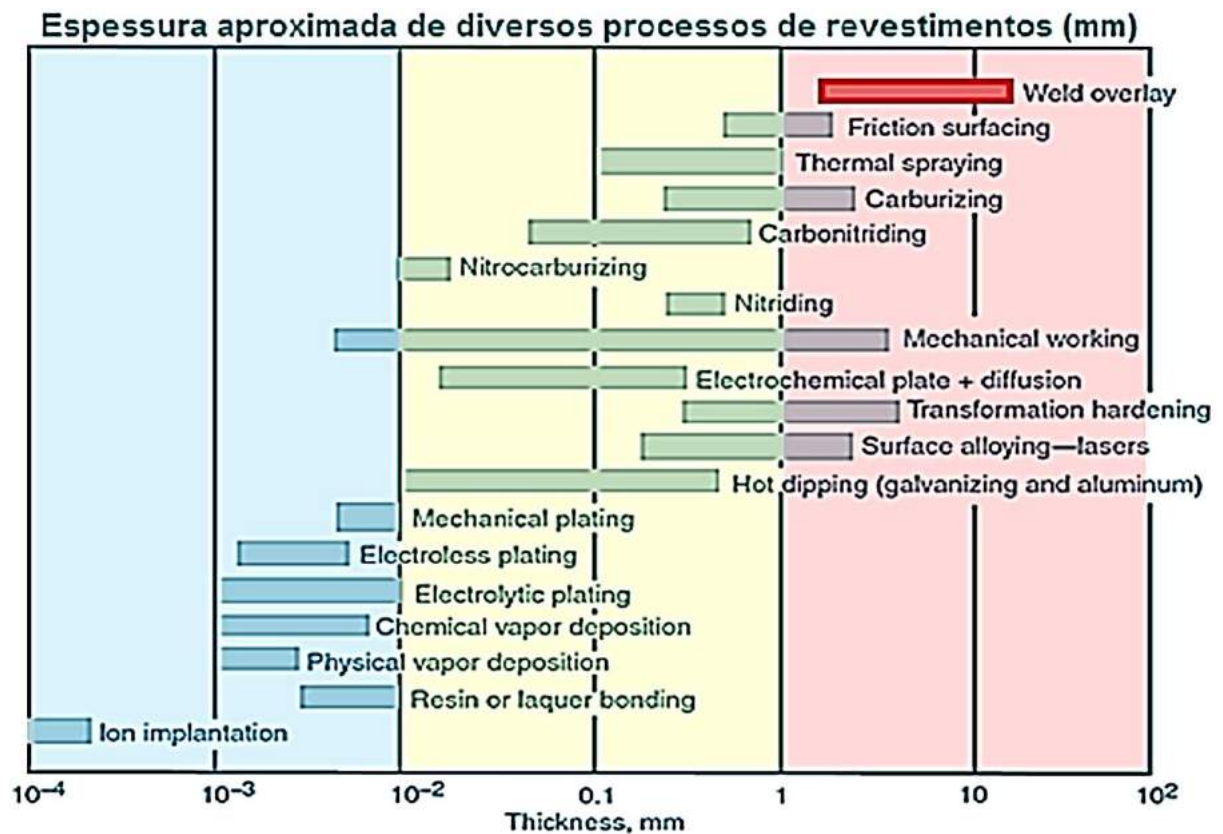


Figura 4. Espessuras obtidas com os revestimentos - (ASM #06835G, 2001).

No outro extremo da escala estão os revestimentos por soldagem (“*weld overlay*”), onde geralmente, espessuras de 1,0 a 20 mm são obtidas nestes processos objetivando a redução do desgaste ou o aumento da resistência à corrosão, ou ainda, a reparação de peças danificadas.

Entre esses dois extremos, no intervalo 0,01 – 1,0 mm, verificam-se processos de deposição, tais como a deposição física de vapor (PVD), deposição de vapor químico (CVD), anodização, processamento laser, projeção térmica, pulverização fria, e métodos de deposição por imersão em líquidos (à frio ou à quente) e outros. (ASM #06835G, 2001).

Restringindo-se aos processos de revestimentos “espessos”, a Figura 5 classifica os processos segundo uma outra ótica, com nítida ênfase na natureza dos processos de soldagem.

Os processos do grupo A apresentam como característica comum o conceito de soldagem no estado sólido (pressão e temperatura são variáveis essenciais). Requerem altos investimentos e destinam-se a produção intensiva de matérias primas (chapas e tubos cladeados), para posteriormente serem utilizados na fabricação de equipamentos e componentes.

Os processos do grupo B, apresentam como característica comum o conceito de soldagem por fusão a partir do arco elétrico. Requerem investimentos menores, e destinam-se a produção de componentes menores, mas ainda são aplicados em revestimentos de tubos de aço.

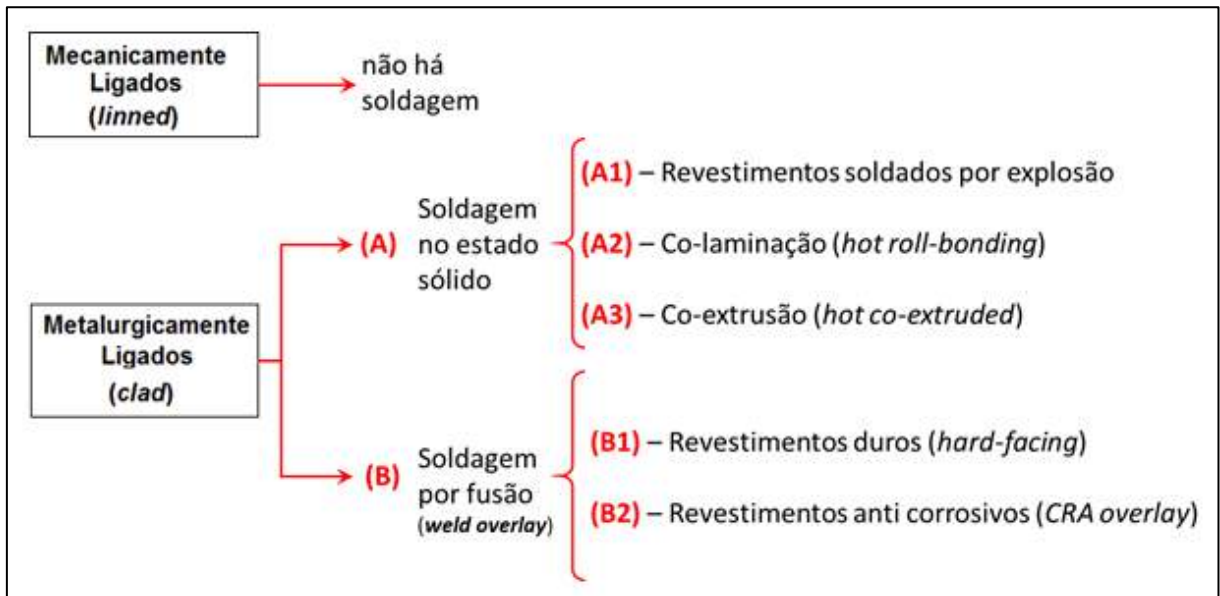


Figura 5. Classificação dos Revestimentos (pelo autor)

A seleção do tipo de revestimento e do método de deposição mais adequados requer uma compreensão dos requisitos operacionais, juntamente com os métodos de aplicação e de considerações sobre os custos de fabricação.

2.2 PRINCIPAIS REVESTIMENTOS (LIGAÇÃO METALÚRGICA)

2.2.1 Revestimento soldados por explosão

O processo de soldagem por explosão utiliza a energia de uma explosão para criar a união (soldagem em estado sólido) entre os metais. O processo é mais comumente utilizado para revestir aço com uma camada de uma liga de metal resistente à corrosão, tais como aço inoxidável, latão, níquel, prata, titânio, cobre e zircônio. Destacam que mais de 260 pares de metais são possíveis. (Smith, 2012.)

A explosão, vista na Figura 6, à esquerda, é detonada a partir de um bordo da placa de revestimento e propaga-se para a outra extremidade a uma velocidade uniforme, o que resulta em uma colisão de alta pressão dos metais. No canto superior da mesma figura, é apresentada a macrografia da interface da solda destacando o formato ondular da interface. Óxidos e impurezas são expulsos, deixando as superfícies das placas metalurgicamente limpas e criando uma ligação metalúrgica entre os dois metais, conforme destacado na ampliação. O folheado recém-formado é desempenado e pode ser laminado para folheados mais finos. Embora a explosão gere calor intenso, não há tempo suficiente para que o calor seja transferido para os metais, por isso não há aumento significativo na temperatura dos metais. Também não existem quaisquer alterações significativas nas características dos metais componentes. Contudo, o endurecimento da interface por deformação mecânica pode demandar tratamento térmico posterior. Em geral, o processo de revestimento cria uma solda dúctil e de alta resistência sobre a superfície inteira. (Pauly, 2012.)

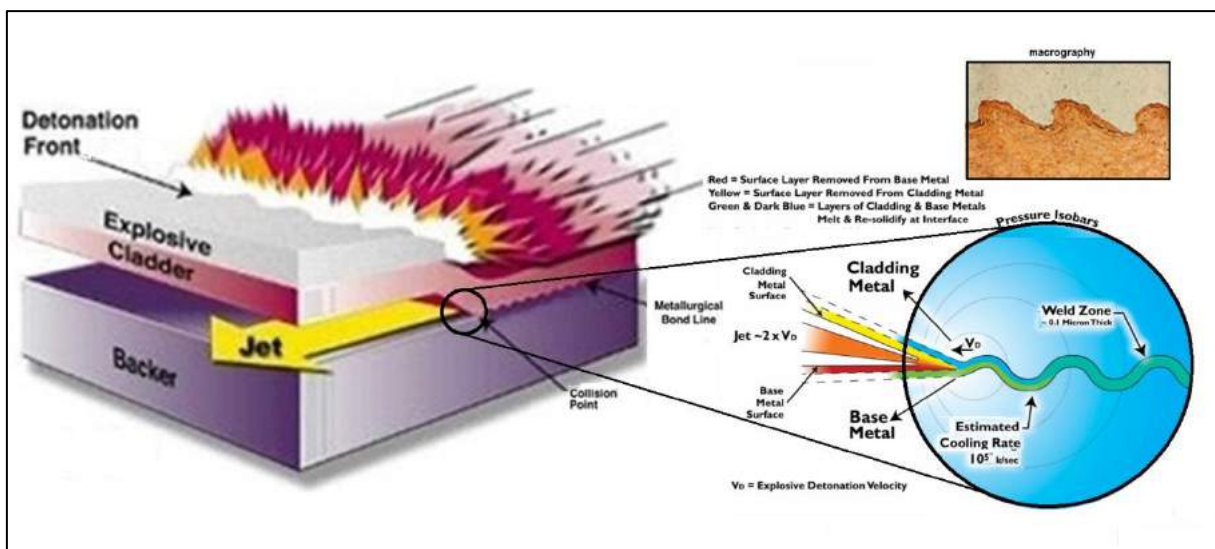


Figura 6. Revestimento soldados por explosão (Pauly, 2012.)

2.2.2 Revestimento por co-laminação à quente

Co-laminação à quente (“*hot roll-bonding*”) é um método de produção de “chapas cladeadas” através da laminação conjunta de dois pacotes espelhados de chapas, separados por uma película isolante (base + liga de revestimento + isolante + liga de revestimento + base). A Figura 7 ilustra as etapas deste processo. O processo se inicia pela limpeza das superfícies a serem unidas, que após montadas, tem suas bordas soldadas. Em seguida é extraído o ar através de vácuo. A soldagem, em estado sólido, entre as placas é obtida pelo aquecimento do sanduiche de placas, seguida da laminação a quente e do tratamento térmico. A bordas soldadas são então cortadas e o par de chapas cladeadas é em seguida separado. A formação da ligação metalúrgica (“*bonded surface*”) em chapas colaminadas depende da difusão entre a liga do revestimento e do material de base. (VOESTALPINE, 2016.)

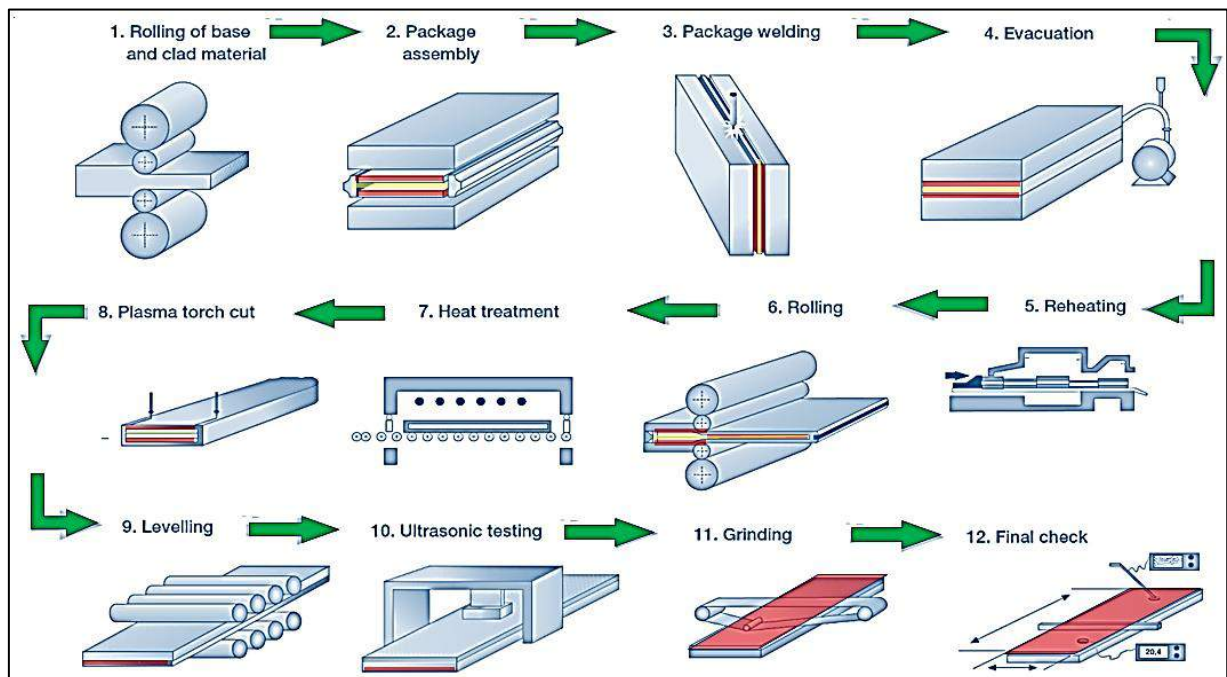


Figura 7. Revestimento por co-laminação à quente. (VOESTALPINE, 2016.)

Este processo responde por mais de 90% da produção de chapa cladeadas em todo o mundo (~ 130.000 ton / ano). Chapas cladeadas típicas são combinações de aço carbono com aço inoxidável, ligas de níquel, ligas de cobre, etc. Chapas cladeadas de aço carbono com ligas de alumínio também são obtidas, mas deve ser tomado cuidado para que compostos intermetálicos frágeis não se formem. Algumas combinações podem resultar em endurecimento por precipitação de fases intermetálicas ou de carbonetos na interface. (Smith, 2012.)

2.2.3 Revestimento por co-extrusão à quente

Esta técnica utiliza tecnologia de altíssimas pressões para preparar “billets” tubulares concêntricos que, após serem extrudados à quente, formam uma interface de ligação de difusão muito fina, mas extremamente forte entre o tubo interno (“inner pipe”) e tubo de externo (“host pipe”). A Figura 8 ilustra três etapas fundamentais deste processo. (SCHULZ, 2016.)

- Montagem – Um tubo da liga metálica “A” é montado à frio dentro de outro tubo da liga metálica “B”. A montagem é realizada hidráulicamente para se obter um ajuste extremamente apertado e com alto grau de interferência mecânica.
- Aquecimento - O “billet” composto montado é então aquecido até a temperatura de extrusão sob condições controladas para evitar uma separação dos dois componentes. Esta prática controlada impede a oxidação da interface que iria interferir com o mecanismo de ligação por difusão.
- Co-extrusão - O lingote composto quente é então extrudado para as dimensões finais. A ligação metalúrgica, uma soldagem no estado sólido, é obtida por efeito da pressão e temperatura durante a extrusão.

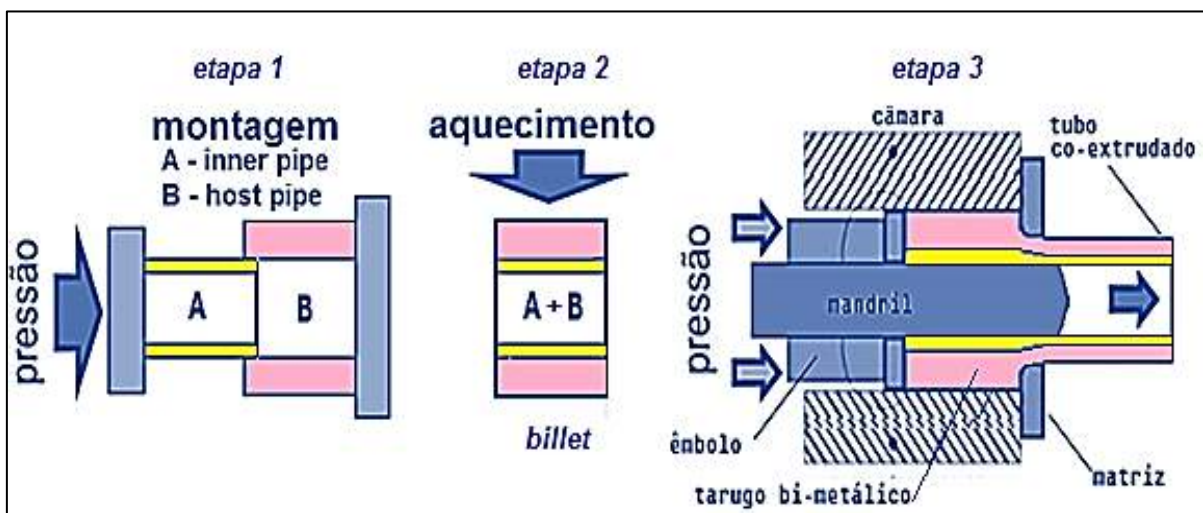


Figura 8. Revestimento por co-extrusão à quente (SCHULZ, 2016.)

O tubo sem costura feito por estas rotas de produção é mais susceptível a apresentar uma falta de concentricidade e variação na espessura da camada de revestimento resultando na necessidade de maior tolerância na circularidade. (Smith, 2012.)

2.2.4 Revestimento por soldagem (“weld overlay”)

De um modo geral, os revestimentos caracterizam-se por soldagem de ligas dissimilares, ou seja, se referem à união de dois sistemas de ligas (substrato + revestimento) com composições químicas, fases metalúrgicas e propriedades significativamente diferentes, para atenderem a propósitos e finalidades definidas – por exemplo – preservar a resistência mecânica do substrato e obter uma camada altamente resistente à corrosão. (Kumar, *et al*, 2010.)

Um primeiro aspecto a ser considerado é a formação das fases oriundas da diluição obtida. O diagrama de Schaeffler (figura 9) permite prever a microestrutura da Zona Fundida com base em sua composição química e não é restrito aos aços inoxidáveis, podendo ser usado também para aços ferríticos e martensíticos. Para utilizá-lo, os equivalentes de Cr e Ni devem ser calculados pela composição química das ligas e a microestrutura é determinada pela leitura direta no diagrama de campo em que o ponto (Cr_{eq} e Ni_{eq}) se localiza. Em aplicações em que as composições dos metais de base e de adição sejam diferentes, o ponto que representa a solda no diagrama estará sobre o segmento de reta entre o metal de base e o metal de adição.

A posição desse ponto no segmento dependerá da diluição da solda, ficando mais próximo do metal de adição para soldas de pequena diluição. A Figura 9 ilustra três diferentes estruturas que poderiam ser obtidas, indicadas pelas setas vermelha (martensita), laranja (austenita + martensita) e amarela (austenita), em função da diluição da liga Inconel 625 em aço baixo carbono.

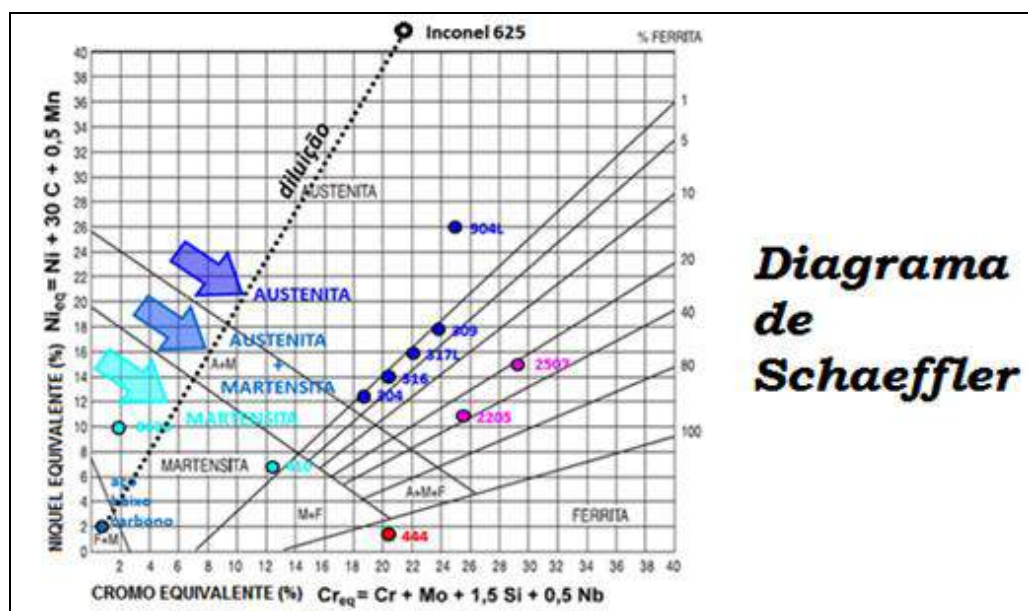


Figura 9. Diagrama de Schaeffler, adaptado de Kejelin, *et al*, 2016

O segundo aspecto, de acordo com Gomes, 2010, é diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem diz respeito a geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, onde é desejável alta penetração (P) para garantir a resistência da junta soldada (Figura 10a), na soldagem de revestimento (Figura 10b), o perfil geométrico desejado se resume a grande largura do cordão (W) e grande altura do reforço (R), baixa penetração (P) e baixo percentual de diluição (D).

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 maior produtividade e economia significativa de material e tempo. (Palani, *et al*, 2007. e Sreeraj, *et al*, 2006.)

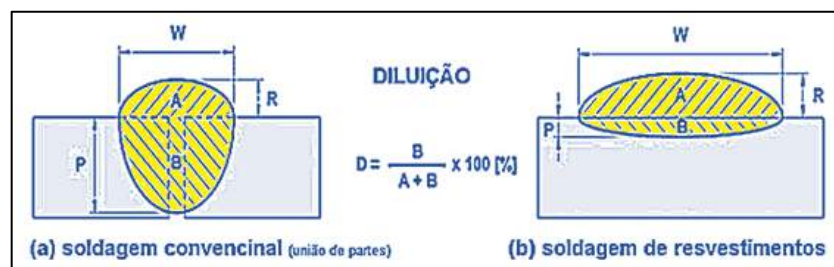


Figura 10. Perfis desejados no cordão de solda. (Gomes, 2010.)

Obter baixa diluição pode implicar em passes de soldagem sobrepostos. Para revestimentos, podemos simplificar o cálculo da diluição como uma função da penetração e do reforço. A Figura 11 mostra esta simplificação considerando penetrações na faixa de 0,2 – 0,5 mm e reforços na faixa de 2 a 5 mm, para um único passe e para dois passes iguais.

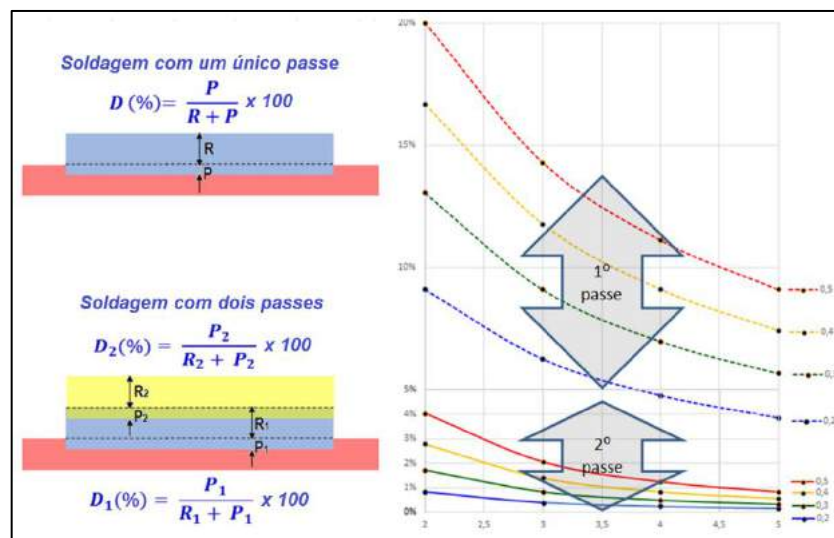


Figura 11. Diluição para um passe e para dois passes sobrepostos iguais.

Como consequência do exposto, um segundo aspecto a ser considerado na soldagem de revestimentos se refere a possíveis defeitos como resultado de uma baixa penetração, tipicamente aqueles relativos à falta de fusão. A Figura 12 evidencia alguns destes possíveis defeitos.

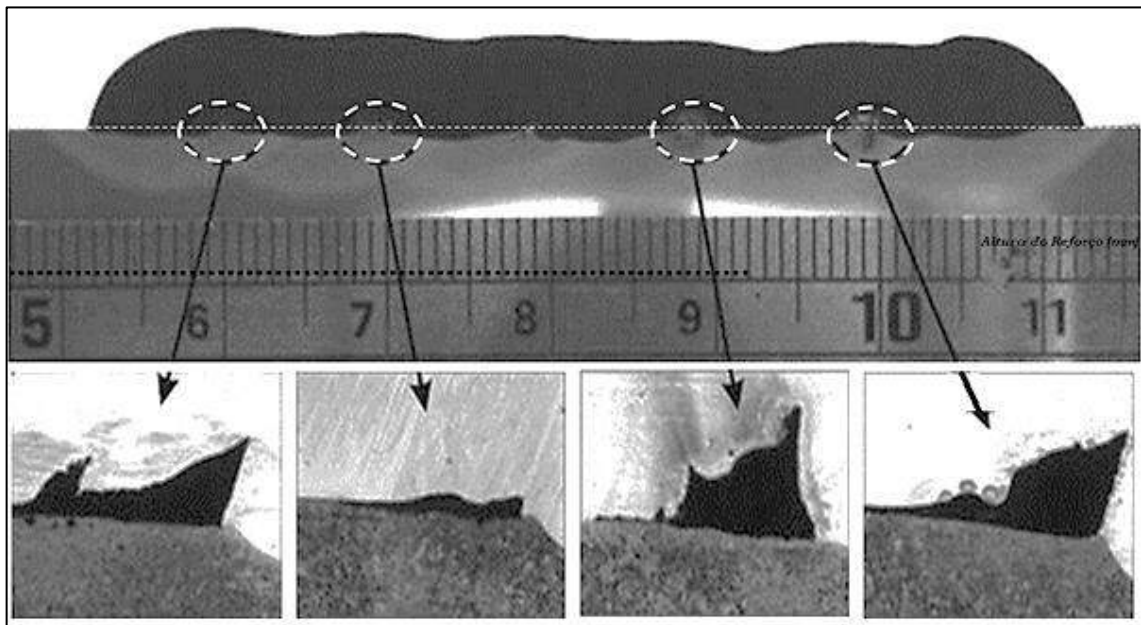


Figura 12. Defeitos na interface de revestimentos (Silva (2), 2010.)

Um terceiro aspecto a ser considerado é que nos revestimentos, onde se buscam significativas diferenças entre as propriedades com o substrato, a interface entre a camada depositada e o substrato é complexa. Uma gama de microestruturas pode ser formada, e frequentemente há um potencial para formar fases deletérias, com propriedades diferentes do revestimento e do substrato. (Silva (2), 2010.)

Três regiões merecem cuidados de serem compreendidas no que se refere as transformações ocorridas após a soldagem:

- Zona de fusão (ZF) com ênfase nas fases formadas, na diluição e nas fases deletérias;
- Zonas Termicamente Afetadas (ZTA) - transformações de fases por efeito do ciclo térmico;
- Zonas Parcialmente Diluídas (ZPD) - interface MB/MS com transformações incompletas, cujas ocorrências são denominadas pela similaridade com acidentes geográficos, como descritos e mostrados na Figura 13;

- a) Praias – faixas finas e estreitas ao longo da linha de fusão.
- b) Baías – áreas parcialmente circundadas pelo metal base.
- c) Ilhas – regiões desprendidas do metal de base inteiramente envolvidas pelo metal de solda.



Figura 13. ZPD - Zonas Parcialmente Diluídas (Doody, 1992)

Próximo à interface da poça de fusão e o substrato sólido, a convecção é enfraquecida, e uma camada liquefeita do substrato, estática ou de fluxo laminar pode ocorrer, e durante a soldagem esta camada do substrato liquefeita pode não se misturar ou misturar-se parcialmente com a liga líquida da poça, gerando zonas parcialmente diluídas (ZPD).

Uma mistura completa na poça de solda, incluindo a interface desta poça com o substrato sólido, é muito improvável. De acordo com a mecânica dos fluidos, a velocidade de deslocamento de um líquido é zero sobre uma parede sólida (condição de contorno de não-deslizamento).

Os revestimentos por soldagem são processos em que uma camada de metal de adição é depositada sobre a superfície metálica com o objetivo de obter propriedades (em geral, mecânicas ou químicas) e dimensões desejadas, podendo se definir como principal aplicação a criação de superfícies com características especiais. Gomes, 2010.

Revestir significa cobrir extensas áreas, portanto a taxa de deposição é a principal variável para se obter produtividade. A Figura 14 apresenta a taxa de deposição em kg/h de diversos processos de soldagem. (Smith, 2012.)

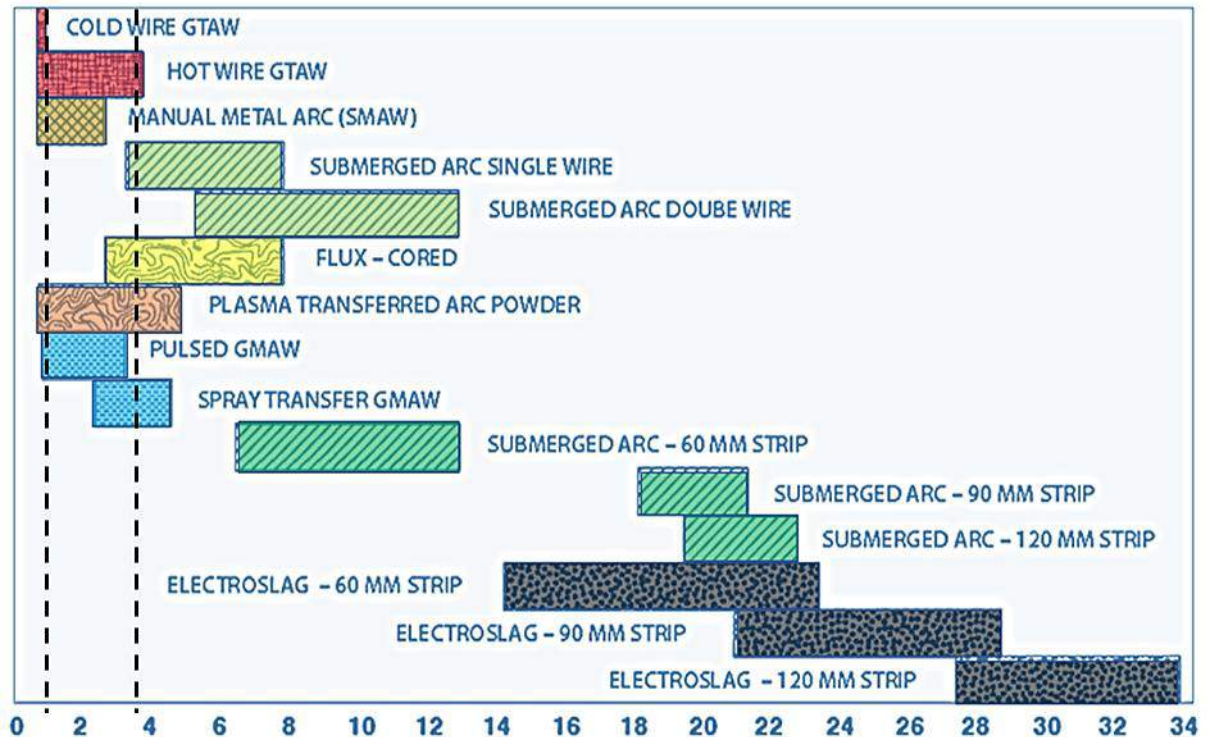


Figura 14. Comparação da taxa de deposição para revestimentos em Kg/h para os diversos processos de soldagem, (Smith, 2012.)

Para áreas muito grandes, a soldagem com arco submerso utilizando fitas ao invés de arames ou técnicas de eletro-escória são geralmente mais econômicas, mas a posição de soldagem pode ser uma limitação. Se o acesso for difícil ou se for necessário soldar em outra posição, como por exemplo, para o revestimento de partes internas de equipamentos ou componentes que não podem ser girados, então as técnicas *GTAW* ou *GMAW* são mais prováveis de serem selecionadas.

Deseja-se obter com o revestimento, propriedades (em geral, mecânicas ou químicas) significativamente diferentes daquelas do substrato, o que requer uma mínima diluição para se atingir esta qualidade desejada, o que, via de regra, se opõe a obter altas taxas de deposição.

Dentre outros, dois grandes campos de aplicação dos revestimentos por solda, destacam-se: revestimento duro (*“hardfacing”*) e revestimentos anti-corrosivos (*“CRA weld overlay”*).

2.2.4.1 Revestimentos duros (*“hardfacing”*)

Revestimento duro é um processo metalúrgico em que material mais duro ou mais resistente é aplicado a um metal de base. Ele é soldado ao material de base,

geralmente utilizando-se eletrodos especiais para soldar a arco ou oxiacetileno. A Figura 15 destaca algumas aplicações típicas.

O revestimento destina-se a prolongar a vida útil dos componentes industriais em serviço severo, preventivamente em novos componentes, ou como parte de um programa de manutenção, resultando em uma economia significativa no tempo de parada de máquinas e custos de produção. (Davis (1), 1993).



Figura 15. Exemplos de revestimento duros (adaptado pelo autor)

A seleção do tipo de soldagem é feita considerando um conjunto de condições que envolvem as condições de serviço do componente e a resposta do desempenho em serviço, destacando-se:

- Processo de soldagem
- Tipo de Metal de adição
- Origem do material de base (laminado, forjado, fundido, etc)
- Nível de dureza desejado
- Propriedade desejável (abrasão, impacto, calor, etc)

Portanto, para cada fenômeno de desgaste (abrasão, corrosão, cavitação, atrito, etc.) procura-se por uma liga de soldagem para proporcionar o objetivo desejado. Extenso trabalho de pesquisa tem resultado no desenvolvimento de uma vasta gama de ligas e procedimentos de soldagem. (Miller, 2005.)

2.2.4.2 Revestimentos anti-corrosivos (“CRA weld overlay”)

Nos revestimentos anti-corrosivos, uma camada relativamente espessa de uma liga metálica é depositada sobre aço carbono ou aço baixa liga com a finalidade de proporcionar uma superfície resistente à corrosão. (CORROSIONPEDIA, 2016).

Devido às soldas de revestimento envolverem grandes superfícies de recobrimento, **processos automáticos, semi-automáticos ou mecanizados** são preferidos, bem como asseguram maior produtividade, controle de processo e repetitividade, para produzir um revestimento com a máxima qualidade.

Uma **atmosfera protetora** da poça de fusão é também requerida, de forma a se evitar uma superfície livre de oxidações, contaminações e escórias, o que poderia comprometer a qualidade ou a resistência à corrosão da camada depositada.

Elevadas taxas de deposição, próprias dos processos de soldagem por arco submerso (“*Submerged Arc Welding – SAW*”) e dos processos *MIG/MAG* (“*Gas Metal Arc Welding – GMAW*”), podem parecer eficientes reduzindo o custo da soldagem, mas uma energia de soldagem alta pode afetar a diluição excessiva do substrato, e por consequência, comprometer a resistência à corrosão. (Marques, *et al*, 2011.)

Processos que utilizam eletrodo não consumível e adicionam o metal de solda diretamente na poça de fusão, permitem o **controle independente entre a energia de soldagem e a taxa de deposição**, o que permite soldar com **menor penetração, mínima diluição e reduzida zona termicamente afetada**. Um dos processos que se caracterizam por fácil controle de menor penetração e menor diluição, é o processo *TIG* (“*Tungsten Inert Gas - TIG*”) ou *GTAW* (“*Gas Tungsten Arc Welding*”). Contudo, o processo *TIG* convencional se caracteriza também por baixa taxa de deposição e baixa produtividade. Processos como soldagem à plasma (“*Plasma Arc Welding – PAW*”) e soldagem à laser (“*Laser Beam Welding - LBW*”) podem também ser considerados similares com relação à estas características de permitir o controle independente entre a energia de soldagem e a taxa de deposição. (Kumar, *et al*, 2010.)

A aparente dicotomia entre “ALTA TAXA DE DEPOSIÇÃO” (produtividade) com “BAIXA DILUIÇÃO” (qualidade) associada à “MÍNIMA ZONA TERMICAMENTE AFETADA”, parece estar sendo equacionada com a combinação de processos e o uso de variantes dos mesmos, de tal forma a potenciarem algumas virtudes de uns, e reduzir os efeitos deletérios de outros. (Schwedersky (1), 2011.)

2.3 SUBSTRATO E REVESTIMENTO

2.3.1 Substrato – aços Alta Resistência Baixa Liga (ARBL)

Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), ou em inglês “*High Strength Low Alloy*” (HSLA), são aços com baixos teores de liga, mas que apresentam elevada resistência mecânica, excelente tenacidade e boa soldabilidade.

Na condição de chapas laminadas apresentam resistência ao escoamento na faixa de 300 a 800 MPa e resistência à tração na faixa de 400 a 900 MPa.

Devido ao baixo teor de carbono apresentam excelente soldabilidade. São classificados pelos níveis de resistência ao escoamento e não pela composição química. (Lemos, 2009.)

Seu desenvolvimento coincide com o desenvolvimento de pesquisas e um melhor conhecimento da relação “microestrutura *versus* propriedades”.

Estes contêm as chamadas **microadições de elementos de liga** como o Nb, Ti e/ou V, que reagem com C e N e formam carbonetos e nitretos ou um complexo destes precipitados, os carbonitretos, que **associados aos processamentos termo-mecânicos** (*em inglês, Thermo-Mechanical Controlled Processing – TMCP*) resultam em uma microestrutura com grãos finos e em uma significativa melhora nas propriedades mecânicas.

A sua produção pode envolver: a) pequenas adições de elementos (Cr, Mo, Nb, Ti e V) formadores de carbonetos e nitretos (microligantes); b) laminação controlada; c) resfriamento controlado; d) controle de forma de inclusões. Os mecanismos de endurecimento utilizados nos aços ARBL incluem: a) refino de grão; b) precipitação; c) subestrutura de discordâncias; d) endurecimento por solução sólida (Ni, P, Si e Cu); e) envelhecimento com deformação. (Perini, 2008.)

Com o advento do uso da soldagem, em substituição ao rebatamento como processo de junção, exigiu a redução do teor de carbono. As falhas, por fratura frágil, de estruturas soldadas resultaram no reconhecimento do fato de que a tenacidade à fratura e ao impacto são propriedades essenciais, e assim tornou-se evidente a necessidade de se obter baixa temperatura de transição “dútil-frágil”.

Também foi evidenciado que a resistência ao escoamento é uma propriedade mais relevante do que a resistência à tração. (Lemos, 2009.)

2.3.1.1 História dos aços ARBL

O desenvolvimento dos aços ARBL é um interessante caso de conjugação de interesses econômicos e tecnológicos. Seu desenvolvimento foi impulsionado pela demanda por aços resistentes, tenazes e soldáveis para tubulações de transporte de óleo e gás, navios e plataformas de perfuração “*off-shore*”. (Leslie, 1981.)

No passado, o teor de carbono dos aços produzidos era em torno de 0,25%, sendo que hoje em dia o teor foi reduzido para valores próximos de 0,05%. Essa redução melhora substancialmente a soldabilidade do aço, mas, em contrapartida, aumenta a razão elástica, obtida pela relação entre o limite de escoamento e o limite de resistência (LE/LR). Este aumento não é desejado, pois diminui a capacidade do material de tolerar deformações plásticas. (Palmer, *et al*, 2008.)

No início dos anos 1930, os aços apresentavam teores de carbono (0,3%) e manganês (1,5%), enquanto os teores de silício eram mais baixos. O carbono era o elemento de liga mais barato e aumentava a resistência à tração desses aços, que eram utilizados na condição “como laminados”, mas com pouco ou nenhum controle de temperaturas de laminação. O uso de pequenas adições de nióbio para endurecer os aços ferrítico-perlíticos foi introduzido em 1936, mas àquela época o custo do nióbio e a falta de demanda por aços deste tipo tornaram o processo pouco mais do que uma curiosidade científica. O resultado foi um aumento de resistência ao escoamento de 225 para 300 MPa e uma redução na temperatura de transição de impacto para valores inferiores a 0° C. No final da década de 40, mais precisamente em 1948, foi introduzida a especificação API 5L, contendo somente tubos até o grau X42. (Mehmood, *et al*, 2002.)

Ao final dos anos 1950, a queda no preço do nióbio e uma simultânea demanda por maior resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade nos aços para tubulações levaram a um ressurgimento do interesse pelo desenvolvimento dos aços ARBL. (Leslie, 1981.)

Em 1959 foi construído nos Estados Unidos o primeiro duto utilizando aço ARBL e neste ano, também houve o desenvolvimento do primeiro aço X52 microligado, possuindo baixo teor de carbono e endurecido pela adição de elementos microligantes, tais como: nióbio e vanádio, na ordem de 0,10%. (Malcoln, 2007.)

Durante os anos 60, o aço dominante para gasodutos era o X52, produzido com aço semi-acalmado e sem requisitos de tenacidade, com teor médio de carbono de

0,16%. A rota de produção de chapas dos aços API até o final da década de 60 baseava-se na laminação a quente seguido de normalização, conseguindo-se chapas com o grau X60. (Bai, *et al*, 2005) e (Hillenbrand, *et al*, 1997).

Inicialmente, os recursos aplicados para se obter as propriedades citadas anteriormente foram reduzir o teor de carbono, enquanto o teor de manganês foi mantido em níveis bem elevados. O refino de grão pela adição de elementos refinadores como alumínio e nitrogênio foi então introduzido posteriormente, mas isso só pôde ser utilizado em aços na condição “normalizados”.

A exploração de petróleo no ártico e a ocorrência de fraturas frágeis com mais de 10 Km de extensão em dutos nos Estados Unidos levaram ao desenvolvimento de tubos produzidos com aços acalmados ao alumínio, proporcionando refino de grão e aumentando tanto a resistência mecânica quanto a tenacidade (Bott, 2003). A evolução histórica da resistência mecânica dos aços API 5L é sintetizada acima nas Figuras 16 e 17, destacando a posição relativa do grau X65 (450 MPa).

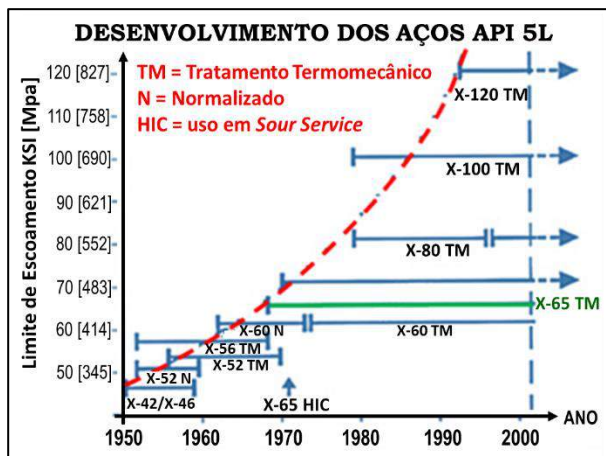


Figura 16. Desenvolvimento dos Aços API 5L, (Malcoln, 2007.)

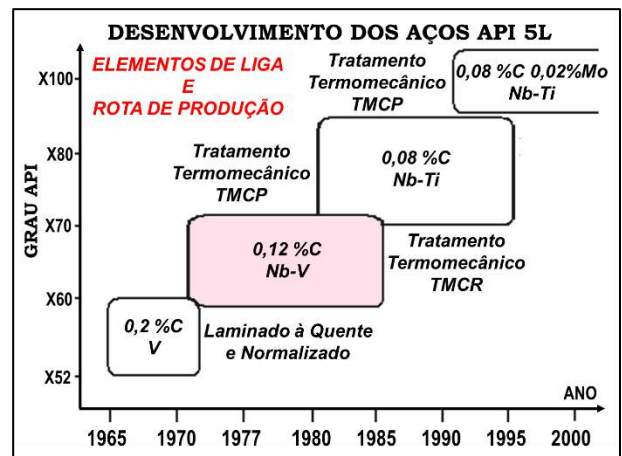


Figura 17. Desenvolvimento dos Aços API 5L (Siciliano, 2008.)

A solução para o problema do material laminado com grãos grosseiros foi realizar a laminação de acabamento em baixas temperaturas, que, além de produzir grãos finos, também manteve algum grau de endurecimento por precipitação. A resistência mecânica obtida aumentou para o patamar de 450 para 525 MPa, com temperaturas de transição de impacto tão baixas quanto -80°C . Esses aços ARBL produzidos por laminação controlada, quando submetidos a refino de grão e endurecimento por precipitação através das adições de nióbio, apresentaram a vantagem econômica de uma composição balanceada, assim permitindo alto rendimento de produção. Nos dias atuais, os aços ARBL já atingem limites de escoamento de 800 MPa e limite de resistência de 900 MPa. (INFOMET, 2016.)

2.3.1.2 Elementos de liga e microligantes

De um modo geral, a composição química dos aços para tubos API 5L pode ser caracterizada por: Aços acalmados ao silício e ao alumínio; Baixo teor de carbono (0,10% máx.) e alto teor de manganês (2,0% máx.); Elementos de liga: Ni, Cu, Cr, Mo; Elementos microligantes: Nb, V, Ti ($\Sigma = 0,15\%$ máx.). Correlacionamos a seguir a influência dos elementos nos aspectos metalúrgicos e mecânicos. Os percentuais se referem especificamente ao aço API 5L X65: **Níquel** (0,5% máx.) – estabilizador da austenita, melhora a resistência à corrosão e refina o grão; **Cobre** (0,5% máx.) – melhora a resistência a corrosão atmosférica e aumenta os limites de resistência; **Cromo** (0,5% máx.) – melhora as propriedades mecânicas (escoamento, ruptura, tenacidade); **Molibdênio** (0,05% máx.) - melhora a resistência e reduz a “fragilidade de revenido”; **Nióbio** (0,05% máx.) – refina o grão por retardar a recristalização durante o processamento e favorece a formação de carbonetos e nitretos; aumenta o limite de escoamento e o limite de resistência; **Vanádio** (0,10% máx.) – aumenta a resistência por favorecer o refino dos grãos; devido à elevada solubilidade na austenita, o nitreto de vanádio tende a se precipitar na ferrita, atuando como efetivo endurecedor; **Titânio** (0,04% máx.) – elemento estabilizador no controle do tamanho de grão durante o reaquecimento. (Chiaverini, 1996).

A Figura 18 mostra a influência dos elementos micro-ligantes (Ti, Nb, V, Al) na temperatura de recristalização, destacando o efeito do Nióbio. A Figura 19 mostra a tendência dos elementos de liga na formação de carbonetos na linha central de segregação, com efeito positivo para Mo, sem efeito para o Cr, e com efeito negativo para Mn, Ni e Cu.

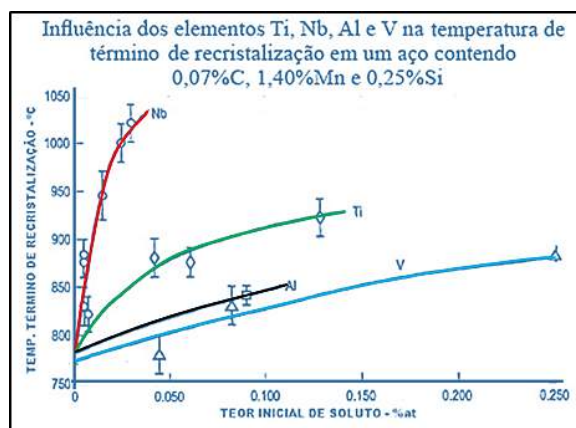


Figura 18. Influência dos elementos micro-ligantes na temperatura de recristalização. (Malcoln, 2007.)

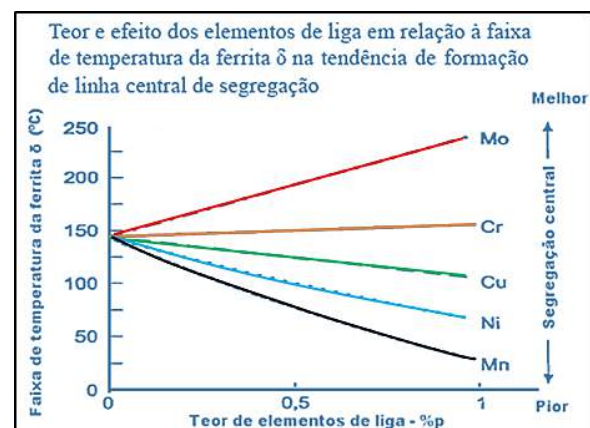


Figura 19. Efeito dos elementos de liga na segregação central. (Malcoln, 2007.)

2.3.1.3 Processamento termo-mecânico

A adição de elementos de liga no aço ARBL afeta as suas propriedades, de modo que cada elemento tem um papel na alteração de alguma propriedade do aço.

Em geral, esta adição vai depender de que tipo de propriedade se necessita e de qual aplicação será dada ao aço. As propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas à microestrutura, e as alterações da microestrutura causa variação nas propriedades mecânicas. (Lemos, 2009.)

A evolução dos processos de fabricação influenciou diretamente na melhora da tenacidade, limite de escoamento e resistência, como função das microestruturas obtidas, conforme evidencia a Figura 20.

A Figura 21 mostra como a combinação da técnica de laminação controlada convencional (LCC) com o resfriamento acelerado (RA) levou a redução do tamanho de grão e consequentemente a melhora das propriedades mecânicas do aço.

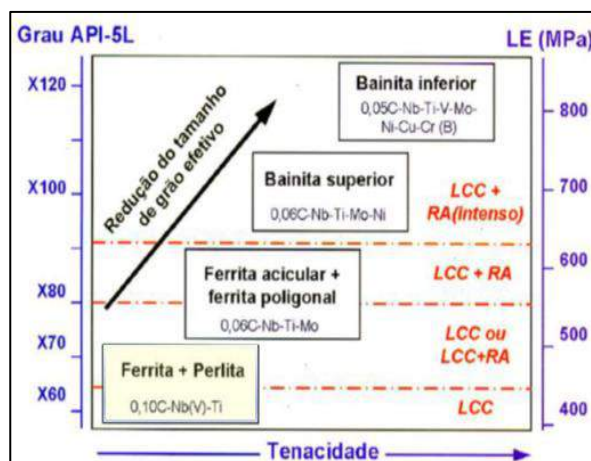


Figura 20. Constituintes microestruturais predominantes em aços API (Araújo, *et al*, 2008.)



Figura 21. Efeito da laminação e do resfriamento sobre sítios de nucleação na transformação da austenita (Araújo, *et al*, 2008.)

Esta técnica compreende a laminação com temperatura controlada convencional (LCC), cuja função é maximizar a formação de sítios para a transformação da austenita, seguida de resfriamento acelerado (RA), cuja função é maximizar a nucleação durante o processamento, resultando em uma estrutura austenítica altamente deformada que se transforma em uma estrutura ferrítica equiaxial de grãos finos no resfriamento.

A técnica LCC + RA é conhecida como *TMCP* (*Thermo-Mechanical Controlled Processing*). (Lage, *et al*, 2010.)

Na laminação a quente dos aços carbono parcialmente acalmados, a recristalização da austenita ocorre em temperaturas tão baixas quanto próximas de 760° C. Uma redução de espessura da ordem de 30 % já é suficiente para atingir aproximadamente 10 % de recristalização.

Num aço semelhante contendo 0,03 % de nióbio a recristalização em 10 % acontece depois de redução de espessura da ordem de 50 % a 925° C. Isso explica porque é difícil refinar o grão em aços carbono até que a temperatura caia abaixo de 815° C. Geralmente é menos caro normalizar o aço carbono do que obter refino de grão por laminação controlada. Por outro lado, o refino de grão nos aços ao nióbio pode ser obtido com temperaturas de acabamento tão altas quanto 925° C.

A Figura 22 mostra os tipos de aços de alta resistência para a fabricação de dutos e indica as rotas de laminação mencionadas.

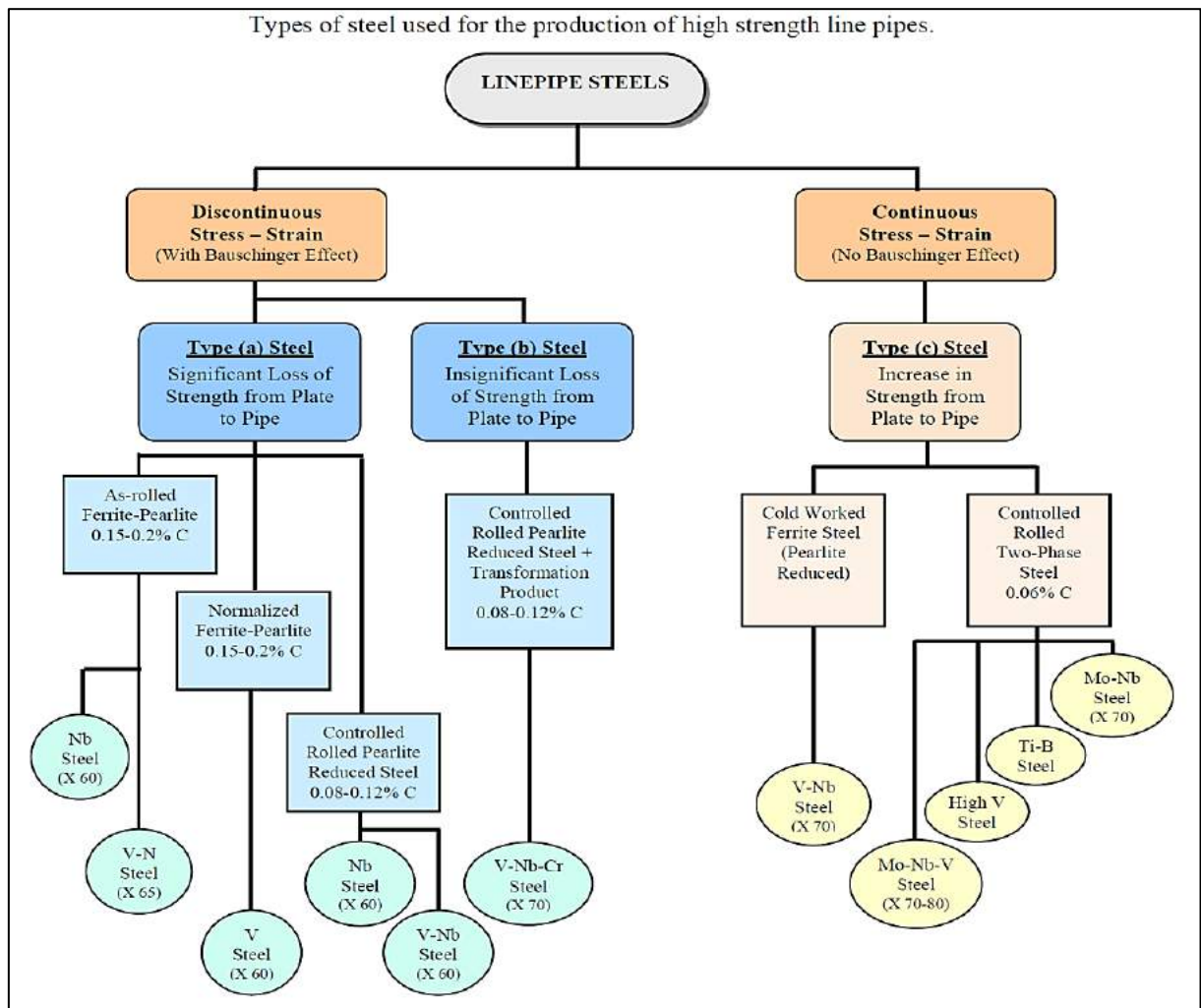


Figura 22. Tipos de aços de alta resistência produzidos para dutos.

(Mehmood, *et al*, 2002.)

Na maioria dos casos, todo o nióbio, carbono e nitrogênio estão em solução no começo da laminação a quente da austenita, mas ocorre precipitação durante a laminação à medida que a temperatura do aço cai.

As partículas de precipitado dificultam o crescimento dos grãos de austenita, e em temperaturas ainda mais baixas as partículas (ou aglomerados pré-precipitação) inibem a recristalização dos grãos deformados de austenita.

A eficiência dos elementos microligantes no refino dos grãos de ferrita está na mesma ordem da solubilidade dos seus carbonetos na austenita.

O refino de grão é o mecanismo preferencial de endurecimento dos aços ARBL porque também aumenta a tenacidade, mas o segundo mecanismo de endurecimento mais importante nos aços ARBL é o endurecimento por precipitação.

As partículas que se formam em altas temperaturas na austenita, embora sejam bastante eficientes no controle do tamanho de grão, não acarretam endurecimento significativo, por serem muito grandes e espaçadas.

As partículas efetivamente endurecedoras são as que se formam em temperaturas relativamente baixas na austenita, na interface ferrita-austenita durante a transformação da ferrita durante o resfriamento. (INFOMET, 2016.)

Devido à elevada solubilidade na austenita, o nitreto de vanádio tende a se precipitar na ferrita, na qual age como efetivo endurecedor. (Pickering, 1978.)

As microestruturas de muitos aços ARBL caracterizam-se pela presença de ferrita e perlita, mas alguns outros aços dessa categoria apresentam outros tipos de microestrutura, como ferrita-bainita, martensita temperada ou bainita. (Pickering, 1978.)

2.3.1.4 Propriedades: API 5L - X65 (“overview”)

A principal norma que especifica requisitos para fabricação de tubos para uso em transportes de petróleo e gás natural é a API 5L, elaborada pelo *American Petroleum Institute*.

Os tubos mais frequentemente utilizados para transporte de gás, a alta pressão, são os aços da norma API 5L de graus X60, **X65**, X70 e X80. Para o grau X65, $LE_{\min} = 450$ MPa e $LR_{\min} = 535$ MPa. (Mireles, 2009.)

A tabela 1 apresenta os maiores graus API, suas composições químicas e limites de composição, as principais propriedades mecânicas e indicadores das rotas de produção. Vale notar que os tubos API podem ser processados como tubos sem costura e tubos soldados, tendo, portanto, rotas diferentes na siderurgia.

Tabela 1 – Aços para tubos API 5L – Graus X52 a X120 (API 5L, 2008).

Características do Tubos API - graus X52 a X120													Carbono Equivalente		LE min (MPa)	LR min (MPa)
Grau	PSL	Costura	Fabricação	C % máx	Mn % máx	P % máx	S % máx	Si % máx	V % máx	Nb % máx	Ti % máx	Other % máx	CEIIW % máx	CEPcm % máx		
X52	1	sem	-	0,28	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-	360	460
		com	-	0,26	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-		
	-	N	0,24	1,40	0,025	0,015	0,45	0,10	0,05	0,04	a,b	0,43	0,25			
	-	Q	0,18	1,50	0,025	0,015	0,45	0,05	0,05	0,04	b	0,43	0,25			
X56	1	sem	-	0,28	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-	390	490
		com	-	0,26	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-		
	-	N	0,24	1,40	0,025	0,015	0,45	0,10	0,05	0,04	a,b	0,43	0,25			
	-	Q	0,18	1,50	0,025	0,015	0,45	0,07	0,05	0,04	a,b	0,43	0,25			
X60	1	sem	-	0,28	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-	415	520
		com	-	0,26	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-		
	-	N	0,24	1,40	0,025	0,015	0,45	0,10	0,05	0,04	a,c	0,43	0,25			
	-	Q	0,18	1,70	0,025	0,015	0,45	a	a	a	a,b	0,43	0,25			
X65	1	sem	-	0,28	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-	450	535
		com	-	0,26	1,45	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-		
	-	Q	0,18	1,70	0,025	0,015	0,45	a	a	a	c	0,43	0,25			
	-	M	0,12	1,60	0,025	0,015	0,45	a	a	a	c	0,43	0,25			
X70	1	sem	-	0,28	1,40	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-	485	570
		com	-	0,26	1,65	0,030	0,030	-	a	a	a	-	-	-		
	-	Q	0,18	1,80	0,025	0,015	0,45	a	a	a	c	0,43	0,25			
	-	M	0,12	1,60	0,025	0,015	0,45	a	a	a	c	0,43	0,25			
X80	2	-	Q	0,18	1,90	0,025	0,015	0,45	a	a	a	d,e	0,43	0,25	555	625
		-	M	0,12	1,60	0,025	0,015	0,45	a	a	a	d	0,43	0,25		
X90	2	com	M	0,10	2,10	0,020	0,010	0,55	a	a	a	d	-	0,25	625	695
X100	2	com	M	0,10	2,10	0,020	0,010	0,55	a	a	a	d,e	-	0,25	690	760
X120	2	com	M	0,10	2,10	0,020	0,010	0,55	a	a	a	d,e	-	0,25	830	915

Legenda:

a - Soma das concentrações de vanádio, nióbio e titânio devem ser $\leq 0,15\%$.

b - Máximo de 0,50% para o cobre, 0,30% para o níquel, 0,30% para o cromo e 0,15% para o molibdênio.

c - Máximo de 0,50% para o cobre, 0,50% para o níquel, 0,50% para o cromo e 0,5% para o molibdênio.

d - Máximo de 0,50% para o cobre, 1,0% para o níquel, 0,50% para o cromo e 0,5% para o molibdênio.

e - Máximo 0,004% de boro.

com – com costura. sem – sem costura.

N – Normalizing rolling (Normalização)

Q - Quenched and tempered (Têmpera)

M – Termo mechanical rolling (Laminação convencional controlada)

PSL1 - Nível padrão.

PSL2 - Requisitos obrigatórios - composição química, ductilidade e propriedades de resistência.

Dentre outras normas para os ARBL, destacam-se também as especificações ASTM: ASTM A572, 2015, ASTM A735, 2012, ASTM A736, 2012 e ASTM A737, 2013 (para vasos de pressão).

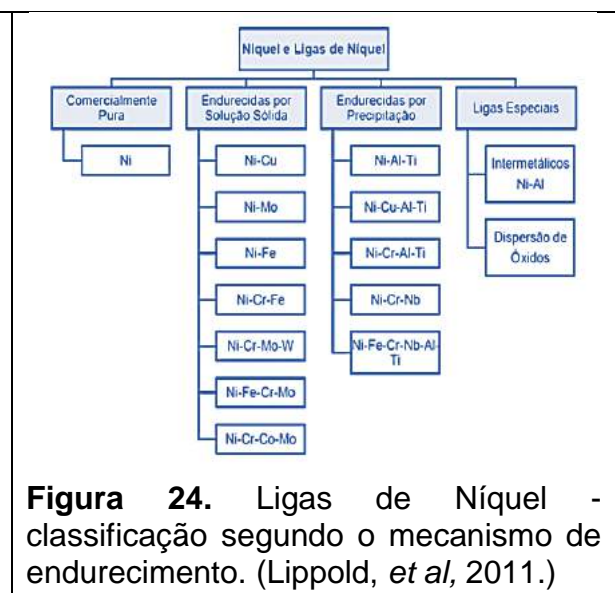
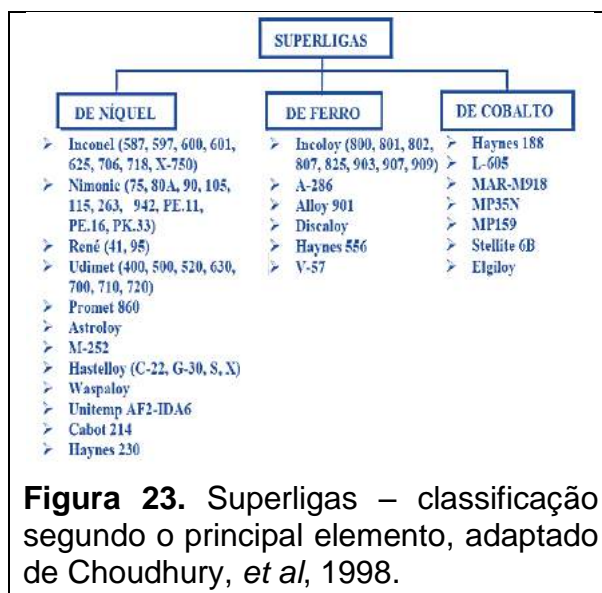
2.3.2 Revestimento – *superliga* de Níquel (*INCONEL 625*)

O termo superliga foi utilizado pela primeira vez logo após a Segunda Guerra Mundial para descrever um grupo de ligas desenvolvidas para aplicações que requerem alto desempenho, combinando **alta resistência mecânica** e **alta resistência à corrosão** em temperaturas elevadas (acima de 650° C). Esses materiais possuem temperaturas de serviço da ordem de 85% do seu ponto de fusão, além de possuírem alta condutividade térmica, baixa expansão térmica, estabilidade metalúrgica, alta resistência ao ataque ambiental, excelente resistência à fluência, à fadiga térmica e mecânica, boa ductilidade e boa resistência a corrosão em temperaturas altas de operação. (Baldan, 2009).

As superligas mais utilizadas são àquelas a base de ferro, níquel ou cobalto, com adições de elementos de liga tais como tungstênio, molibdênio, tântalo, nióbio, titânio, cromo, etc. As ligas à base de níquel podem ser classificadas como ligas níquel-cobre (MONEL), ligas níquel-molibdênio, ligas níquel-cromo-ferro (INCONEL), ligas níquel-ferro-cromo-molibdênio (INCOLOY), ligas níquel-cromo-molibdênio-tungstênio, ligas níquel-silício. (Calvo, 1997).

Podem também ser subdivididas, com relação aos mecanismos de endurecimento, em: (a) endurecíveis por solução sólida (solubilização) e (b) endurecíveis por precipitação. (Lippold, *et al*, 2011.)

A Figura 23 mostra a classificação das superligas com base em seu principal elemento. A Figura 24 mostra a classificação das ligas de Níquel considerando os mecanismos de endurecimento.



As superligas à base de níquel constituem o grupo mais importante dessa classe de materiais, que são complexos e possuem uma variedade de elementos que, quando combinados, produzem diferentes ligas, com microestruturas e propriedades interessantes para diversas aplicações. As ligas a base de níquel não possuem uma classificação sistemática como os aços. As inúmeras combinações dos seus elementos de liga com variações de seus teores, formam uma combinação extensa. Por conta disto, elas são conhecidas e agrupadas por seus nomes comerciais ou pelo número de identificação dado pelo inventor, conforme mostra a Figura 25.

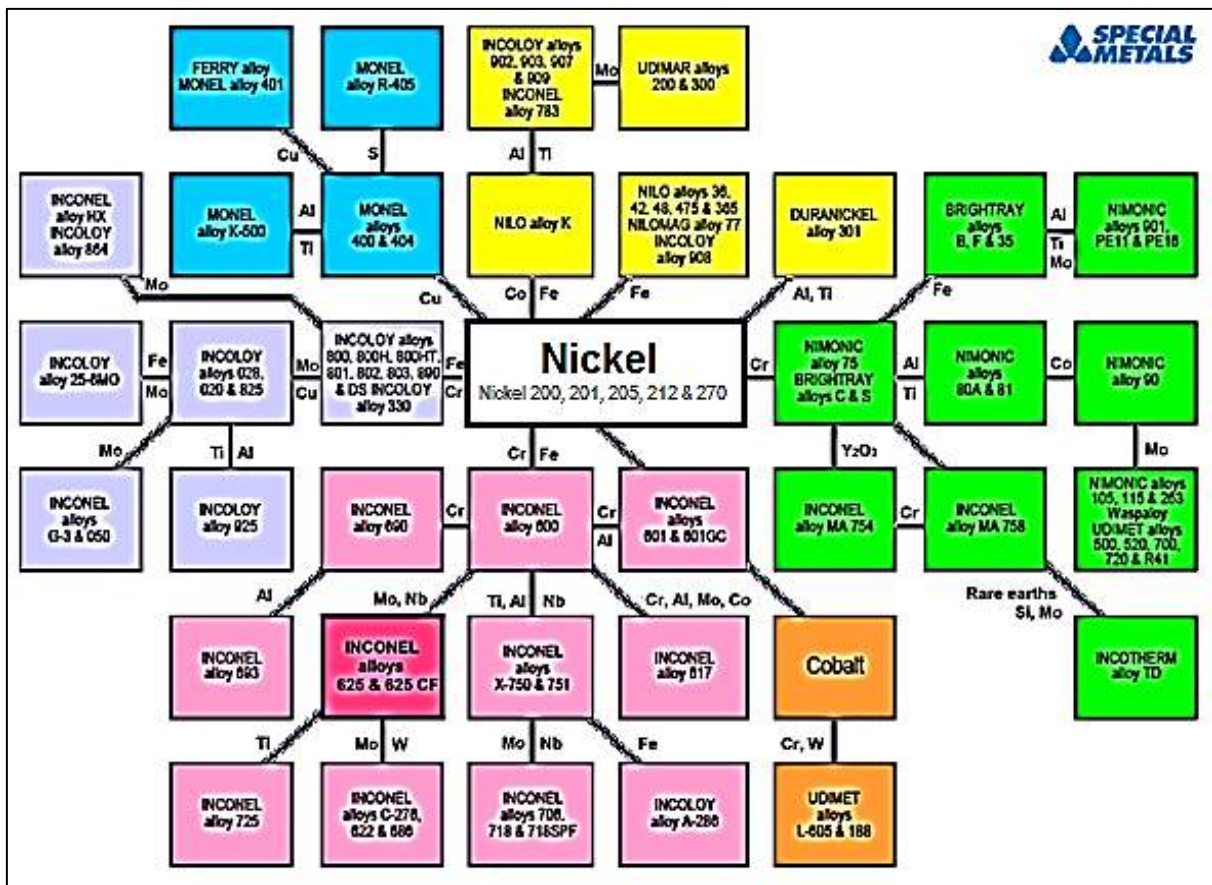


Figura 25. Diagrama das ligas de Níquel (SPECIAL METALS, 2016.)

INCONEL 625 (*UNS N06625 ou alloy 625, Chronin 625, Altemp 625, Haynes 625, Nickelvac 625, Pyromet 625 e Nicrofer 6020*) é uma superliga à base de níquel, que possui propriedades de alta resistência mecânica e resistência a temperaturas elevadas. Ela também demonstra notável proteção contra corrosão e oxidação. A sua capacidade de suportar um elevado stress em uma vasta gama de temperaturas, tanto dentro como fora da água, bem como ser capaz de resistir à corrosão ao ser exposta a ambientes altamente ácidos torna uma escolha adequada para aplicações nucleares e marinhas. (Suave, *et al*, 2014.)

2.3.2.1 História das superligas (INCONEL 625)

Mais de 3000 anos separam os manuscritos chineses que relatam as primeiras ligas Zn-Ni, denominadas de cobre-branco (“*Pai-Thong*”), da descoberta em 1751, de Axel Cronsted, sueco, que identifica o elemento Níquel. Em 1756, Ernest Geitner, alemão, cria a prata alemã (*german silver*), Cu com 12 a 25% Ni. No século XVIII, mineradores alemães produziram uma liga branca, muito dura para ser martelada, denominando-a de cobre do diabo (“*Kupfer-Nickel*”). Em 1905, uma liga similar ao Monel, 2/3 Ni e 1/3 Cu, demonstra alta resistência à corrosão e inicia o desenvolvimento tecnológico das superligas. Na década de 40, as ligas NIMONIC (Ni-Cr-Al-Ti) surgem, na Inglaterra, como uma das primeiras aplicações em motores turbojet. Ao mesmo tempo, surgem os Inconéis (Ni-Fe-Cr). (Mankins, *et al*, 1990.)

O desenvolvimento dessas superligas (Figura 26) se acelera a partir dos anos 50, com as evoluções nos processos de refino de metais (fusão à vácuo, dentre outros), com a finalidade de suprir a demanda por materiais de alta resistência para uso em turbinas à vapor na geração de energia e aviação. Nos anos 70, processo de solidificação direcional, com microestrutura de grãos colunares, isentos de contornos de grão transversais, resultam no desenvolvimento de superligas monocristalinas na década de 1980. (Patel, *et al*, 2001.)

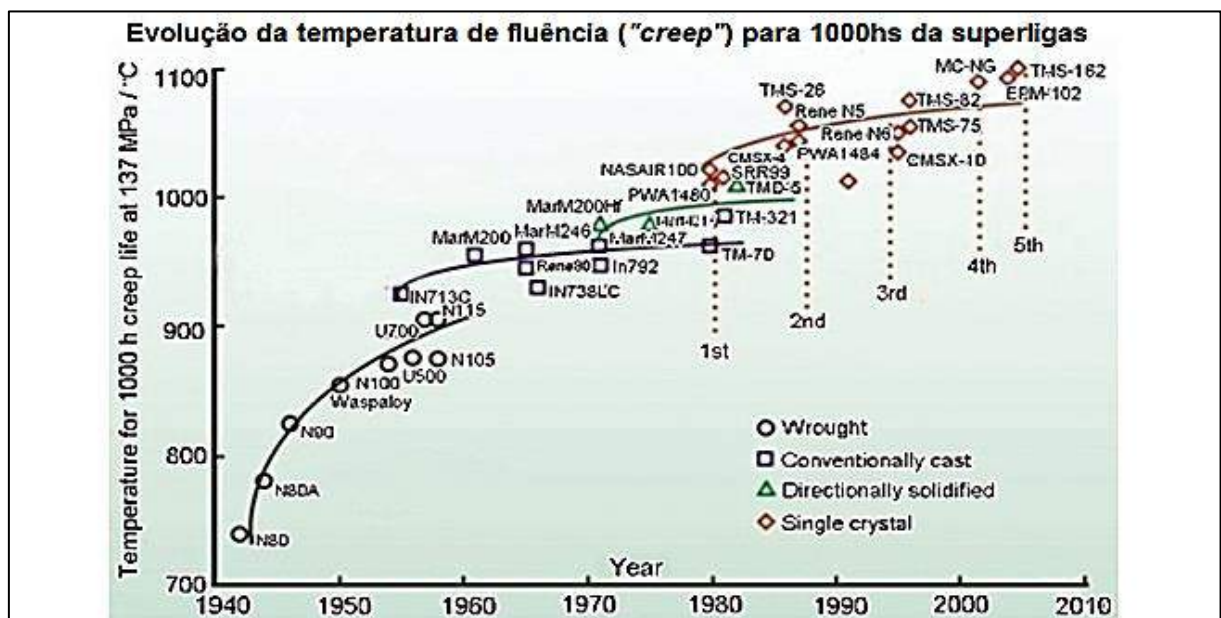


Figura 26. Evolução das superligas (Reed, 2006.)

O resultado desses avanços é a criação de inúmeras ligas com resistência à fluência em temperaturas cada vez maiores, acompanhando o progresso que vem sendo feito ao longo do século XX e do século XXI. (Reed, 2006.)

2.3.2.2 Elementos de liga

As ligas de níquel permitem altas concentrações de elementos de liga devido a sua estrutura cristalina CFC. Correlacionamos a seguir a influência dos elementos com propriedades. Os percentuais se referem à liga *Inconel 625* conforme tabela 2:

Tabela 2 – Composição química da liga *UNS N06625* (ASTM B446, 2014).

elemento	Ni	Cr	Mo	Nb +Ta	Co	Mn	Si	Ti	C	P	S	Al
%	58 min	20-23	8-10	3,15-4,15	1,0 max	0,5 max	0,5 max	0,4 max	0,1 max	0,015 max	0,015 max	0,015 max

Cromo (20-23%) - aumenta a resistência à corrosão formando uma camada passivadora de óxido (Cr_2O_3), aumenta de resistência à corrosão em altas temperaturas e melhora as propriedades mecânicas através do mecanismo de endurecimento por solução sólida; **Molibdênio** (8-10%) - aumenta de resistência à corrosão por pites e em frestas, aumenta de resistência por solução sólida em alta temperatura e é forte formador das fases topologicamente compactas (TCP), prejudiciais às propriedades de resistência mecânica e resistência à corrosão; **Nióbio** (3,15-4,15%) - aumenta a resistência mecânica por precipitação através da formação da fase γ'' , tem alta afinidade com o carbono, contribuindo para formação de carboneto do tipo NbC e é um forte formador da fase Laves, a qual está associada à trincas de solidificação; **Ferro** (5,0% max) - eleva a resistência mecânica da liga por solução sólida, aumenta a solubilidade do carbono no níquel, melhorando a resistência em altas temperaturas, porém, sua adição deve ser limitada para não comprometer a resistência à corrosão da liga; **Manganês** (0,5% max) – tem afinidade com o enxofre, é importante no controle da segregação de compostos sulfurados, que são nocivos à soldabilidade; **Silício** (0,5% max) - efeito prejudicial à soldabilidade por aumentar a tendência à formação de trinca a quente, contribui na formação de fases intermetálicas, sendo um subproduto da reação de desoxidação; **Alumínio** (0,4% max) - eleva a resistência mecânica por precipitação, é um formador da fase γ' e aumenta a resistência à corrosão pela formação de óxidos Al_2O_3 na superfície da liga; **Titânio** (0,4% max) - atua elevando a resistência mecânica por precipitação da fase γ' . Apresenta forte tendência à segregação para as regiões interdendríticas. Além disso, é um formador de carbonetos; **Carbono** (0,1 max) - é mantido em baixas quantidades, formando carbonetos de forma intergranular, que pode ser benéfica por dificultar o deslizamento dos contornos, contribuindo para a resistência mecânica em altas temperaturas. (Mankins, *et al*, 1990 e Mathew, *et al*, 2007.)

2.3.2.3 Microestruturas e Tratamentos Térmicos

A liga INCONEL 625 (UNS N06625) é uma liga Ni-Cr-Fe-Mo-Nb. Apresenta uma matriz austenítica, fase γ , com estrutura cúbica de face centrada (CFC), com uma larga variedade de segundas fases, classificada como endurecível por solução sólida e geralmente aplicadas na condição recozida (solubilizada).

A austenita é não magnética, e é dúctil em uma ampla faixa de temperaturas, desde temperaturas criogênicas até temperaturas de fluência (creep). Não apresenta, portanto transição dútil-frágil, nem fratura frágil. Pode atingir alta resistência mecânica pelo endurecimento induzido por deformação a frio. Essa liga geralmente apresenta, sob determinadas circunstâncias, segundas fases: fase γ' (CFC) - $Ni_3(Al, Ti)$, fase γ'' (TCC) – Ni_3Nb , e Carbonetos metálicos MC (cúbica), $M_{23}C_6$ (CCC), M_6C (CCC) e M_7C_3 (hexagonal).

A tabela 3 a seguir foi adaptada e combinada de Mankins, *et al*, 1990 e de Stoloff, 1990., de forma a se obter uma visão condensada das microestruturas envolvidas, suas fases e efeitos dos elementos nas ligas de Níquel.

Tabela 3 – Microestruturas, fases e efeitos dos elementos nas ligas de Ni (Mankins, *et al*, 1990. e Stoloff, 1990.

Fases que podem se formar nas ligas de Níquel			Funções dos elementos de liga	
Fase	Estrutura	Fórmula	Efeitos	Base Níquel
γ	CFC	Ni_3Al , $Ni_3(Al,Ti)$	Endurecimento por solução sólida.....	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
η	HC	Ni_3Ti	Estabilizadores da matriz FCC.....	
γ'	TCC	Ni_3Nb	Forma Carbonetos:	
δ	ortorrômbic	Ni_3Nb	MC.....	W, Ta, Ti, Mo, Nb
	a		M_7C_3	Cr
MC	cúbica	TiC; NbC; HfC	$M_{23}C_6$	Cr, Mo, W
			M_6C	Mo, W
$M_{23}C_6$	CCC	(Cr,Fe,W,M $o)_{23}C_6$	Carbonitretos: M(CN).....	C, N
M_6C	CCC	(Fe, W, Mo, Nb, Ta) $_3C$	Promove precipitações gerais de carbonetos.....	
M_7C_3	hexagonal	Cr_7C_3	Forma $\gamma' Ni_3(Al,Ti)$	Al, Ti
MN	Cúbica	(Ti, Nb, Zr)N	Retarda a formação do hexagonal $\eta (Ni_3Ti)$	
μ	romboédrica	(Fe,Co) $_7(Mo,$ W) $_6$	Eleva a temperatura solvus do γ'	Co
Laves	Hexagonal	Fe $_2(Nb,Ti, Mo,$ Ta)	Precipitados de endurecimento e/ou intermetálico.....	Al, Tio, Nb
σ	Tetragonal	FeCrMoNi	Resistência a oxidação.....	Al, Cr
			Melhora a resistência a corrosão à quente.....	La, Th
			Resistência à sulfuração.....	Cr
			Melhora as propriedades à fluência.....	B
			Aumenta a resistência à ruptura.....	B(c)
			Causa segregação e, contornos de grão.....	B, C, Zr
			Facilidade de trabalho.....	

(a) Nem todos esses efeitos ocorrem em uma dada liga.
 (b) Endurecimento por precipitação do Ni_3Ti também ocorre se o Ni suficiente está presente
 (c) Se estiver presente em grande quantidade, boretos são formados

O INCONEL 625 foi concebido para ser um material endurecível por solução sólida. Isto é válido em temperaturas baixas e altas, mas existem faixas de temperaturas entre 650 a 875 °C, onde formam-se precipitados que são prejudiciais às propriedades de fluência, e, portanto, à resistência da liga, conforme mostrado na Figura 27.

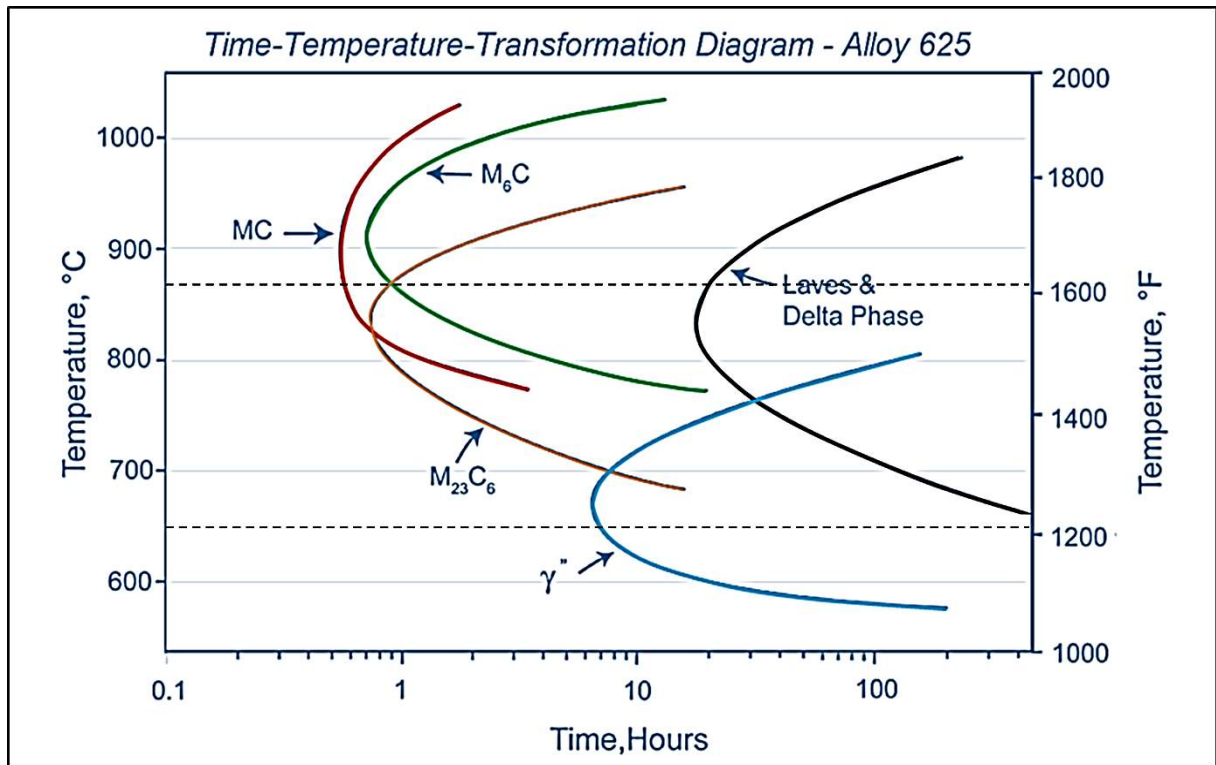


Figura 27. Diagrama TTT para Inconel 625. (Shoemaker, 2005.)

No processamento ou na exposição a temperaturas elevadas (soldagem) estas ligas podem apresentar fases indesejáveis, tais como: fase δ (delta / ortorrômbica) - Ni_3Nb , fase σ (sigma / tetragonal de corpo centrada) - $FeCrMoNi$, fase **Laves** (hexagonal) - $Fe_2(Ni, Ti, Mo, Ta)$ e a fase η (eta - hexagonal compacta) - Ni_3Nb . (Voort, 1985.)

Quando submetidos a 700 °C, os precipitados γ'' , típicos $Ni_3(Nb, Al, Ti)$, com estrutura cristalina tetragonal e uma morfologia em forma de disco, coerentes em relação à matriz, começam a se formar. Quando submetidos a 725 °C, precipita a fase δ , típicos $Ni_3(Nb, Mo)$, com uma estrutura cristalina ortorrômbica, com uma morfologia tipo agulha e são incoerentes com a matriz.

Ambos estes precipitados podem ser completamente dissolvidos de volta para a matriz quando a amostra é aquecida acima de 875 °C, recuperando as propriedades de fluência da liga para prolongar a vida útil dos materiais.

2.3.2.4 Propriedades – Inconel 625 (“overview”)

Um guia de seleção de materiais para ambiente “sour service”, destaca a complexidade da seleção e a importância das ligas de Níquel para altas pressões parciais de CO₂ e H₂S e os limites de temperatura aplicáveis é apresentado na Figura 28.

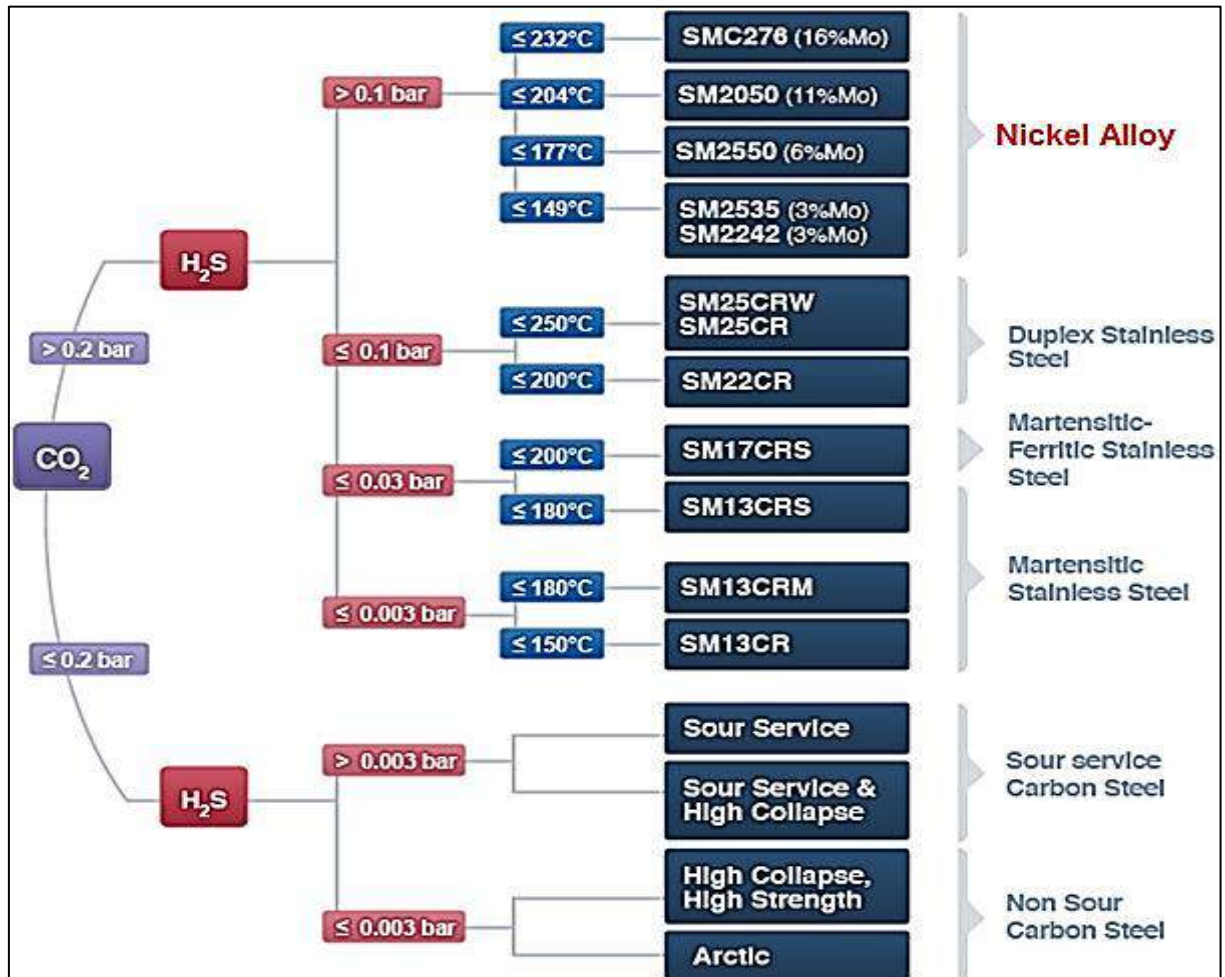


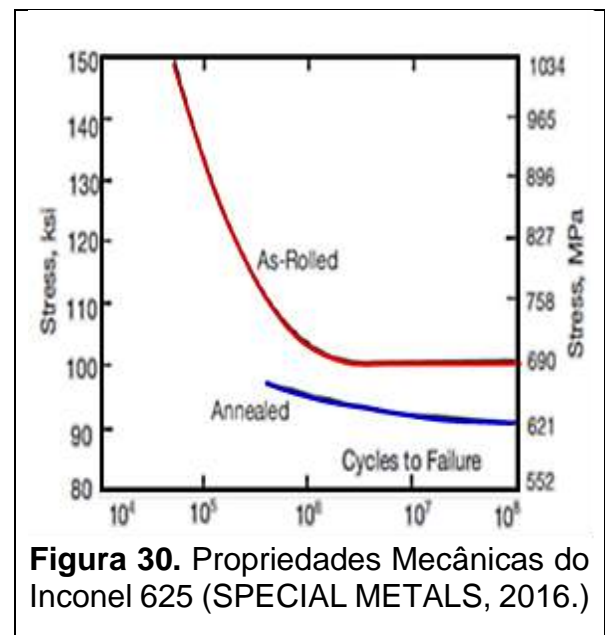
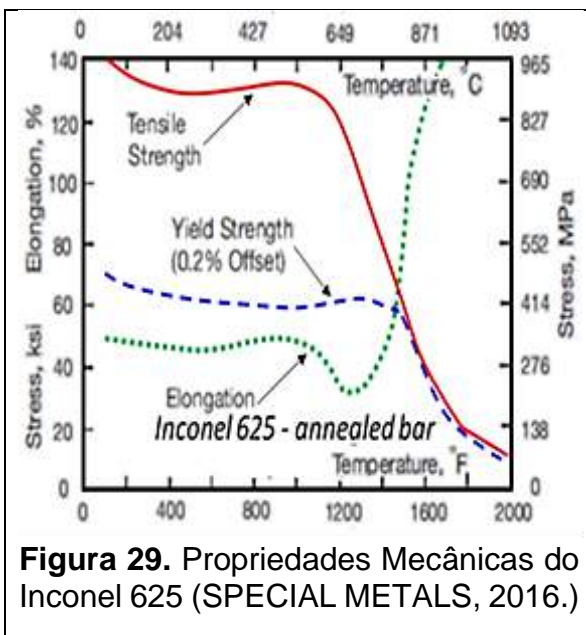
Figura 28. Material Selection Chart (NSSMC, 2016.)

A tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas para barras e tarugos segundo a norma ASTM B446, 2014.

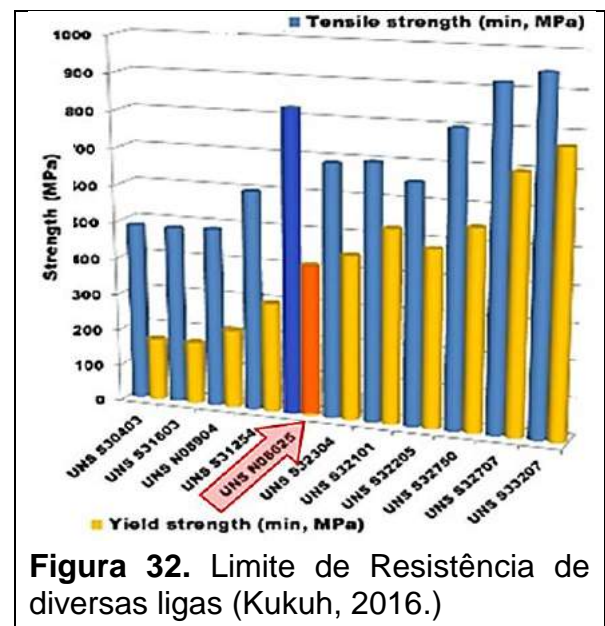
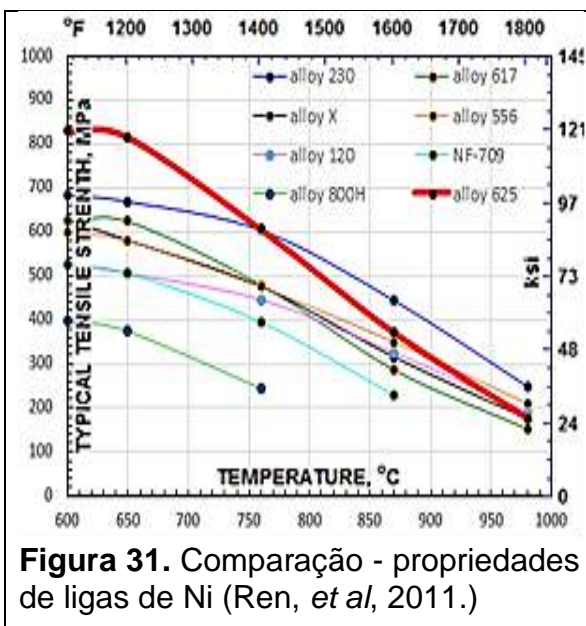
Tabela 4 – Propriedades Mecânicas da liga UNS N06625, (ASTM B446, 2014).

Diameter or Distance Between Parallel Surfaces, in. (mm)	Tensile Strength min, ksi (MPa)	Yield Strength (0.2 % offset), min, ksi (MPa)	Elongation in 2 in. or 50 mm or 4D, min, %	^A Forging quality is furnished to chemical requirements and surface inspection only. No tensile properties are required. Forging stock is typically supplied in the hot worked condition, (see X1.1.5).
UNS N06625 Grade 1 (Annealed) ^B				^B Annealed 1600°F (871°C) minimum.
Up to 4 (102), incl	120 (827)	60 (414)	30	
Over 4 (102) to 10 (254), incl	110 (758)	50 (345)	25	^C Solution annealed at 2000°F (1093°C) minimum, with or without subsequent stabilization anneal at 1800°F (982°C) minimum to increase resistance to sensitization.
UNS N06625 Grade 2 (Solution Annealed) ^C				
All sizes	100 (689)	40 (276)	30	

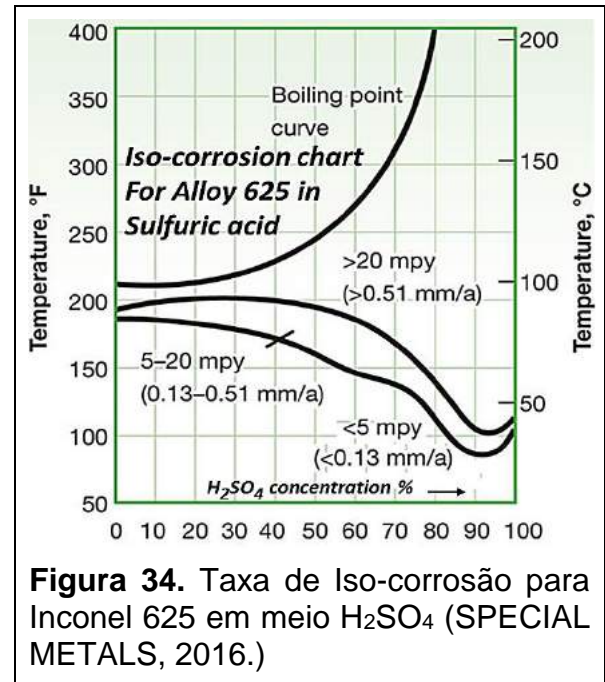
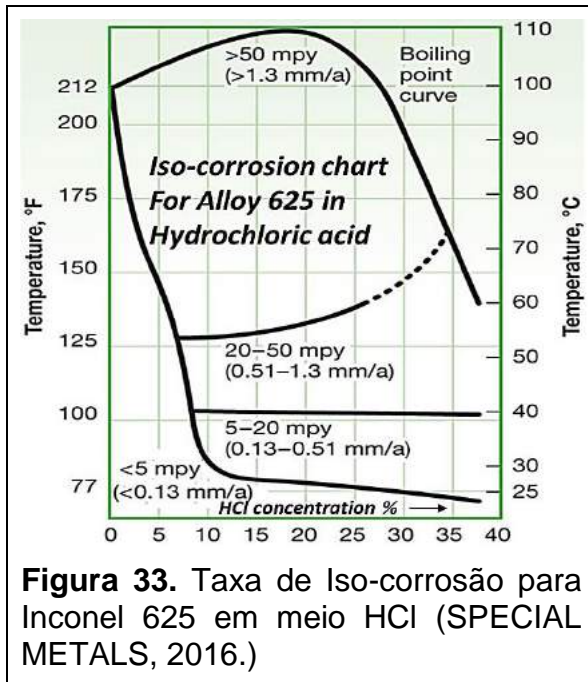
O INCONEL 625 é capaz de suportar elevadas tensões em uma vasta gama de temperaturas, desde criogênicas a altas temperaturas, em várias aplicações industriais como processamento químico, termoquímico, refinarias, exploração de óleo e gás, o que torna esta liga uma escolha adequada para as áreas aeroespaciais, nucleares e marinhas. De forma muito resumida, são apresentadas abaixo, como algumas **propriedades mecânicas** (limite elástico, limite de ruptura, alongamento percentual, e fadiga) dependem do grau de deformação a frio e como variam em função da temperatura (Figuras 29 e 30).



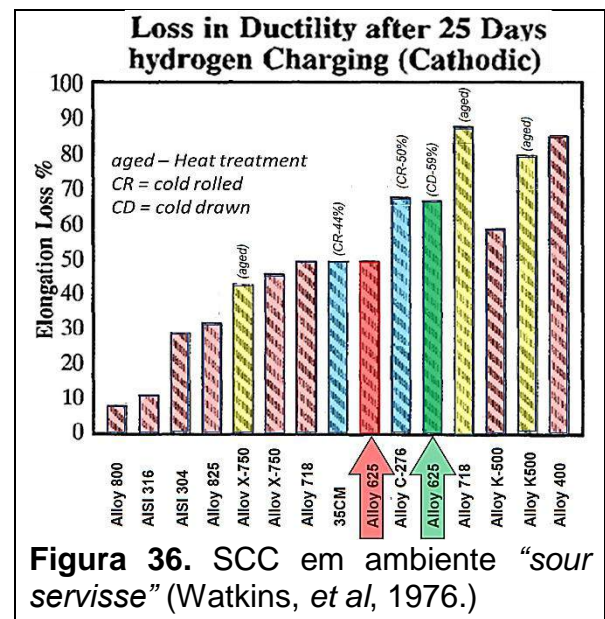
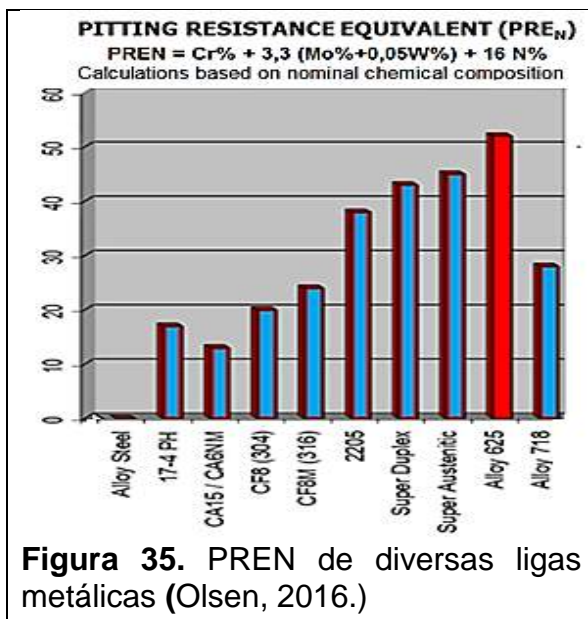
Aspectos comparativos sobre o limite de resistência do *Inconel 625* com outras ligas são apresentados nas Figuras 31 e 32.



Os fenômenos associados à corrosão e à capacidade dos materiais de apresentarem maior/menor resistência a esses processos são de natureza complexa e seu estudo em profundidade foge aos propósitos deste trabalho. De forma bastante resumida, as Figuras 33 e 34 apresentam taxas de iso-corrosão para o Inconel 625, respectivamente em meios HCl e H₂SO₄ e em função da temperatura.



A figura 35 apresenta a posição relativa do Inconel 625 frente a outras ligas para o PREN (“Pitting Resistance Equivalent Number”) – um fator empírico – indicativo da resistência à corrosão alveolar. A Figura 36 mostra a perda da ductilidade (SCC – Stress Corrosion Cracking) de ligas quando expostas 25 dias em meios contendo H₂S.



As condições especialmente corrosivas do meio “*presa*” (*sour service*), também caracterizadas como sendo um meio ácido, referem-se à presença de sulfeto de hidrogênio, que cria um ambiente propício à fragilização do material.

Tipicamente, as ligas que foram tratadas termicamente, ou trabalhadas a frio para obter um nível de resistência mais elevado, são mais susceptíveis à fissuração por corrosão sob tensão. (Brown, 2016).

Selecionar uma liga com base na propriedade desejada, deve considerar o efeito potencial dessa propriedade na resistência à corrosão do material.

Tensões, mesmo aquelas muito inferiores aos valores de escoamento, podem interagir sinergicamente com o ambiente (meio aquoso) induzindo efeitos eletroquímicos e causando trincas em estruturas por corrosão.

A corrosão geralmente está confinada aos sites das trincas (corrosão localizada) e geralmente não apresentam corrosão uniforme, mas seus efeitos podem ser catastróficos.

O termo genérico “trincas ambientalmente sensíveis” (Environmentally-Sensitive Cracking) descreve esses efeitos destrutivos. Duas formas principais são reconhecidas: (Talbot, *et al*, 1998.)

- Corrosão sob tensão - que descreve a falha atrasada nos termos da carga estática.
- Corrosão-fadiga - que descreve falha induzida por cargas cíclicas.

As principais fontes de tensão capazes de promover a corrosão sob tensão são: as tensões das condições de operação (pressão, temperatura e carregamento mecânico) e as tensões residuais, geralmente provenientes de soldagem e de conformação mecânica.

As tensões residuais decorrentes da soldagem podem ser maiores do que as tensões de operação e tendem a ser uma força motriz dominante para a iniciação e o crescimento de trincas. (Sedricks, 1996.)

Dentre outras normas para aplicações industriais do Inconel 625 (UNS N06625), destacam-se as especificações:

- ASTM B446, 2014. (Rod and Bar)
- ASTM B444, 2016. (*Pipes & Tubes Seamless*)
- ASTM B704, 2014. (*Alloy Tubes*)
- ASTM B705, 2014. (*Welded Pipe*).

2.3.3 Soldagem TIG de alta performance

2.3.3.1 História do processo TIG

Soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas-Shielded Tungsten Arc Welding*) pode ser definida como um processo que utiliza um eletrodo sólido de tungstênio não consumível. O eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera gasosa protetora. Se um metal de enchimento é necessário, ele é adicionado no limite da poça de fusão.

Os princípios da soldagem com arco protegido por gás, começou a ser entendido no final do século XIX (Nicolai Bernados, ucraniano, 1842-1905), depois que Humphrey Davis descobriu o arco elétrico em 1801, e inicialmente usava um eletrodo de carbono. Em 1890, C. L. Coffin teve a idéia de usar o arco elétrico, dentro de um gás inerte, por causa das dificuldades de soldar materiais não ferrosos como alumínio e magnésio, porque estes materiais reagiam rapidamente com o ar, gerando porosidade e, conseqüentemente, soldas de baixíssima qualidade.

Por volta de 1930, H.M. Hobart e P.K. Devers começaram a utilizar gás inerte engarrafado, para proteger a área de soldagem, utilizando uma fonte de energia CC, processo que permitia soldar magnésio.

Em 1941, Russell Meredith, trabalhando para a Northrop Aircraft, e Vladimir H. Pavlecka, aprimoram o processo que ficou conhecido como processo Heliarc ou “tungsten inert gas”, abreviação para processo TIG, isto porque o processo utilizava um eletrodo de tungstênio e hélio como gás de proteção. (DBC, 2014).

A Figura 37 ilustra sequencialmente os inventos de Nicolai Bernados (1887), de Meredith (1941), e uma moderna tocha manual TIG.

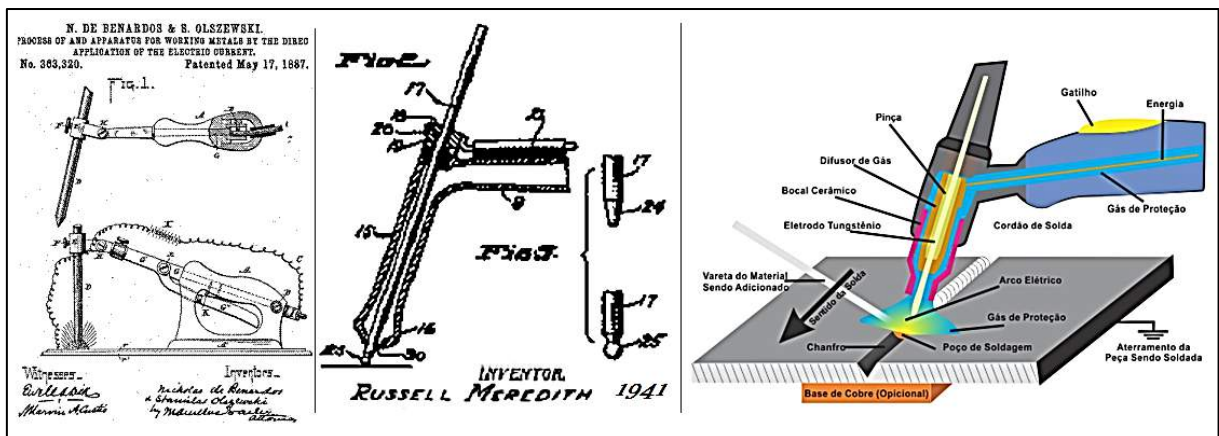


Figura 37. Evolução da tocha TIG; adaptada de DBC, 2014.

Nos anos de 1950 o processo se tornou popular, passando a ser utilizado o argônio como gás de proteção no lugar o hélio, economicamente mais barato. (Howard, 1998.)

Pode ser usada para quase todos os metais. É largamente utilizada para solda com alumínio e magnésio e com ligas de aço inoxidável e ligas de níquel, dentre outras, onde a integridade da solda é de extrema importância.

Com relação ao processo *TIG*, resultados de experiências adequadamente conduzidas atestam a não veracidade de muitos paradigmas em temas tecnológicos. Estes paradigmas surgem a partir de dados e informações não adequadamente contextualizadas, sejam em publicações de ampla divulgação, sejam por tradicionalismos de chão de fábrica. Este fato inibe o surgimento de novas ideias e, conseqüentemente o progresso de novas possibilidades tecnológicas. Por exemplo, algumas literaturas de ensino da soldagem classificam o processo *MIG/MAG* como de elevada produtividade, em oposição aos processos *TIG* e Plasma, considerados lentos. Neste contexto, as pesquisas realizadas nos últimos anos mostraram resultados que contrariam o que tem sido exposto tradicionalmente. Diversos trabalhos destacam, via de regra individualmente, que desenvolvimentos ou variantes do processo *TIG*, ou algumas vezes as denominadas tecnologias híbridas, além de proporcionarem reconhecidamente alta qualidade e menores emissões (ausência de respingos, reduzidos fumos), podem também apresentar desempenho sensivelmente aprimorado em velocidade por meio de avanços na técnica empregada. (Schwedersky (1), 2011.)

TIG de alta performance pode ser definido como sendo os processos de soldagem *TIG* que podem combinar e integrar estes novos recursos tecnológicos.

A evolução tecnológica destes recursos pode ser melhor compreendida pela análise individual de cada uma das partes deste processo. Neste contexto, foram enumerados a seguir estas principais partes:








- tochas (potencializando a energia de soldagem)
- fontes de soldagem (controlando o arco elétrico)
- controles sobre o metal de adição ("*toptig*", "*forward/backward wire motion*" "*weaving*", "*oscillarc*", "*hot-wire*", "*dual wire*")
- gases de proteção ("*trailing gas*" – gases inertes ou ativos)
- miscelâneas (manipulação, controles e automação)

2.3.3.2 Tochas (potencializando a energia de soldagem)

Eletrodos de Tungstênio – genericamente é chamado de eletrodo de tungstênio, mas trata-se de uma vareta do metal tungstênio (99% puro), ou ligas de tungstênio (tório, zircônio, lantânio, cério), normalmente de 150mm ou 175mm de comprimento, que é utilizado no processo de soldagem *TIG* e processos de soldagem Plasma. O eletrodo de tungstênio é utilizado por suportar altas temperaturas, com um mínimo de derretimento e eletro-erosão, ser excelente condutor de elétrons e ter altíssima elasticidade. Seu ponto de fusão, que é acima de 3500°C, é o mais alto dentre os metais conhecidos. Eles são fabricados por processo metalúrgico do mais alto nível, chamado “*sintering*”, no qual o produto é feito a partir de pó. Este processo se aplica principalmente na produção de metais puros. (INFOSOLDA, 2016.)

A norma ANSI/AWS A5.12 estabelece um código para a identificação dos eletrodos conforme sua composição química, como mostrado na Tabela 5. Segundo esse código, a letra “E” significa eletrodo; “W” é para wolfrâmio (ou tungstênio), o elemento químico de que é feito o eletrodo, “X” é o elemento químico adicionado ao eletrodo e “P” significa puro. (AWS A5.12, 2009)

Tabela 5 – Seleção do eletrodo *TIG*, adaptado de INFOSOLDA, 2016.

Classificação AWS	W %	CeO ₂ %	La ₂ O ₃ %	ThO ₂ %	ZrO ₂ %	Outros % (máx.)	Cor da ponta	
EWP	99,5	-	-	-	-	0,5	Verde	
EWCe-2	97,5	1,8 - 2,2	-	-	-	0,5	Laranja	
EWLa-1	98,3	-	0,9 - 1,2	-	-	0,5	Preta	
EWTh 1 (1%)	98,5	-	-	0,8 - 1,2	-	0,5	Amarela	
EWTh 2 (2%)	97,5	-	-	1,7 - 2,2	-	0,5	Vermelha	
EWZr-1	99,1	-	-	-	0,15 - 0,40	0,5	Marrom	
EWG	94,5	-	-	-	-	0,5	Cinza	

Os números 1 e 2 apresentam a quantidade

Dados do eletrodo		Parâmetros elétricos		
Diâmetro	secção	Tensão	Corrente média	Dens. média de corrente
mm	mm ²	(V)	(A)	A/mm ²
1,5	1,77	20	40 ± 10	- 23
2,0	3,14	22	65 ± 15	- 22
2,5	4,91	23	80 ± 30	- 17
3,25	8,30	24	130 ± 50	- 16
4,0	12,57	26	170 ± 60	- 14
5,0	19,64	28	20 ± 80	- 12
6,0	28,27	30	300 ± 90	- 11
8,0	50,27	36	400 ± 100	- 8

material a ser soldado	tipo de eletrodo	CA	CC(-)	CC(+)
Alumínio e ligas	Puro, Zircônio, Lantânio	+++	+	não
Alumínio e bronze	Puro	não	++	não
Magnésio e ligas	Puro	+++	não	+
Níquel e ligas	Puro	+++	+	+
Aço carbono	Tório, Cério, Lantânio	não	+++	não
Aço inox	Tório, Cério, Lantânio	não	+++	não
Cobre	Tório, Cério, Lantânio	+	+++	não
Bronze	Tório, Cério, Lantânio	+	+++	não
Titânio	Tório, Cério, Lantânio	+	+++	não

A Figura 38 mostra como a geometria da afiação do eletrodo de tungstênio e o comprimento do arco influenciam diretamente o formato do arco de soldagem, influenciando na penetração da solda, vida útil do eletrodo, e velocidade de soldagem.

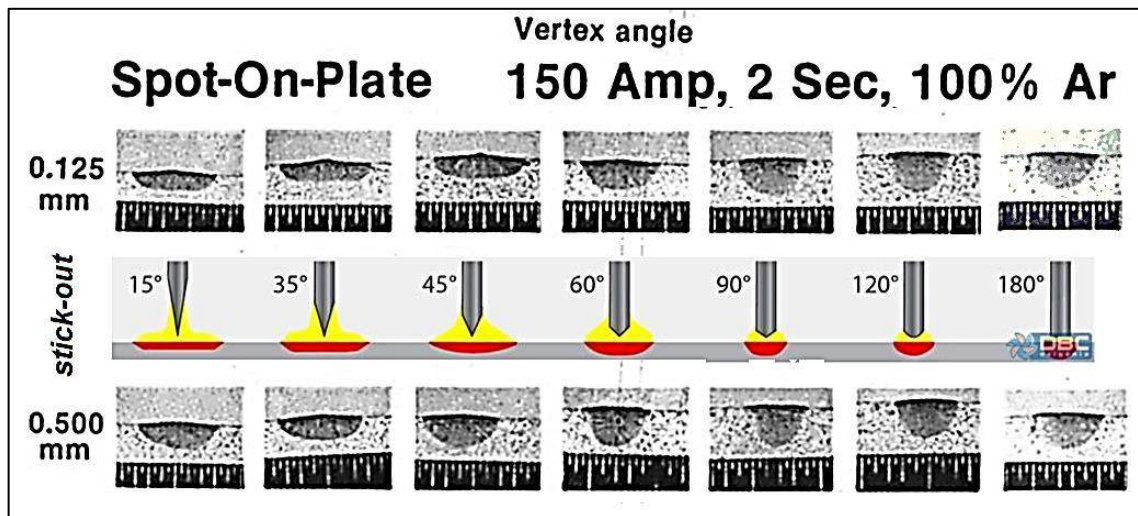


Figura 38. Efeitos do ângulo do eletrodo e da distância “eletrodo-peça” para soldagem *TIG* autógena, adaptado de AWS – Welding Process, 2009.

Tochas refrigeradas à água (“*water cooled torch*”) - Tochas convencionais são refrigeradas com o próprio gás de proteção e estão limitadas a 200 A. A busca pelo aumento de produtividade em processos de soldagem autógenos se baseia comumente em iniciativas para aumento da concentração da fonte de calor. Para efetiva viabilidade industrial, esta meta deve estar acompanhada de estabilidade da poça de fusão e robustez processual, em termos de repetitividade e imunidade a defeitos. Isto significa que maiores taxas de energia implicam em maiores taxas de refrigeração dos componentes, dentre eles as tochas. O uso de uma unidade autônoma de resfriamento (*chillers*) para o fluido refrigerante é frequente em caso de tochas acima de 500 A, de modo a reduzir a dimensão dos dutos de refrigeração e da tocha. As tochas de alta produtividade são refrigeradas à água (Figura 39), suportando correntes de até 1000 A. (Bracarense, 2000).

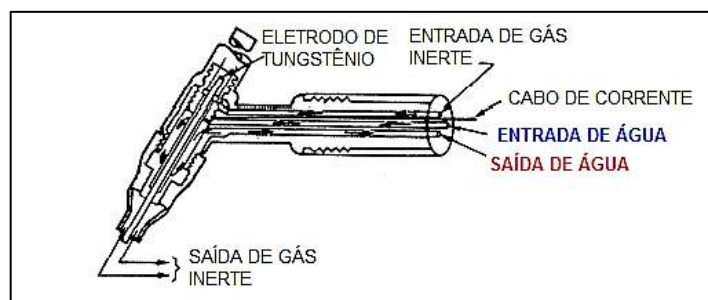


Figura 39. Tocha *TIG* refrigerada à água, (Bracarense, 2000).

Soldagem TIG Multi-Catodo - A soldagem TIG multi-catodo emprega dois ou mais eletrodos de tungstênio na mesma tocha de soldagem em circuitos de soldagem independentes, cada qual com sua respectiva fonte de potência. (Egerland, *et al*, 2015)

Tocha TIG bi-catodo - No caso de dois eletrodos, o processo recebeu a denominação de TIG Duplo Eletrodo (“TIG-DE: TIG Double Electrode”), TIG bi-catodo, ou ainda, de forma genérica “*twin arc*”. Do ponto de vista técnico, o processo TIG Duplo Eletrodo é uma variante do processo TIG que se caracteriza por utilizar dois eletrodos de tungstênio, posicionados em pequenas distâncias, conectados em fontes de corrente de potencial isolado.

A corrente elétrica passando através de um eletrodo, cria um campo magnético radial, que se inicia na superfície do eletrodo e se estende para o infinito, decrescendo de intensidade na razão inversa do quadrado da distância. Se dois eletrodos são colocados em paralelo, um campo magnético reage com o outro, exercendo uma força de repulsão sobre os mesmos. Se os eletrodos são mantidos próximos, os campos magnéticos são deformados, comprimindo as linhas do campo entre os eletrodos. Isto provoca a concentração da corrente elétrica nas superfícies justapostas dos condutores, denominada de efeito de proximidade (“*proximity effect*”).

Este efeito se estende ao arco elétrico de cada eletrodo, influenciando fortemente no deslocamento do jato de plasma, fazendo com que os arcos se aproximem, quando os eletrodos estão na mesma polaridade, podendo resultar num arco combinado (ou arco híbrido), com características diferenciadas do arco do processo eletrodo único. (Leng, *et al*, 2006)

O arco resultante do acoplamento (“*coupling arc*”) possui menor pressão, fato que diminui a ocorrência de descontinuidades no cordão de solda e possibilita incrementos na corrente e velocidade de soldagem.

Na Figura 40 observam-se as distribuições da pressão de arco para diferentes correntes de soldagem em função da localização do centro do arco, para o processo TIG convencional e para o processo TIG bi-catodo. É possível notar, ainda na mesma figura, que para correntes da ordem de 300 A, a pressão de arco para o processo TIG bi-catodo fica reduzida a um quinto da pressão de arco com o processo TIG convencional (atentar para as diferentes escalas de pressão). (Schwedersky (2), 2015.)

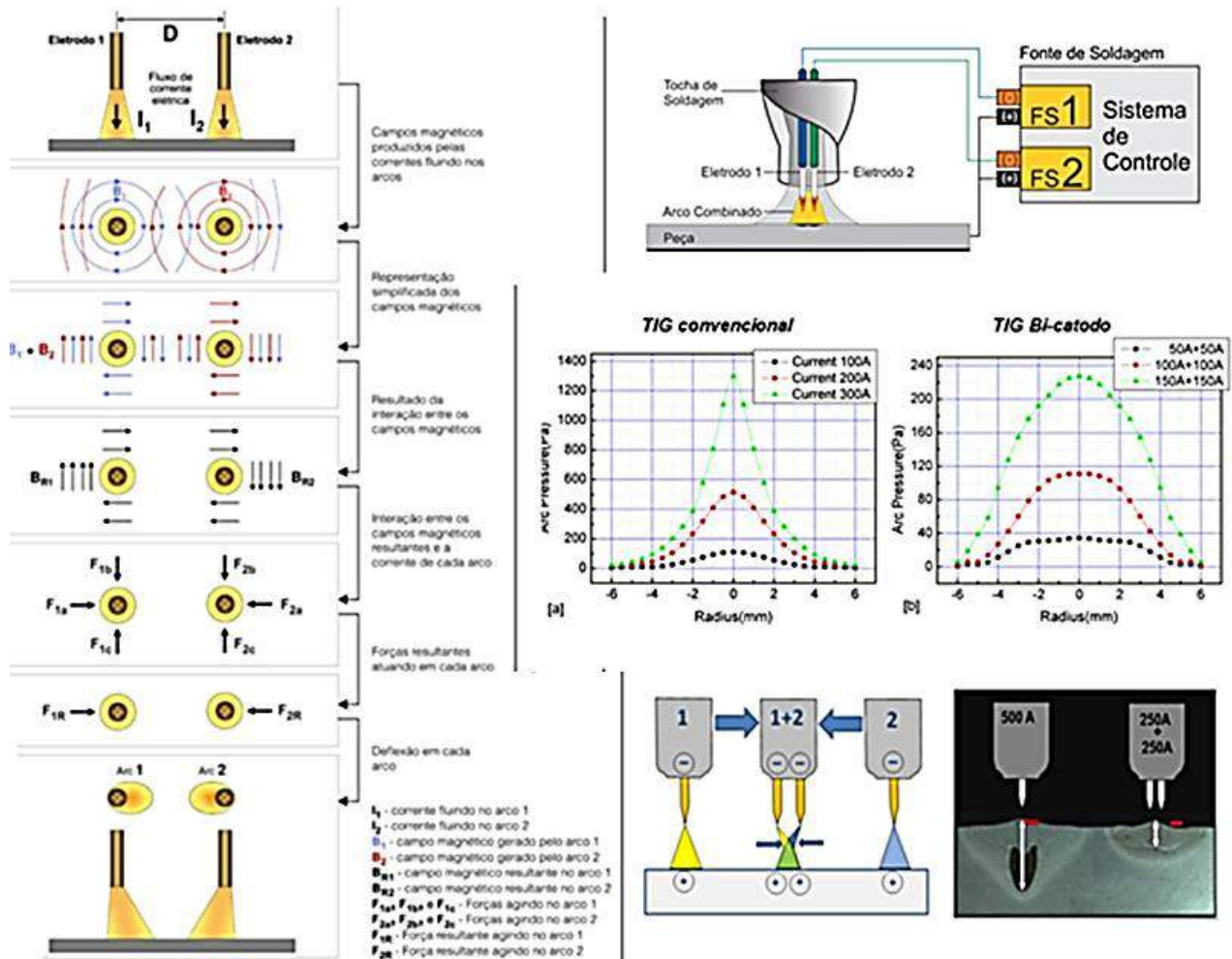


Figura 40. Tocha TIG bi-catodo, adaptada de Leng, *et al*, 2006 e Schwedersky (2), 2015.

A Figura 41, mostra à esquerda, a sobreposição visível de 2 arcos acoplados de 100 A e à direita a comparação de pressões do arco simples e da sobreposição de 2 arcos de 100 A.

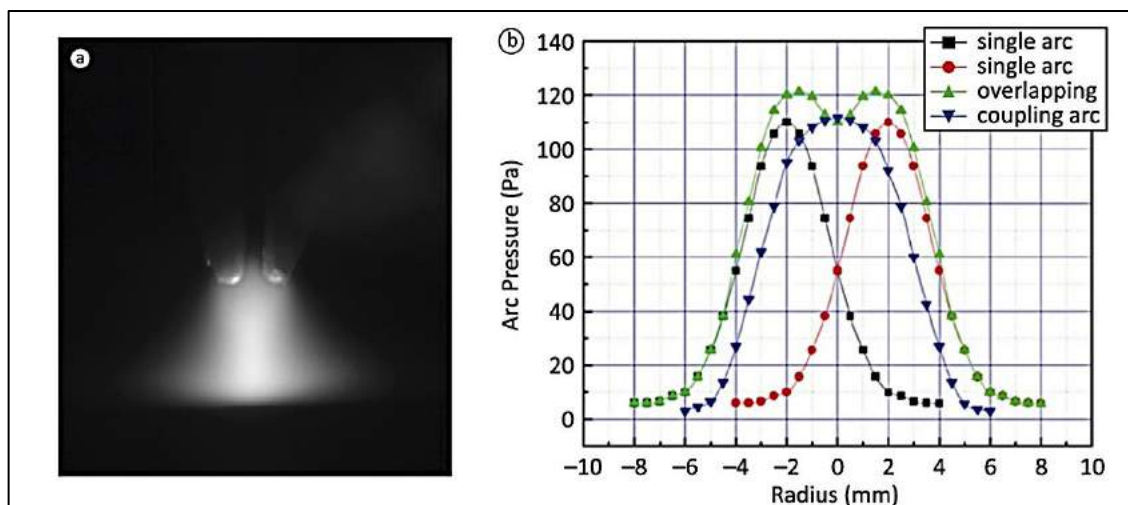


Figura 41. Arco TIG Bi-catodo (Egerland, *et al*, 2015)

Constrição catódica do arco (“*CF-TIG - cathode focussed TIG*”) - A tecnologia da constrição catódica se baseia em uma manipulação do fenômeno de emissão termiônica, que potencializa a soldagem com eletrodos não consumíveis.

Este fenômeno consiste na emissão espontânea de elétrons, portadores de carga para a corrente de soldagem, e depende da temperatura da superfície do eletrodo. *TIG* com constrição catódica do arco consiste na utilização de um projeto diferenciado de tocha, que provê uma elevada taxa de refrigeração do eletrodo de tungstênio (cátodo). (Dutra, 2016.)

A Figura 42 reproduz dados de simulação numérica da temperatura do eletrodo e do arco para uma mesma corrente de soldagem e o gráfico central quantifica o efeito na pressão do arco e da tensão de soldagem. Verifica-se substancial aumento da temperatura do arco e redução da temperatura do eletrodo para a tocha *TIG* com constrição catódica, em relação à tocha convencional. A área com temperatura suficiente para emissão termiônica é constringida pela alta refrigeração do eletrodo. Isto resulta em maior densidade de corrente de soldagem, pois a área condutora é menor e devido a menor capacidade de emissão de elétrons pelo eletrodo, é necessária maior ionização do gás, ou seja, aumento de íons disponíveis para transportar carga elétrica e manter a corrente de soldagem.

Observa-se também que, para uma mesma corrente elétrica, a pressão do arco (mostrada em azul na Figura central) é significativamente aumentada, enquanto que a tensão do arco (mostrada em verde na Figura central) sofre um relativo aumento, quando se compara o processo *TIG* com constrição catódica com relação ao *TIG* convencional. (Dutra, 2016.)

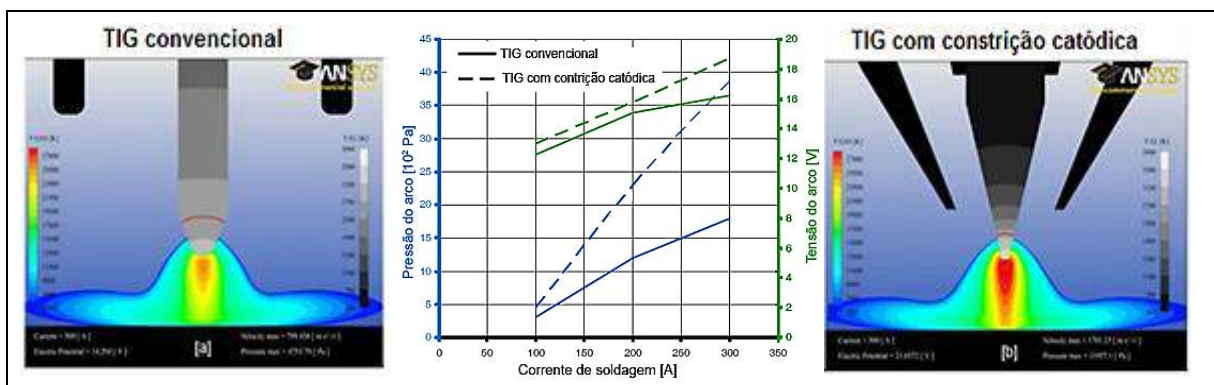
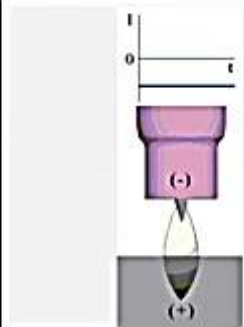
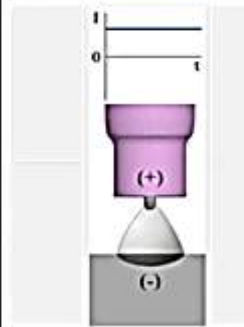
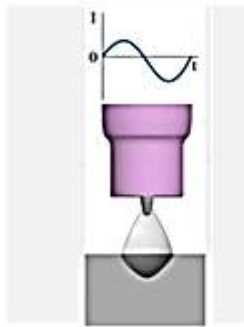


Figura 42. Pressão do arco e tensão do arco medidas para soldagem *TIG* convencional e *TIG* com constrição catódica (*CF-TIG*), para diferentes correntes de soldagem, adaptado de Lohse, *et al*, 2013.

2.3.3.3 Fontes de Soldagem (controlando o arco elétrico)

Tipos de corrente - Na década de 80, surgiram as fontes de energia do tipo Inversoras, extremamente compactas, com total controle de parâmetros e grande economia de energia elétrica. A soldagem *TIG* pode ser feita utilizando corrente contínua (CC- ou CC+) ou corrente alternada (CA). Cada uma dessas alternativas, conforme tabela 6, irá influenciar fortemente os mecanismos de emissão de elétrons e conseqüentemente as características de soldabilidade. (Marques, *et al*, 2011.)

Tabela 6 –Tipos de corrente e seus efeitos para *TIG*, (ESAB (1), 2014.)

TIPO DE CORRENTE	CONTÍNUA		ALTERNADA
	Direta CC-	Inversa CC+	CA
Características			
Objetivo	Penetração profunda e preservação do tungstênio	Penetração "rasa" e efeito limpeza de óxido superficial	Preservação do W e efeito limpeza a cada meio ciclo
Aplicação	Aços carbono, baixa/alta liga, inoxidáveis, prata e cobre e ligas, revestimentos	Viável para soldagem de pequenas espessuras	Alumínio, magnésio e suas ligas
Eletrodo de W: capacidade de suportar corrente sem fundir	Ótima, pode-se usar altos valores de corrente	Pobre, somente para baixos valores de corrente	Boa, pode-se usar valores intermediários de corrente
Ação de limpeza do óxido na soldagem de Al e Mg e suas ligas	Não	Sim	Sim, a cada meio ciclo
Balanco de calor no arco (aprox.)	70% na peça, 30% no eletrodo	30% na peça, 70% no eletrodo	50% na peça, 50% no eletrodo
Fluxo de elétrons - Penetração			

Corrente pulsada - Importantes avanços no uso da eletrônica nas máquinas de solda atuais, que juntamente com máquinas computadorizadas, tem promovido uma maior precisão nas regulagens da soldagem, melhorando a qualidade e a produtividade. Uma das inovações conhecida hoje, é a utilização da "corrente pulsada". O arco elétrico varia em ciclos de altas e baixas amperagens (nível de pico versus nível de base), em intensidade e/ou no tempo. A soldagem *TIG* com corrente pulsada é adequada ao trabalho automatizado, uma vez que os picos de corrente possibilitam controle eficaz da penetração, cujos efeitos são descritos na Figura 43.

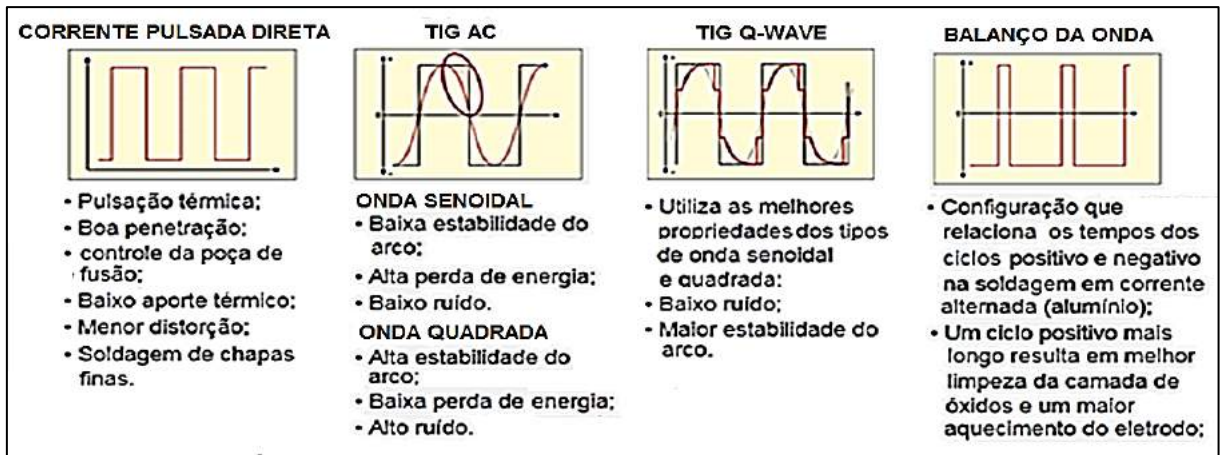


Figura 43. TIG com corrente pulsada, (ESAB (1), 2014.)

É aplicada com sucesso na soldagem de revestimentos, de chapas de diferentes espessuras, de juntas com escoamento assimétrico de calor, em soldagens de penetração total em chapas finas e em passes de raiz em chapa grossa. Os possíveis balanços da amplitude da corrente (corrente de pico *versus* corrente de base) com as possíveis combinações de ciclos de intervalos de tempo geram efeitos na penetração, na largura do cordão e na limpeza (Figura 44).

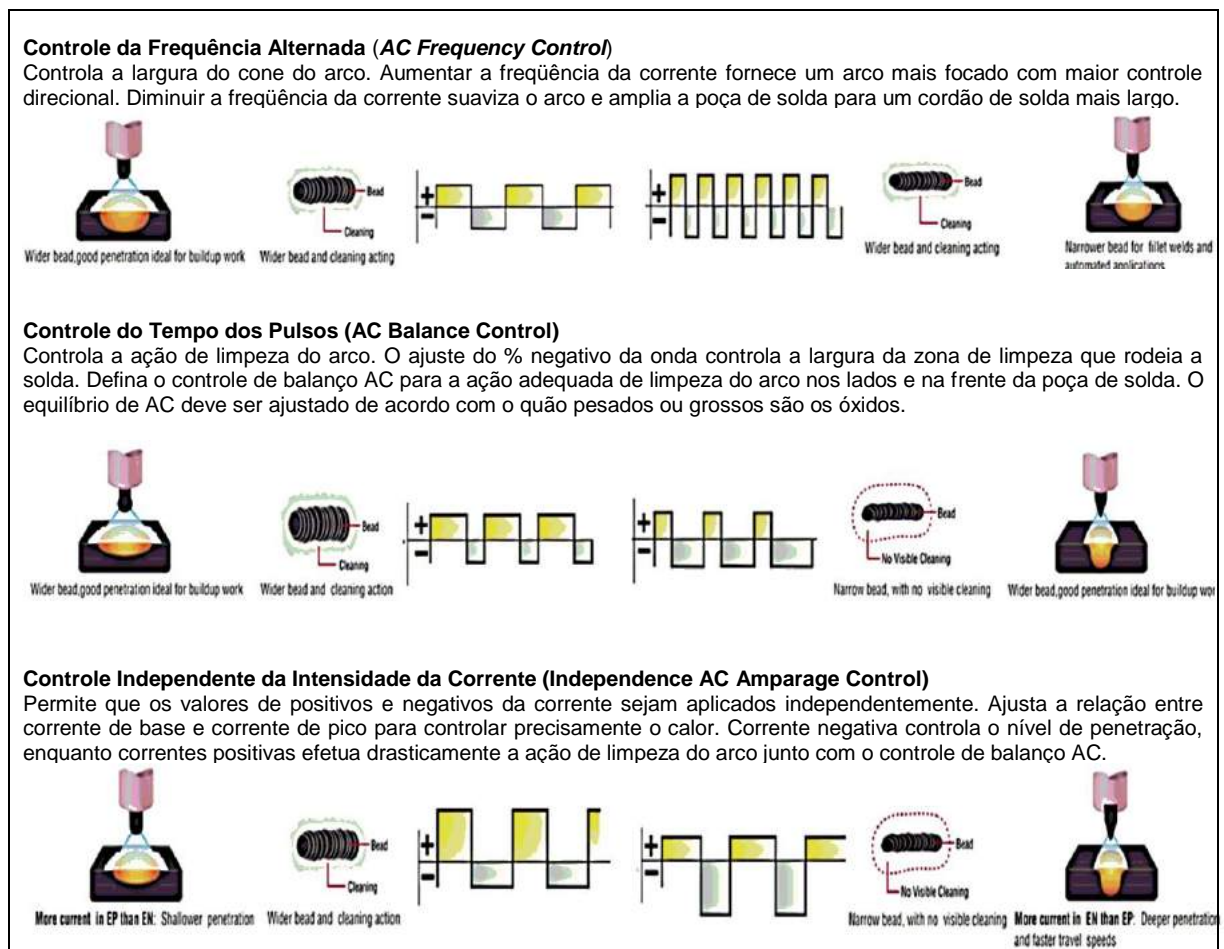


Figura 44. Efeitos do TIG com corrente pulsada (TOPWELL, 2016.)

Controle Automático da Tensão do Arco – (“*AVC – Arc Voltage Control*”) – modernos equipamentos de soldagem *TIG* automatizadas incorporaram este interessante recurso para controle de comprimento de arco para garantir soldas consistentes de alta qualidade em aplicações de corrente alternada ou corrente contínua, controlando o intervalo de arco (comprimento do arco) entre a ponta do eletrodo e a superfície de trabalho. Um transdutor detecta a tensão do arco elétrico para manter o comprimento do arco na distância predefinida dentro de uma precisão de $\pm 0,1$ volt, através de um servo-motor. Isto se processa através de uma interface amigável resultando em procedimentos precisos e repetíveis, obtendo-se uma constante penetração da solda, mesmo em superfícies irregulares (Figura 45). Em soldas automáticas longas, a unidade compensa a erosão do tungstênio, mantendo a zona de solda e a entrada de calor consistentes ao longo do comprimento da solda. O sistema é fácil de operar e se integra com uma ampla gama de fontes de alimentação, tochas e posicionadores para montagem de sistemas de automação “turn-key”. (ARC PRODUCTS, 2016).

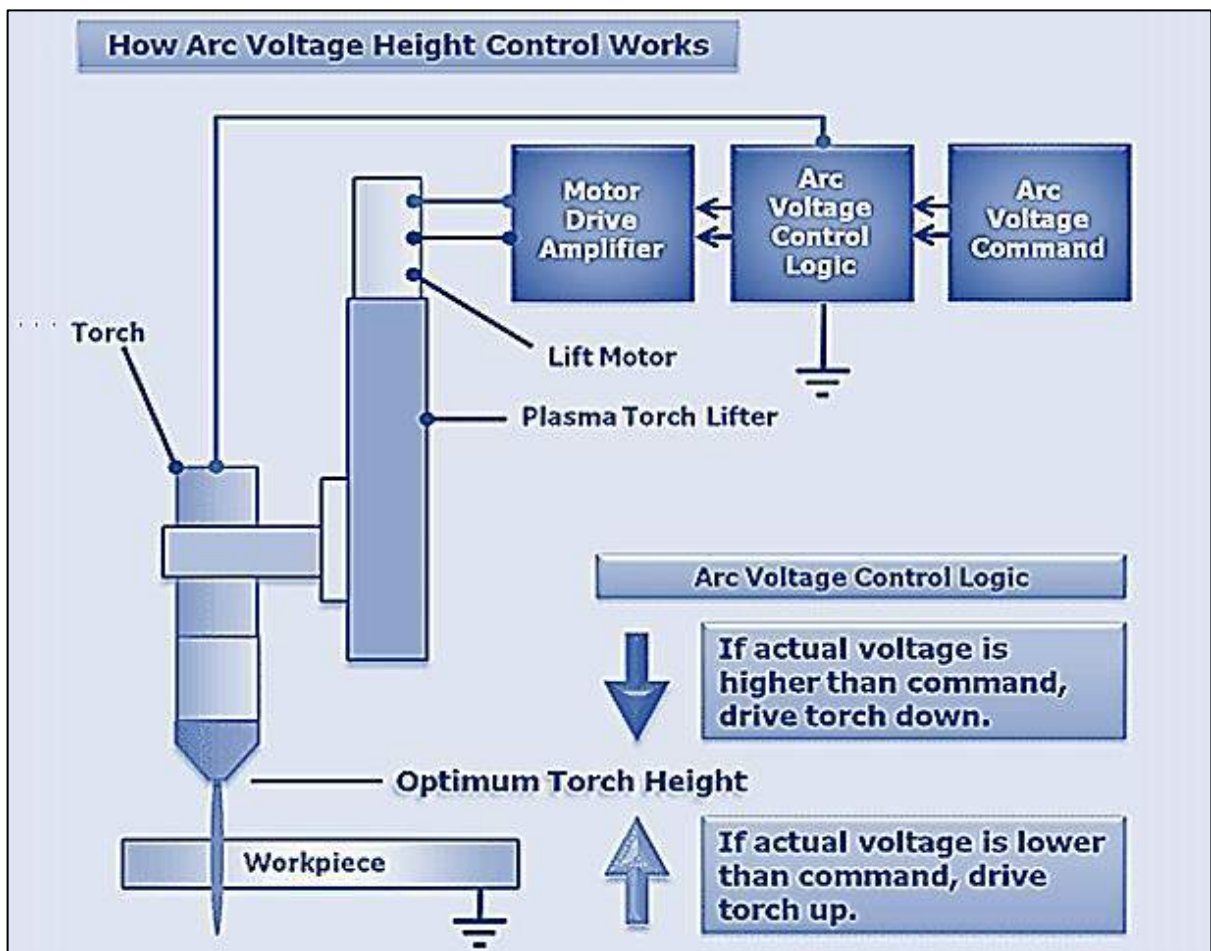


Figura 45. *TIG* com controle automático da voltagem (AVC) - (ESAB (2), 2013.)

2.3.3.4 Controles sobre o metal de adição

TIG com alimentação automática de arame frio – a alimentação contínua e mecanizada do arame de soldagem se dá através de um trator de alimentação do arame de solda, cuja taxa de deposição pode ser controlada independentemente da energia de soldagem. (Delgado, 2000).

No TIG convencional, conforme Figura 46 à esquerda, o arame é injetado à temperatura ambiente, diretamente na poça fundida, com um ângulo de 75° em relação ao eletrodo de tungstênio não consumível, técnica conhecida na bibliografia especializada como **alimentação radial**, e também é mais convencional a inserção do arame na frente da poça de fusão, cuja técnica é denominada “empurrando”.

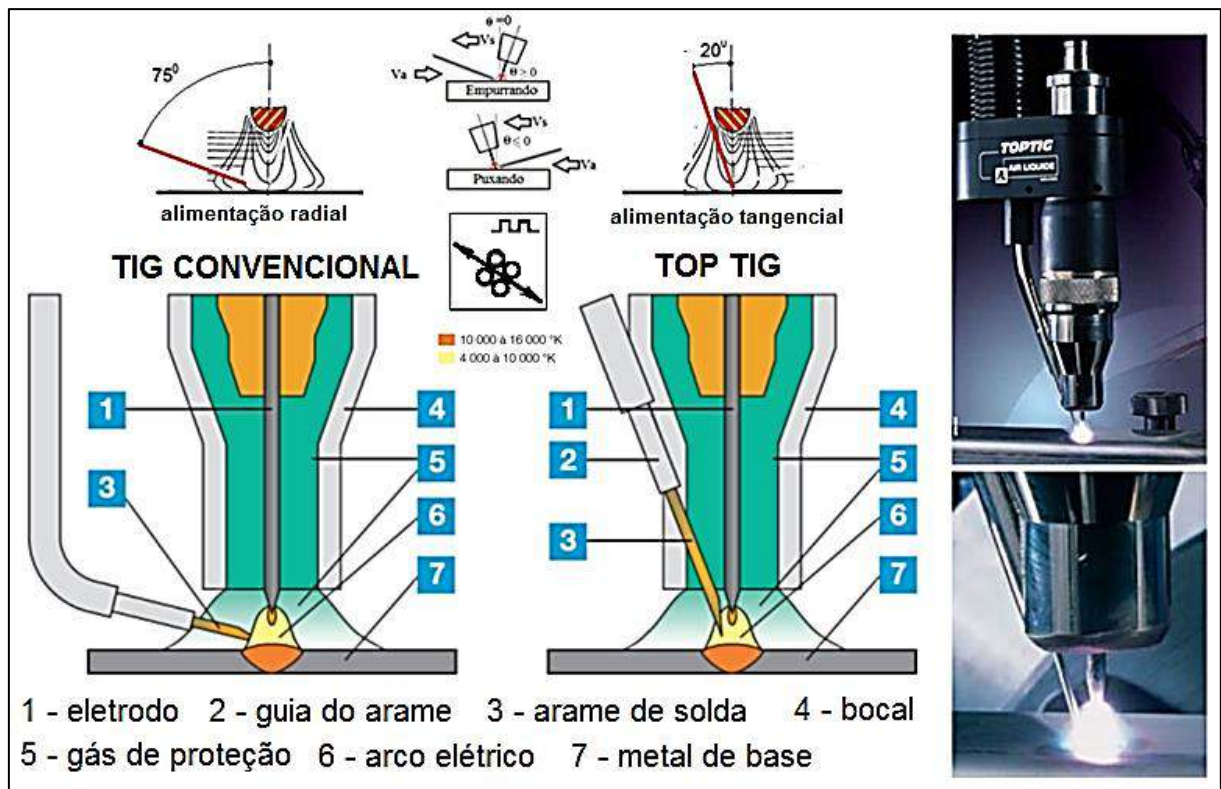


Figura 46. TIG: metal de adição (radial e tangencial) - (SAF, 2014.)

Na alimentação tangencial, chamada de “top-tig”, conforme Figura 41 à direita, o metal de adição é fornecido através do bocal, dentro do arco com um ângulo de 20° em relação ao eletrodo, precisamente onde a temperatura do arco é mais alta. Este conceito garante alta taxa deposição e uma excelente transferência metálica. Os ajustes de parâmetros permitem a escolha de uma ponte líquida de transferência ou uma transferência no modo de gotas. Para ambos modos de alimentação, a velocidade do arame (“forward/backward wire motion”) pode ser pulsada e

sincronizada com a corrente elétrica (programação de velocidades diferentes de arame na fase de base e na fase de pulso da corrente). Seja qual for o parâmetro selecionado, devido ao controle preciso da energia, o processo garante um resultado de qualidade, com ausência total de respingos e evita distorções em chapas finas. (SAF, 2014.)

Tecimento mecanizado (“weaving”) – o tecimento é normalmente caracterizado pela oscilação transversal do eletrodo combinado com o deslocamento longitudinal da soldagem, descrevendo uma determinada trajetória desejada. A velocidade de deslocamento combinada da fonte de calor (**V_c**), é uma variável de grande importância, pois é ela que determina a real distribuição do calor imposto. Na Figura 47 à esquerda, a equação (a), obtida pelo teorema de Pitágoras, quantifica a relação entre as três velocidades envolvidas. **V_c** é a resultante vetorial da velocidade de soldagem (**V_s**) e da velocidade de oscilação (**V_o**). Esta última, por sua vez, é dependente dos parâmetros de oscilação (amplitude (**A**), frequência (**f**) e tempo de parada lateral (**t_{PL}**)), conforme a equação (b). Frequência e amplitude, via de regra definem os parâmetros de regulagem dos mecanismos de oscilação da tocha. Combinação de tempos de parada (central e/ou lateral) do movimento transversal permitem ampliar a gama de trajetórias possíveis (Figura 47, à direita).

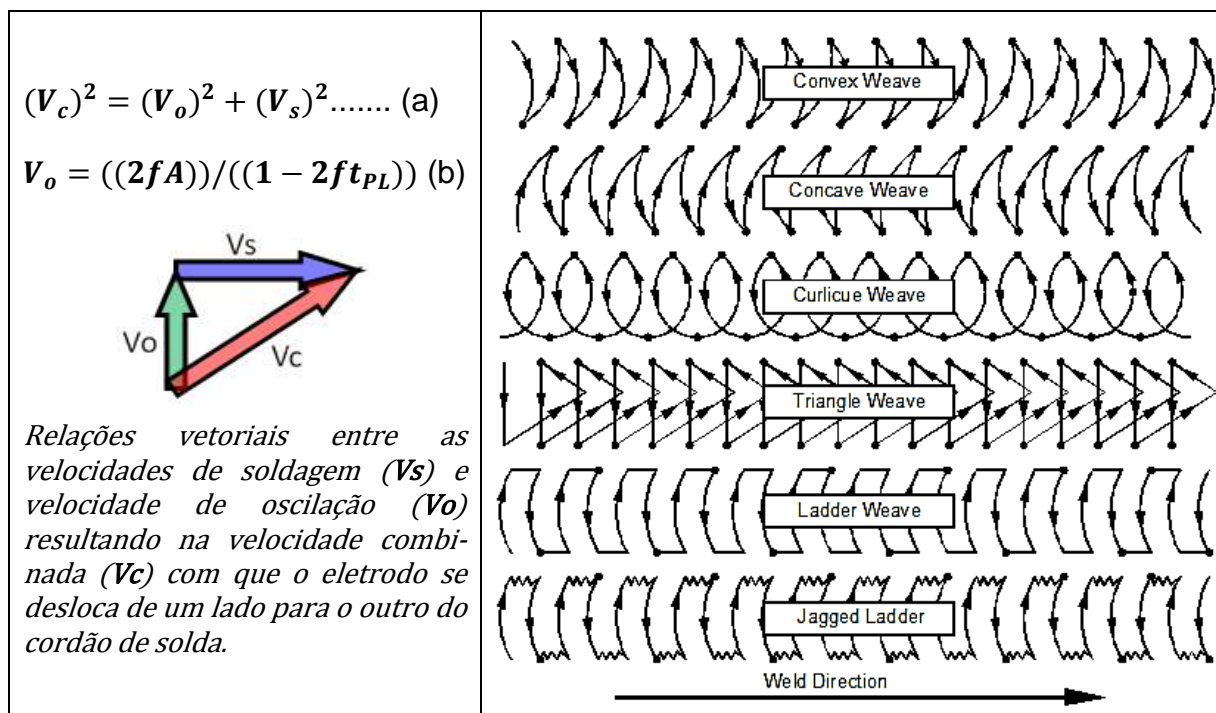


Figura 47. Trajetórias de Tecimento na soldagem (Scotti, 1991.)

O uso do tecimento influencia consideravelmente a geometria do cordão de solda e o nível de diluição. Via de regra, o uso do tecimento aumenta a largura e reduz o reforço do cordão de solda, proporcionando uma melhor distribuição de material sobre a peça, reduzindo com isso a razão reforço/largura (r/w), parâmetro este que indica o grau de convexidade do cordão de solda. (Fratril, *et al* – 2010).

Tecimento eletromagnético (“oscillarc”) – A ideia de usar campos eletromagnéticos para oscilar arcos de soldagem não é nova, foi idealizada e patenteada em 1960. (Greene, 1960.)

Trata-se de uma variante do tecimento mecanizado, onde o deslocamento da fonte de calor se dá pela deflexão do arco voltaico quando submetido à influência de um campo eletromagnético controlado, conforme mostra a Figura 48. O sentido da deflexão (esquerda e direita ou à frente e atrás, em relação ao vetor velocidade de soldagem) depende da montagem/posicionamento do eletroímã em relação ao arco/tocha de soldagem, ou seja, do sentido das linhas de fluxo magnético produzidas pelo eletroímã. A inversão da posição (sentido da deflexão) do arco se dá pela inversão do sinal de controle (tensão/corrente) do eletroímã. O alcance do movimento do arco em cada posição depende do nível de campo magnético aplicado. O tempo de permanência nesta posição depende do tempo de aplicação do campo eletromagnético, conforme mostra o diagrama à direita na figura 48.

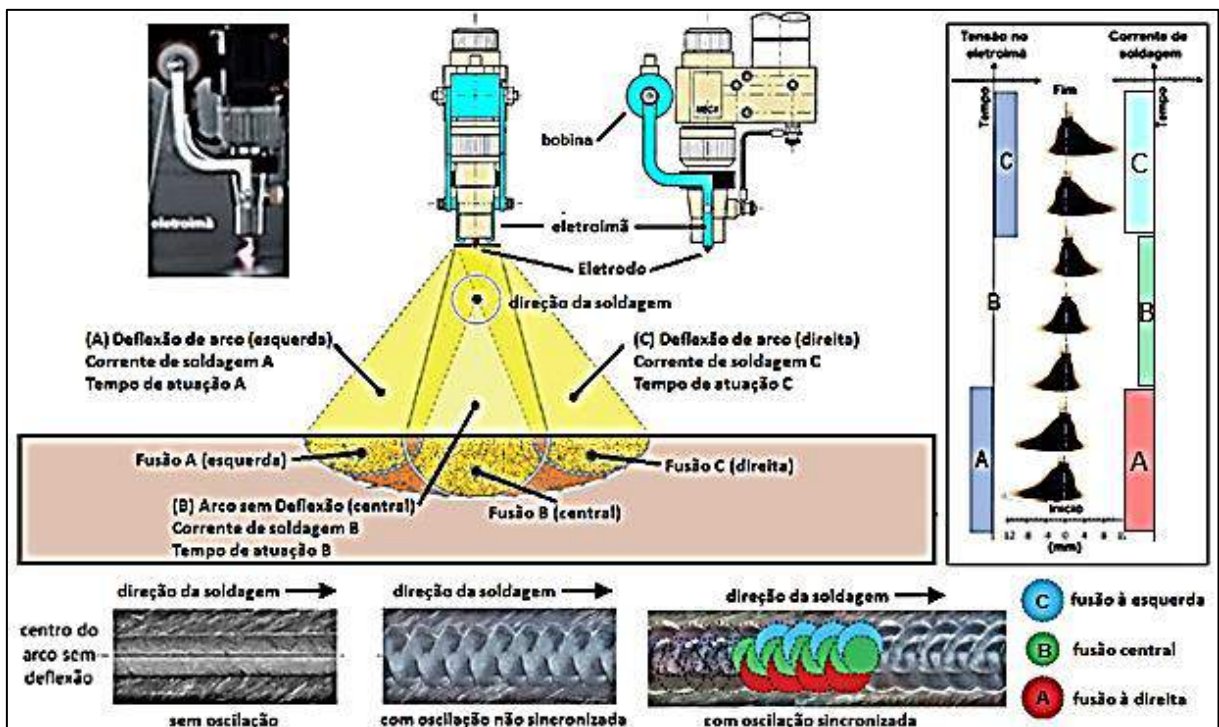


Figura 48. TIG – oscilação eletromagnética do arco (Larquer, *et al* - 2016.)

As vantagens, comparada à oscilação mecânica, é não se ter peças móveis sujeitas ao calor da solda e a precisão eletrônica que pode ser obtida na inversão / desligamento do campo eletromagnético, bem como a facilidade de se sincronizar as deflexões com os pulsos de corrente / tensão, conforme mostrado pelas posições A, B e C na figura 48. A desvantagem é a limitação na amplitude que pode ser obtida. (Larquer, *et al* - 2016.)

Arame Quente (“hot-wire”) – Na década dos anos 60 foi desenvolvida a técnica chamada “hot-wire”, com o objetivo de aumentar a taxa de deposição do processo *TIG*, através do aquecimento do arame de solda até próximo da temperatura de fusão, e conseqüentemente, reduzindo-se o efeito de sequestro de calor da poça de fusão para poder fundir o material de aporte, aumentando-se a eficiência do arco de soldagem. (Henon, 2015).

O aquecimento é obtido através de uma segunda fonte de corrente (contínua ou alternada), e uma diferença de potencial elétrico é estabelecida entre dois pontos do arame de solda no bocal de guia. O arame comporta-se como uma resistência elétrica para o fluxo da corrente elétrica, provocando assim o aquecimento do mesmo, reduzindo a energia necessária para a fusão deste no momento de ser depositado na poça de fusão.

Existem inúmeros métodos pelos quais pode ser aquecido o arame, o mais simples deles é circular uma corrente constante pelo material de adição, que será aquecido ao fechar o circuito elétrico em contato com a poça fundida. Faz-se necessário destacar que os métodos de aquecimento de arame somente são eficientes quando aplicados a materiais que possuam uma alta resistividade elétrica, restringindo seu uso a materiais como o cobre ou alumínio. A energia para o aquecimento resistivo é obtida pela queda de tensão através da extensão do arame (efeito Joule), e pode ser medida com as equações básicas da eletricidade descritas a seguir.

A resistência é determinada pelo comprimento do arame sob a influência do gradiente de tensão, do material e do diâmetro do arame (Olivares, *et al*, 2016.)

A Primeira Lei de Ohm postula que um condutor ôhmico (resistência constante), mantido à temperatura constante, a intensidade (i) de corrente elétrica será

proporcional à diferença de potencial (**V**) aplicada entre suas extremidades, ou seja, sua resistência elétrica (**R**) é constante. É representada pela seguinte fórmula:

i – corrente elétrica (**A**)

V – tensão (**V**)

R - resistência elétrica (**ohms**)

$$V = Ri \Rightarrow i = V/R \dots\dots\dots (1)$$

A Segunda Lei de Ohm estabelece que a resistência elétrica de um material é diretamente proporcional ao seu comprimento, inversamente proporcional à sua área de secção transversal e depende do material do qual é constituído, sendo representada pela seguinte fórmula:

ρ - resistividade do material (**$\Omega.mm$**)

L – comprimento do arame sob influência (**mm**)

D – diâmetro do arame (**mm**)

S – área da seção transversal do arame (**mm²**) => **S** = (πD^2)/4 (2)

R – resistência do arame (**Ω**) => **R** = (ρL)/**A** (3)

Substituindo (2) em (3): $R = \frac{\pi}{4} \rho (D^2 L) \dots\dots\dots (4)$

Quando um resistor é percorrido por uma corrente elétrica **i**, devida a uma tensão **V**, fornecida por uma fonte de energia, ele se aquece. Esse aquecimento, chamado de efeito Joule, é resultado da transformação da energia que vem da fonte em energia térmica no resistor. A energia transformada em calor, **Q_e** é dada pela equação $Q_e = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt$, simplificada abaixo pela equação da energia por unidade de tempo (**Q̇_e**):

$$\dot{Q}_e = Q_e / \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{Q}_e = Ri^2 \dots\dots\dots (6)$$

Substituindo (1) na equação (5), temos:

$$\dot{Q}_e = V^2 / R \dots\dots\dots (6)$$

Substituindo (4) na equação (6), temos:

$$\dot{Q}_e = 4V^2 / \pi \rho (D^2 L) \dots\dots\dots (7)$$

De modo análogo, o fluxo de calor (\dot{Q}_e) descrita na equação (5) pode ser escrito como (\dot{Q}_t), a partir da equação fundamental da calorimetria, como:

\dot{m} – fluxo de massa (**kg/s**)

c_p – calor específico do arame (**J/(kg.°K)**)

ΔT – variação da temperature do arame (**°K**)

$$\dot{Q}_t = \dot{m} \cdot c_p \Delta T \dots\dots\dots (8)$$

O fluxo de massa (\dot{m}) pode ser escrito como:

V_A – velocidade de alimentação do arame (**cm/min**)

δ – densidade do arame (**Kg/m³**)

$$\dot{m} = V_A \cdot \delta \cdot S \dots\dots\dots (9)$$

Substituindo (9) na equação (8), temos:

$$\dot{Q}_t = V_A \cdot \delta \cdot S \cdot c_p \Delta T \dots\dots\dots (10)$$

Substituindo (2) na equação (10), temos:

$$\dot{Q}_t = V_A \delta (\pi D^2 / 4) c_p \Delta T \dots\dots\dots (11)$$

As equações (7) e (11) definem as energias (elétrica e térmica), as quais podem ser consideradas equivalentes pelo princípio da conservação de energia ($\dot{Q}_e = \dot{Q}_t$), desprezando-se as perdas de calor.

Considerando-se então que $\dot{Q}_e \cong \dot{Q}_t$, o gradiente térmico ΔT , para o aquecimento do arame na tocha “hot wire”, pode então ser estimado, em função das outras variáveis, conforme descrito pela equação (12):

$$4V^2 / \pi \rho (D^2 L) = V_A \delta (\pi D^2 / 4) c_p \Delta T$$

$$16V^2 = V_A \rho \delta \pi^2 L D^4 c_p \Delta T$$

$$\Delta T = (\pi^2 \rho \delta c_p) \cdot (V_A L D^4) / (16V^2) \dots\dots\dots (12)$$

A Figura 49, na parte superior, apresenta as alternativas para os circuitos elétricos para o processo *TIG hot-wire*. Na parte inferior, o gráfico da Figura 44 mostra que ao aumentar a energia do arco voltaico, a taxa de deposição do processo *TIG hot-wire* aumenta, em especial se é combinado com técnicas de oscilação do arco. O processo *TIG hot-wire* destaca-se por conseguir taxas de deposição de pelo menos o dobro do *TIG cold-wire*. (Lucas (2), 1990.)

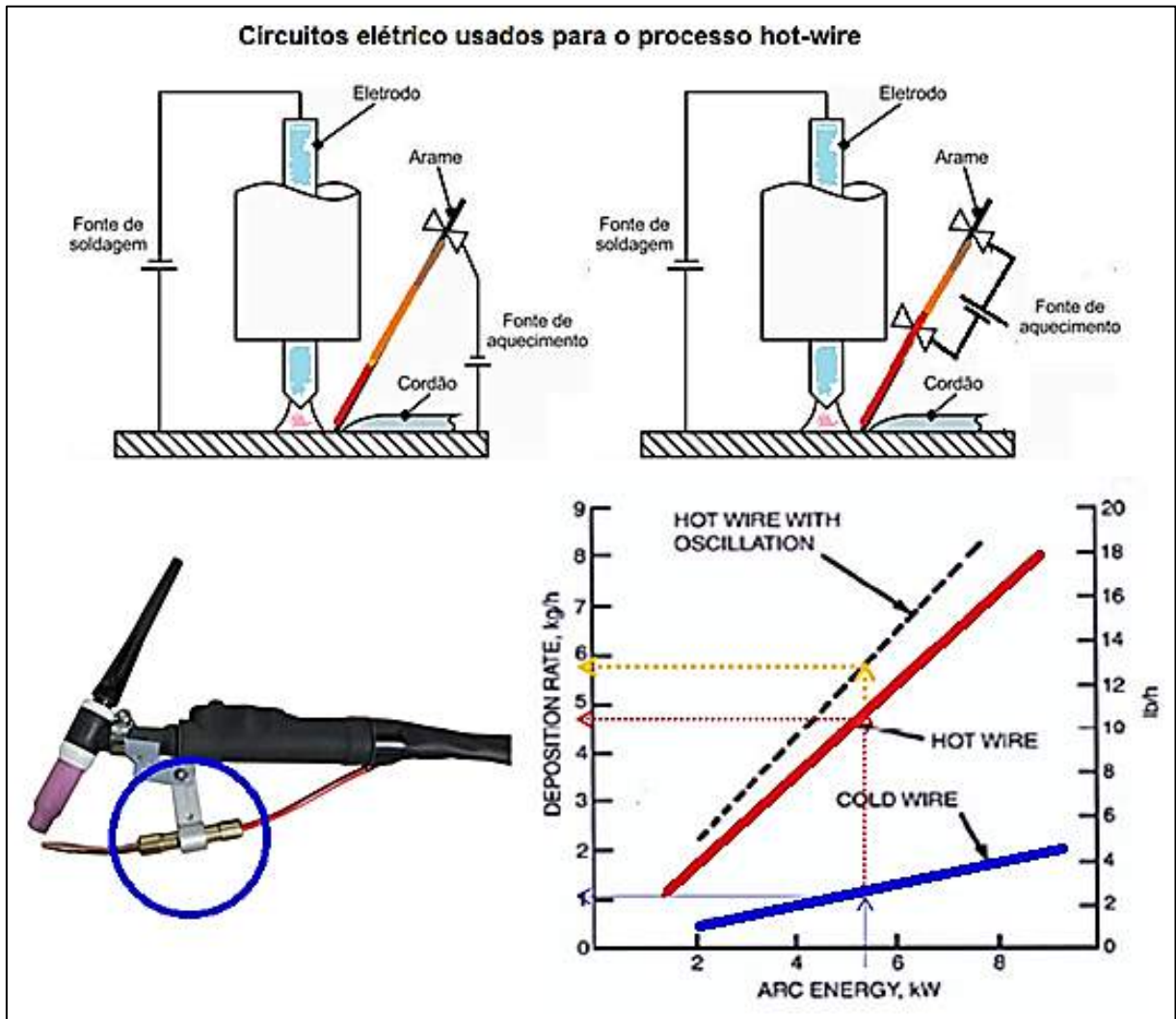


Figura 49. *TIG* – arame quente (“*hot wire*”), adaptado de Lucas (2), 1990.

Tocha duplo arame – com o objetivo de aumentar a taxa de deposição com a preservação do conceito de baixa diluição, outra técnica que vem sendo desenvolvida é a da dupla alimentação de material de adição (“*dual wire*”) em processos automatizados.

Esta variante, demonstrada na Figura 50, permitiu elevar ainda mais a taxa de deposição do processo *TIG*, podendo ser combinada com o aquecimento prévio do arame e com a sincronização dos movimentos de tecimento automatizados. (Deitos, 2016).

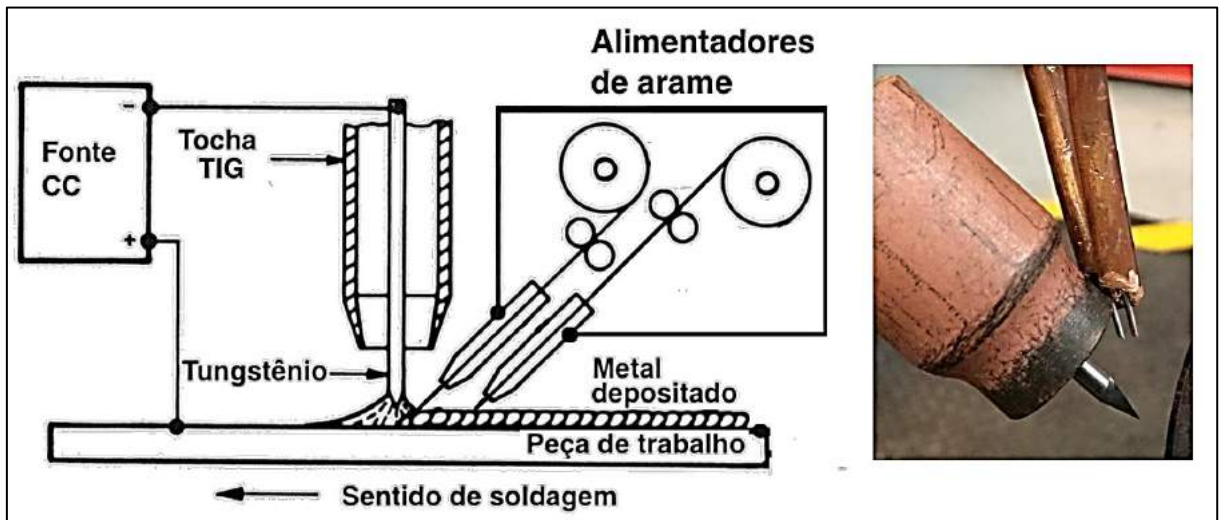


Figura 50. *TIG* – tocha duplo arame (Lucas (1), 1994.)

2.3.3.5 Gases (inertes ou ativos)

O desempenho do processo de soldagem *TIG*, quando se busca elevada produtividade está ligado ao gás de proteção que está sendo usado, pois este influi de forma acentuada sobre a eficiência em gerar a fusão. A blindagem com gás de proteção é particularmente importante para aplicações de soldagem *TIG* com arame quente porque uma maior área de solda (solidificação / resfriamento) requerem maior cobertura de gás. Deste modo, o projeto eficaz do bocal do gás é essencial para a variante *TIG* com arame quente. Um fluxo lamelar de gás é crítico de forma a se assegurar que o gás se eleve toda a extensão da poça de fusão.

O gás convencional para a soldagem *TIG* é o argônio (Ar). O hélio (He) pode ser adicionado para aumentar a penetração e a fluidez do conjunto de solda. As misturas de argônio / hélio podem ser usadas para soldar todos os graus. Em alguns casos, pode-se adicionar nitrogênio (N₂) e / ou hidrogênio (H₂) para obter propriedades especiais. Por exemplo, a adição de hidrogênio dá um efeito semelhante, mas muito mais forte do que a adição de hélio. Contudo, as adições de hidrogênio não devem ser utilizadas para soldar graus martensíticos, ferríticos ou duplex.

O uso de gases com adição de pequenos percentuais de hidrogênio ao argônio proporciona aumento de rendimento do processo possibilitando a soldagem *TIG* em maiores velocidades. (SANDVICK, 2016.)

A Figura 51 sintetiza os efeitos de diversos gases na soldagem. Tomando como referência o Hidrogênio, relativamente ao Hélio e ao Argônio, destaca-se a partir do diagrama, que ele reduz a energia do arco (exige menor voltagem), reduz a penetração, aumenta a estabilidade e reduz os respingos. (Moyer, *et al*, 2010.)

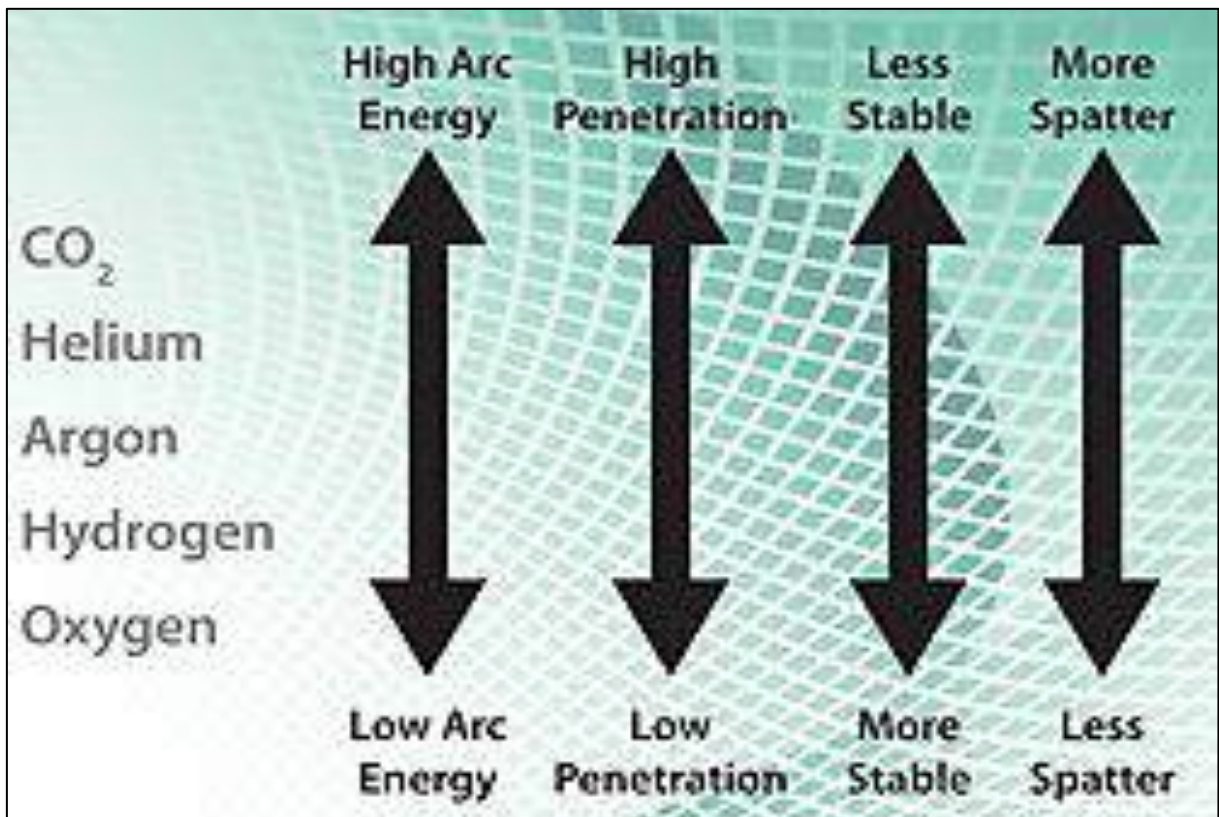


Figura 51. *TIG* – gases de proteção (Moyer, *et al*, 2010).

A adição de percentuais de hidrogênio ao argônio no gás de proteção para o processo *TIG* resulta em aumento na tensão do arco. Essa tendência é mostrada em diferentes trabalhos e também é bastante conhecido na prática. A Figura 52, mostra características estáticas do arco na soldagem *TIG* com argônio puro e diferentes misturas de Ar-H₂ com 0,5%, 5,0% e 20% de hidrogênio, de modo que conforme maior a adição de hidrogênio ao argônio, a tensão do arco se torna mais elevada. (Tusek, *et al*, 2000. e Lowke, *et al.*, 1997.)

A Figura 53 apresenta os resultados de Schwedersky (1), 2011., que investiga com profundidade a influência e os efeitos do gás de proteção no comportamento do

arco, na eficiência do arco (produtividade) e na geometria do cordão. Esses ensaios de soldagem *TIG* autógena foram do tipo cordão sob chapa, realizados sobre chapa de aço carbono de 3/8" de espessura, todos realizados com velocidade de soldagem de 30 cm/min, todos com distância eletrodo peça (DEP) de 3 mm, e confirmam os experimentos de Tusek, *et al*, 2000, mostrando a tensão média para os diferentes gases testados, em diferentes níveis de corrente. Para uma mesma condição de corrente e distância eletrodo-peça, nota-se diferentes tensões de arco, o que significa diferentes energias de soldagem. O arco com hélio resulta numa tensão da ordem de 30% maior do que a tensão obtida com argônio. A adição de % de H₂ ao argônio também resulta num aumento da tensão do arco, e para 15% de H₂ esta tensão se equivale ao resultado obtido com hélio.

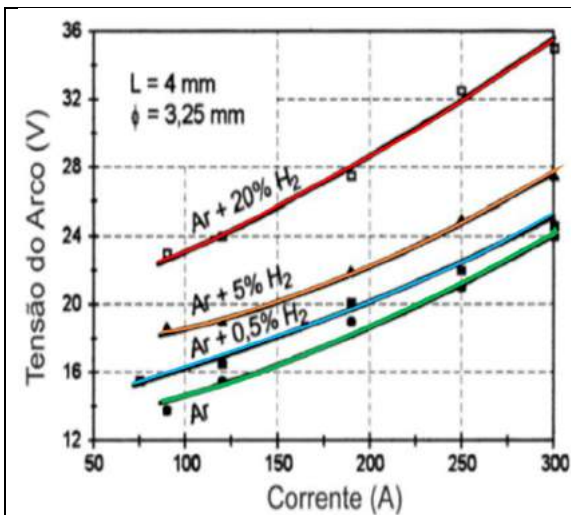


Figura 52. Característica estática na soldagem *TIG*, com diferentes % de hidrogênio no gás de proteção (argônio; DEP = 4 mm; CC-). (Tusek, *et al*, 2000.)

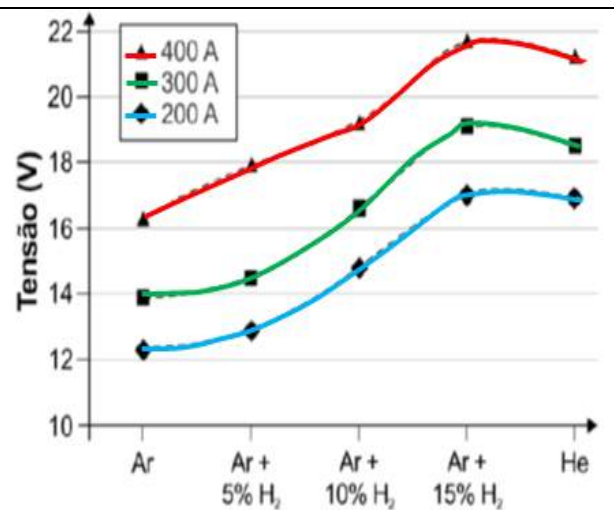


Figura 53. Tensão do arco utilizando soldagem *TIG*, com diferentes gases de proteção (Ar, diferentes %H + Ar, He; DEP = 3 mm; CC-). (Schwedersky (1), 2011.)

A adição de hidrogênio ao argônio no gás de proteção no processo *TIG* resulta em um aumento da área fundida para a mesma corrente média. A Figura 54 a seguir mostra a área da seção transversal fundida em função da porcentagem de hidrogênio no gás de proteção. Nesta pode-se verificar que a área da secção transversal aumenta cerca de 3 vezes, ou seja de aproximadamente 7 mm² para 20 mm², quando a quantidade de hidrogênio é aumentada de 0% até 10%. Na faixa de 10% a 20%, o aumento é significativamente menor, ou seja, de 20 mm² para 23 mm². (Hooijmans, 1994.)

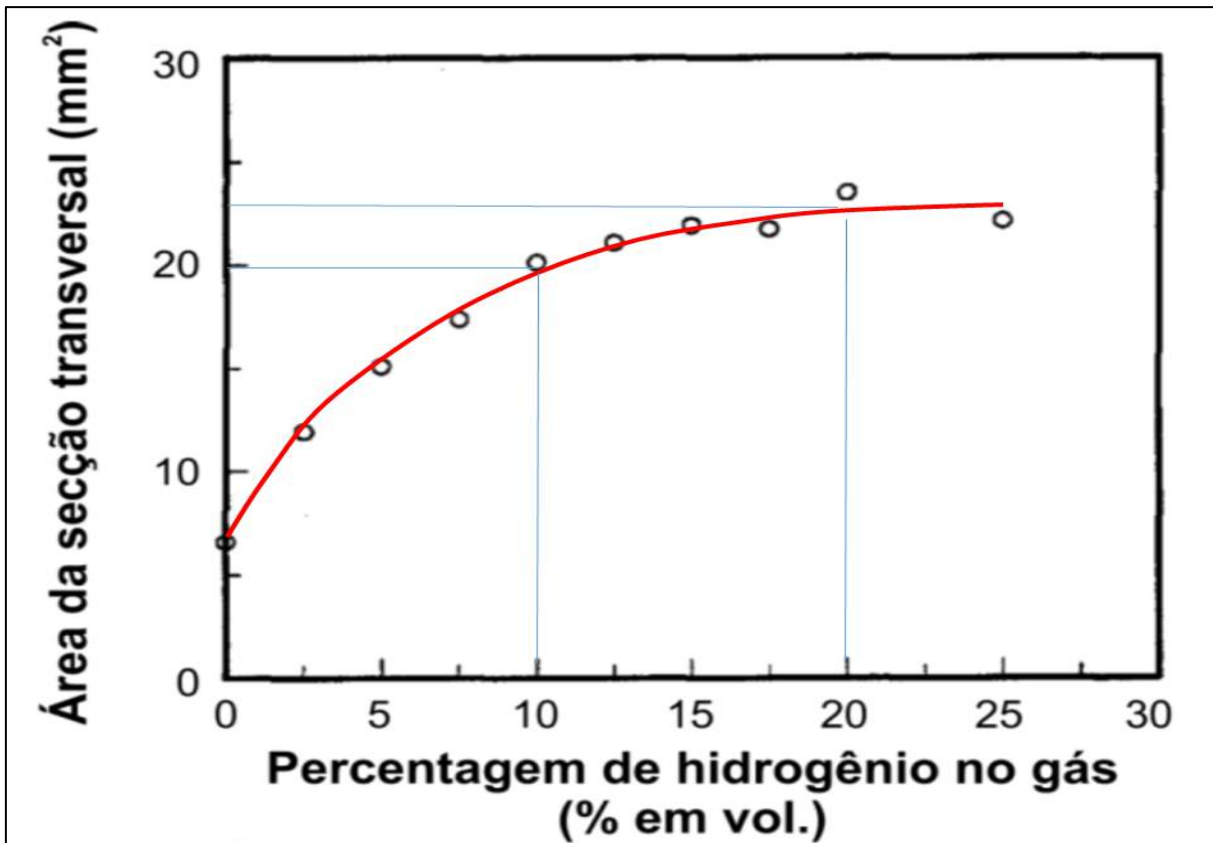


Figura 54. Área da seção transversal do cordão em função do % de Hidrogênio na soldagem TIG, com diferentes % de hidrogênio no gás de proteção (argônio) - (Hooijmans, 1994.)

De modo análogo, os resultados de Tusek, *et al*, 2000 são comparados, a seguir, com os resultados de Schwedersky (1), 2011 para a quantidade de metal de base fundido por unidade de tempo em função do % de hidrogênio no argônio para três diferentes níveis de corrente.

Na Figura 55, à esquerda, os resultados obtidos por Tusek, *et al*, 2000. mostram que a quantidade de metal fundido aumenta fortemente com a adição de hidrogênio para todas as faixas de corrente estudadas. A Figura 56, à direita, Schwedersky (1), 2011. mostra que a quantidade de metal fundido em Kg/h, calculado à partir da seção transversal em função do % de H₂ em misturas com argônio e para o He puro, para diferentes níveis de corrente. Nesta é possível verificar que para um mesmo valor de corrente elétrica, o hélio funde uma quantidade de metal maior, aproximadamente 1,5 vezes, em comparação com o argônio puro. Nas misturas H₂+Ar, verifica-se que o máximo de fusão ocorre em torno de 15% H₂, sendo da ordem de 2,5 vezes do valor para o argônio. Também permite se estimar que uma mistura de 10%H₂ apresenta resultado equivalente ao do He puro.

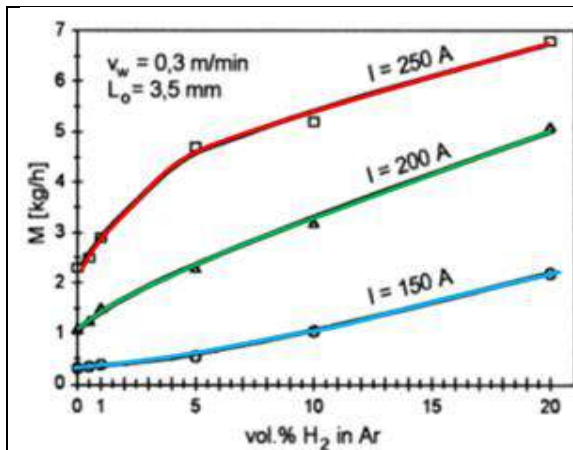


Figura 55. Efeito do % de H₂ no argônio para diferentes níveis de corrente na quantidade de metal fundido para o processo TIG (aço inox 18/8; DEP= 3,5mm; Vs=0,3 m/min; CC- (Tusek, et al, 2000.))

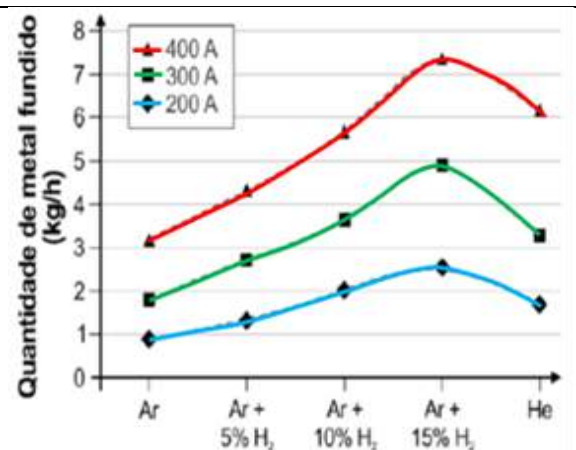


Figura 56. Quantidade de metal fundido para soldagem TIG em função de diferentes gases de proteção – DEP=3mm, (Schwedersky (1), 2011.)

Enquanto que os resultados apresentados acima implicam em conclusões sobre a eficiência da soldagem TIG, cujo foco seria a produtividade, os ensaios e resultados a seguir, extraídos do trabalho de Schwedersky (1), 2011 objetivam avaliar os efeitos na geometria da área de penetração, levando-nos a refletir sobre a penetração e a deposição, e por consequência na taxa de diluição. Estudou-se os efeitos da geometria do cordão em três níveis de corrente (CC-), 200 A, 300 A, e 400 A e para 5 condições de gases de proteção: 100% Ar, 5%H₂+ 95%Ar, 10%H₂+ 90%Ar, 15%H₂+ 85%Ar e 100% He. As Figuras 57 e 58 mostram as seções transversais destes cordões soldados na distância 100 mm e 150 mm, a partir do início da solda.

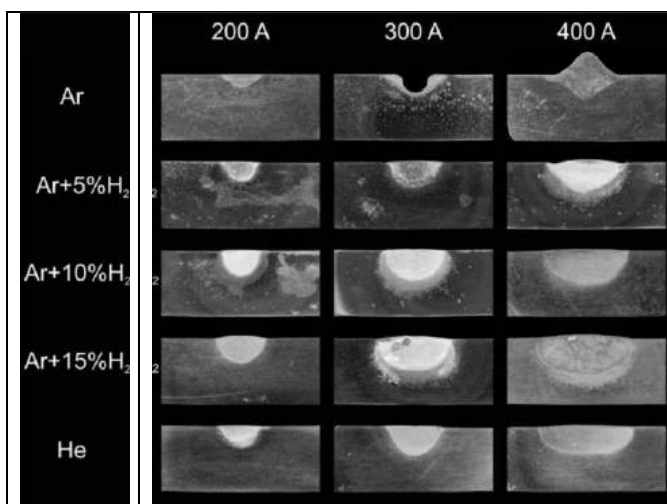


Figura 57. Seções transversais dos cordões cortados a 100 mm do início da soldagem (Schwedersky (1), 2011.)

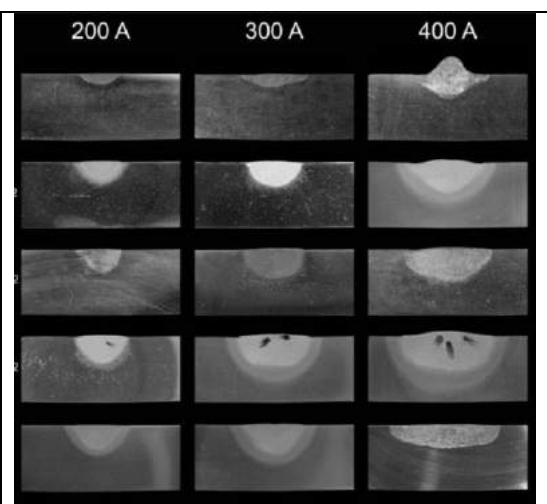


Figura 58. Seções transversais dos cordões cortados a 150 mm do início da soldagem (Schwedersky (1), 2011.)

Na Figura 59, os perfis de penetração foram plotados através da média dos valores de penetração e largura dos cordões, obtidos das macrografias anteriores, para diversas condições de soldagem (corrente e gases de proteção).

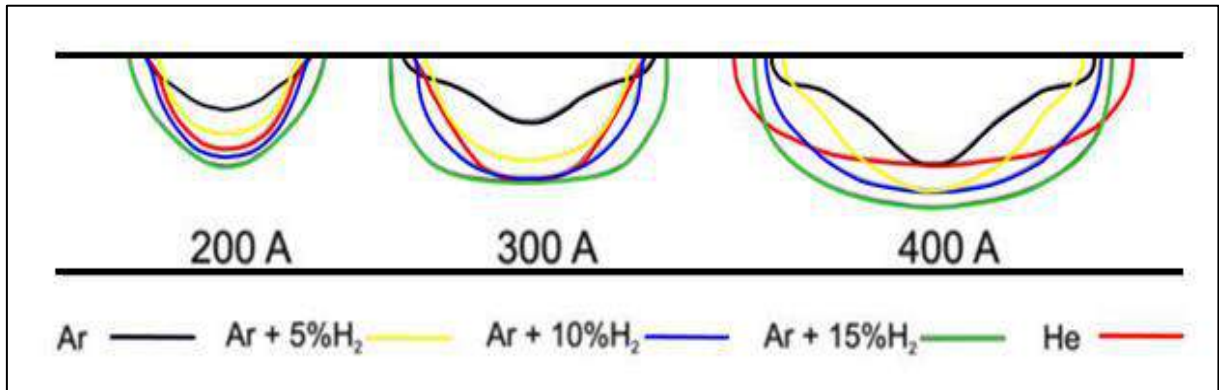


Figura 59. Perfil de penetração plotado a partir da média dos valores de penetração e largura dos cordões, para diversas condições de soldagem (corrente e gases de proteção), adaptado de Schwedersky (1), 2011.

As Figuras 60 e 61 apresentam, respectivamente, a largura do cordão (à esquerda) e a penetração (à direita) quantificadas percentualmente com relação ao perfil de argônio, tomando-se este como referência nominal.

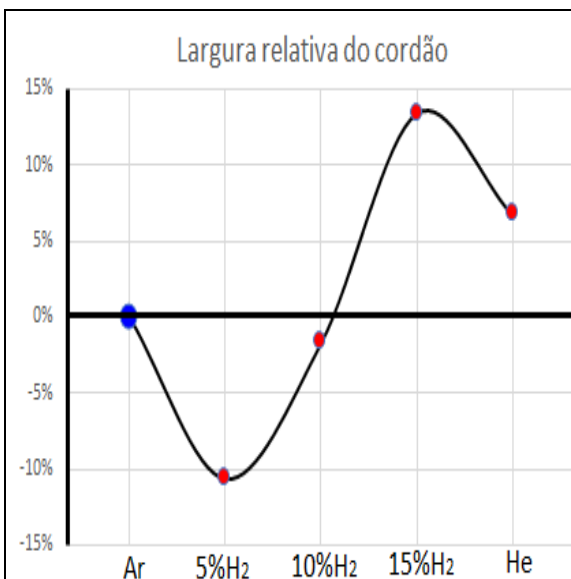


Figura 60. Variação percentual média (entre as 3 condições de corrente) da largura do cordão para soldagem TIG em função de diferentes gases de proteção – DEP=3mm, adaptado de Schwedersky (1), 2011.

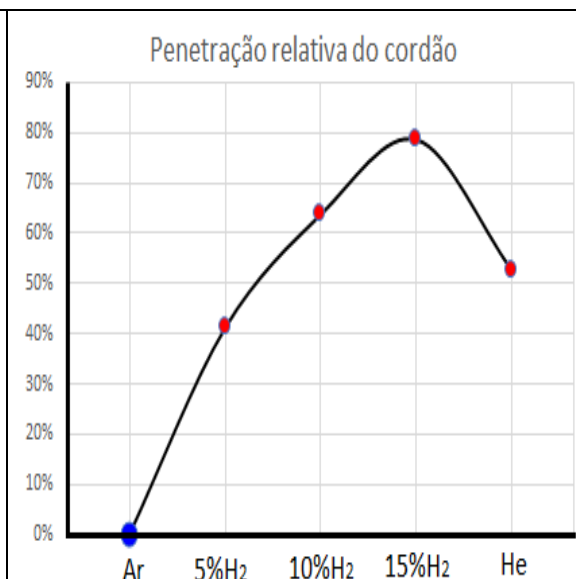


Figura 61. Variação percentual média (entre as 3 condições de corrente) da penetração do cordão para soldagem TIG em função de diferentes gases de proteção – DEP=3mm, adaptado de Schwedersky (1), 2011.

Com relação à largura do cordão (Figura 60), o efeito dos gases não se revelou muito significativo. Uma adição de 5% H₂ produziu uma redução da largura de 10% enquanto que uma adição de 15% H₂ representou um ganho na largura de 14%. A soldagem utilizando Hélio obteve um ganho de 7,5% na largura do cordão. Soldagem com 10% H₂ não apresentou diferença significativa em relação ao argônio.

Inversamente, a penetração (Figura 61), apresentou uma resposta de ganho progressivamente positivo, com o aumento do % de H₂ (40% para 5% H₂; 65% para 10% H₂; e 80% para 15% H₂). Soldagem utilizando Hélio obteve um ganho de 52% na penetração do cordão, resultado que equivaleria a uma mistura de 7,5% H₂ no Argônio. (Schwedersky (1), 2011.)

Extensores de proteção do gás de proteção - O uso de extensores de proteção após o bocal da tocha (*trailing shield gas*) tal como mostrado no lado esquerdo da Figura 62, visa fornecer cobertura além da poça de fusão, e é altamente recomendado para a soldagem *TIG hot-wire*, especialmente para operações de revestimento.

Isto ajuda na solidificação e resfriamento da solda e para correntes e velocidades mais altas, reduz a possibilidade de formação de óxidos, bem como o risco de ocorrer porosidades.

A Figura 62, à direita, revela que eles estão disponíveis em formato plano para soldagem de chapa metálica ou em estilo curvo (côncavo ou convexo) para soldar itens circulares, internos ou externos, tais como tubos.

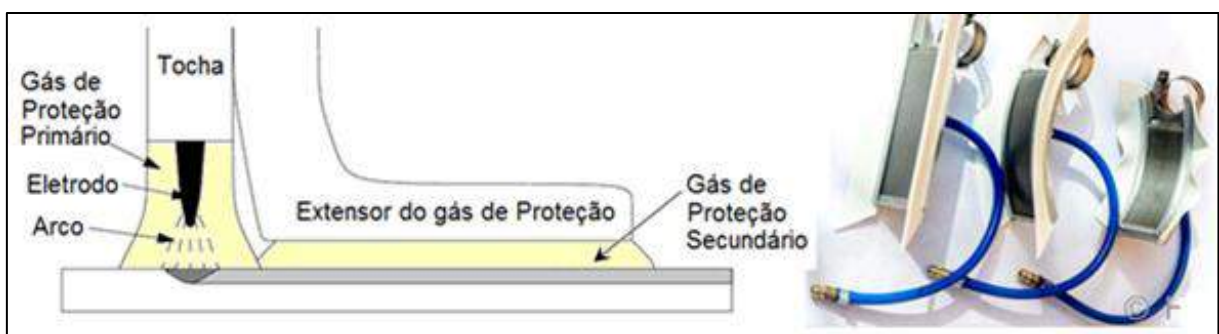


Figura 62. TIG - extensores de proteção gasosa (*trailing gas*) – (HFT, 2016.)

2.3.3.6 Miscelâneas (manipulação, monitoração e automação)

Os processos de soldagem passam pela completa interferência do homem até uma monitoração à distância de todo o processo, caracterizando a soldagem manual, semiautomática, automática e automatizada.

As funções que definem a soldagem dentro desses campos são: início e fim da manutenção do arco elétrico; controle da energia durante soldagem; deslocamentos do eletrodo; manipulação da tocha e correção do arco elétrico em desvios.

É evidente que, em se tratando de revestimento por soldagem, onde grandes extensões tridimensionais (podendo compreender superfícies complexas), estão envolvidas, requerendo tolerâncias severas, exigindo o controle do binômio penetração / taxa de diluição, conduzem estes processos a utilizarem recursos de manipulação, monitoração e automação.

Um estudo bem estruturado reduz os pontos de incerteza relacionados à decisão da implantação de um sistema compreendendo manipulação, monitoração e automação. A viabilidade deve ser estudada segundo parâmetros objetivos e subjetivos.

Em nível mundial, as empresas automatizam levando em conta produtividade, competitividade, qualidade e redução de custo. (SENAI-SP, 1997.)

Manipulação – manipulador é um mecanismo composto geralmente de elementos em série, articulados ou deslizantes entre si, cujo objetivo é o deslocamento de objetos seguindo diversos movimentos.

O aspecto cinemático do manipulador, no que se refere aos movimentos, considera somente as características geométricas dos manipuladores, definindo-os como mecanismos compostos de corpos rígidos chamados de ligações, capazes de assumir configurações geométricas apropriadas para a execução de determinadas tarefas.

Utilizam diversas formas de acionamentos (elétrico, pneumático, hidráulico), são multifuncional e podem ser comandados diretamente por um operador humano ou qualquer sistema lógico programável.

O objetivo é o deslocamento da tocha e/ou da peça de soldagem, podendo realizar deslocamentos de translação e/ou rotação, programados, combinados e sincronizados.

A combinação destes movimentos resulta na trajetória entre o eletrodo e a peça de soldagem.

Os mais comuns são vistos na Figura 63: mesa indexadora, o “trolley” (carro com trilho) e/ou a combinação destes.

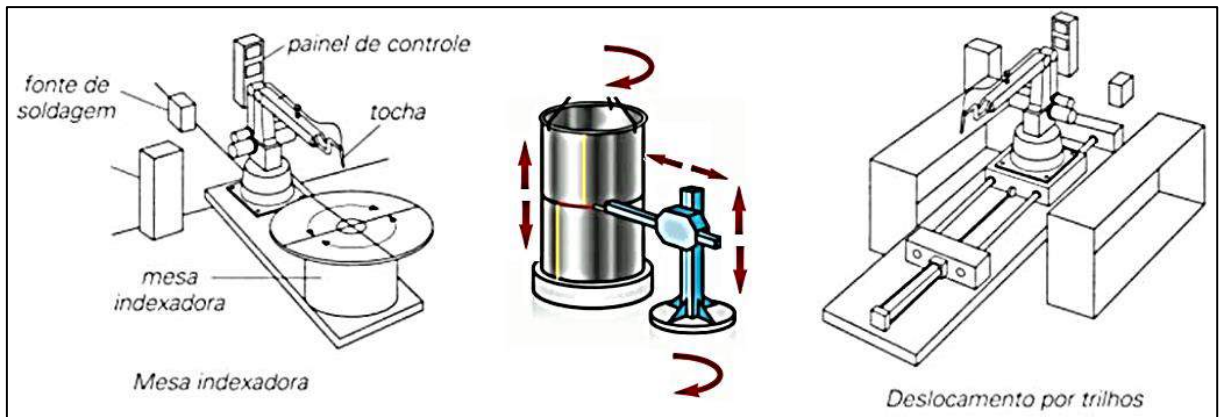


Figura 63. Manipuladores de Soldagem, adaptado de SENAI-SP, 1997.

Sistemas mecanizados ou automatizados, utilizando servossistemas controlados e/ou não controlados, incrementados por sensores que monitoram as funções, garantem a precisão e qualidade da solda e a ausência de interferência humana nas possíveis correções feitas durante a soldagem.

Além disso, permitem a movimentação com maior liberdade e versatilidade na condução do arco elétrico do que na manipulação pelo operador.

A diferença entre o servossistema controlado e o não controlado está na concepção da função de controle inteligente como realimentação de informações da trajetória realizada.

No sistema controlado é possível posicionar o manipulador em qualquer ponto de sua área de trabalho, como também controlar velocidade e aceleração; no sistema não controlado, o deslocamento é definido antecipadamente, sem retroalimentação. (SENAI-SP, 1997.)

Monitoração – pode ser definida como a capacidade de se detectar como se comporta uma determinada variável. A monitoração pode ser qualitativa, como através de monitores de imagens, ou quantitativa, como através de um sensor, para fins de se controlar a operação de soldagem.

A visualização da soldagem, conforme mostrado na Figura 64, com foco no arco elétrico e na poça de fusão, em tempo real pode ser realizada com sucesso com um sistema robusto que consiste em uma câmera e um monitor.



Figura 64. Soldagem TIG com Câmera de Vídeo (“*visioarc*”), adaptado de (SAF, 2014.)

Para monitoramento avançado (“*visioarc*” ou “*melt view*”), são oferecidos sistemas de câmera de alta resolução, com uma vasta gama de opções de lentes e filtros especializados, adequando-se automaticamente às condições com arco aberto ou sem arco (com iluminação focada), resistentes a ambientes agressivos, de poeira, umidade ou temperatura, com recursos analíticos e gravação com o toque de um dedo. (MELT TOOLS, 2016.)

Os requisitos inerentes aos sensores incluem capacidade de manter a precisão adequada ao processo de soldagem, capacidade de não serem afetados pela influência de perturbações induzidas pelo processo de soldagem, durabilidade satisfatória, baixo custo, fácil manutenção, larga gama de aplicações, além de serem compactos e leves.

A escolha dos sensores depende do objetivo, isto é, do controle de soldagem ou do equipamento, e podem compreender: detectores de tensão e corrente do arco, de velocidades (tocha e arame), de vazão dos gases, sensores de temperatura sem contato utilizando radiação infravermelha, seguidores de chanfro (“*tracers joints*” ou “*seam tracker*”), etc. (SENAI-SP, 1997.)

Além disto, sensores podem estar conectados a coletores de dados (“*datalogger*”), de forma a registrarem os parâmetros de soldagem e evidenciarem objetivamente que estiveram restritos aos limites de aceitação.

Automação - Para ser competitiva, a fabricação de equipamentos por meio de soldagem requer um grau de automação maior ou menor, dependendo das condições geométricas da peça de trabalho, da disponibilidade de investimento e da avaliação de objetivos.

Existem desde equipamentos simples, que são manipulados manualmente, até sistemas sofisticados com controle numérico computadorizado (CNC). A soldagem pode partir do sistema manual e evoluir até o automatizado, este último como uma característica diferenciada quando comparado ao sistema automático.

No início, a automação visava a maior produtividade e a melhoria da qualidade; era então denominada de automação rígida, pela qual se fabricavam grandes quantidades e produtos restritos. Todo serviço mecânico repetitivo e rotineiro vai, aos poucos, se transformando em sistemas de automação integrados à manufatura.

Com o passar do tempo, as ideias e conceitos se adequaram à produção de poucas unidades, porém com maior diversificação; a preocupação, agora, é focar a automação global e flexível e o robô (Figura 65) veio atender a esta necessidade.

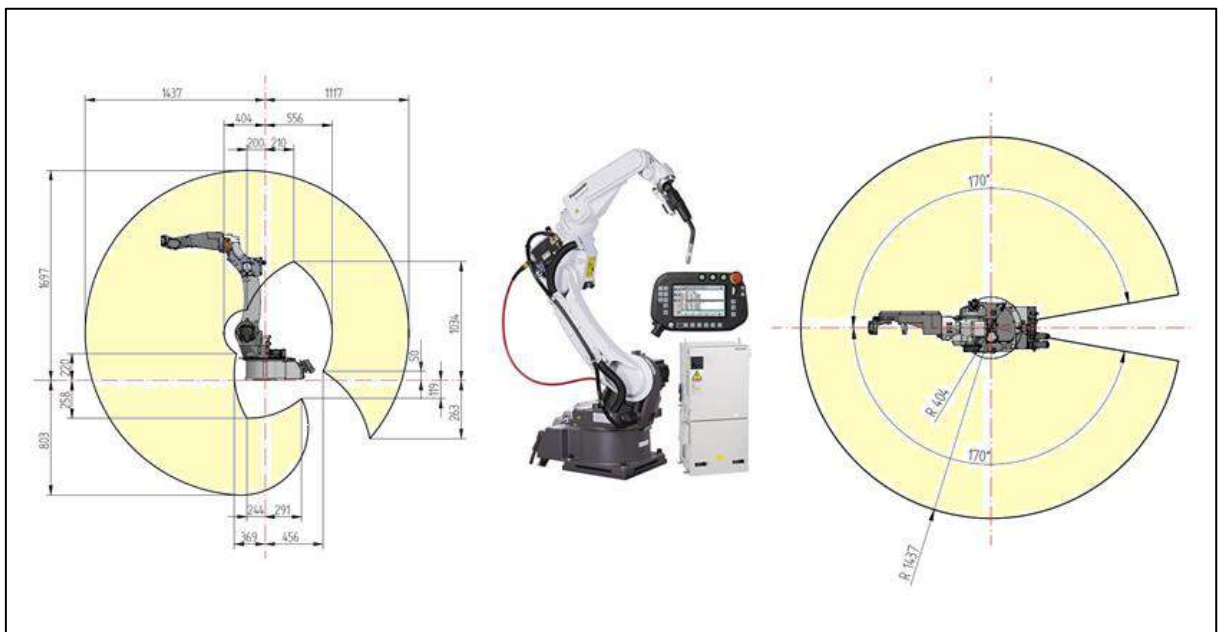


Figura 65. Soldagem com robô, adaptado de POWERMIG, 2016.

A integração da manufatura é a continuidade natural de uma tendência na direção da automação que envolve tecnologias como CAD/CAM, comando numérico computadorizado (CNC) e robótica, formando a célula integrada à manufatura (CIM). (SENAI-SP, 1997.)

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS:

No desenvolvimento deste estudo, foram utilizados os seguintes materiais e recursos:

- **Metal de base:** Chapa e Tubo de aço carbono, API X65, 12" - 0.375" (323,2 x 9,5 x 1600 mm). A tabela 7 apresenta os resultados obtidos na análise de espectrometria ótica para o metal de base (MB). Os valores encontrados para o metal de base apresentam-se destacados em verde e estão de acordo com os valores não destacados, na parte superior, para a especificação API 5L X65 e, na parte inferior, para valores típicos para tubos sem costura, incomuns para chapas laminadas destinadas a tubos soldados.

Tabela 7: Composição química do metal de base (Laboratório TORK-RJ)

API 5L X65 %	0,24 max Carbono C	1,4 max Manganês Mn	0,045 max Silício Si	0,025 max Fósforo P	0,015 max Enxofre S	Nióbio Nb	Titânio Ti	Vanádio V	Alumínio Al	Cobre Cu	Níquel Ni	Cromo Cr	Molibdênio Mo
MB	0,055	0,298	0,028	0,015	0,012	0,020	0,003	<0,001	0,067	0,383	0,139	0,069	0,023
típico	0,10 max	1,4 max				0,05% max	0,10 max	0,04% max		0,5 máx	0,5 máx	0,5 máx	0,05 máx
						$\Sigma = 0,15 \text{ max}$							
$Ceq = C+(Mn/4)+(Ni/20)+(Cr/10)+(Cu/40)-(Mo/50)-(V/10) \Rightarrow Ceq = 1,4$													

- **Metal de revestimento:**

- Arame de soldagem: ER NiCrMo-3 (AWS A5.14, 2005)
arame 1,20 mm – BÖHLER - THERMANIT 625

Tabela 8: Composição Química do arame de solda ER NiCrMo-3
(certificado do fabricante)

Elementos							
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	Fe
0,04	0,50	0,60	22,0	9,0	61,6	3,30	3,0

- **Tocha de Soldagem:**

- Eletrodo de Tungstênio – WC 20 – 4,8 x 175 mm (EWTh 2)
- Unidade de Refrigeração (água) – Friojet 300 – 0,26 m³/h – 5,5 Bar
- Tocha TIG – SAF (Air Liquide) - MEC 4 – 450 A (100%) – tocha mono-catodo com constrição catódica do arco (“CF-TIG - cathode focussed TIG”)

- **Fonte Integrada de Soldagem:** SAF (Air Liquide) Nertamatic 450 AC/DC
 - Alimentação: 60Hz / 380 V
 - Corrente máxima de saída: 450 A (100%)
 - Frequência de Pulso: 1-100 Hz em DC ; 1 -200 Hz em AC
 - Polaridade variável: DC-; DC+; AC / 50-200 Hz
 - IHM para monitoração das variáveis de controle
 - Módulo de Controle Automático de Voltagem (AVC) – MOTOVAR MV 20

A Figura 66 apresenta o conjunto de recursos descrito anteriormente:

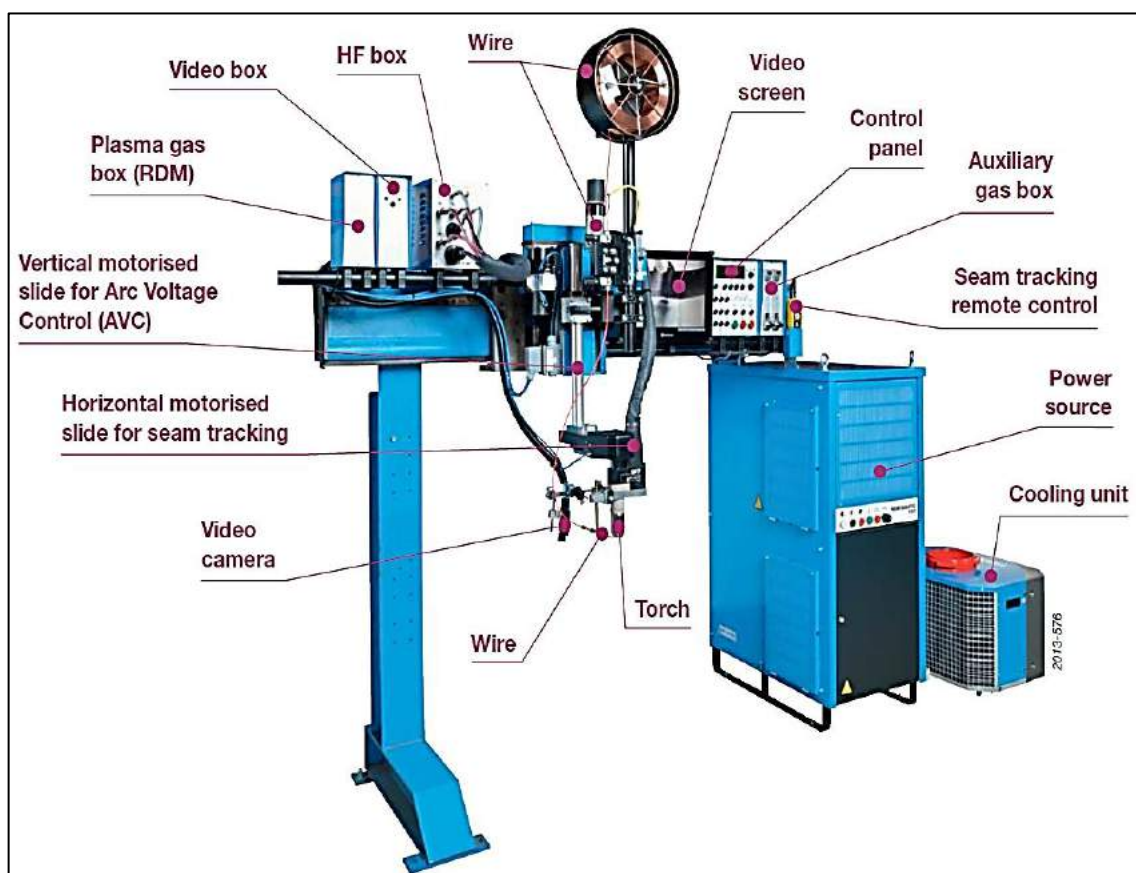


Figura 66. Recursos utilizados na Soldagem (SAF, 2014.)

- **Controles sobre o metal de adição:**
 - Alimentador de arame: 0,8 - 1,0 - 1,2 mm (velocidade máxima: 1200 cm/min)
 - Oscilador Eletromagnético – OSCIMATIC S III (SAF-FRO)
- **“Hot-wire”** - foi desenvolvida conforme o desenho esquemático na Figura 67, com o aterramento feito na peça de soldagem.

- Fonte de Corrente “hot-wire”: ESAB TIG ORIGO 200i: 110 A / 14,5 V / 100%

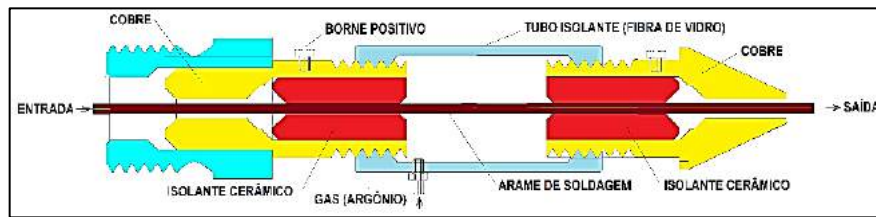


Figura 67. Tocha “HOTWIRE”, pelo autor.

- **Gases:**

- Misturador de Gás (AIR LIQUIDE) - Argônio + Hidrogênio (5%)
- Módulo de Controle de Gás de Proteção
 - Pressão máxima: 3 Bar
 - 2 rotômetros - 10-38 l/min (tocha + *trailing gas*)

- **Miscelâneas** (manipulação, monitoração e automação)

- Monitoração por vídeo – VISIOARC VA1
- Lança de sustentação da tocha TIG
- Carro de transferência (NETSU) com velocidade de translação controlada
- Viradores NETSU (“*turn-rollers*”) com velocidade de translação controlada

Para a soldagem de revestimento interno em tubos, a tocha será sustentada por uma lança tubular, por onde passam todas as conexões elétricas (potência e controle), dutos de refrigeração, de gases e do arame de solda.

A soldagem do revestimento foi realizada com a tocha parada (posição plana - 1G) e com a combinação de movimentos do tubo, através do deslocamento de translação do carro, com o movimento de rotação dos viradores, gerando uma superfície helicoidal de cordões justapostos, através do movimento coordenado de translação e rotação da peça. A Figura 68 evidencia esta montagem.

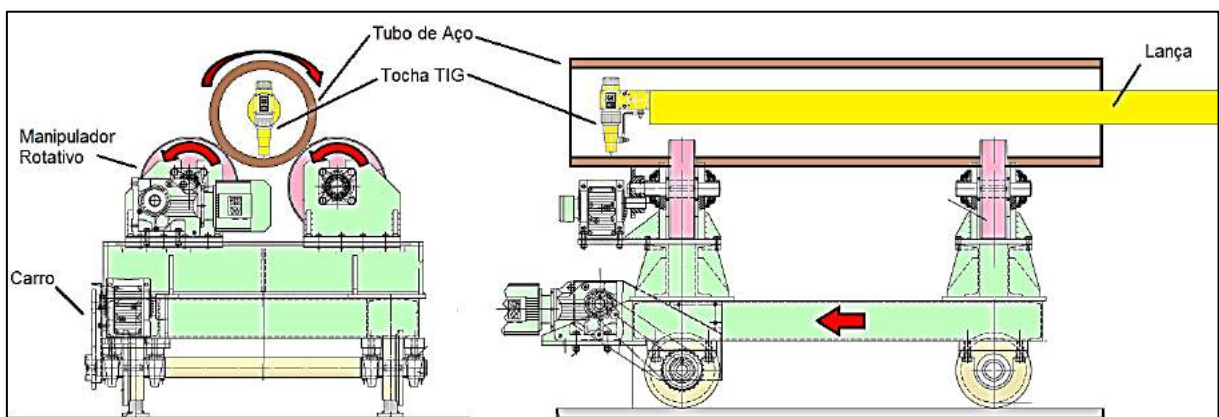


Figura 68. Equipamentos de Manipulação (NETSU), pelo autor.

- **Avaliações de macrografias por computador:**
 - Microcomputador DELL Latitude E7440 - com software Microsoft Excel
 - Câmera Digital Sony Cyber Shot DSC-W800 20.1 Megapixels
- **LAMAV – UENF - Laboratório de Materiais Avançados:**
 - Preparação de amostras:
 - Policorte refrigerado disco de corte AA3 - AROCOR.80 – AROTEC
 - Politriz semi-automática Struers com lixas 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh e pasta de alumina de 1 e 0,3 µm
 - Revelação de estruturas:
 - Macrografias - Nital 2% (ácido nítrico, diluído em álcool etílico)
 - **MB** - ataque por imersão com Nital 2% por 30 segundos.
 - **MS** - ataque eletrolítico: Nital 2%, Nital 5% (ácido nítrico, diluído em etanol), ácido oxálico 10%, ácido crômico 10%. No presente trabalho, a solução que apresentou melhor revelação da microestrutura do revestimento e seus precipitados, assim como a ZPD foi o ácido oxálico 10% (H₂C₂O₄ diluído em água destilada). A voltagem utilizada para a execução do ataque eletrolítico foi de 2 V, a amperagem foi de 0.20 A, com tempo de duração entre 20 e 40 segundos.
 - Microscópio ótico Carl Zeiss Jena - NEOPHOT 32
 - Microscópio de varredura a laser – CONFOCAL OLYMPUS 3D OLS4000
 - Ensaio de Dureza HV10 – SHIMADZU
- **TORK Controle Metrológico de Materiais LTDA**
 - Análise Química com base na ASTM A751, 2011 - *Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products*.

3.2 MÉTODOS:

Este estudo foi dividido em 3 etapas. Cada etapa subsequente utiliza os recursos e conclusões obtidas na etapa anterior. As etapas foram intituladas:

3.2.1 ETAPA 1: DESENVOLVER UM APLICATIVO UTILIZANDO MICROSOFT EXCEL PARA AVALIAÇÃO GRÁFICA POR COMPUTADOR DE MACROGRAFIAS DE SOLDAS

Uma metodologia prática e rápida para verificação de soldas é a análise macrográfica. Simples fotografias digitais (com ou sem aumento), conforme mostra a Figura 69, permitem avaliar qualitativamente a região fundida, a ZTA e suas interfaces (linhas e áreas).



Figura 69. Macrografia de um cordão de solda, pelo autor.

A falta de uma sistematização para algumas avaliações, tais como para a determinação da diluição ou da taxa de deposição, retardam a resposta rápida para o ambiente produtivo, principalmente em processos de solda que envolvem um grande número de variáveis que alteram significativamente os resultados desejados. Contudo, quantificar esta avaliação através destas **linhas e áreas**, mensurando suas dimensões geométricas para se obter padrões comparativos, comumente requerem o uso de uma lupa graduada e uma metodologia de cálculo, muitas vezes complexa, visto que as linhas não são retas e as áreas não são de geometrias simples.

Considerando o exposto, esta etapa se propôs a desenvolver uma ferramenta dedicada ao revestimento por soldagem, para responder rapidamente ao complexo dimensionamento das linhas e áreas desejadas em avaliações de solda.

A ideia básica é utilizar "*apenas uma evidência do crime*": uma fotografia digital de um corte transversal da solda, destinada a mostrar linhas de contornos (interfaces – bordas externas, zona fundida, zona termicamente afetada, distorções de bordas, de linhas de segregação, de alinhamentos de grãos, também chamadas de linhas de fluxo, etc.) e suas respectivas áreas, para se obter uma análise abrangente da solda, qualitativa e quantitativa, utilizando-se uma avaliação gráfica por computador através do aplicativo “Microsoft Excel”.

O aplicativo desenvolvido foi denominado de “*VIRTUAL MACRO*”, uma ferramenta simples, prática e poderosa para alterar a “**tradicional avaliação subjetiva e qualitativa**” de macrografias de soldas para uma “**avaliação objetiva e quantitativa**”, e destinado a estimar rapidamente as áreas, e, por conseguinte, a diluição e a taxa de deposição. A metodologia aplicada é descrita a seguir.

Sobre a macrografia mostrada anteriormente, foram definidos os seguintes elementos gráficos na Figura 70 a seguir:

- **Eixo X:** linha reta horizontal e **Eixo Y:** linha reta vertical, centralizada em relação aos extremos da Figura (ambas em branco);
- **Linha A:** linha curva que determina o contorno do extremo inferior da chapa, mostrando a distorção ocorrida na soldagem (em amarelo);
- **Linha A':** translação vertical (em laranja) da linha A (em amarelo);
- **Linha B:** limite superior da deposição de solda (em vermelho);
- **Linha C:** interface da fusão com o metal de base (em azul);
- **Linha D:** interface da zona termicamente afetada (em verde);
- **Os pontos “L” e “R”,** são respectivamente os limites, esquerdo e direito, da solda.
- **grade quadrangular, digital, transparente** do *Microsoft Excel*, onde a imagem (fotografia digital) e a grade podem ser coerentemente ajustados entre si através da função “tamanho e posição”, através de uma dimensão previamente conhecida, tal como a espessura da chapa.

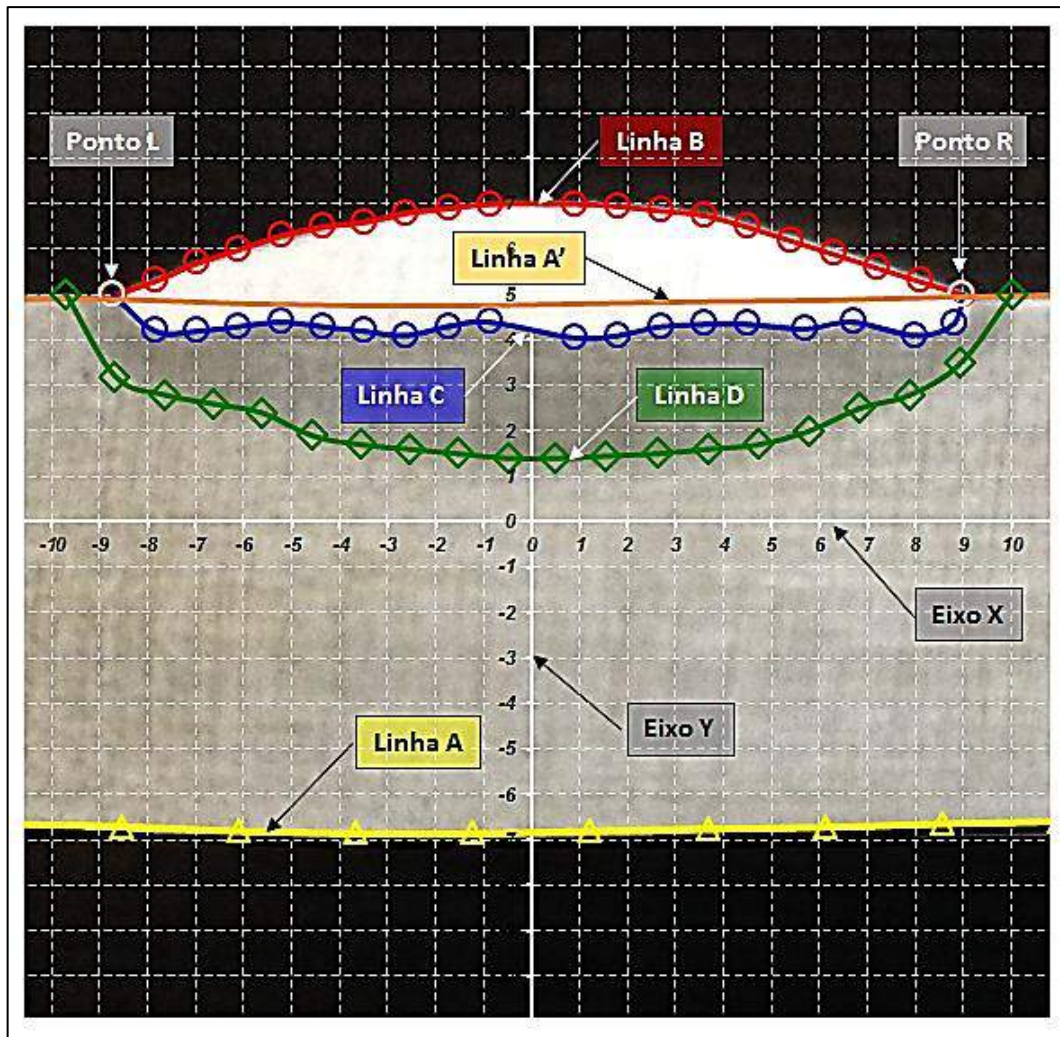


Figura 70. VIRTUAL MACRO - Definição das linhas e áreas, pelo autor.

Cada uma das linhas **A**, **A'**, **B**, **C**, e **D**, bem como os pontos **L** e **R**, podem ser definidos por uma série de pares de coordenadas "**x,y**", lidas diretamente sobre esta grade sobreposta. Dependendo das ampliações uma precisão de décimos de milímetro pode ser obtida.

No *Microsoft Excel* diversas opções de gráficos estão disponíveis. Um "*Gráfico de Linhas*", por exemplo, conecta os pontos por segmentos de reta, caracterizando as mudanças de direção e as inflexões por quinas angulares.

Um "*Gráfico de Dispersão*" é utilizado para pontuar dados em um eixo vertical e horizontal com a intenção de exibir quanto uma variável é afetada por outra através do conceito estatístico de correlação. Em função disto, e entendendo que tais transições são contínuas, como regra geral, foi adotado um "*Gráfico de Dispersão*".

Se aplicado quando uma análise é criada, o "*Gráfico de Dispersão*" pode exibir informações adicionais através de "*linhas de tendência*".

Estas linhas ou curvas podem, por exemplo, exibir quão bem os seus dados se adaptam a certa escolha do tipo de linha de tendência (*linear, exponencial, logarítmica, polinomial, potência ou média móvel*), ou para resumir, como uma coleção de pontos de dados amostrais se ajusta a um modelo matemático que descreverá os dados.

A Figura 71 mostra as linhas de tendência polinomiais de 6 ordem obtidas (linhas contínuas azul e vermelha e linha tracejada laranja), suas equações e seus respectivos coeficientes de correlação de Pearson.

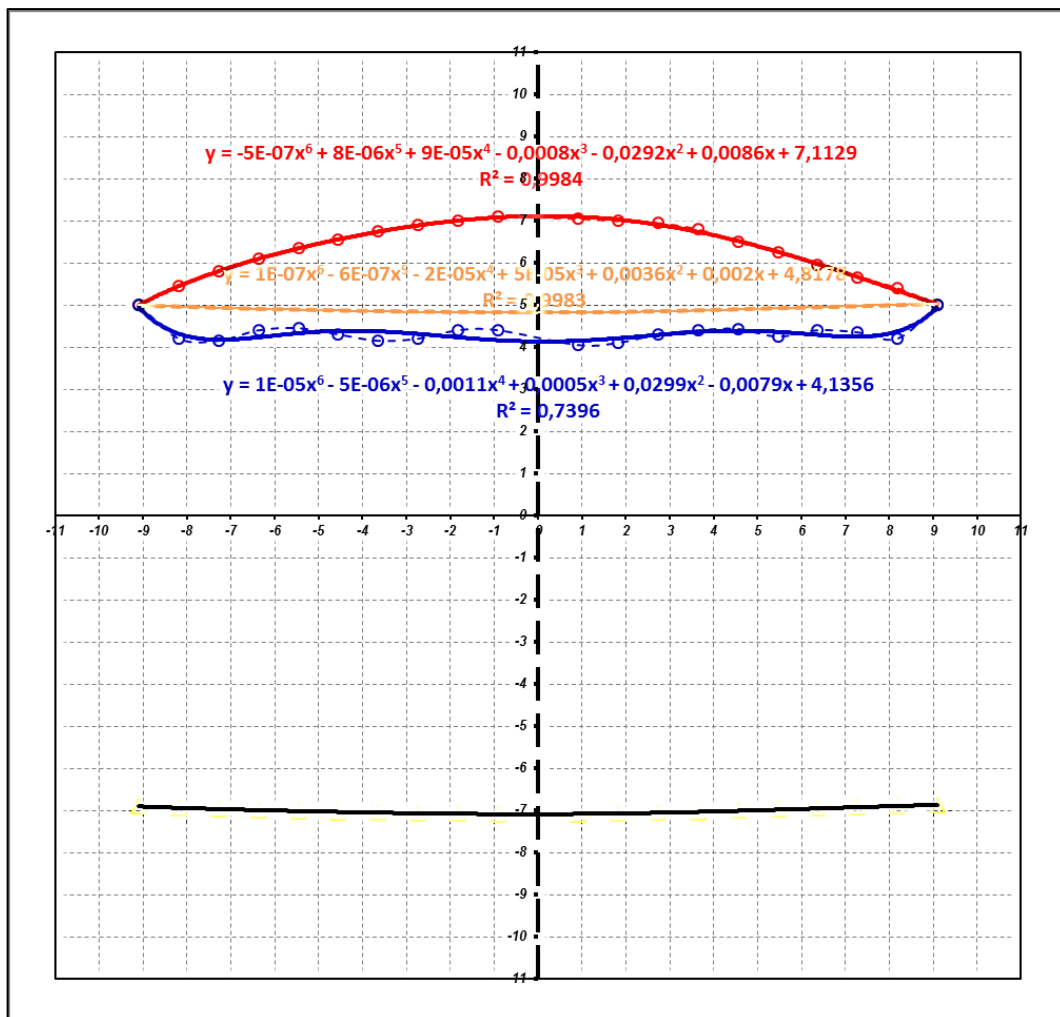


Figura 71. VIRTUAL MACRO – Linhas de tendência e suas equações, pelo autor.

A linha de tendência é obtida através da relação entre duas variáveis quantitativas e pode ser representada pela linha de melhor ajuste, extraída da nuvem de pontos, através do método da regressão em direção à média (correlação de Pearson).

Uma linha de tendência é mais confiável quando o coeficiente de correlação de Pearson está em ou próximo a 1.

Quando você ajusta uma linha de tendência aos dados, o *Microsoft Excel* calcula automaticamente o coeficiente de correlação de Pearson.

Na figura 72, três áreas foram destacadas: S_D - área de metal depositado (em vermelho), S_F - metal base fundido na soldagem (em azul), e ZTA - zona termicamente afetada (em verde).

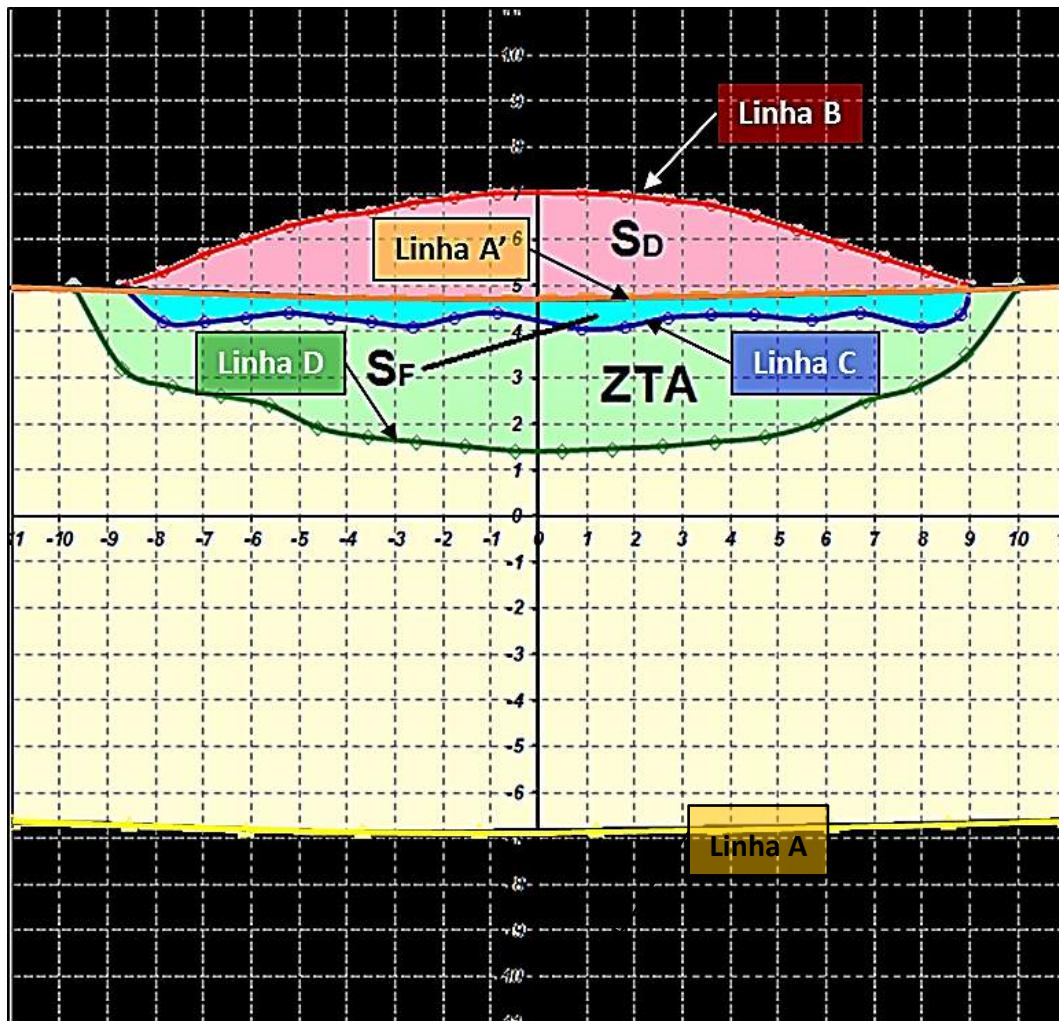


Figura 72. VIRTUAL MACRO –Linhas e Áreas a serem mensuradas, pelo autor.

O princípio aplicado foi a determinação das equações aproximadas destas curvas através das linhas de tendências. Assim sendo, uma área “ S ”, compreendida entre duas curvas, $F_1(x)$ e $F_2(x)$ pode ser estimada pela integral:

$$S = \int_L^r [F_1(x) - F_2(x)] dx \dots\dots\dots (13)$$

Na figura anterior, a área de deposição (S_D) pode ser escrita como:

$$S_D = \int_L^R \text{Linha B (vermelha)} dx - \int_R^L \text{Linha A' (laranja)} dx,$$

E a área de fusão do metal de base (S_F) pode ser escrita como:

$$S_F = \int_R^L \text{Linha A' (laranja)} dx - \int_R^L \text{Linha C (azul)} dx.$$

Conforme já visto, a diluição ($D\%$) pode ser escrita como:

$$D\% = S_D / (S_D + S_F) \dots\dots\dots (14)$$

E a taxa de deposição de solda (T_{DS}) pode ser escrita como:

$$T_{DS} = \delta \cdot V_s \cdot S_D \dots\dots\dots (15)$$

Ou, a taxa de deposição de arame (T_{DA}) pode ser escrita como:

$$T_{DA} = \delta \cdot V_a \cdot S_\phi \dots\dots\dots (16)$$

De modo análogo, poderiam ser desenvolvidas ferramentas dedicadas para outros processos de soldagem, tais como, “ virtual ERW ” para soldas longitudinais de tubos realizadas pelo processo “soldagem por resistência elétrica induzida em alta frequência”, onde deformações plásticas são desenvolvidas durante a soldagem. (Braga, 2004).

3.2.2 ETAPA 2: COM BASE NO APLICATIVO AVALIAR OS RESULTADOS E ESTABELEECER OS MELHORES PARÂMETROS DE SOLDAGEM

O objetivo desta etapa foi escolher a melhor combinação de parâmetros, notadamente a clássica influência da voltagem, da corrente e da velocidade, para se obter baixa diluição com alta taxa de deposição. As metas são obter e correlacionar baixa diluição (máxima de 10%) com alta taxa de deposição (altura do revestimento mínima: 3 mm). Utilizando o aplicativo “*VIRTUAL MACRO*”, descrito anteriormente, buscou-se caracterizar uma coletânea de resultados em cordões de solda, utilizando de forma combinada as seguintes variantes do processo *TIG*:

- tocha mono-catodo com constrição catódica do arco
- controle automático da voltagem (AVC)
- gases aditivados
- tecimento (“*weaving*”) por Oscilação Eletromagnética do Arco Voltaico
- nesta etapa, não se incluiu o uso da variante “*hotwire*”, cujo efeito será visto na etapa 3.

Os cordões de solda com 100 mm de extensão foram produzidos sobre chapa plana de aço, e foram realizados sob diferentes combinações de variáveis de soldagem. Algumas variáveis são interdependentes, bem como algumas combinações extremas podem resultar em resultados indesejados ou estarem restritas as condições tecnológicas disponíveis. Tal assertiva nos leva a hierarquizar as variáveis, realizando-se uma seleção dirigida destas, de modo a se restringir a pesquisa ao campo viável. Esta seleção levou em consideração as seguintes condições:

Definições iniciais: gases, oscilação eletromagnética, tensão do arco e DEP. Considerando-se que um dos objetivos é alta produtividade, foram escolhidos, como ponto de partida e ajuste inicial, a corrente de 250 A (55% da corrente máxima da fonte de soldagem) com o uso de gases aditivados.

- **Gás de Proteção** – adotou-se Ar + 5% H₂ como uma condição imposta em função de ser a única disponível para os experimentos.
- **Oscilação eletromagnética (tempos e amplitudes)** – Não há recomendação técnica, como ponto de partida para estes parâmetros. O recurso OSCIMATIC III não disponibiliza ajuste da parada central, sendo este fixo (100 ms), para permitir a sincronização do Módulo de Controle Automático de Voltagem (AVC). Foi assumida como razoável uma configuração de tempo de parada lateral de 120 ms. A amplitude está associada à intensidade do campo eletromagnético em promover a deflexão do arco, mas principalmente em se obter o equilíbrio das deflexões. Não é necessariamente uma variável que possa ser fixada, mas que deve ser continuamente ajustada durante o processo a partir da monitoração por vídeo através do VISIOARC VA1. Contudo, a máxima amplitude, possível e estável, foi aplicada para a corrente escolhida como ponto de partida.
- **Tensão do arco e DEP** – A tensão do arco e a DEP (distância eletrodo-peça) são variáveis interdependentes e determinam a estabilidade do arco. Arcos muito curtos ou muito longos tendem a ser instáveis dependendo do meio (ionização do gás de proteção). Considerando-se que ambas, tensão e DEP, estarão sendo monitoradas eletronicamente pelo Módulo de Controle Automático de Voltagem (AVC), resta-nos escolher a intensidade da tensão. Quanto maior for o comprimento do arco mais largos e rasos são

os cordões, sendo estes, aspectos desejáveis na soldagem para revestimento, o que nos leva a desejar tensões mais altas. Um segundo efeito positivo, associado ao uso da variante oscilação é esperado quando se usa tensões mais altas, pois uma DEP maior deve promover um deslocamento maior do arco quando submetido ao campo eletromagnético, aumentando a largura do cordão e reduzindo a penetração.

- **Método Taguchi para Planejamento Robusto de Experimentos:** é entendido como uma nova abordagem da qualidade voltada para o projeto do produto e do processo, sendo por ele determinada de controle de qualidade “*off-line*”. Engloba o conjunto propostas para atingir o objetivo de um projeto as quais incluem a otimização da função perda e projetos de experimentos fatoriais com matrizes ortogonais. Objetiva cumprir com um reduzido número de ensaios, dois objetivos: obter a influência dos fatores de controle sobre as variáveis respostas e determinar as condições ideais para a soldagens de revestimentos. (Ross, P. J., 1991.)
- **Definição do número de ensaios:** (*Faixa de estudo das outras variáveis*)
 - A condição de partida para o estudo compreende obter a máxima tensão para um arco estável (20 V), em atmosfera Ar + 5% H₂, com corrente de soldagem de 250 A e tempos de parada da oscilação: 120 ms (esquerda e direita); 100 ms (central).
 - **Corrente de Soldagem (A):** 200; 250; 300
 - **Velocidade de soldagem (cm/min):** 20; 25; 30
 - **Velocidade de alimentação do arame (cm/min):** 400; 500; 600

A tabela 9 apresenta o plano de amostragem para 15 combinações de parâmetros estabelecendo as condições de execução de cada experimento:

Tabela 9: Plano de amostragem.

VARIÁVEL	unidade	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2	E3
Corrente de Soldagem	A	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200	250	300	200	250	300
Velocidade de Soldagem	cm/min	20	20	20	20	20	20	20	20	20	15	15	15	25	25	25
Alimentação do Arame	cm/min	400	400	400	500	500	500	600	600	600	500	500	500	500	500	500

Conforme acima, foram escolhidos três fatores de controle com três níveis cada: Corrente de soldagem, Velocidade de soldagem e Velocidade de alimentação do arame. Por sua vez, seis variáveis respostas foram escolhidas: Largura do cordão, Altura do cordão, área de Deposição, área de Penetração e Diluição e Taxa de Deposição. Após a soldagem, a seção transversal, na posição central do cordão (50 mm) foi mensurada utilizando-se o aplicativo descrito na etapa 1.

3.2.3 ETAPA 3: REVESTIMENTO INTERNO DO TUBO REALIZADA COM OS PARÂMETROS ESCOLHIDOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS (experimento F)

O objetivo desta etapa foi avaliar e caracterizar os resultados do revestimento com *Inconel 625* sobre a superfície interna (soldagem helicoidal) de um tubo de aço API X65, utilizando o aplicativo *VIRTUAL MACRO* e o método descrito na etapa 2 (GTAW com as variantes “oscilação eletromagnética” e “gás de proteção Ar + 5% H₂”), acrescida do uso da variante “*hotwire*”. Ou seja, utilizar de forma conjunta e integrada as variantes tecnológicas do processo *TIG* de alta produtividade com a finalidade de revestimento.

Para o revestimento, denominado experimento “F”, um plano de soldagem e um plano de amostragem (figura 73) foi estabelecido de forma a se realizar 5 cordões justapostos, com uma única camada de soldagem.

O plano compreendeu atender ao requisito de se obter uma altura mínima de 3 mm de espessura, e, quantificar as variáveis de resposta.

As variáveis de controle foram adotadas considerando-se a inserção da nova variante “*hot-wire*” junto com a análise do melhor conjunto de variáveis de resposta obtidas na etapa 2.

Durante a realização dos cordões 1 e 2, ajustes finos dos parâmetros de soldagem foram admitidos.

Os cordões 3, 4 e 5 foram soldados sem alteração dos parâmetros de soldagem. Por não conterem efeitos de borda, nem alterações de parâmetros, e por já conterem os efeitos de pré-aquecimento do cordão anterior e os efeitos de pós tratamento do cordão subsequente, ou seja, por representar um regime permanente, o cordão de número 4 foi escolhido para fins de região de amostragem.

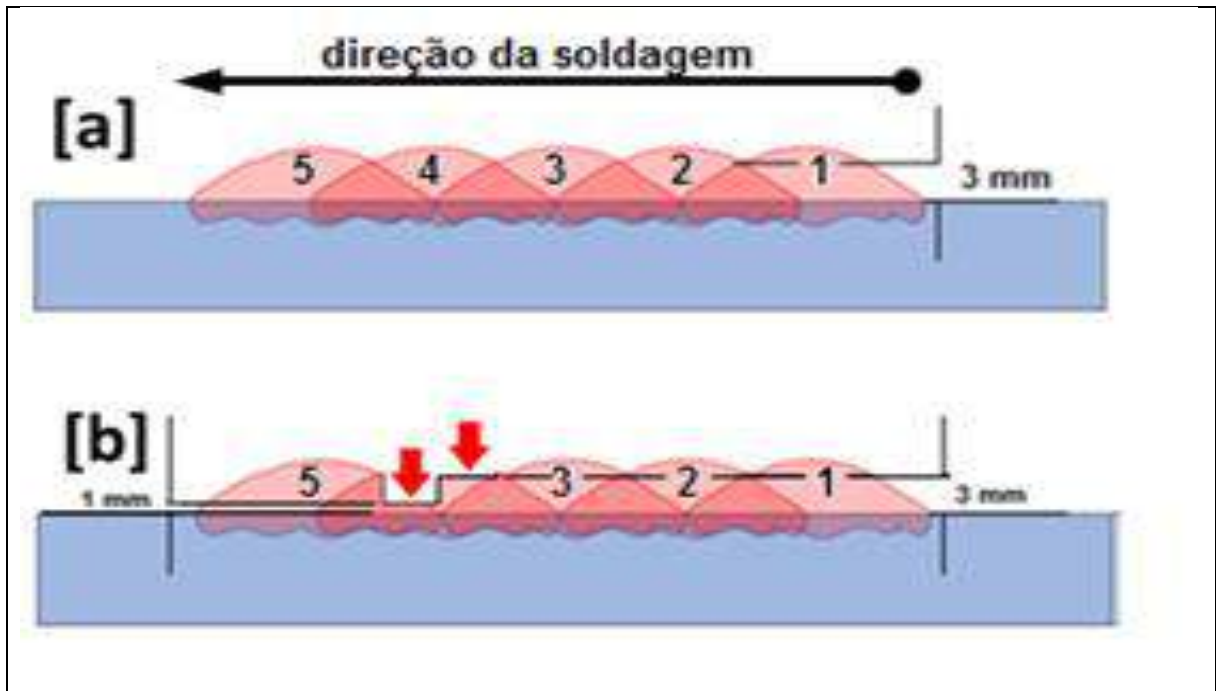


Figura 73. Plano de revestimento [a] e Plano de amostragem [b], pelo autor.

O revestimento foi avaliado através do “*VIRTUAL MACRO*” com relação às variáveis de controle e as variáveis de resposta, tendo como foco principal obter a diluição máxima de 10% e a máxima taxa de deposição.

A caracterização metalúrgica da soldagem não foi tratada com ênfase neste trabalho, contudo um mínimo de caracterização foi contemplado através dos seguintes ensaios.

- **Ensaio de Análise Química por Espectrometria Ótica** – utilizou-se o Espectrômetro de Emissão Ótica - SPECTROMAX, utilizando o método Ni40-F, no laboratório da TORC, com foco na verificação do teor de ferro e para confrontação com os resultados obtidos pelo método desenvolvido na etapa 1 (*VIRTUAL MACRO*).

O ensaio foi realizado sobre uma amostra do experimento de revestimento F, em duas profundidades, 1 mm e 3 mm, conforme localização no plano de amostragem mostrado na figura 73 [b].

Como procedimento aplicou-se os métodos definidos pela norma ASTM A751 - *Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products*. [107] ASTM A751, 2014.

- **Ensaio de Metalografia** – para caracterização metalúrgica das regiões MB, ZTA, ZPD e MS, as amostras foram preparadas seguindo as seguintes etapas.
 - **Corte** - As amostras serão cortadas no aparelho de policorte refrigerado de modelo AROCOR.80 da AROTEC com disco de corte AA3 disponível no laboratório de metalografia localizado no LAMAV/UENF. As regiões preparadas metalograficamente para análise serão as correspondentes à direção transversal à soldagem.
 - **Lixamento** - O lixamento das amostras será realizado utilizando lixas com a seguinte sequência granulométrica de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Será utilizada a politriz semi-automática Struers para a realização desta etapa. Sendo que a direção de lixamento será rotacionada em 90° a cada troca de lixa para que se obtenha uma melhor qualidade na preparação das amostras.
 - **Polimento** - Para esta etapa será utilizada pasta de alumina de 1 e 0,3 µm. O aparelho utilizado será a politriz Struers semi-automática para o primeiro polimento, seguido de polimento manual bastante fluidificado com água destilada para melhor acabamento superficial da amostra.
 - **Ataque** - Devido à presença de dois materiais dissimilares nas amostras utilizadas, diferentes soluções foram utilizadas com o objetivo de obter melhor revelação de todas as regiões presentes. Para o aço foi utilizado ataque por imersão e pincelamento, enquanto que para o revestimento foi necessário ataque eletrolítico.
 - Metal de base: foi realizado ataque por imersão com Nital 2% por 30 segundos.
 - Para revelar a microestrutura do revestimento, foram utilizadas diversas soluções para o ataque eletrolítico: Nital 2%, Nital 5%, ácido oxálico 10%, ácido crômico 10%. No presente trabalho, a solução que apresentou melhor revelação da microestrutura do revestimento e seus precipitados, assim como a ZPD foi o ácido oxálico 10%. A voltagem utilizada para a

execução do ataque eletrolítico foi de 2 V, a amperagem foi de 0.20A com tempo de duração entre 20 e 40 segundos.

- **Microscopia Ótica** - As observações por microscopia ótica foram realizadas via microscópio Confocal Olympus 3D Measuring Laser Microscope OLS4000 e microscópio Neophot 32. As micrografias utilizadas neste trabalho foram obtidas com o Confocal em diferentes aumentos.
- **Ensaio de Dureza** – foram avaliadas as durezas das regiões do MB, ZTA, ZPD e MS do revestimento F. O microdurômetro utilizado foi da marca Shimadzu disponível no LAMAV/UENF.
 - Foram feitas impressões em cada região: metal de base, zona termicamente afetada (ZTA), ZPD e na camada do revestimento. As cargas utilizadas foram de 10, 300 e 1000 *gf*, dependendo da região, com duração de 10 segundos.
 - Na região da ZPD, a carga utilizada foi de 10 *gf* devido à sua pequena extensão, cargas maiores extrapolaram o limite desta região. No metal de base foi utilizada carga de 1000 *gf*, devido ao tamanho de grão ser grande e, portanto, necessitar de impressões com grande área para abranger as fases presentes. No revestimento, as impressões que apresentaram o melhor aspecto foram as de 300 *gf*.
 - No metal de base, as medições foram realizadas de forma aleatória, com o espaçamento mínimo equivalente à 3 (três) vezes a medida da diagonal da impressão, para não haver influência do encruamento provocado de uma impressão na outra.
 - Na ZTA, ZPD e camada do revestimento, as impressões foram feitas no centro da região, paralelamente à linha de fusão, em linha reta com o espaçamento mínimo necessário entre cada uma. O objetivo foi de se obter a média de dureza de cada região.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ETAPA 1: DESENVOLVER UM APLICATIVO UTILIZANDO MICROSOFT EXCEL PARA AVALIAÇÃO GRÁFICA POR COMPUTADOR DE MACROGRAFIAS DE SOLDAS

A figura 74, abaixo, oferece uma visão geral do aplicativo desenvolvido.

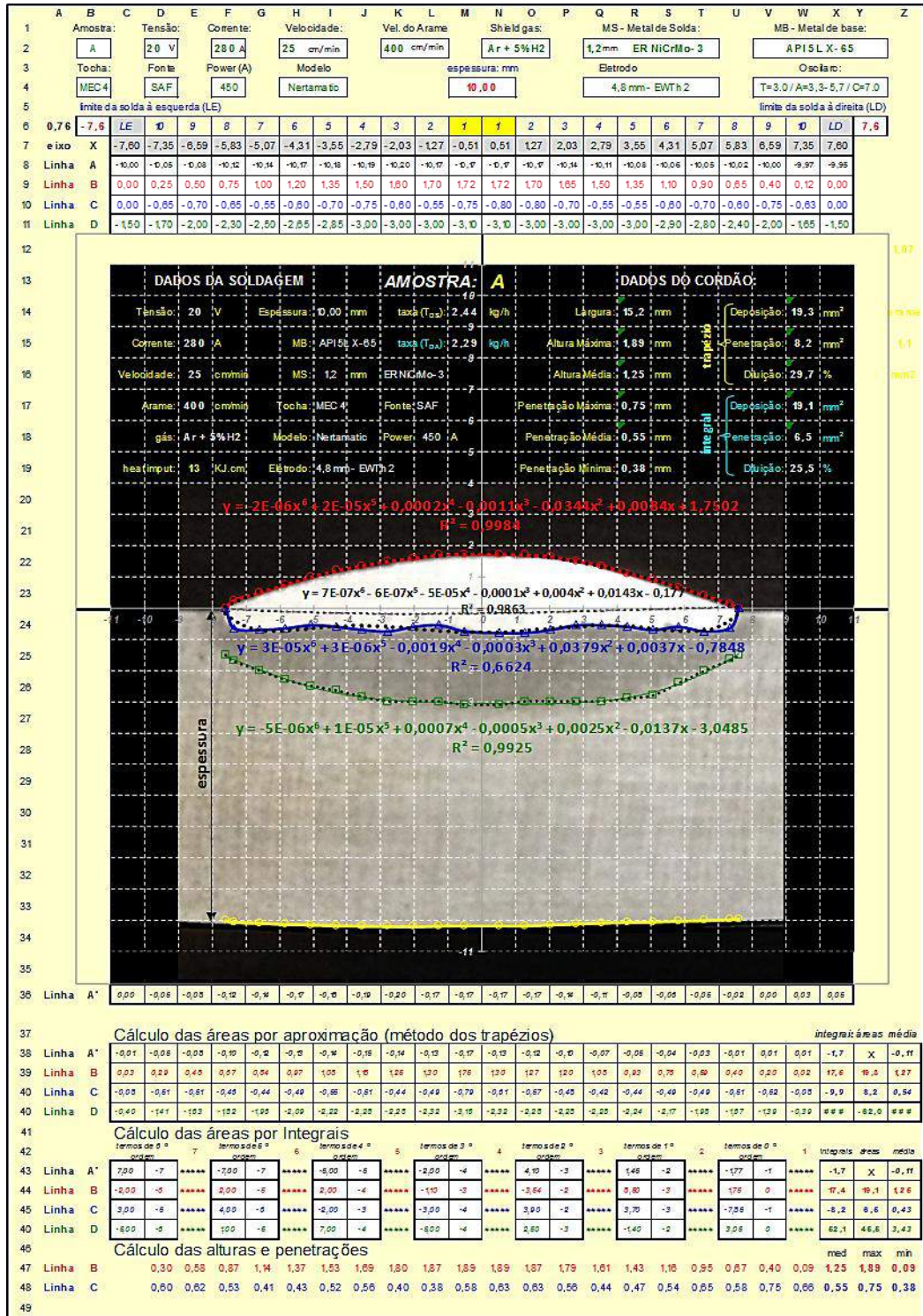


Figura 74. Visão geral do VISUAL MACRO, pelo autor.

O aplicativo foi desenvolvido considerando-se a máxima simplificação para o uso, de forma a se obter rapidamente o resultado da avaliação.

Para facilitar o uso da planilha Excel, as células com fundo colorido foram bloqueadas (protegidas), por conterem fórmulas pré-estabelecidas para o cálculo de outras variáveis do aplicativo gráfico. Desta forma, somente as células brancas estão abertas para digitação, e isto é fundamental para as explicações abaixo.

As linhas 2 e 4 da planilha (Figura 75) apresentam os campos para informações sobre os parâmetros usados na soldagem: na linha 2: Amostra (identificação da amostra), Tensão (V), Corrente (A), Velocidade (cm/min – velocidade de soldagem), Alimentador de Arame (cm/min – velocidade de alimentação do arame), Gás de Proteção (*shield gas*), MS - Metal de Solda (diâmetro / denominação AWS), MB - Metal de Base (norma / grau); na linha 4: Tocha, Fonte, Potência, Modelo, espessura (mm), Eletrodo (diâmetro / denominação AWS) e dados do Oscilarc.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	Amostra:		Tensão:		Corrente:		Velocidade:		Alimentador de Arame:		Gás de Proteção:		MS - Metal de Solda:				MB - Metal de base:									
2	A		20 V		280 A		25 cm/min		400 cm/min		Ar + 5%H2		1,2mm ER NiCrMo-3				API 5L X-65									
3	Tocha:		Fonte:		Power (A):		Modelo:		espessura: mm		Eletrodo:				Oscilarc:											
4	MEC4		SAF		450		Nertamatic		10,00		4,8 mm - EWTh 2				T=3.0 / A=3,3-5,7 / C=7.0											
5	limite da solda à esquerda (LE)												limite da solda à direita (LD)													
6	0,76	-7,6	LE	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	LD	7,6	
7	eixo X	-7,60	-7,35	-6,59	-5,83	-5,07	-4,31	-3,55	-2,79	-2,03	-1,27	-0,51	0,51	1,27	2,03	2,79	3,55	4,31	5,07	5,83	6,59	7,35	7,60			
8	Linha A	-10,00	-10,05	-10,08	-10,12	-10,14	-10,17	-10,18	-10,19	-10,20	-10,17	-10,17	-10,17	-10,17	-10,14	-10,11	-10,08	-10,06	-10,05	-10,02	-10,00	-9,97	-9,95			
9	Linha B	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,20	1,35	1,50	1,60	1,70	1,72	1,72	1,70	1,65	1,50	1,35	1,10	0,90	0,65	0,40	0,12	0,00			
10	Linha C	0,00	-0,65	-0,70	-0,65	-0,55	-0,60	-0,70	-0,75	-0,60	-0,55	-0,75	-0,80	-0,80	-0,70	-0,55	-0,55	-0,60	-0,70	-0,60	-0,75	-0,63	0,00			
11	Linha D	-1,50	-1,70	-2,00	-2,30	-2,50	-2,65	-2,85	-3,00	-3,00	-3,00	-3,10	-3,10	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-2,90	-2,80	-2,40	-2,00	-1,65	-1,50		
12																									1,07	

Figura 75. Campo de informações gerais do *VISUAL MACRO*, pelo autor.

Simultaneamente à inserção dos dados anteriores, os mesmos são transferidos automaticamente para o campo “DADOS DA SOLDAGEM”, na parte superior esquerda da grade cartesiana (Figura 76).

Após a inserção da imagem sob a grade cartesiana (linhas 13 a 35 da figura 74 e ampliação na Figura 76), e sendo a espessura a dimensão mais fácil de ser verificada, adotou-se esta como referência para o ajuste de escala da imagem sob a grade cartesiana, utilizando-se a função “Tamanho e Propriedades da Imagem”, assegurando-se que a condição de proporcionalidade da imagem tenha sido ativada anteriormente. O valor da espessura já havia sido registrado no campo superior central, para uso em fórmulas do aplicativo (linha 4, em vermelho, na figura 75).

Em seguida ao ajuste dimensional da imagem, esta foi nivelada e centralizada com relação ao eixo vertical, tomando-se como referência os extremos da solda.

No próximo passo, foram estabelecidos os valores das abcissas dos limites da solda, à esquerda e à direita, digitados na parte superior da planilha (figura 75, linha 6, em vermelho). Funções pré-estabelecidas criam uma partição do eixo horizontal “X”, com dez pontos, à esquerda e à direita, do eixo vertical (figura 75, linhas 6 e 7).

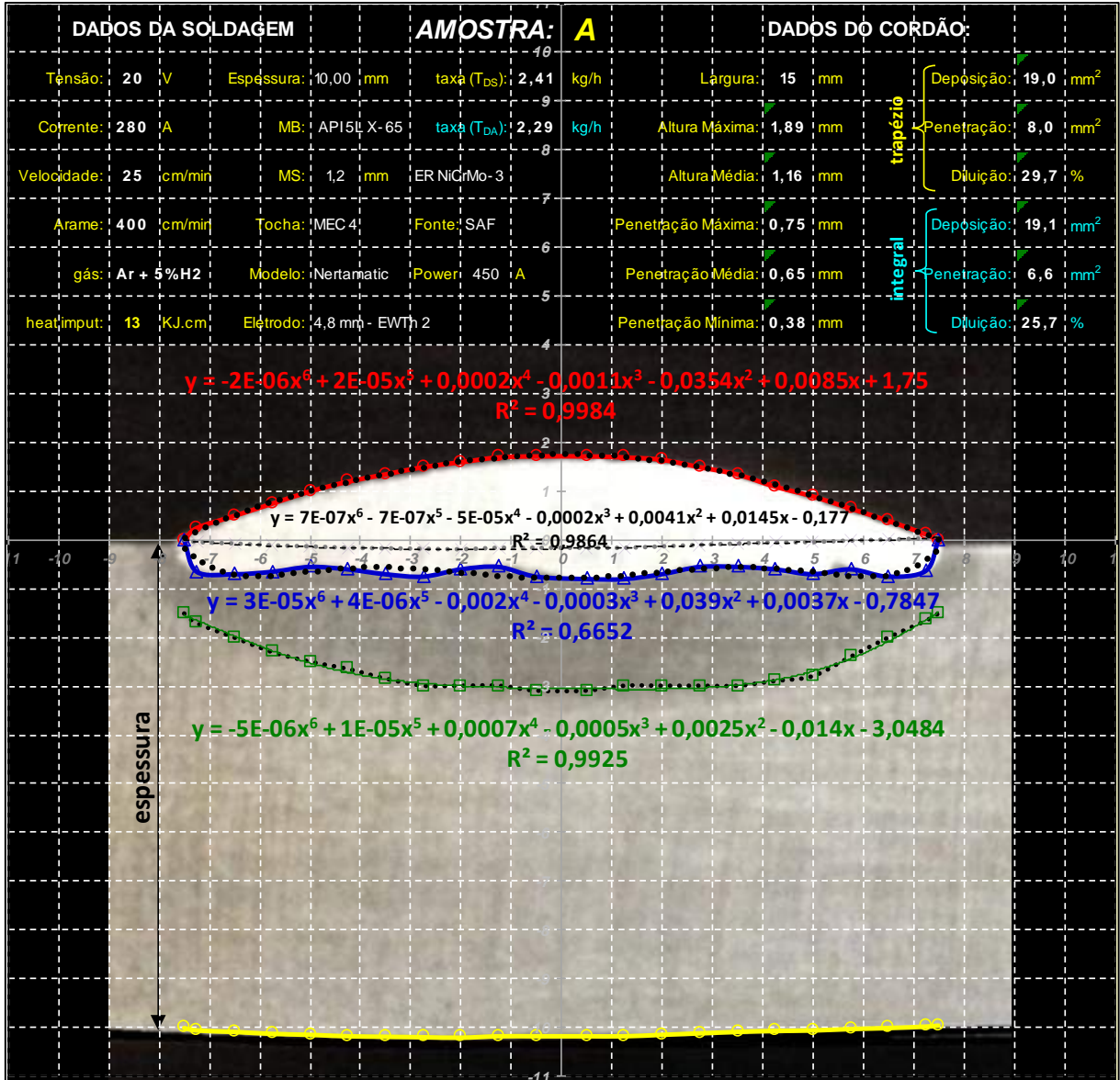


Figura 76. Grade cartesiana do *VISUAL MACRO*, pelo autor.

Assim sendo, o trabalho de construção das curvas foi facilitado, requerendo somente a inserção das ordenadas para as respectivas abcissas predeterminadas anteriormente. O próximo passo foi estabelecer as ordenadas (linha 8 da figura 76) para a Linha “A” (em amarelo na Figura 76), que define o contorno da superfície oposta à soldagem, contemplando os efeitos de distorção da peça soldada.

A linha Linha “A’” (Figura 74, linha 36 e plotada em tracejado preto na figura 76), imaginária, foi então desenvolvida como sendo a translação vertical da linha “A”,

tomando como fator de translação o valor da espessura estabelecido, cuja importância é definir a separação entre a área de metal de adição depositado da área do metal de base fundido. Em seguida, a linha “B” (em vermelho na figura 76), representativa do contorno externo do metal de adição, foi estabelecida informando-se as ordenadas dos pontos (linha 9, em vermelho na figura 75) para os quais as abscissas foram anteriormente estabelecidas. De forma análoga, a Linha “C” (em azul na figura 76), representativa dos limites da fusão foi estabelecida informando-se as ordenadas dos pontos desta (linha 10, em azul na figura 75) e a linha “D” (em verde na figura 76), representativa da ZTA, foi estabelecida informando-se as ordenadas dos pontos desta (linha 11, em verde na figura 75).

O uso da função “zoom” (figura 77), mostra o recurso da ampliação com que se quer trabalhar, auxiliando na definição das ordenadas mencionadas acima.

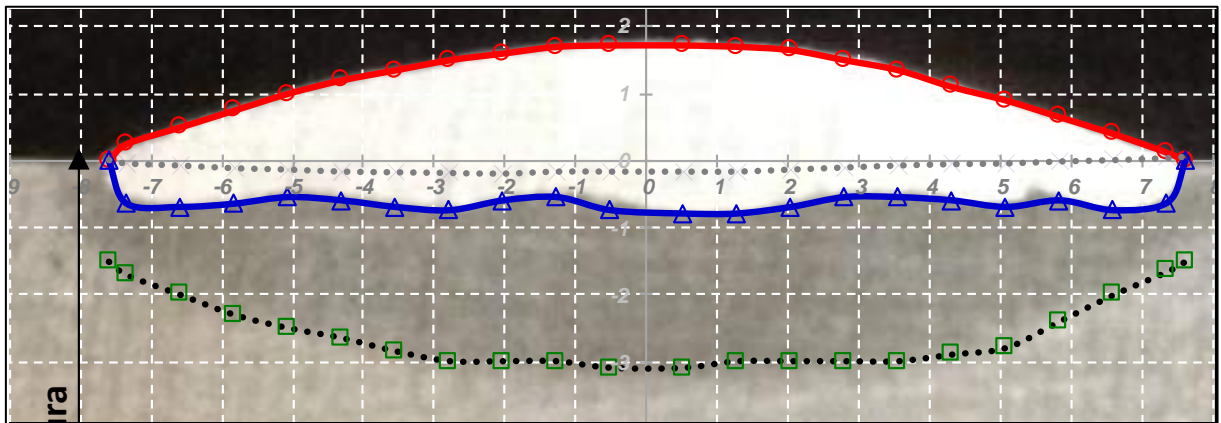


Figura 77. “Zoom” aplicado à Grade cartesiana do VISUAL MACRO, pelo autor.

De forma automática, uma primeira avaliação das áreas é obtida pelo algoritmo da regra dos trapézios para resolução de integrais (linhas 38, 39, 40, 41 e 42 da figura 78). Tais informações são levadas para o campo “DADOS DO CORDÃO”, no lado superior direito da grade cartesiana (em amarelo na figura 76).

Cálculo das áreas por aproximação (método dos trapézios)																		integrals áreas média							
39	Linha A'	-0,01	-0,05	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,15	-0,14	-0,13	-0,11	-0,13	-0,12	-0,10	-0,07	-0,05	-0,04	-0,03	-0,01	0,01	0,01	-1,7	X	-0,11	
40	Linha B	0,03	0,29	0,48	0,67	0,84	0,97	1,08	1,18	1,25	1,30	1,30	1,27	1,20	1,08	0,93	0,76	0,59	0,40	0,20	0,02	17,6	19,3	1,26	
41	Linha C	-0,08	-0,51	-0,51	-0,46	-0,44	-0,49	-0,55	-0,51	-0,44	-0,49	-0,79	-0,61	-0,57	-0,48	-0,42	-0,44	-0,49	-0,49	-0,51	-0,52	-0,08	-9,9	8,2	0,54
42	Linha D	-0,40	-1,41	-1,63	-1,82	-1,96	-2,09	-2,22	-2,28	-2,28	-2,32	-3,16	-2,32	-2,28	-2,28	-2,28	-2,24	-2,17	-1,98	-1,67	-1,39	-0,39	###	-62,0	###
Cálculo das áreas por Integrais																		integrals áreas média							
44		termos de 6° ordem		termos de 5° ordem		termos de 4° ordem		termos de 3° ordem		termos de 2° ordem		termos de 1° ordem		termos de 0° ordem											
45	Linha A'	7,00	-7	-7,00	-7	-5,00	-5	-2,00	-4	4,00	-3	1,45	-2	-1,77	-1	-1,7	-1	-1,7	-1	-1,7	-1	-1,7	X	-0,11	
46	Linha B	-2,00	-6	2,00	-5	2,00	-4	-1,00	-3	-3,54	-2	8,50	-3	1,75	0	17,4	19,1	1,26							
47	Linha C	3,00	-5	4,00	-6	-2,00	-3	-3,00	-4	3,90	-2	3,70	-3	-7,85	-1	-8,2	6,5	0,43							
48	Linha D	-5,00	-6	1,00	-5	7,00	-4	-5,00	-4	2,50	-3	-1,40	-2	3,05	0	52,1	45,5	3,43							
Cálculo das alturas e penetrações																		med max min							
50	Linha B	0,30	0,58	0,87	1,14	1,37	1,53	1,69	1,80	1,87	1,89	1,87	1,79	1,61	1,43	1,16	0,95	0,67	0,40	0,09	1,25	1,89	0,09		
51	Linha C	0,60	0,62	0,53	0,41	0,43	0,52	0,56	0,40	0,38	0,58	0,63	0,63	0,56	0,44	0,47	0,54	0,65	0,58	0,75	0,66	0,55	0,75	0,38	

Figura 78. Cálculo de áreas do VISUAL MACRO, pelo autor.

Após a inserção da “linha de tendência” para as curvas **A**, **B** e **C**, as mesmas podem ser formatadas marcando-se as opções de “polinômios de ordem 6”, “exibir equação no gráfico” e “exibir valor de R^2 no gráfico”.

Uma segunda avaliação através do cálculo das áreas por integrais (linhas 45, 46, 47 e 48 da figura 78), pode ser obtida a partir destas linhas de tendência, considerando-se suas equações polinomiais de sexta ordem, bem como os coeficientes de Pearson das mesmas.

Ambos são imediatamente apresentados após a digitação das ordenadas dos pontos das curvas **A**, **B** e **C**, devido ao fato de que a grade cartesiana já haver sido configurada anteriormente para isto (Figura 76).

As equações polinomiais são descritas como um polinômio $p(x) = a_6x^6 + a_5x^5 + \dots + a_1x + a_0$. O aplicativo calcula a integral de cada um dos polinômios **A**(x), **B**(x) e **C**(x), através de formulações pré-estabelecidas, requerendo somente que sejam digitados os coeficientes a_6 , a_5 , a_4 , a_3 , a_2 , a_1 , e a_0 de cada polinômio (linhas 45, 46, 47 e 48 da figura 78).

De forma também pré-estabelecida, os valores de máximo, médio e mínimo para alturas e penetrações de cada curva são também calculados (linhas 50 e 51) da figura 78. Tais informações foram levadas para o campo “DADOS DO CORDÃO”, no lado superior direito da grade cartesiana (em amarelo na figura 76).

Considerando-se a densidade do Inconel 625 ($\delta = 8,44 \text{ g/cm}^3$), o aplicativo calcula a taxa de deposição por duas maneiras, alocando seus resultados na parte central da grade cartesiana.

Uma, toma como base a velocidade de alimentação do arame (v_a), sendo a taxa de deposição (T_{DS}) calculada pela equação $T_{DS} = \delta \cdot V_a \cdot S_\phi$ (equação 15). A outra considera a velocidade de soldagem (V_s) e a área de deposição (S_D), calculada pela equação $T_{DS} = \delta' \cdot V_s \cdot S_D$ (equação 16).

A primeira consideração que foi obtida a partir dos resultados foi que o método de cálculo de áreas, a partir da integral do polinômio obtido pela linha de tendência de cada curva, se revelou pouco prático, exigindo a digitação dos coeficientes de cada uma das três equações, e pior, bastante impreciso (ver na figura 76, os valores de R^2 - coeficientes de correlação de Pearson e as áreas obtidas).

Nota-se que os valores das áreas obtidas pelo método dos trapézios são mais práticos e precisos.

4.2 ETAPA 2: COM BASE NO APLICATIVO AVALIAR OS RESULTADOS E ESTABELECEM OS MELHORES PARÂMETROS DE SOLDAGEM

4.2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS:

No sentido de se evitar repetições, antes da apresentação das considerações específicas sobre cada um dos experimentos, foram feitas as seguintes observações. A literatura técnica considera clássica a figura 79, que mostra os efeitos provocados por alguns parâmetros de soldagem (diâmetro do eletrodo, tensão, corrente e velocidade de soldagem), sobre a morfologia do cordão de solda, e não considera outros efeitos (velocidade de alimentação, tecimento, gases utilizados, etc).

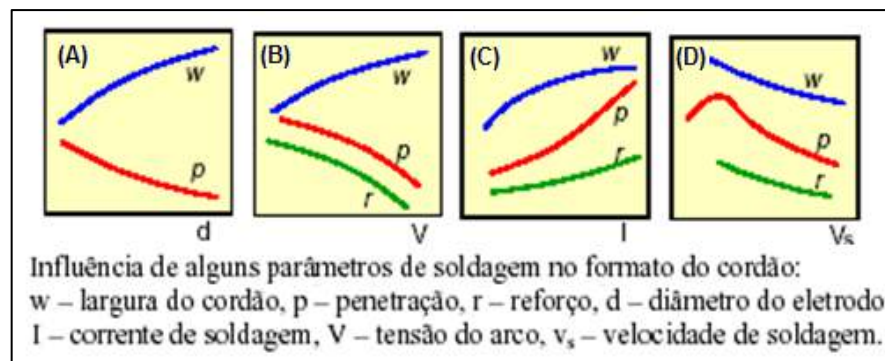


Figura 79. Causa e efeito das variáveis primárias de soldagem (Modenesi, 2007.)

Contudo: **(a)** estes são conceitos gerais, cujas relações de causa e efeito derivam, via de regra, dos processos com eletrodo consumível (SMAW, GMAW, SAW, FCAW, etc.); **(b)** de forma diferente, e justamente pelo fato do arco elétrico ser mantido entre o eletrodo não consumível e a peça, e a alimentação de material de adição (quando utilizada) se dar externamente ao arco, diz-se que o processo GTAW não possui transferência metálica, ou que a alimentação se dá de forma independente da tensão, corrente e velocidade de soldagem. Em resumo, a tensão elétrica do arco não varia com o consumo de material de adição como ocorre em outros processos de soldagem a arco. (Modenesi, 2007.); **(c)** de modo genérico, tem-se que a largura do cordão é influenciada pela velocidade de soldagem e tensão, a altura do reforço pela velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, enquanto que a penetração é influenciada pela corrente, tensão e velocidade de soldagem. (Koshy, 1985.); **(d)** a literatura técnica oferece poucos dados para as condições específicas e especiais deste experimento com soldagem GTAW, e que, em função do recurso “arco oscilante” e do objetivo de “alta taxa de deposição com baixa diluição”, os experimentos estão sendo conduzidos em condições atípicas daquelas da soldagem GTAW convencional, o que dificulta estabelecer análises comparativas com dados da literatura clássica.

A figura 80 abaixo mostra como serão apresentados os resultados dos experimentos realizados, tomando-se por base o plano de amostragem estabelecido em Métodos e Materiais (3.2.2) e utilizando o aplicativo “*VIRTUAL MACRO*”, descrito anteriormente. Nesta, observa-se que os experimentos foram logicamente grupados. No grupo I, onde a velocidade de soldagem ($V_S = 20$ cm/min) é mantida constante e a velocidade de alimentação variável ($V_A = 400-600$ cm/min), enquanto que, no grupo II, a velocidade de alimentação ($V_A = 500$ cm/min) é mantida constante e a velocidade de soldagem variável ($V_S = 15-25$ cm/min). Para ambos os grupos, destaca-se que a faixa de estudo da corrente elétrica ($I = 200-300$ A) é a mesma. Os experimentos “B1-B2-B3” são comuns aos grupos I e II.

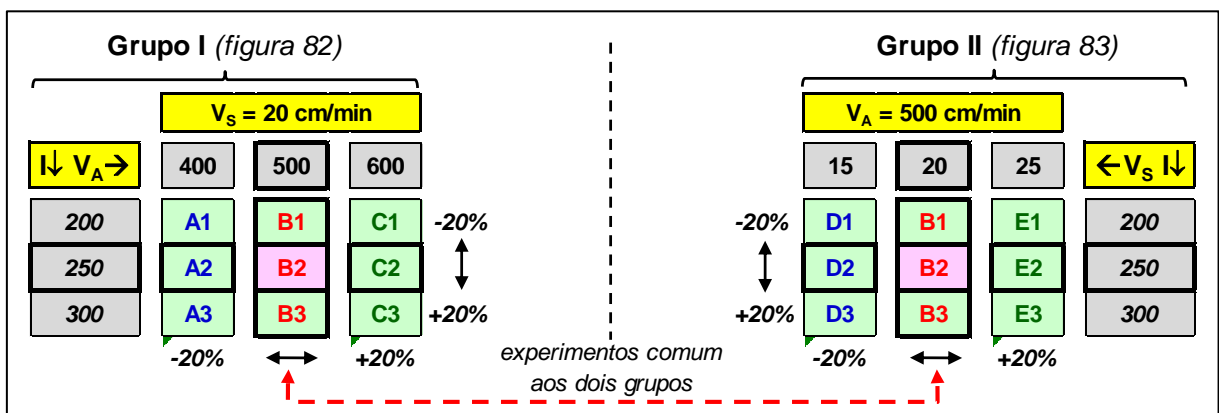


Figura 80. Diagrama de apresentação dos experimentos, pelo autor.

Esta diagramação permitirá tecer considerações paralelas entre Grupo I e Grupo II, para a influência das variáveis de controle (I , V_A e V_S) sobre as variáveis de resposta (Largura, Altura, Área de Deposição, Área de Penetração, Diluição, e Taxa de Deposição). O experimento central “B2” aparece destacado, por ser considerado um referencial simétrico devido à equidade das amplitudes percentuais ($\pm 20\%$) de cada variável para cada um dos outros experimentos.

A Figura 81 (Grupo I) e a Figura 82 (grupo II), mostram respectivamente as seções transversais dos cordões de solda obtidos, vistas a partir da grade cartesiana do aplicativo VISUAL MACRO. Cada um dos cordões de solda foi então processado pelo aplicativo, de forma a se quantificar os resultados para as variáveis de resposta.

O experimento D1, na figura 82, foi desconsiderado nas avaliações a seguir por ter apresentado uma soldagem instável e com qualidade abaixo da requerida.

Para o cálculo das áreas, foi considerado somente o método dos trapézios, visto que o método das integrais foi avaliado como mais impreciso, conforme já exposto na etapa 1.

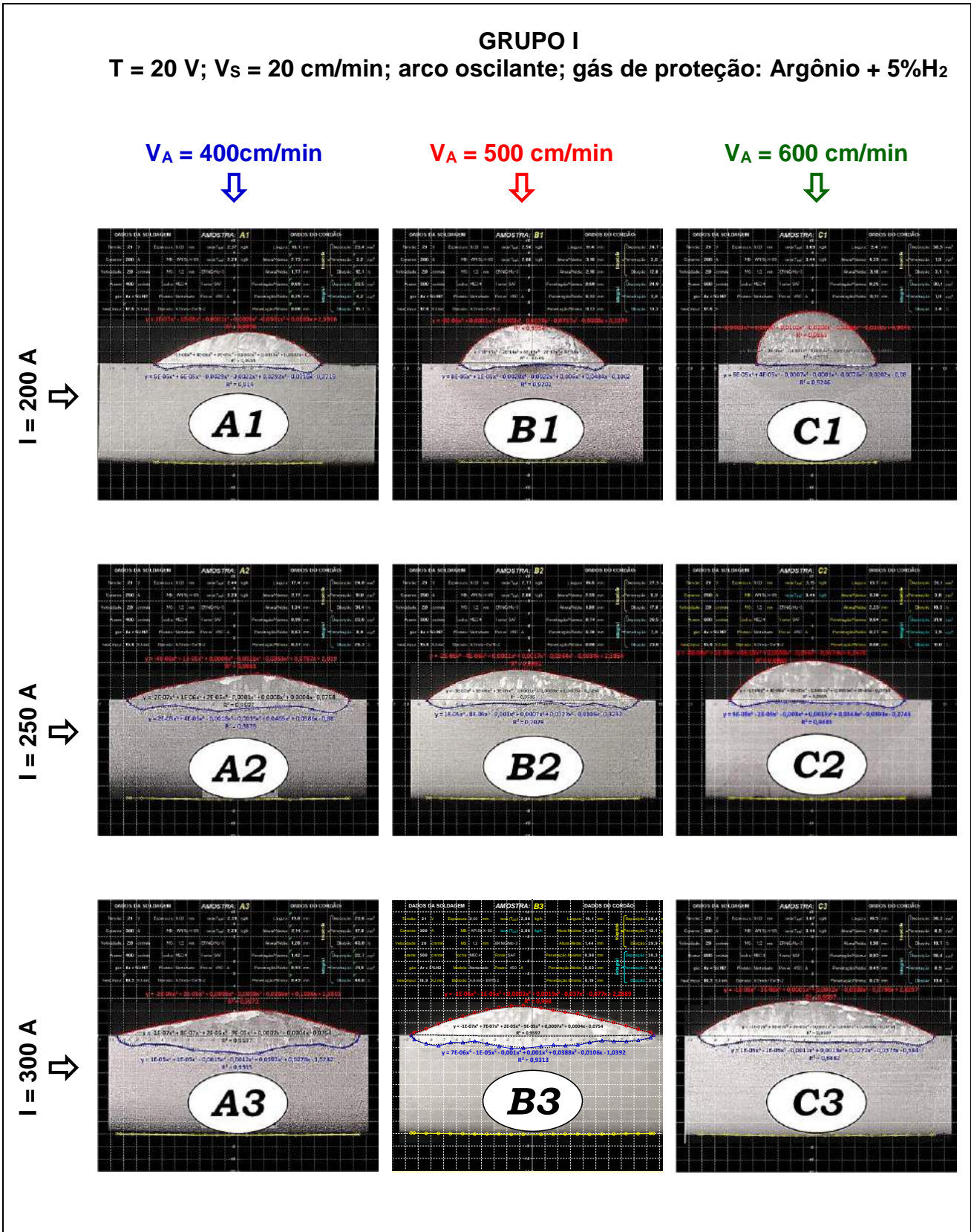


Figura 81. Morfologia dos cordões de solda do Grupo I, com tensão (T) e velocidade de soldagem (V_s) fixas, corrente (I) e velocidade de alimentação (V_A) variáveis, e avaliados com o *VISUAL MACRO*, pelo autor

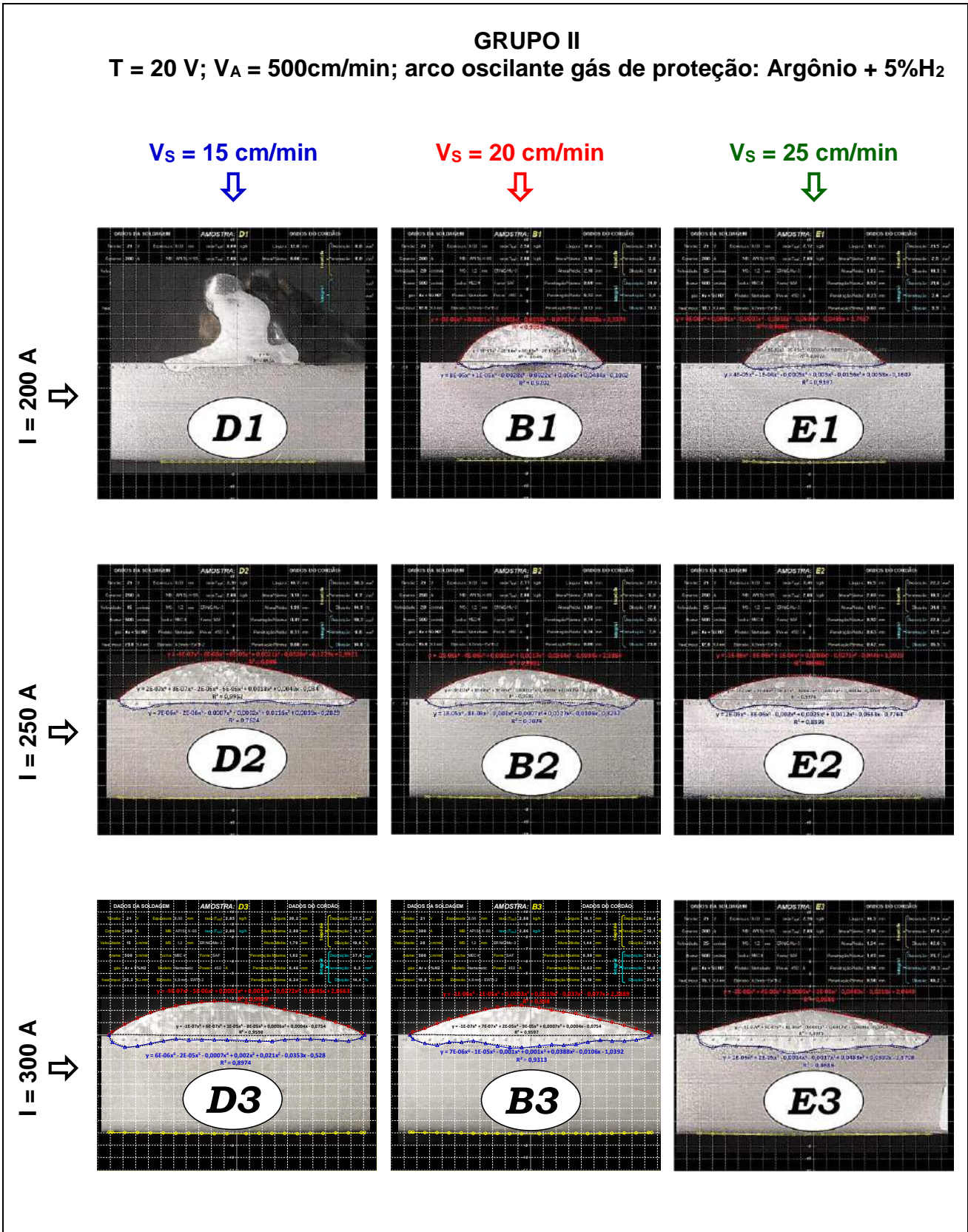


Figura 82. Morfologia dos cordões de solda do Grupo II, com tensão (T) e velocidade de alimentação (V_A) fixas, corrente (I) e velocidade de soldagem (V_s) variáveis, e avaliados com o *VISUAL MACRO*, pelo autor.

4.2.2 - CONSIDERAÇÕES COMUNS AOS RESULTADOS OBTIDOS:

Analisar e discutir, ao mesmo tempo, quinze fotografias junto com diversos gráficos de causa e efeitos, parece complexo. Para isto algumas regras foram aqui definidas. Nos parágrafos a seguir são estabelecidos critérios padronizados para correlacionar os efeitos das três variáveis de controle em análise (corrente de soldagem [I], velocidade de alimentação [V_A] e velocidade de soldagem [V_S]) com cada uma das seis variáveis de resposta (Largura do cordão [w], Altura do cordão [r], Área de Deposição [S_D], Área de Penetração [S_P], Diluição, e Taxa de Deposição [T_{DS}]).

Para cada variável de resposta, foram tabulados os resultados e plotados quatro gráficos cartesianos, lado a lado, estando à esquerda, os representativos do Grupo I, e à direita, os representativos do Grupo II, de forma a se permitir uma análise paralela e comparativa dos efeitos provocados pelas variáveis de controle sobre uma mesma variável de resposta.

Nos gráficos superiores, a corrente de soldagem (I) foi adotada como variável de controle primária e registrada no eixo das abcissas. A variável de controle secundária (velocidade de alimentação, para o Grupo I e velocidade de soldagem para o grupo II), foram representadas por curvas individuais para as diferentes correntes de soldagem, de forma que a variável de resposta pudesse ser lida no eixo das ordenadas. Nos gráficos inferiores, a variável de controle primária (velocidade de alimentação, para o Grupo I e velocidade de soldagem para o grupo II) foram registradas no eixo das abcissas. A variável de controle secundária (corrente de soldagem, foi representada por curvas individuais, de forma que a variável de resposta pudesse ser lida no eixo das ordenadas.

Cada conjunto de quatro gráficos foi construído de tal forma que as escalas dos eixos fossem iguais, permitindo uma leitura visual direta e comparativa das curvas (inclinações, concavidades, etc.) e do efeito provocado por cada variável de controle (eixo das abcissas) na variável de resposta (eixo das ordenadas).

Em cada gráfico e para cada curva que contemple o experimento B2 (curva central), foi determinada uma linha de tendência linear e foram identificadas as coordenadas do ponto relativo ao referencial B2. Uma linha divisória horizontal foi inserida e setas indicando conceitualmente a direção do resultado mais desejável (+) e do menos desejável (-), foram adotadas. A figura 83, fictícia, exemplifica o exposto.

Tomando-se como referência os valores do ponto relativo ao referencial B2, um par de triângulos, em amarelo, foi inserido de forma a se quantificar a influência direta ou inversa, da variável primária na variável de resposta, através da relação percentual dos catetos destes triângulos. Os gráficos da figura 83 destacam o exposto.

Com o conjunto de variáveis estruturado desta maneira, foi inserido em cada gráfico uma expressão formada por códigos, que descreve uma análise sintética, do efeito percentual provocado sobre o valor da variável de resposta (eixo das ordenadas) por uma variação percentual da variável primária (eixo das abcissas), em torno do seu valor mediano, considerando-se uma variável secundária, mantida constante, bem como, para uma variável terciária, também constante. A figura 83 apresenta na parte inferior a decodificação para as análises sintéticas apresentadas.

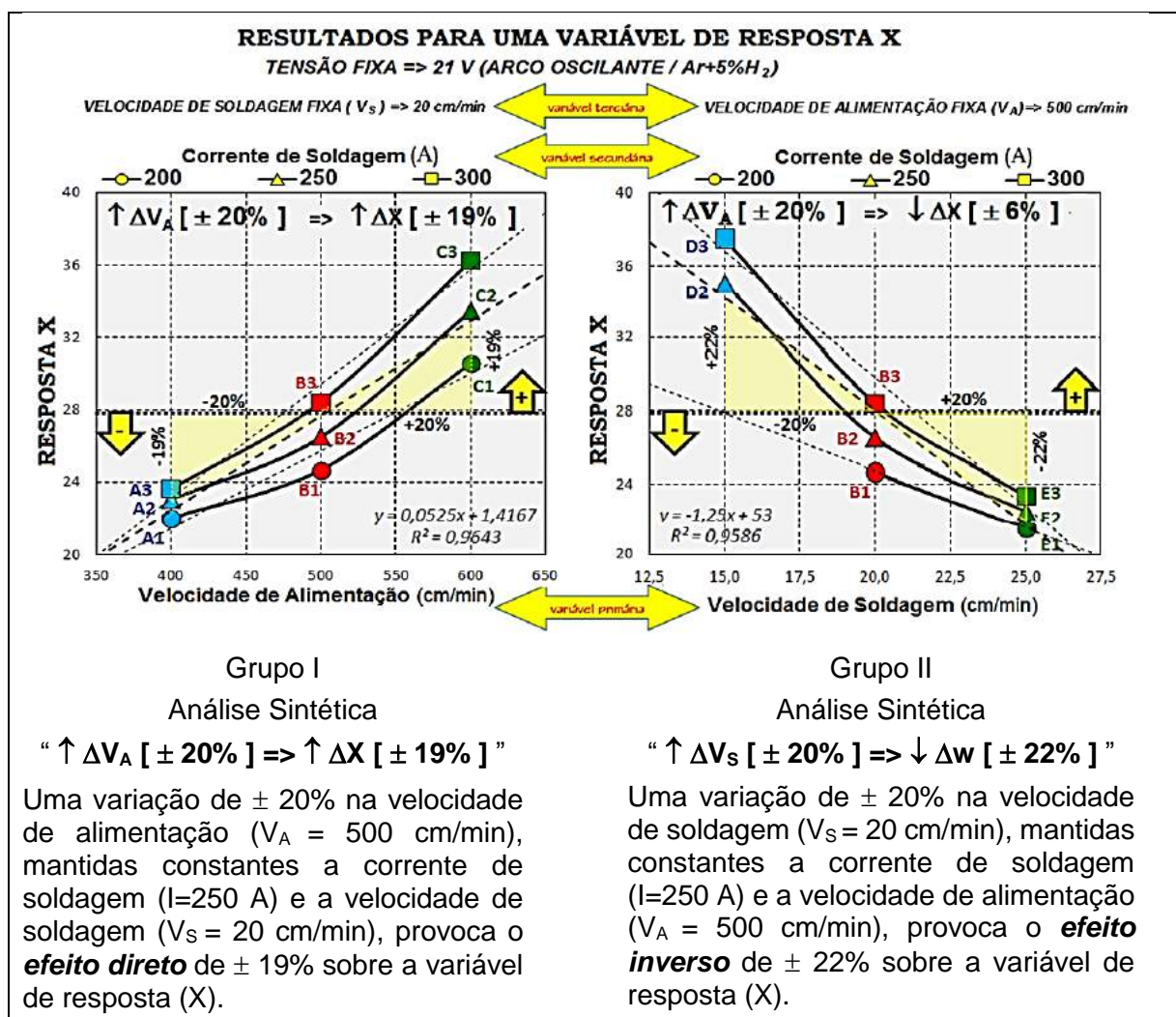


Figura 83. Modelo de Gráficos e Análise Sintética, pelo autor.

Para fins de comparações, nas análises descritivas a seguir, quando e onde possível, foram registrados dados e resultados de trabalhos análogos ou similares.

4.2.3 – ANÁLISE DA LARGURA DO CORDÃO ($w \rightarrow mm$):

A figura 84 compreende o conjunto de avaliações feitas com relação à largura do cordão de solda [w]. Das tabelas inseridas nesta figura, verificou-se que o cordão de referência, B2, apresentou uma largura de 16,6 mm. A menor largura obtida foi de 9,36 mm (Grupo I - C1), e a maior de 20,2 mm (Grupo II - D3).

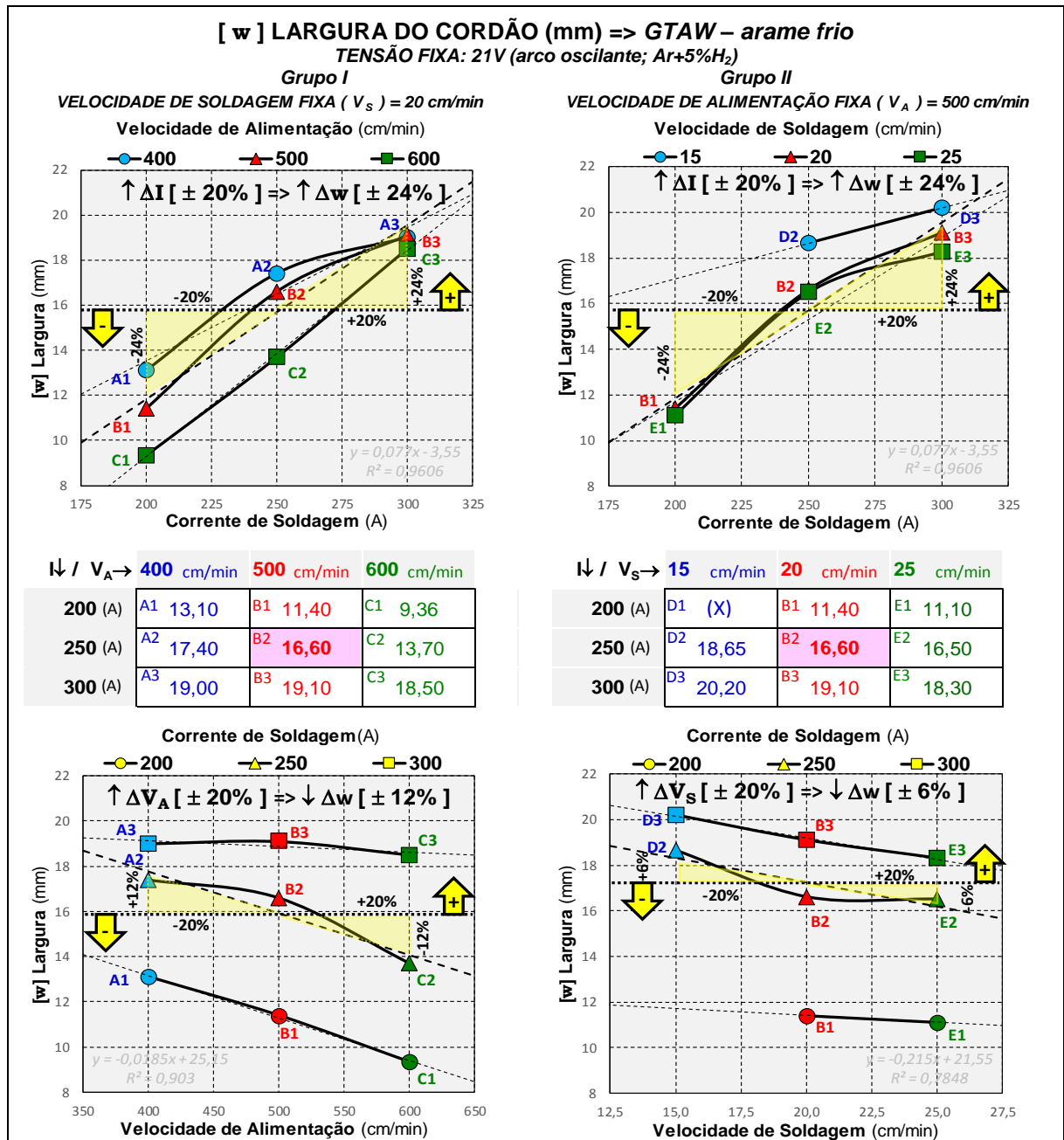


Figura 84. Largura do cordão [w] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.

O aumento da corrente (efeito maior: 24%), a redução da velocidade de alimentação (efeito médio: 12%) e a redução da velocidade de soldagem (efeito menor: 6%), hierarquicamente, responderam pelo efeito de aumento da largura do cordão.

Nos gráficos superiores, notou-se a significativa influência direta da corrente de soldagem (I) sobre a largura do cordão. Em contrapartida, nos gráficos inferiores, mas com influência menor, tanto velocidade de alimentação (V_A) maior, quanto velocidade de soldagem (V_S) maior, reduziram a largura do cordão.

Esses resultados são coerentes com a literatura técnica convencional. (Figura 79, quadros C-D, variável “ w ”, curvas azuis). A literatura técnica clássica, considera o aporte de calor como determinante da largura do cordão, ou seja, a largura é diretamente influenciada pela tensão e pela corrente, e inversamente pela velocidade de soldagem. A redução da largura com a velocidade de soldagem está associada com a diminuição da quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta. (Modenesi, 2007.)

Silva (1), *et al*, 2009, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida), estudou a influência do comprimento do arco (6-14 mm) na diluição e na geometria do cordão, e obteve cordões com largura de 4,5 a 10,9 mm.

Deitos, 2016, com estudo para soldagem “GTAW – arco pulsado - duplo hot wire” (Inconel 625 x aço AISI 4130; $T=14V$; $I=254-305A$; $V_S=38-58$ cm/min; $V_A=200-276$ cm/min), obteve cordões com larguras variando de 7,9 a 10,6 mm. Em relação aos efeitos obtidos, concluiu de forma similar à literatura técnica convencional, quanto a relação direta ou inversa dos efeitos, mas de forma diferente com relação à intensidade, ou seja, a redução da velocidade de soldagem (efeito maior), o aumento da corrente de soldagem (efeito médio) e a velocidade de alimentação (efeito menor), hierarquicamente, responderam pelo efeito de aumento da largura.

Miranda, *et al*, 2015, em estudo com soldagem “GTAW – oscilação mecânica” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida, tecimento triangular - amplitude: 4 mm; passo: 2 mm), obteve cordões com larguras variando de 8,0 a 11,8 mm.

Kumar, *et al*, 2010, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço 355J2+N, $I=140-300A$; $V_S=4-14$ cm/min; $V_A=91$ cm/min; voltagem desconhecida, mas provavelmente bastante inferior à 20V), obteve larguras de 5,7 a 14,2 mm. As influências da corrente e da velocidade de soldagem sobre a largura do cordão foram praticamente lineares e similares às verificadas neste trabalho.

4.2.4 – ANÁLISE DA ALTURA DO CORDÃO (r → mm):

A figura 85 compreende o conjunto de avaliações feitas com relação à altura do cordão de solda [r]. Das tabelas inseridas nesta figura, extraiu-se que o cordão de referência, B2, apresentou uma altura de 2,55 mm. A menor altura obtida foi de 2,14 mm (Grupo I – A3), e a maior de 4,29 mm (Grupo I – C1).

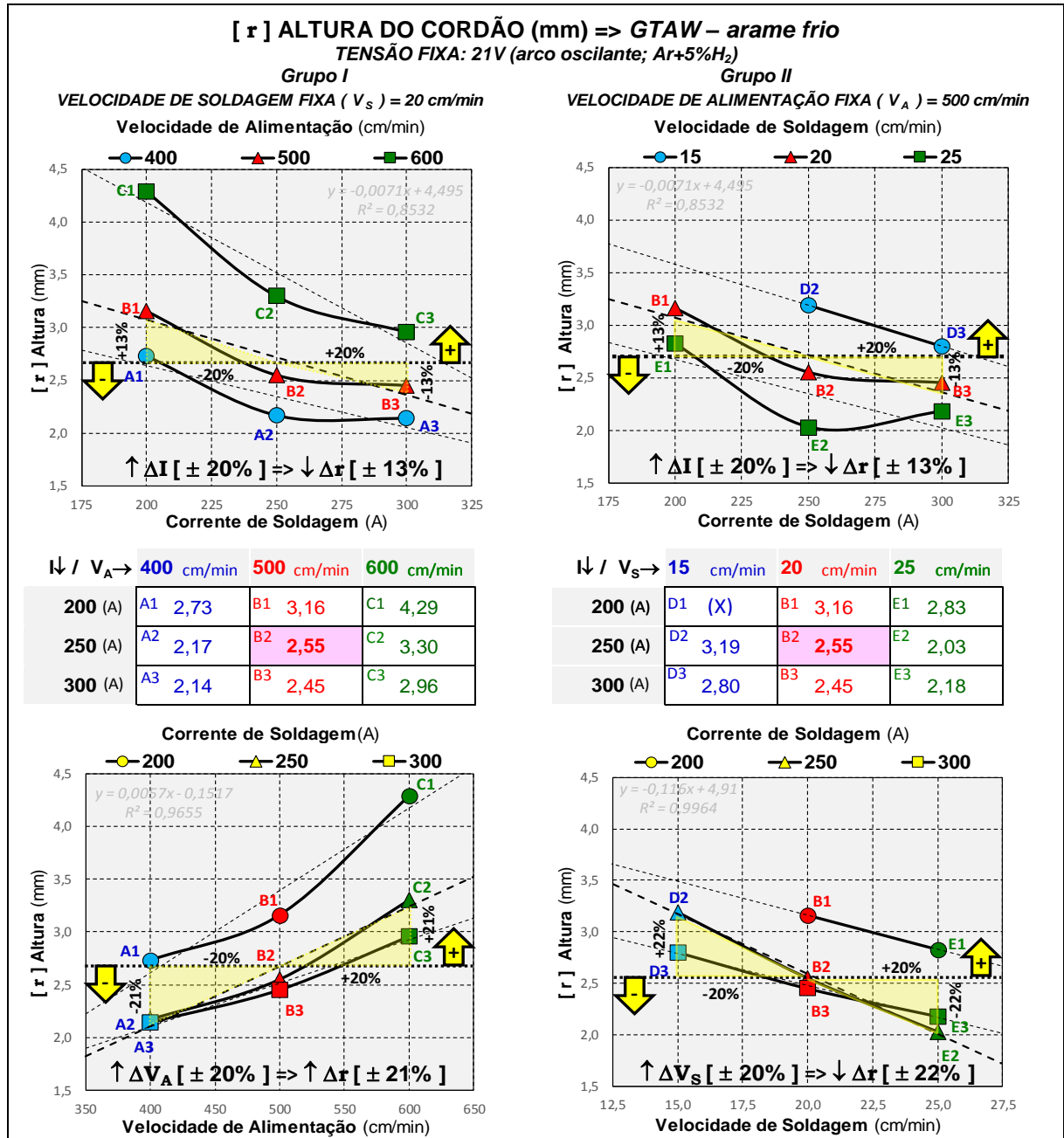


Figura 85. Altura do cordão [r] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.

A redução da velocidade de soldagem (efeito: 22%) e o aumento da velocidade de alimentação (efeito: 21%), afetaram significativamente altura do cordão, enquanto a redução da corrente de soldagem (efeito menor: 13%), hierarquicamente, responderam pelo efeito de aumento da altura do cordão.

Nos gráficos superiores, notou-se uma influência menor e inversa da corrente de soldagem (I) sobre a altura do cordão. Em contrapartida, nos gráficos inferiores, mas com influência maior, tanto velocidade de alimentação (V_A) maior, quanto velocidade de soldagem (V_S) menor, aumentaram a altura do cordão.

Confrontando a observação acima com Modenesi, 2007, no que se refere à corrente de soldagem é divergente (figura 79, quadro C, variável “ r ”, curva verde), conquanto as observações com relação à velocidade de soldagem são coerentes (figura 79, quadro D, variável “ r ”, curva verde) com a literatura técnica convencional. Uma razão para esta divergência poderia estar associada ao fato de que a alimentação do arame é independente no processo GTAW, enquanto que nos processos de eletrodo consumível, esta variável é dependente.

Deitos, 2016, em estudo com soldagem “GTAW – arco pulsado - duplo hot wire” (Inconel 625 x aço AISI 4130; $T=14V$; $I=254-305A$; $V_S=38-58$ cm/min; $V_A=200-276$ cm/min), obteve cordões com alturas variando de 1,5 a 3,0 mm. Em relação aos efeitos obtidos, concluiu de forma similar quanto a relação direta ou inversa dos efeitos, bem como com a intensidade, ou seja, a redução da velocidade de soldagem (efeito maior) e o aumento da corrente de soldagem (efeito médio), hierarquicamente, responderam pelo efeito de aumento da altura do cordão.

Kumar, *et al*, 2010, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço 355J2+N, $I=140-300A$; $V_S=4-14$ cm/min; $V_A=91$ cm/min; voltagem desconhecida, mas provavelmente bastante inferior à 20V), obteve larguras de 1,3 a 3,2 mm. Kumar, *et al*, 2010, concluiu que a energia do arco pode ser usada de forma diferente, por exemplo, para aumentar a fusão do metal de base ou do metal de adição. A influência da corrente e da velocidade de soldagem sobre a altura do cordão foram praticamente lineares e similares às verificadas neste trabalho.

Miranda, *et al*, 2015, em estudo com soldagem “GTAW – oscilação mecânica” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida, tecimento triangular - amplitude: 4 mm; passo: 2 mm), obteve cordões com alturas variando de 2,8 a 3,9 mm.

Silva (1), *et al*, 2009, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida), onde verificou-se a influência do comprimento do arco (6-14 mm) na diluição e na geometria do cordão, obteve cordões com altura de 3,1 a 4,5 mm.

4.2.5 – ANÁLISE DA ÁREA DE DEPOSIÇÃO ($S_D \rightarrow mm^2$):

A figura 86 compreende o conjunto de avaliações feitas com relação à área de deposição [S_D]. Das tabelas inseridas nesta figura, verificou-se que o cordão de referência, B2, apresentou uma deposição de 27,34 mm². A menor deposição obtida foi de 21,48 mm² (Grupo II–E1), e a maior de 38,27 mm² (Grupo II–D2).

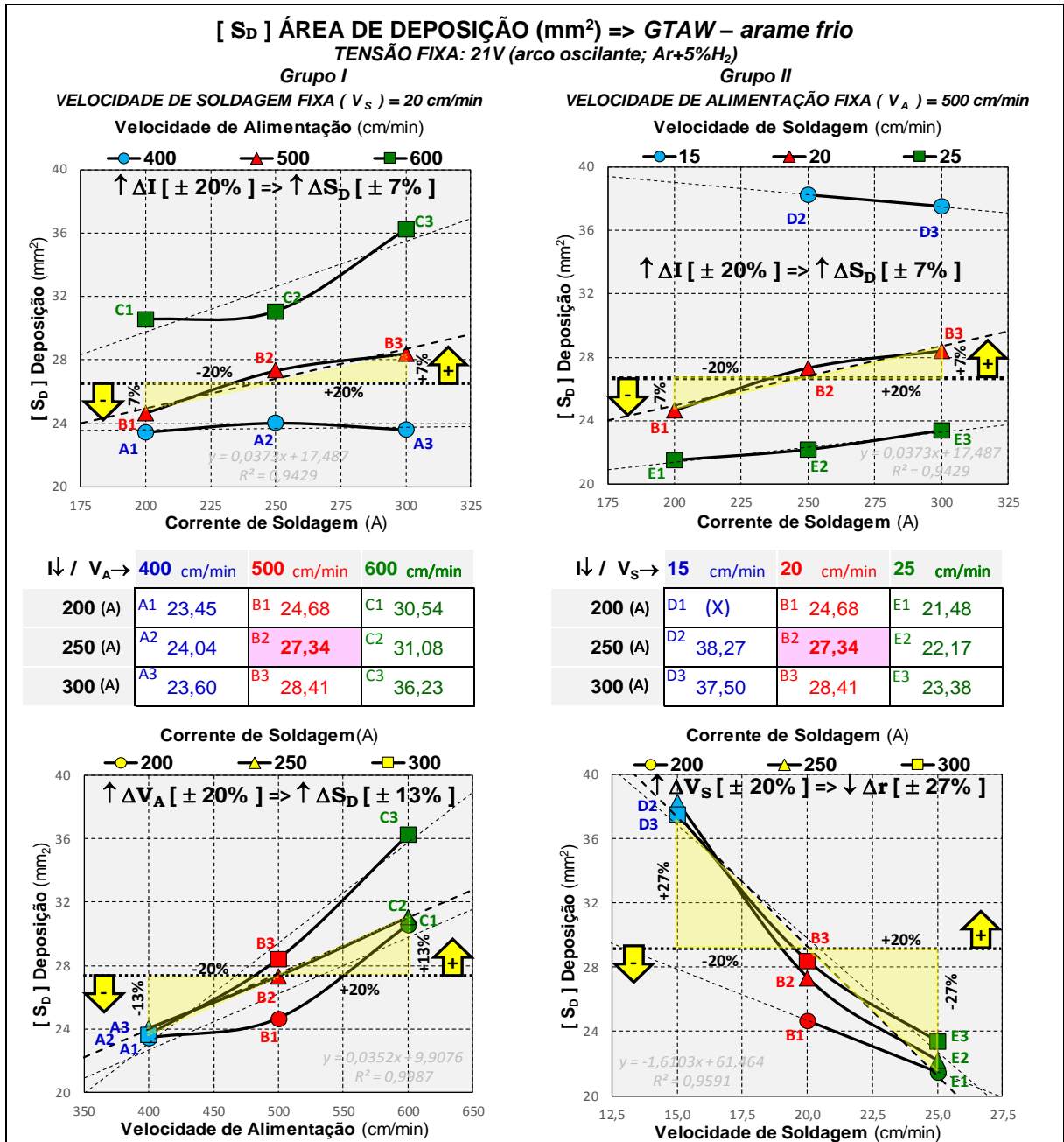


Figura 86. Área de Deposição [S_D] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.

A redução da velocidade de soldagem (efeito maior: 27%), o aumento da velocidade de alimentação (efeito médio: 13%) e o aumento da corrente de soldagem (efeito menor: 7%), hierarquicamente, responderam pelo efeito de aumento da área de deposição.

Nos gráficos superiores, nota-se uma pequena influência direta da corrente de soldagem (I) sobre a deposição.

Nos gráficos inferiores, nota-se que um aumento da velocidade de alimentação (V_A), ou uma redução da velocidade de soldagem (V_S), aumentam significativamente a área de deposição, sendo o efeito de V_S maior do que o efeito de V_A .

As observações referentes à corrente de soldagem e à velocidade de soldagem são coerentes (figura 79, quadros C e D, variáveis “ w ” e “ r ”, curvas azul e verde), com a literatura técnica convencional. (Modenesi, 2007.)

Deitos, 2016, em estudo com soldagem “GTAW – arco pulsado - duplo hot wire” (Inconel 625 x aço AISI 4130; $T=14V$; $I=254-305A$; $V_S=38-58$ cm/min; $V_A=200-276$ cm/min), embora não tenha apresentado as áreas de deposição, estas foram estimadas entre 8,5 a 21,3 mm², os valores mínimos e máximos, calculados a partir da largura e da altura do cordão. A influência de V_S e de I sobre a área de deposição do cordão foram similares às verificadas neste trabalho.

Kumar, *et al*, 2010, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço 355J2+N, $I=140-300A$; $V_S=4-14$ cm/min; $V_A=91$ cm/min; voltagem desconhecida, mas provavelmente bastante inferior à 20V), embora não tenha apresentado as áreas de deposição, estas foram estimadas entre 7,4 a 25,7 mm², os valores mínimos e máximos, calculados a partir da largura e da altura do cordão. A influência da corrente e da velocidade de soldagem sobre a área de deposição do cordão foram similares às verificadas neste trabalho.

Silva (1), *et al*, 2009, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida), onde verificou-se a influência do comprimento do arco (6-14 mm) na diluição e na geometria do cordão, cujas áreas de deposição foram estimadas entre 13,3 a 23,0 mm². Os cordões obtidos por Silva (1), *et al*, 2009, com alta convexidade, assemelham-se com o obtido no experimento C1 ($w = 9,3$ mm; $r = 4,29$ mm; $SD = 30,5$ mm²) deste trabalho.

Miranda, *et al*, 2015, em estudo com soldagem “GTAW – oscilação mecânica” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida, tecimento triangular - amplitude: 4 mm; passo: 2 mm), obteve áreas de deposição estimadas entre 19,4 a 21,8 mm.

4.2.6 – ANÁLISE DA ÁREA DE PENETRAÇÃO ($S_F \rightarrow mm^2$):

A figura 87 compreende o conjunto de avaliações feitas com relação à área de penetração [S_F]. Das tabelas inseridas nesta figura, verificou-se que o cordão de referência, B2, apresentou uma área de penetração de 5,91 mm². A menor penetração obtida foi de 0,99 mm² (Grupo I – C1), e a maior de 17,84 mm² (Grupo I – A3).

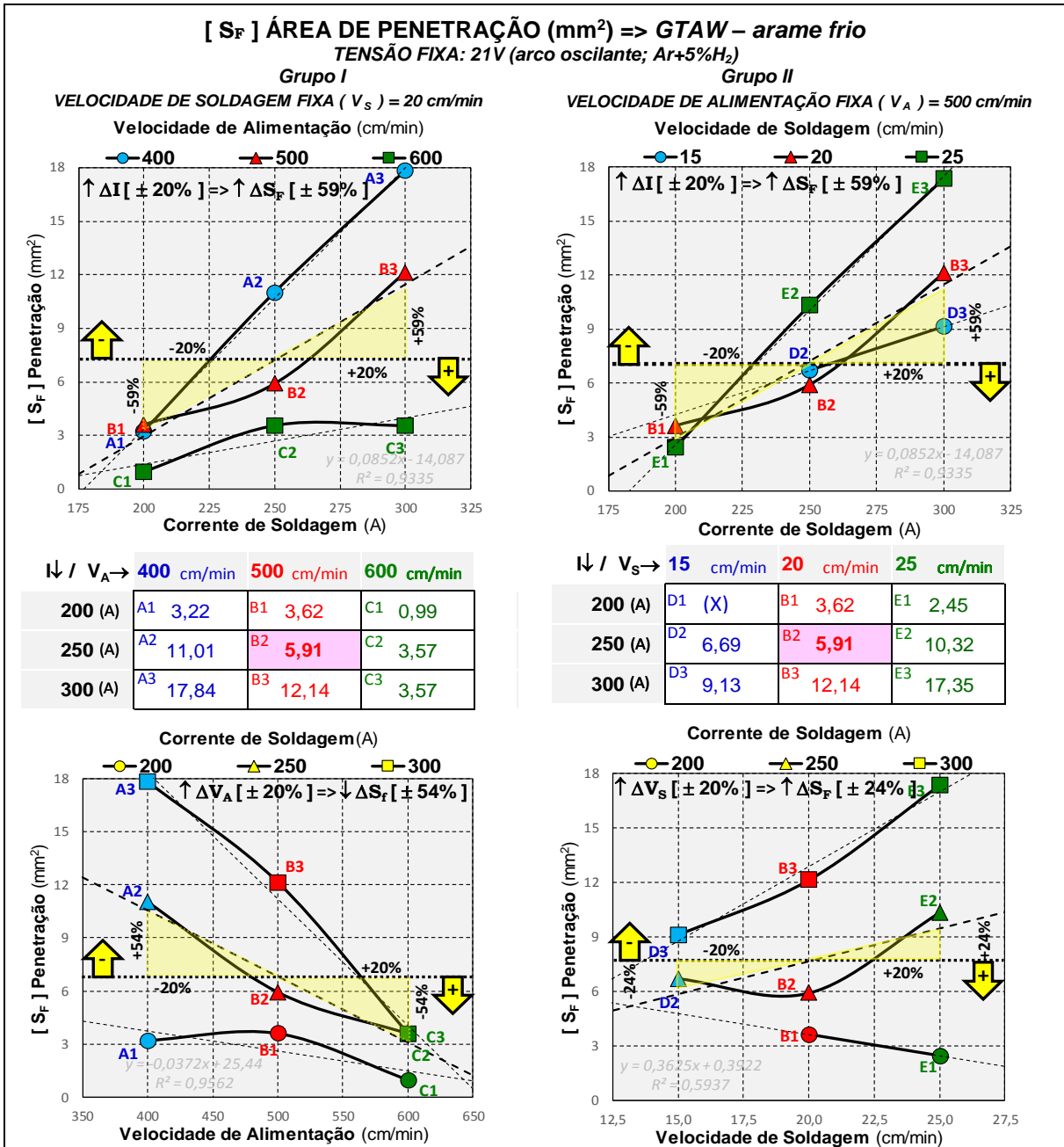


Figura 87. Área de Penetração [S_F] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.

A redução da corrente de soldagem (efeito maior: 59%), o aumento da velocidade de alimentação (efeito médio: 54%) e o aumento da velocidade de soldagem (efeito menor: 24%), hierarquicamente, responderam pelo efeito de redução da área de penetração.

Nos gráficos superiores, notou-se uma forte influência direta da corrente de soldagem (I) sobre a área de penetração. No gráfico inferior esquerdo, notou-se que a redução da velocidade de alimentação (V_A) provocou o aumento da área de penetração. Na figura 87, e para o gráfico inferior direito, o coeficiente angular de “B1-E1” é negativo, enquanto que para “D2-B2-C2” e “D3-B3-E3” é positivo. Uma análise dos coeficientes indica que existe uma corrente de soldagem para a qual, variações na velocidade de soldagem não implicam em variação na penetração.

A literatura técnica convencional afirma que um aumento da corrente implica em aumento na penetração (figura 79, quadros C, variável “p”, curva vermelha), enquanto que um aumento da velocidade de soldagem, implica em uma redução da penetração (figura 79, quadros D, variável “p”, curva vermelha). (Modenesi, 2007.)

A literatura clássica, via de regra, mede a altura da penetração (“ p ”) ao invés da área de penetração (S_F). Os gráficos da altura da penetração em função da corrente de soldagem e da velocidade de soldagem, para o grupo II ($V_A \rightarrow constante$) foram inseridos abaixo, na figura 88, para se comparar as mesmas grandezas.

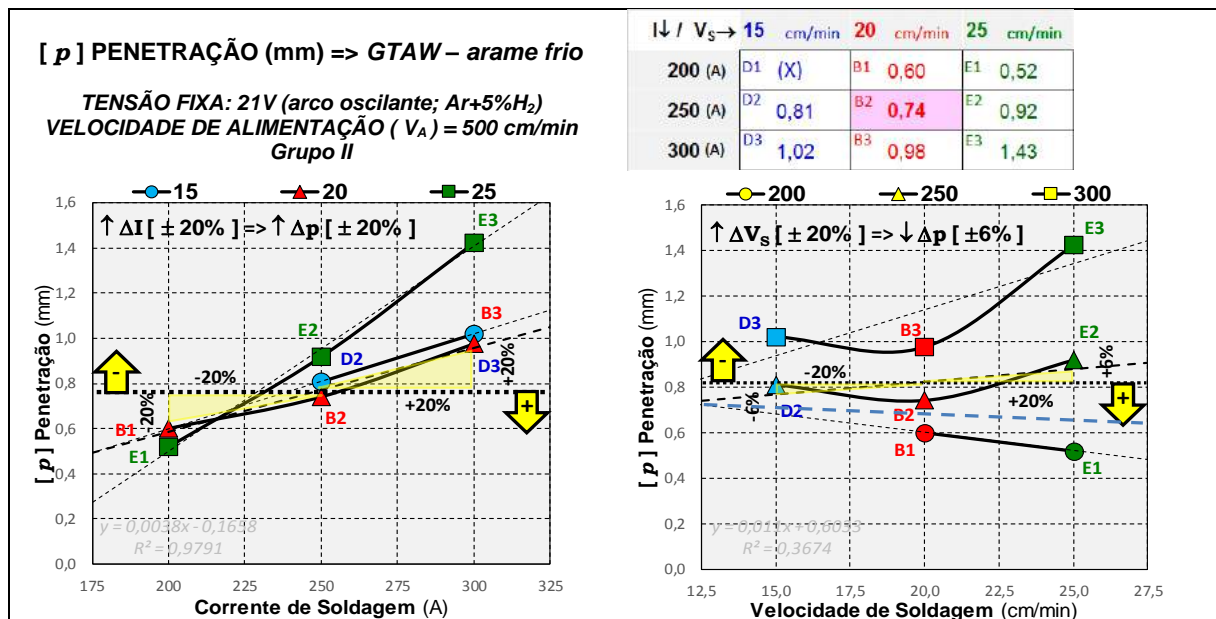


Figura 88. Penetração [p] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.

No gráfico da figura 88, à esquerda, para “B1-B2-B3”, o efeito direto provocado pela corrente de soldagem ($\pm 20\%$) sobre a penetração ($\pm 20\%$) é concordante com a literatura técnica convencional. No gráfico da figura 88, à direita, para “D2-B2-E2”, o efeito provocado pela velocidade de soldagem ($\pm 20\%$) sobre a penetração ($\pm 6\%$) é pequeno e inverso do que dispõe a literatura citada.

Deitos, 2016, em estudo com soldagem “GTAW – arco pulsado - duplo hot wire” ($T=14V$; $I=254-305A$; $V_S=38-58$ cm/min; $V_A=200-276$ cm/min), obteve cordões com penetrações na faixa de 0,75 a 2,0 mm, observando que a penetração varia diretamente com o aumento da corrente de soldagem e inversamente com o aumento da velocidade de soldagem, ou seja, coerente com a literatura técnica convencional, conforme mostrado na figura 89, gráfico à esquerda.

Kumar, *et al*, 2010, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço 355J2+N, $I=140-300A$; $V_S=4-14$ cm/min; $V_A=91$ cm/min; voltagem desconhecida), obteve penetrações de 0,7 a 3,3 mm e concluiu que a velocidade de soldagem praticamente não afeta a penetração. De seu estudo, extraiu-se dados específicos da soldagem com uma corrente de 220A, correlacionando “ V_S ” x “ p ”, os quais foram plotados no gráfico à direita da figura 89. Dados da penetração para a mesma corrente foram obtidos por interpolação do presente trabalho e plotados no mesmo gráfico para fins de comparação. Kumar, *et al*, 2010, obteve penetrações de 1,5-2,2 mm, e observou-se que um aumento de 20% sobre $V_S = 10$ cm/min, implicou num aumento de 7% na penetração. Para a mesma corrente de 220 A, foi obtida no presente trabalho, penetrações de 0,65-0,75 mm, e que, de forma oposta, observou-se que um aumento de 20% sobre $V_S = 20$ cm/min, implicou numa redução de 7% na penetração.

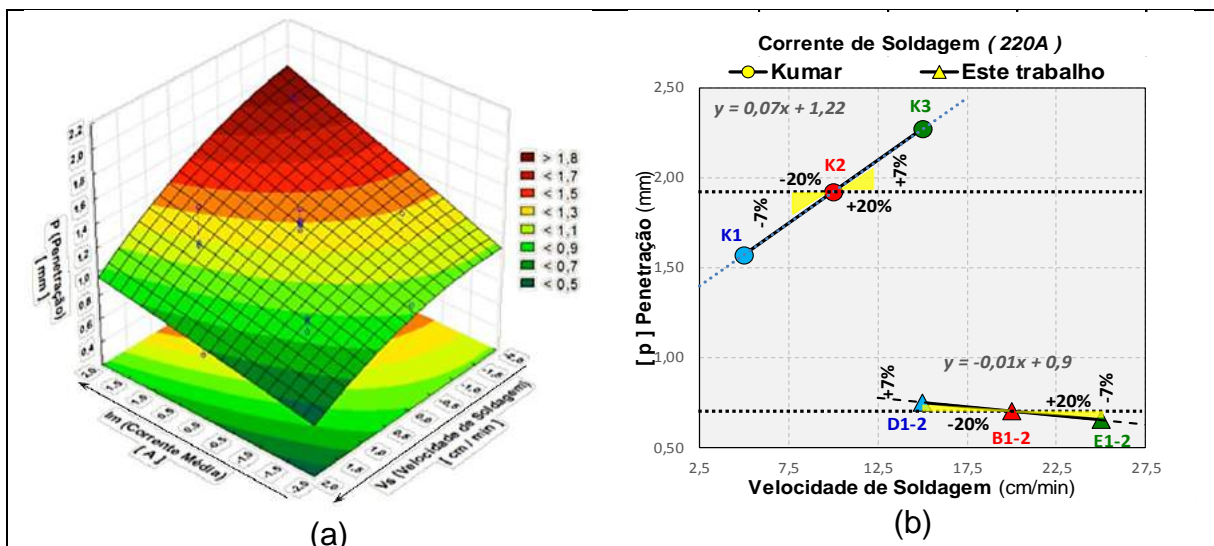


Figura 89. Comparações entre as Penetrações [p] obtidas, pelo autor.

Silva (1), *et al*, 2009, em estudo com “GTAW convencional” ($I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; tensão e V_A desconhecidas) obteve penetrações de 0,4 a 1,7 mm.

Miranda, *et al*, 2015, em estudo com “GTAW – oscilação mecânica” ($I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; tensão e V_A desconhecidas) obteve penetrações variando de 0,12 a 0,67 mm.

4.2.7 – ANÁLISE DA DILUIÇÃO (D → %):

A figura 90 compreende o conjunto de avaliações feitas com relação à diluição [D]. Das tabelas inseridas nesta figura, verificou-se que o cordão de referência, B2, apresentou uma diluição de 17,78 %. A menor diluição obtida foi de 3,14% (Grupo I – C1), e a maior de 43,05 % (Grupo I – A3).

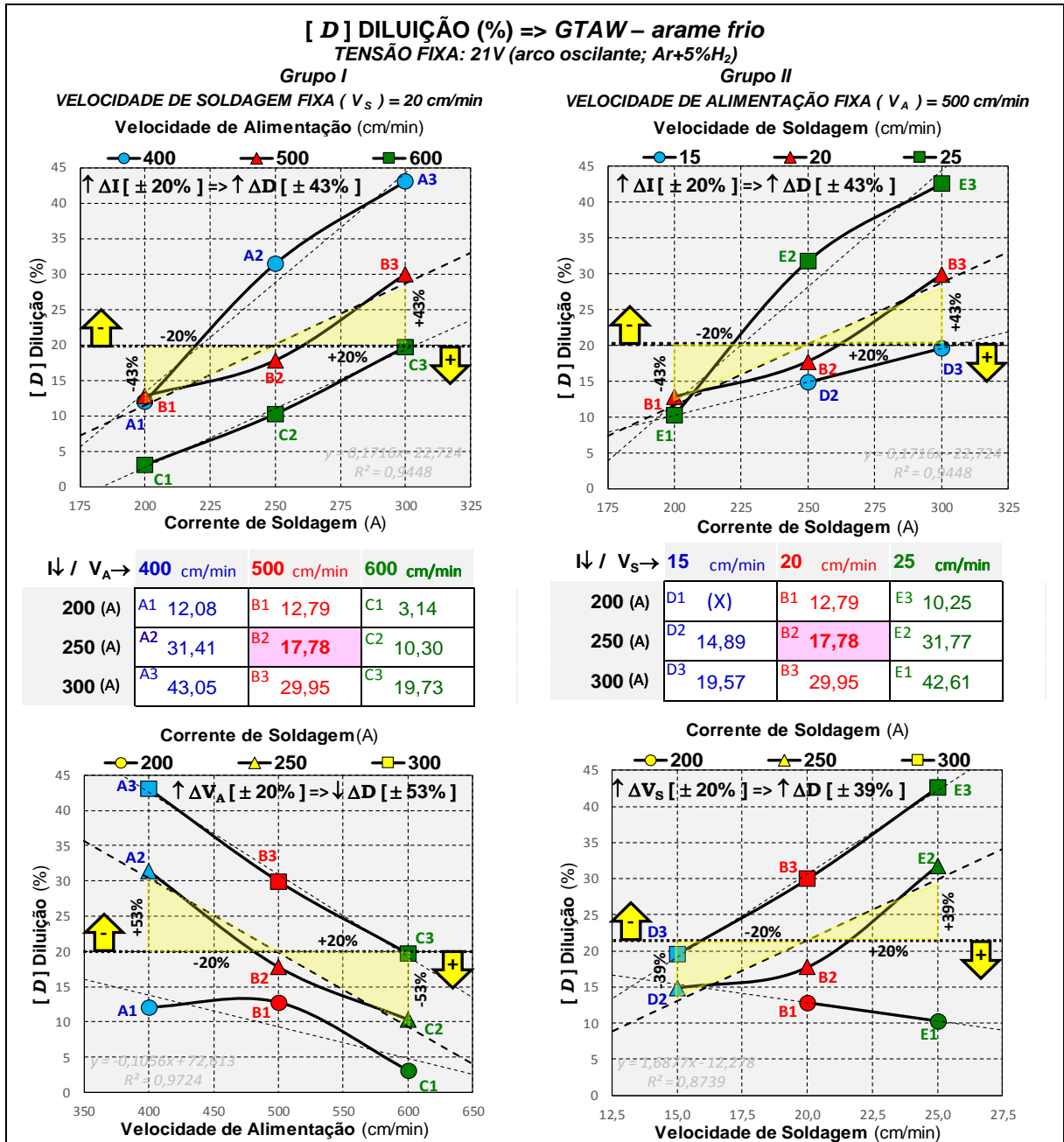


Figura 90. Diluição [D] em função dos parâmetros de soldagem, pelo autor.

O aumento da velocidade de alimentação (efeito maior: 53%), a redução da corrente de soldagem (efeito médio: 43%) e a redução da velocidade de soldagem (efeito menor: 39%), hierarquicamente, responderam pelo efeito de redução da diluição.

Nos gráficos superiores, observa-se a influência direta da corrente de soldagem (I) sobre a diluição. Nos gráficos inferiores, com forte influência, uma velocidade de alimentação (V_A) maior reduz a diluição, enquanto que, com influência menor, uma velocidade de soldagem (V_S) maior, aumenta a diluição.

Na figura 90, e para o gráfico inferior direito, o coeficiente angular de “B1-E1” é negativo, enquanto que o coeficiente angular de “D2-B2-E2” e “D3-B3-E3” é positivo. Uma análise dos coeficientes indica que existe uma corrente de soldagem para a qual, variações na velocidade de soldagem, não implicam em variação na diluição. Isto indicou que ocorria uma oscilação em torno de um ponto de inflexão.

O efeito da diluição reduzir como consequência do aumento da velocidade de alimentação parece ser coerente, pois uma velocidade de alimentação maior, aumentaria a deposição e sequestraria mais calor da poça de fusão, reduzindo a penetração.

Contudo, da literatura técnica convencional (figura 79, quadro C e D) não se pode extrair uma conclusão segura sobre o efeito da corrente e da velocidade de soldagem, visto que ambas afetam de forma concorrente, tanto a penetração, quanto a deposição, que indiretamente determinam a diluição.

O cálculo da diluição é obtido da relação entre a “área de penetração” e a “soma das áreas de deposição e de penetração”, que respectivamente, buscam ser minimizadas e maximizadas neste trabalho.

Em termos de ordem de grandeza, o objetivo é se obter uma relação menor que 1:10. Trata-se, portanto de relações extremas, podendo não terem sido contempladas pela literatura clássica.

Foi atribuído que o efeito do arco oscilante implicou fortemente em alterar a geometria do cordão, e por consequência, as áreas de penetração e de deposição, resultando em efeitos diferentes na relação das áreas, e, por conseguinte, na diluição.

Kumar, *et al*, 2010, em seu trabalho com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço 355J2+N, I=140-300A; $V_S=4-14$ cm/min; $V_A=91$ cm/min; voltagem desconhecida), obteve diluições de 10% a 60%, com o aumento da corrente, e diluições de 55% a 37% com o aumento da velocidade de soldagem. Observou também que o efeito direto da variação da corrente é mais significativo do que o efeito inverso da variação da velocidade de soldagem.

Deitos, 2016, em estudo com soldagem “GTAW – arco pulsado - duplo hot wire” (Inconel 625 x aço AISI 4130; $T=14V$; $I=254-305A$; $V_S=38-58$ cm/min; $V_A=200-276$ cm/min) obteve diluições variando de 26,35 % a 48,84%, e estimou, por extrapolação, poder atingir um mínimo de 6,37%. Os gráficos da figura 91, à esquerda, “diluição x corrente de soldagem x velocidade de alimentação”, e, à direita, “diluição x % de He na mistura do gás de proteção x velocidade de soldagem”, resumem os resultados obtidos. Em relação aos efeitos obtidos, observou-se, a partir do gráfico à esquerda na figura 91, que o aumento da velocidade de alimentação (efeito maior) e a redução da corrente de soldagem (efeito médio), e da figura 91, lado direito, que o aumento da velocidade de soldagem (efeito menor) responderam pelo efeito de redução da diluição.

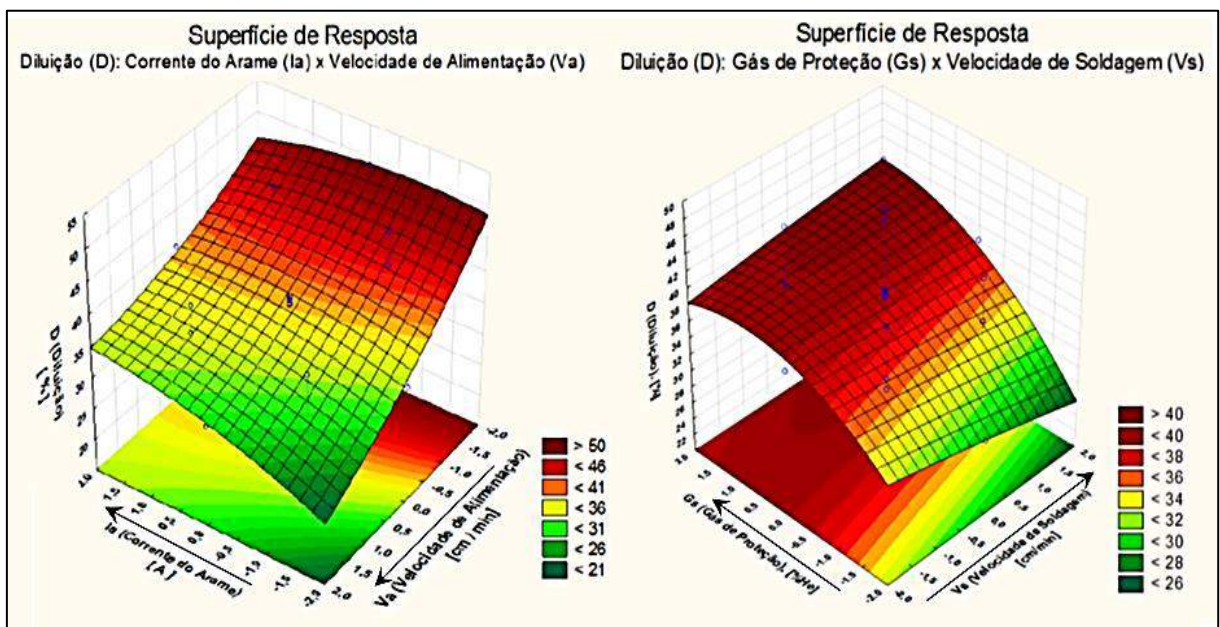


Figura 91. Resultados da diluição em trabalho similar (Deitos, 2016).

Silva (1), *et al*, 2009, em estudo com “GTAW convencional” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida), onde verificou-se a influência do comprimento do arco (6-14 mm) na diluição e na geometria do cordão, obteve diluições de 4,4% a 28,5%.

Miranda, *et al*, 2015, em estudo com soldagem “GTAW – oscilação mecânica” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; $I=223-343$ A; $V_S=25$ cm/min; V_A desconhecida; voltagem desconhecida, tecimento triangular - amplitude: 4 mm; passo: 2 mm), obteve diluições variando entre 1,7% a 28,5%.

4.2.8 – ANÁLISE DA TAXA DE DEPOSIÇÃO ($T_D \rightarrow \text{kg/h}$):

A figura 92 compreende o conjunto de avaliações feitas com relação à taxa de deposição [T_D]. Das tabelas inseridas nesta figura, verificou-se que o cordão de referência, B2, apresentou uma taxa de deposição de 2,77 kg/h. A menor taxa de deposição obtida foi de 2,39 kg/h (Grupo I – A3), e a maior de 3,67 kg/h (Grupo I – C3).

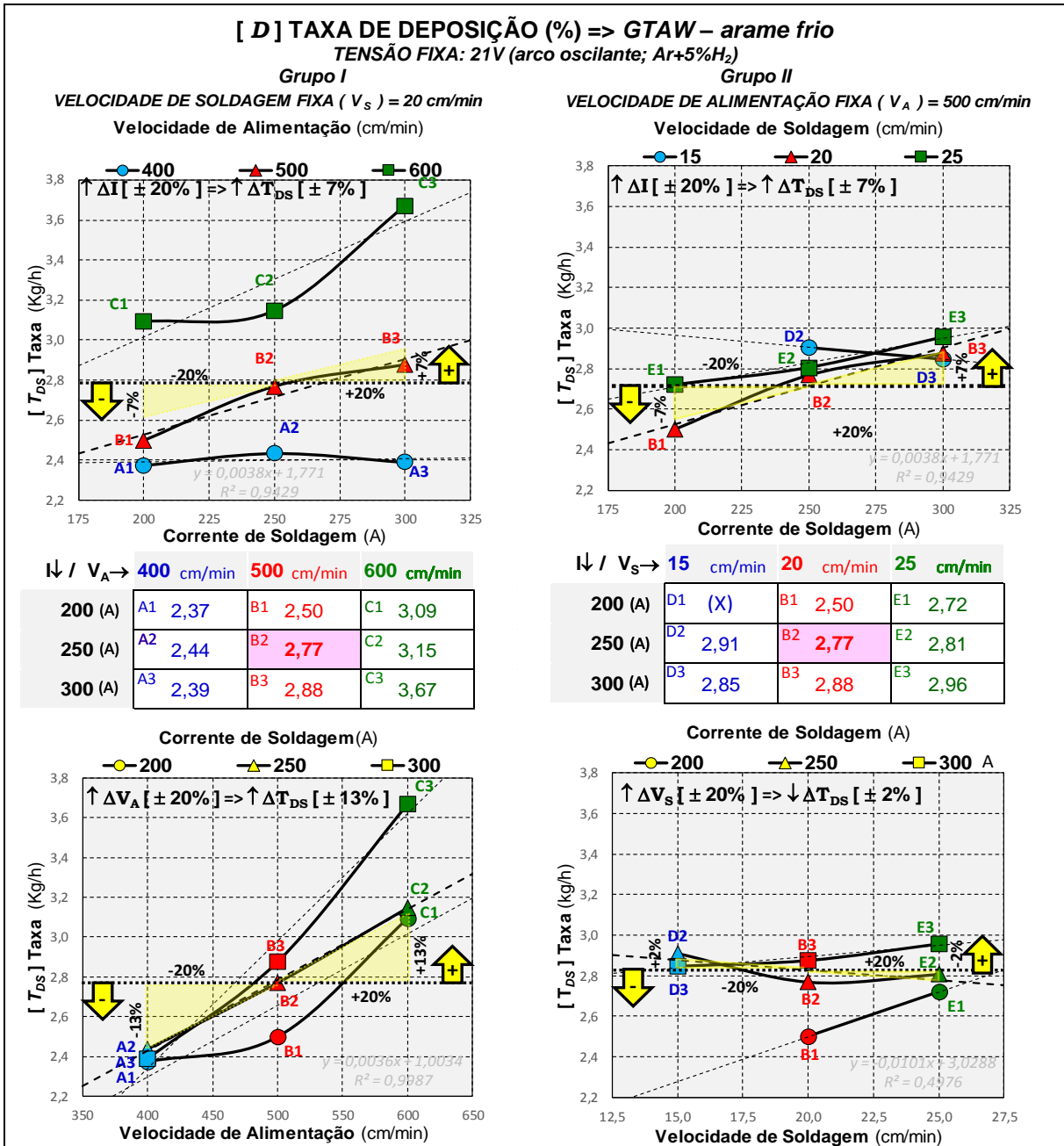


Figura 92. Taxa de deposição [T_{Ds}] em função dos parâmetros de solda, pelo autor.

O aumento da velocidade de alimentação (efeito maior: 13%), o aumento da corrente de soldagem (efeito médio: 7%) e a redução da velocidade de soldagem (efeito menor: 2%), hierarquicamente, responderam pelo efeito de aumento da taxa de deposição.

Nos gráficos superiores, observa-se a influência direta da corrente (I) sobre a taxa de deposição. No gráfico inferior esquerdo, com forte influência, uma velocidade de alimentação (V_A) maior aumenta a taxa de deposição. No gráfico inferior direito, o coeficiente angular de “B1-E1” e de “D3-B3-E3” é positivo, enquanto que o coeficiente angular de “D2-B2-E2” é negativo. Todos são de pequena inclinação, podendo-se supor que a velocidade de soldagem praticamente não afeta a taxa de deposição.

Conforme visto em Materiais e Métodos (3.2.2), a taxa de deposição pode ser descrita como $T_{DS} = \delta \cdot V_a \cdot S_\phi$ (equação 15) ou $T_{DS} = \delta' \cdot V_s \cdot S_D$ (equação 16).

Da equação 15 deduz-se que a taxa de deposição é diretamente proporcional à velocidade de alimentação (V_A). Da equação 16 deduz-se que a taxa de deposição é diretamente proporcional a S_D , e que S_D é proporcional ao produto “ w ” x “ r ” e que ambos crescem com o aumento de corrente, donde concluiu-se que a taxa de deposição aumenta com o aumento da corrente de soldagem. De modo análogo, na equação 16, para o crescimento de V_s , teve-se o efeito contrário em S_D , ou seja, a diluição depende deste balanço.

Os trabalhos referenciados a seguir não apresentam as taxas de deposição obtidas, e elas foram calculadas a partir dos dados disponíveis utilizando a equação $T_{DS} = \delta' \cdot V_s \cdot S_D$ (equação 16).

Kumar, *et al*, 2010, em seu trabalho com “GTAW convencional” (I=140-300A; $V_s=4-14$ cm/min; $V_A=91$ cm/min; voltagem desconhecida), obteve taxas de deposição de 0,38 a 0,52 kg/h, significativamente menores do que as obtidas no presente trabalho.

Silva (1), *et al*, 2009, em estudo com “GTAW convencional” (I=223-343 A; $V_s=25$ cm/min; voltagem e V_A desconhecidas), verificou a influência do comprimento do arco (6-14 mm) na diluição e na geometria do cordão, e obteve taxas de deposição de 1,69 a 2,91 kg/h, e Miranda, *et al*, 2015, em estudo com soldagem “GTAW – oscilação mecânica” (Inconel 625 x aço ASTM A516 Gr 60; I=223-343 A; $V_s=25$ cm/min; voltagem e V_A desconhecidas, tecimento triangular - amplitude: 4 mm; passo: 2 mm), obteve taxas de deposição variando entre 2,58 a 2,76 kg/h, menores que as obtidas no presente trabalho (2,39 - 3,67 kg/h).

Deitos, 2016, com “GTAW – arco pulsado - duplo hot wire” (Inconel 625 x aço AISI 4130; T=14V; I=254-305A; $V_s=38-58$ cm/min; $V_A=200-276$ cm/min) obteve taxas de deposição de 2,27 a 4,11 kg/h, similares às obtidas no presente trabalho.

4.2.9 – MÉTODO TAGUCHI PARA ESCOLHA DAS VARIÁVEIS

A tabela 10 reúne todos os resultados obtidos para as variáveis de resposta em função das variáveis de controle, após a avaliação de cada experimento de soldagem através do aplicativo *VIRTUAL MACRO*.

No cabeçalho da tabela 10 foi inserida uma linha onde se indicou a direção do resultado desejado objetivando-se a mínima diluição e a máxima taxa de deposição, de tal forma que setas indicam, em cada coluna, os efeitos desejados (maior ou menor) para cada variável de resposta. Os valores máximos e mínimos foram destacados nesta tabela.

Tabela 10: Resultados dos experimentos de soldagem

amostra	variáveis de controle				variáveis de resposta						
	TENSÃO	CORRENTE	VELOCIDADE DE SOLDAGEM	VELOCIDADE DO ARAME	[w] LARGURA MAX	[r] ALTURA MAX	[S _D] DEPOSIÇÃO (trapézio)	[S _F] PENETRAÇÃO (trapézio)	[D] DILUIÇÃO (trapézio)	[T _{DS}] TAXA DE DEPOSIÇÃO	
	efeito desejável: ↑ (maior) / ↓ (menor)	↑	↑	↑	↓	↓	↑				
unidade	V	A	cm/min	cm/min	mm	mm	mm ²	mm ²	%	kg/h	
A	A1	21	200	20	400	13,10	2,73	23,45	3,22	12,08	2,37
	A2	21	250	20	400	17,40	2,17	24,04	11,01	31,41	2,44
	A3	21	300	20	400	19,00	2,14	23,60	17,84	43,05	2,39
B	B1	21	200	20	500	11,40	3,16	24,68	3,62	12,79	2,50
	B2	21	250	20	500	16,60	2,55	27,34	5,91	17,78	2,77
	B3	21	300	20	500	19,10	2,45	28,41	12,14	29,95	2,88
C	C1	21	200	20	600	9,36	4,29	30,54	0,99	3,14	3,09
	C2	21	250	20	600	13,70	3,30	31,08	3,57	10,30	3,15
	C3	21	300	20	600	18,50	2,96	36,23	8,90	19,73	3,67
D	D1	21	200	15	500	x	x	x	x	x	x
	D2	21	250	15	500	18,65	3,19	38,27	6,69	14,89	2,91
	D3	21	300	15	500	20,20	2,80	37,50	9,13	19,57	2,85
E	E1	21	200	25	500	11,10	2,83	21,48	2,45	10,25	2,72
	E2	21	250	25	500	16,50	2,03	22,17	10,32	31,77	2,81
	E3	21	300	25	500	18,30	2,18	23,38	17,35	42,61	2,96

De acordo com o estabelecido em Métodos e Materiais (3.2.2), foi prevista a aplicação do método Taguchi (Planejamento Robusto de Experimentos), para cumprir com um reduzido número de ensaios, dois objetivos: obter a influência individual dos

fatores de controle sobre as variáveis respostas e determinar as condições ideais (combinação de variáveis de controle) para a soldagens de revestimentos.

De forma a se classificar por atributos o efeito desejável para cada variável de resposta da tabela 10, tomou-se como referência “0”, o valor da variável de resposta intermediária e se estabeleceu-se uma escala de pontuação: (-7; -6; -5; -4; -3; -2; -1; 0; +1; +2; +3; +4; +5; +6; +7). Os pontos foram registrados na tabela 11 e a soma dos valores atribuídos foi então calculada para cada experimento, de tal forma que os maiores totais obtidos representem as melhores combinações de variáveis de entrada com variáveis de respostas.

Os experimentos C1 e C2 obtiveram os maiores totais de pontos (empatados). Na tabela 11, dentre estes melhores experimentos, e para cada variável de resposta, foram identificados com círculos verdes os melhores resultados individuais e com círculos vermelhos os piores resultados individuais.

Tabela 11: Resultados da seleção pelo Método Taguchi

variáveis de controle					variáveis de resposta						TOTAL
amostra	TENSÃO	CORRENTE	VELOCIDADE DE SOLDAGEM	VELOCIDADE DO ARAME	LARGURA MAX	ALTURA MAX	DEPOSIÇÃO	PENETRAÇÃO	DILUIÇÃO (integral)	TAXA DE DEPOSIÇÃO T_{ps}	
unidade	V	A	cm/min	cm/min	mm	mm	mm ²	mm ²	%	kg/h	pontos
A1	21	200	20	400	-3	0	-3	5	4	-6	-3
A2	21	250	20	400	1	-4	-1	-3	-3	-4	-14
A3	21	300	20	400	5	-5	-2	-6	-6	-5	-19
B1	21	200	20	500	-4	4	0	3	3	-3	3
B2	21	250	20	500	0	-1	1	2	1	-1	2
B3	21	300	20	500	6	-2	2	-4	-2	2	2
C1	21	200	20	600	-6	7	3	7	7	5	23
C2	21	250	20	600	-2	6	4	4	5	6	23
C3	21	300	20	600	3	3	5	0	-1	7	17
D1	21	200	15	500	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-42
D2	21	250	15	500	4	5	7	1	2	3	22
D3	21	300	15	500	7	1	6	-1	0	1	14
E1	21	200	25	500	-5	2	-6	6	6	-2	1
E2	21	250	25	500	-1	-6	-5	-2	-4	0	-18
E3	21	300	25	500	2	-3	-4	-5	-5	4	-11

As figuras 93 e 94 apresentam as imagens ampliadas dos experimentos C1 e C2 vistos a partir das telas de análise do aplicativo *VIRTUAL MACRO*.

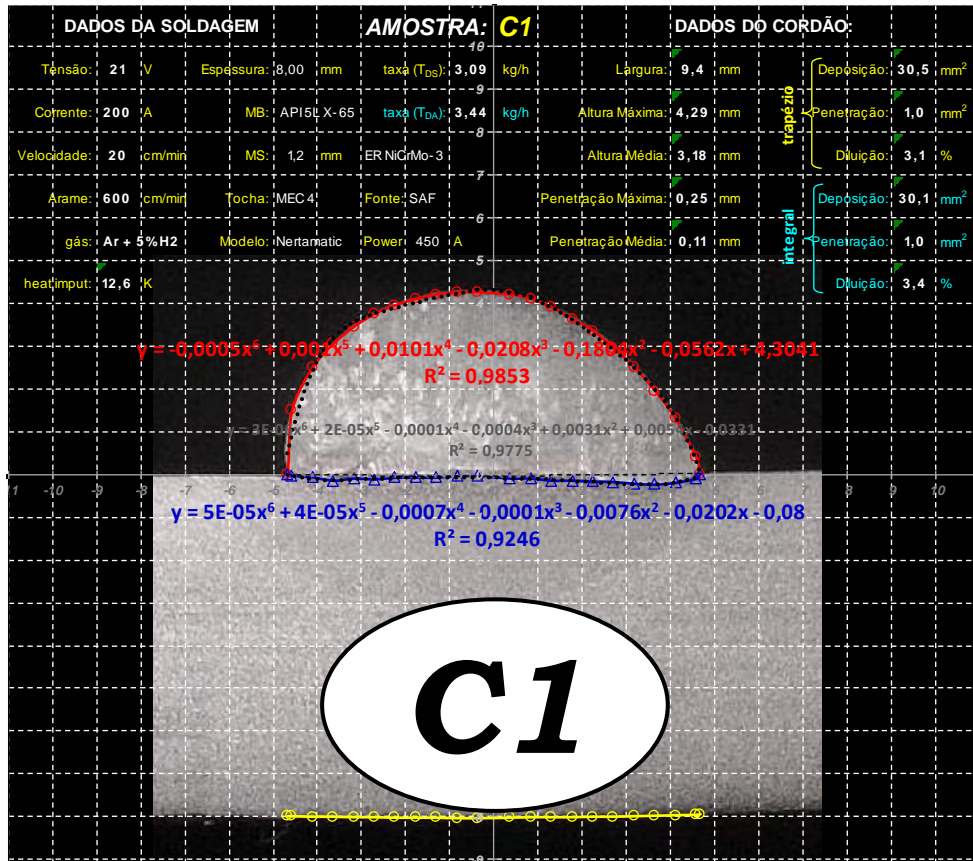


Figura 93. Experimento C1, pelo autor.

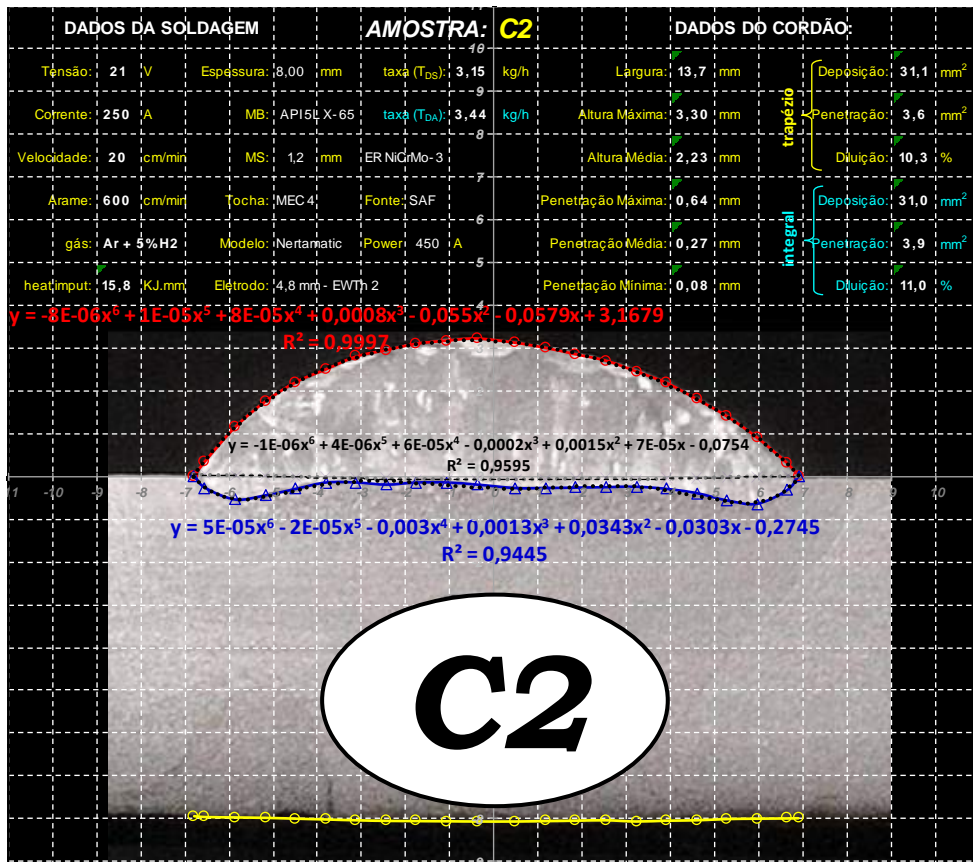


Figura 94. Experimento C2, pelo autor.

4.3 ETAPA 3: REVESTIMENTO INTERNO DO TUBO REALIZADA COM OS PARÂMETROS ESCOLHIDOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS (experimento F)

Na figura 95, a fotografia [a] apresenta a tocha GTAW destacando: (1) Lança de sustentação; (2) bobina para geração da oscilação eletromagnética acoplada a tocha; (3) “hot-wire” e (4) câmera. A fotografia [b] apresenta o carro de movimentos combinados, destacando a rotação do tubo, promovida por pares de rolos motorizados e o movimento de translação, obtido pelo deslocamento longitudinal do carro. A fotografia [c] destaca por outro ângulo a tocha com as variantes instaladas antes de ser inserida no tubo.

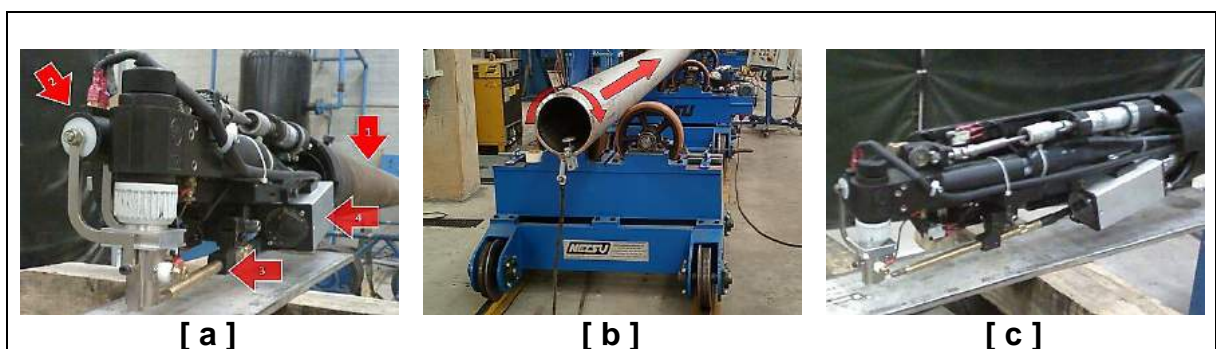


Figura 95. Equipamento de soldagem: [a] lança, tocha, bobina, hotwire e câmera, [b] carro de movimentos combinados (rotação e translação), [c] visão lateral da tocha

A figura 96 apresenta a instalação e a operação de soldagem, destacando a tocha de soldagem no interior do tubo. Na fotografia [a] observa-se a tocha, a bobina para oscilação magnética e a câmera Visioarc. Na fotografia [b], apresenta-se uma visão da soldagem, vista por traz, a partir da lança de sustentação da tocha. A fotografia [c] mostra o início da soldagem do revestimento, visto pela frente.

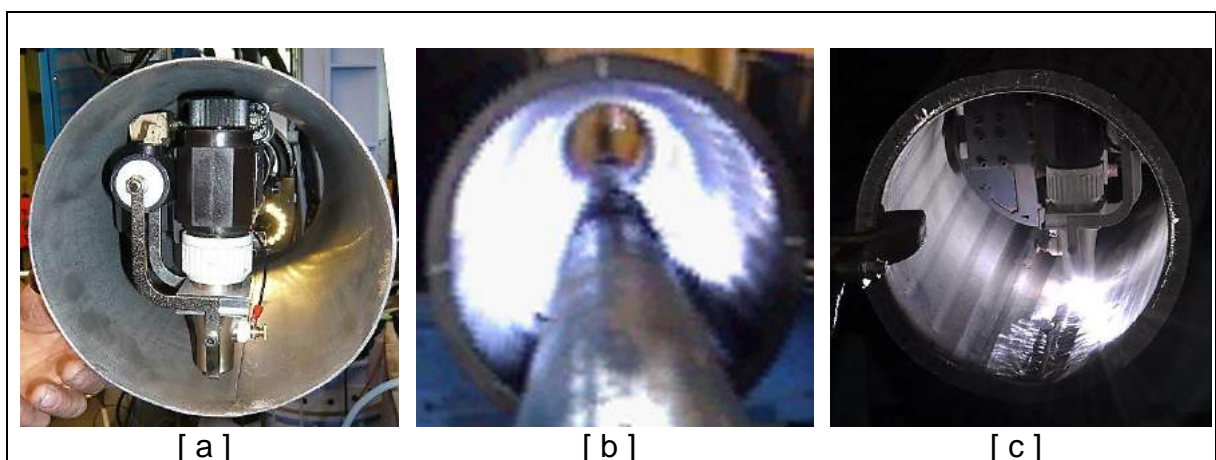


Figura 96. Equipamento de soldagem: [a] vista frontal da montagem; [b] visão posterior da soldagem, a partir da lança de sustentação; [c] vista frontal da soldagem.

A figura 97 mostra um conjunto de fotografias realizadas durante o experimento F. A fotografia [a] apresenta o painel de controle. Na parte superior, da esquerda para a direita, rotômetros para medição da vazão do gás (ar + 5% H₂), controles da tensão e corrente de soldagem, controles da oscilação magnética e controle da tocha hotwire. Na parte inferior, da esquerda para a direita, controle de rotação e controle de translação do tubo. A fotografia [b] apresenta o detalhe do arame quente saindo “rubro” da tocha “hot-wire”. A fotografia [c] mostra a execução da soldagem de revestimento.

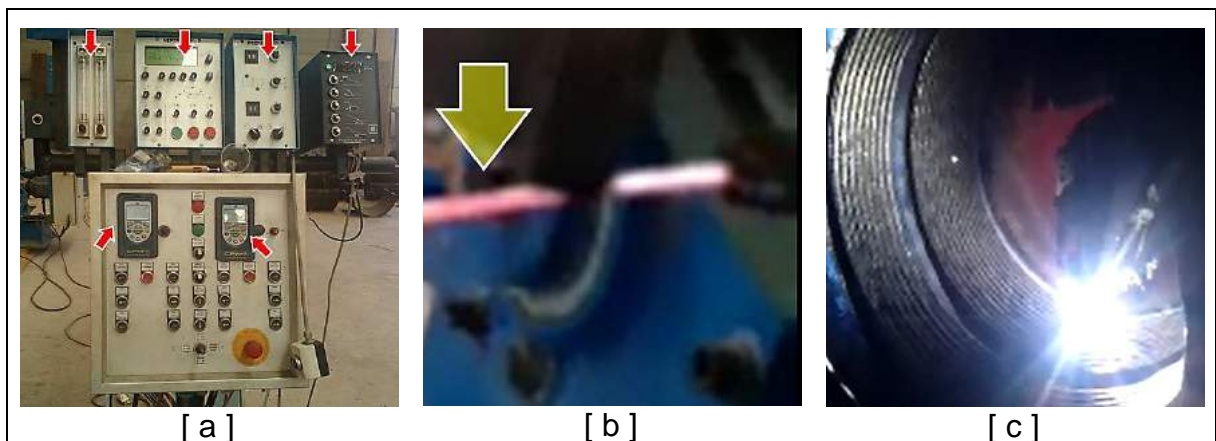


Figura 97. [a] Painel de controle, [b] detalhe do arame quente saindo da tocha “hot-wire” e [c] execução da soldagem de revestimento.

A figura 98 mostra as imagens obtidas do monitor a partir da câmera Visioarc. A fotografia [a] mostra o arco defletido para a esquerda, por força do campo eletromagnético produzido pela bobina de indução. A fotografia [b] mostra o arco sem deflexão eletromagnética. A fotografia [c] mostra o arco defletido para a direita.

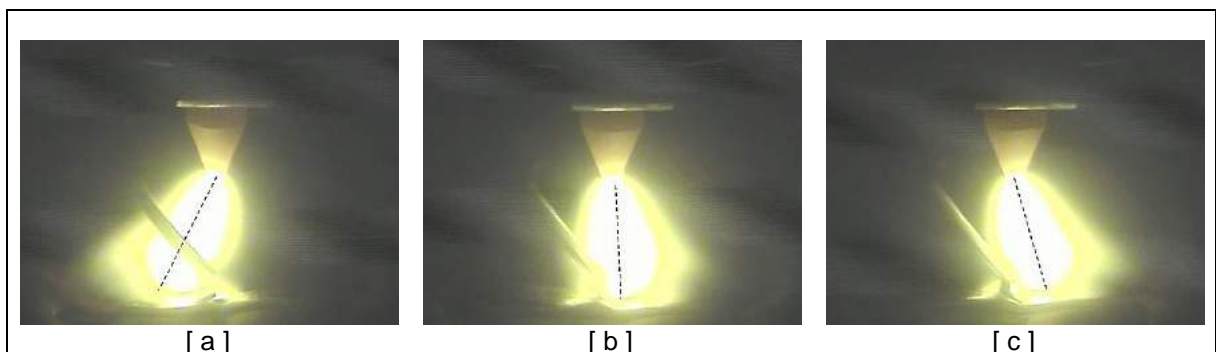


Figura 98. Visão durante a soldagem da deflexão do arco elétrico como resultado da polaridade controlada sobre a bobina de indução: [a] arco defletido para a esquerda; [b] arco sem deflexão; arco defletido para a direita.

Conforme descrito em Métodos e Materiais (3.1) o revestimento se processou com tocha parada e peça (tubo) com movimento combinado de translação e rotação.

Para a realização da etapa 3 (soldagem helicoidal do revestimento com as variantes “oscilação magnética e gás de proteção Ar + 5 % de H₂ e acrescida da variante “hot-wire”), três observações iniciais foram consideradas:

- a escolha entre os melhores perfis entre C1 e C2;
- a realização de um processo com cordões de solda justapostos, ao invés de cordões isolados;
- a introdução da variável hot-wire.

4.3.1 – A ESCOLHA ENTRE OS MELHORES PERFIS [C1 e C2]

A etapa 2 determinou dois perfis de soldagem (C1 e C2) considerados como os melhores. As considerações abaixo objetivaram definir qual perfil usar e, por conseguinte, quais variáveis de controle seriam tomadas como referência inicial para a soldagem do revestimento. A figura 99 suporta as observações a seguir:

- A largura $w_2 = 13,7$ mm em relação a $w_1 = 9,36$ mm, resultará em um passo helicoidal maior, e por consequência em uma produtividade maior.
- A altura de $r_2 = 3,3$ mm atende ao requisito de altura mínima de 3 mm, enquanto que a altura de $r_1 = 4,29$ mm, excede este requisito.
- A diluição obtida com C2 de 10,3% praticamente atende ao requisito proposto de diluição máxima de 10%; a diluição de C1 = 3,14% é significativamente melhor, mas excede ao proposto neste trabalho.
- O perfil menos convexo do experimento C2 em relação ao experimento C1 foi considerado mais adequado para cordões justapostos com transpasse.

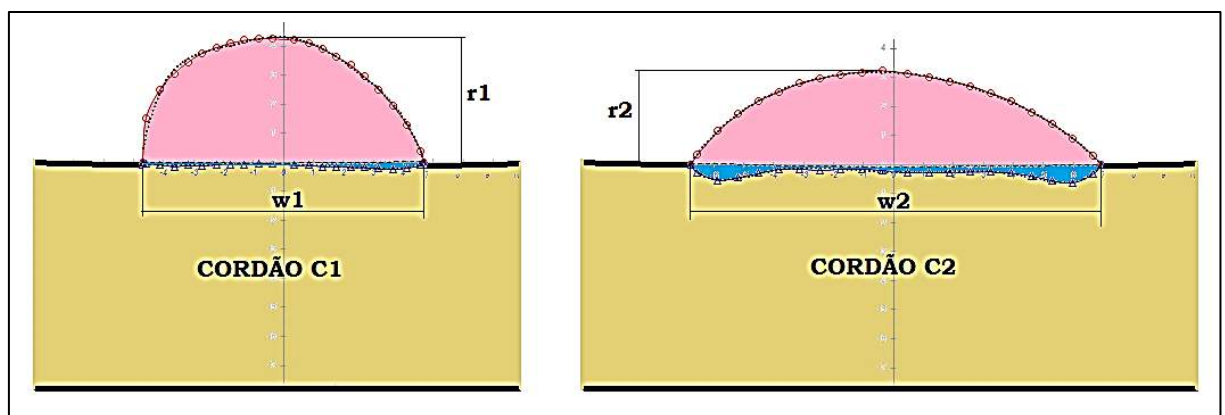


Figura 99. Experimentos C1 e C2, pelo autor.

4.3.2 – CONSIDERAÇÕES SOBRE CORDÕES JUSTAPOSTOS

Uma segunda consideração relativa a mudança de cenário na soldagem do revestimento trata-se da justaposição dos cordões, cuja vizinhança altera a geometria de base plana para cordões isolados, com consequências em uma das bordas.

A figura 100 ilustra a questão. Nesta, a ilustração (A) representa um cordão individual, bastante convexo, com relação w/r alta, típico das soluções adotadas atualmente na indústria de revestimento (GTAW; arco pulsado; sem tecimento). A ilustração (B) representa os mesmos cordões justapostos, mas aplicados em duas camadas, conforme recomendado em normas e práticas, destacando as regiões refundidas das camadas. A ilustração (C) mostra o cordão C2 obtido neste trabalho (GTAW; arco oscilante; hotwire; gás Ar + 5% H₂), significativamente menos convexo. A ilustração (D) apresenta uma imagem fictícia dos cordões citados em (C), justapostos, aplicados como uma única camada de soldagem.

A primeira observação que se faz é que a penetração máxima em (A) ocorre na região central do cordão, enquanto que em (C), a penetração máxima ocorre nas extremidades, como um efeito secundário do tecimento (arco oscilante).

Embora não seja o objetivo deste trabalho estabelecer ou comparar o efeito do tratamento térmico de uma segunda camada de solda sobre a primeira, a ilustração permitiu induzir que um efeito similar pode ser obtido. Nota-se que tanto em (B), quanto em (D), as regiões refundidas se projetam verticalmente sobre as áreas termicamente afetadas do cordão de solda anterior.

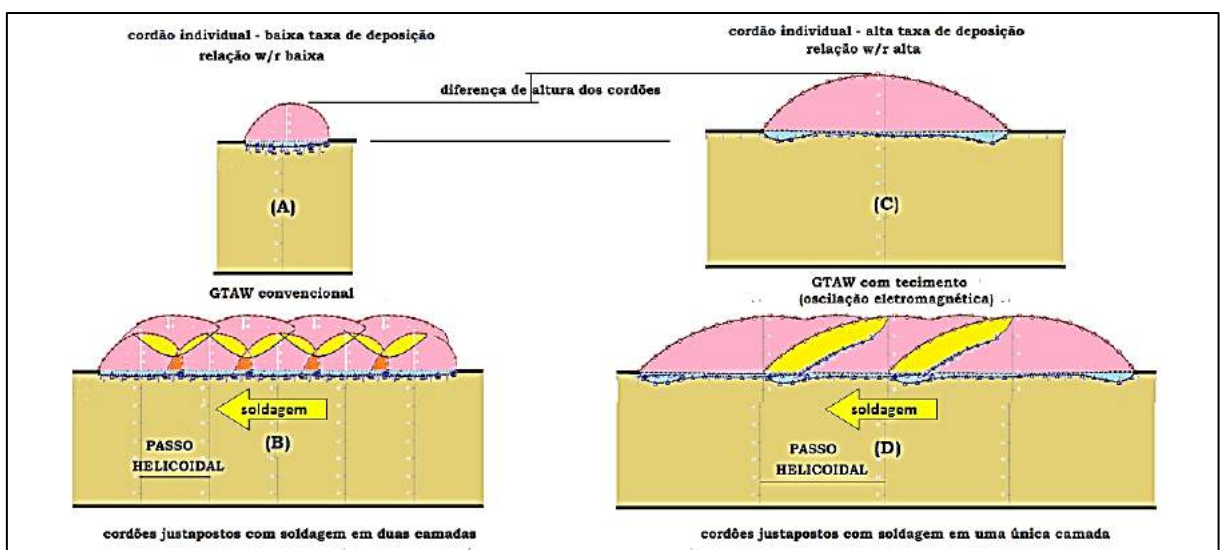


Figura 100. Considerações sobre a geometria e número de camadas para cordão isolado e cordões justapostos, pelo autor.

4.3.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A INSERÇÃO DO “HOT-WIRE”

Deduz-se que a introdução da variante “hot-wire” implicará em ajustar as variáveis de controle para a realização da soldagem com esta nova configuração. Dispor de um guia para nortear estes ajustes e orientar as decisões seria de grande utilidade.

A tabela 12 sintetiza os efeitos provocados pelas variáveis de controle sobre as variáveis de resposta e foi obtida das análises anteriores no sentido de nortear os ajustes que se fazem necessários, observando o efeito que a variável de controle exerce sobre uma variável de resposta desejada. Nesta tabela, à esquerda, um conjunto de setas verticais classifica qual variável de controle provoca o efeito maior (3 setas), efeito médio (2 setas) e efeito menor (1 seta). Setas que apontam para cima indicam que a variável de resposta aumenta diretamente com o aumento da variável de controle, enquanto que setas para baixo indicam que a variável de resposta diminui com o aumento da variável de controle. À direita, um indicador numérico, foi extraído das tabelas de medição efetuadas com $I=250$ A, $V_S = 25$ cm/min e $V_A= 600$ cm/min, de tal forma que pudesse ser estimado a ordem de grandeza do efeito esperado, em termos proporcionais à variação de uma unidade na grandeza da variável de controle.

Tabela 12: Efeitos de I , V_A e V_S sobre as variáveis de resposta

efeito (direto ou inverso)			← variáveis de controle →			relação de intensidade		
I (↑)	V_A (↑)	V_S (↑)	variável de resposta			I (↑)	V_A (↑)	V_S (↑)
↑↑↑	↓↓	↓	largura do cordão (mm)			1:1,20	1:0,60	1:0,30
↓	↑↑	↓↓↓	altura do cordão (mm)			1:0,70	1:1,05	1:1,10
↑	↑↑	↓↓↓	área de deposição (mm ²)			1:0,35	1:0,65	1:1,40
↑↑↑	↓	↑↓	área de penetração (mm ²)			1:2,95	1:2,40	1:2,70
↑↑	↓↓↓	↑↓	diluição (%)			1:2,15	1:2,70	1:1,95
↑↑	↑↑↑	↑↓	taxa de deposição (kg/h)			1:0,35	1:0,65	1:0,10

legenda	maior	médio	menor
direto	↑↑↑	↑↑	↑
inverso	↓↓↓	↓↓	↓

Esta tabela foi estabelecida p/ GTAW, arco oscilante, gás de proteção Ar + 5%H₂ ($I = 250$ A; $V_S = 25$ cm/min; e $V_A = 600$ cm/min).

Exemplo: para uma variação de 1 cm/min na velocidade de soldagem, estima-se que obteremos uma redução de 2,7% na diluição.

4.3.4 – CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VARIÁVEIS DE CONTROLE

Tomando por base os parâmetros de soldagem obtidos para o experimento C2, e as três considerações acima (4.3.1 a 4.3.3), as seguintes observações foram feitas para início do experimento do revestimento:

- **Velocidade de alimentação** (C2= 600 cm/min): com o aquecimento do arame de solda, quanto maior for a temperatura, mais alta poderá ser a velocidade de alimentação do arame, desde que o substrato fundido acompanhe esse aumento. Será a principal variável afetada com a introdução da variante “*hotwire*” e certamente deverá ser maior do que os 600 cm/min, utilizados para o experimento C2, devido a redução do sequestro de calor da poça de fusão em comparação com os experimentos com arame frio.

Da tabela 12, os maiores efeitos individuais promovidos pelo aumento da velocidade de alimentação implicariam em reduzir a diluição e aumentar a taxa de deposição, ambos desejáveis. Dos efeitos secundários extraídos da tabela 12, redução da largura, aumento da altura e aumento da área de deposição, somente o aumento da altura não é desejável. O efeito menor foi redução da área de penetração, o qual é também desejável.

Durante a soldagem do revestimento (experimento F) ajustou-se a velocidade de alimentação para 800 cm/min; relativamente ao experimento obteve-se um aumento de 33%.

- **Velocidade de soldagem** (C2= 20 cm/min): compreendendo-se que o experimento C2 resultou em uma altura de 2,96 mm, que a altura do revestimento mínima requerida é de 3 mm, e que este é um fator limitante de projeto, e ainda que mesmo, por custo, observa-se que como consequência do aumento da velocidade de alimentação proposta acima, e do menor sequestro de calor (arame quente), certamente V_s deveria ser significativamente aumentada.

Da tabela 12, os maiores efeitos individuais seriam reduzir a altura do cordão (desejável, mas limitado a 3 mm mínimo) e reduzir a área de deposição (não desejável). A conclusão sobre o efeito secundário extraído da tabela 12, relativo à área de penetração, foi dúbia segundo os experimentos conduzidos, embora a literatura clássica indique uma redução na penetração (desejável) com o aumento da velocidade de soldagem. Um efeito individual menor, relacionado com o aumento da velocidade seria a redução da largura (não desejável). Outros efeitos menores na tabela 12, tais como, área de penetração, diluição e taxa de deposição, também resultaram em conclusões duvidosas.

Durante a soldagem do revestimento (experimento F) ajustou-se a velocidade de soldagem para 30 cm/min; relativamente ao experimento C2 obteve-se um aumento de 50%.

- **Corrente de soldagem** (C2 = 250 A): da tabela 12, foi verificado que um aumento da corrente de soldagem aumenta fortemente a largura (desejável) e a área de penetração (não desejável).

De forma mediana, aumenta a diluição (não desejável) e aumenta a taxa de deposição (desejável). Com intensidade menor, reduz a altura do cordão (desejável) e aumenta a área de deposição (desejável).

A combinação de efeitos desejáveis e indesejáveis ocorreu em todos os níveis avaliados, o que recomenda se evitar o aumento da corrente, limitando sua aplicação a correções que se fizerem necessárias para balancear os efeitos do aumento da velocidade de alimentação e do aumento da velocidade de soldagem.

Durante a soldagem do revestimento (experimento F) ajustou-se a corrente de soldagem para 290 A; relativamente ao experimento C2 obteve-se um aumento de 16%.

- **Tensão do arco** (C2 = 21 V): durante a soldagem do revestimento (experimento F) ajustou-se a tensão para 20V; obteve-se uma redução de 4,8% (resultado não planejado).
- **Hot-wire**: a fonte de energia foi ajustada para uma tensão de 9 V e para uma corrente de 45 A; estimou-se que a tocha desenvolvida obteve uma temperatura do arame de aproximadamente 660 °C através das equações apresentadas anteriormente em **2.3.3.4**, cujos cálculos são abaixo registrados:

$$V = Ri \text{ (equação 1)} \Rightarrow R = 0,2 \text{ ohms}$$

$$S = (\pi D^2)/4 \text{ (equação 2)} \Rightarrow S = 0,011 \text{ cm}^2$$

$$\dot{Q}_e = Ri^2 \text{ (equação 6)} \Rightarrow \dot{Q}_e = 405 \text{ W (96,75 cal/s)}$$

$$\dot{m} = V_A \cdot \delta \cdot S \text{ (equação 9)} \Rightarrow \dot{m} = 1,273 \text{ g/s}$$

$$\dot{Q}_t = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ (equação 8)} \Rightarrow \Delta T = \dot{Q}_t / \dot{m} \cdot c_p \Rightarrow \Delta T = 636,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = T + T_{amb} \Rightarrow T = \sim 660^\circ\text{C}$$

Embora as dimensões reduzidas do arame (D=1,2 mm) dificultem uma medição precisa, verificou-se leituras de 650 °C utilizando-se um pirômetro ótico.

4.3.5 – RESULTADOS DO REVESTIMENTO DO TUBO (experimento F)

A figura 101 apresenta uma visão geral do aplicativo *VIRTUAL MACRO* descrito na etapa 3, aplicado para o revestimento obtido de 5 cordões justapostos, soldados de forma helicoidal sobre a superfície interna de tubo de aço.

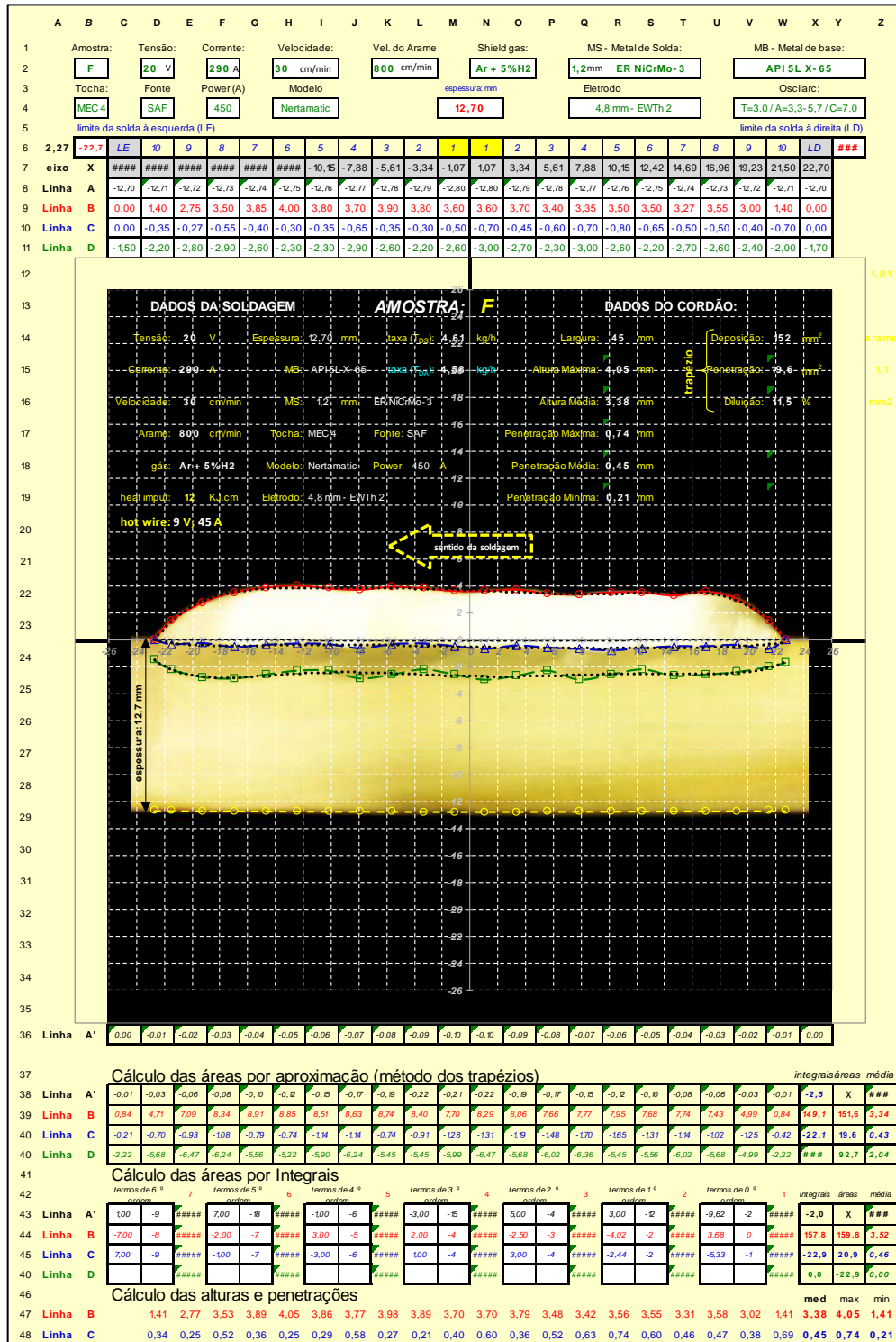


Figura 101. Visão geral do aplicativo *VIRTUAL MACRO* - revestimento helicoidal de tubo utilizando “GTAW – arco oscilante + gás Ar com 5% H2 + hot-wire”, pelo autor.

A figura 102 apresenta a grade cartesiana do aplicativo *VIRTUAL MACRO*, donde foram avaliados e processados os resultados. Sobre o metal de base foi inserido um diagrama mostrando a sequência de aplicação dos cordões e algumas dimensões.

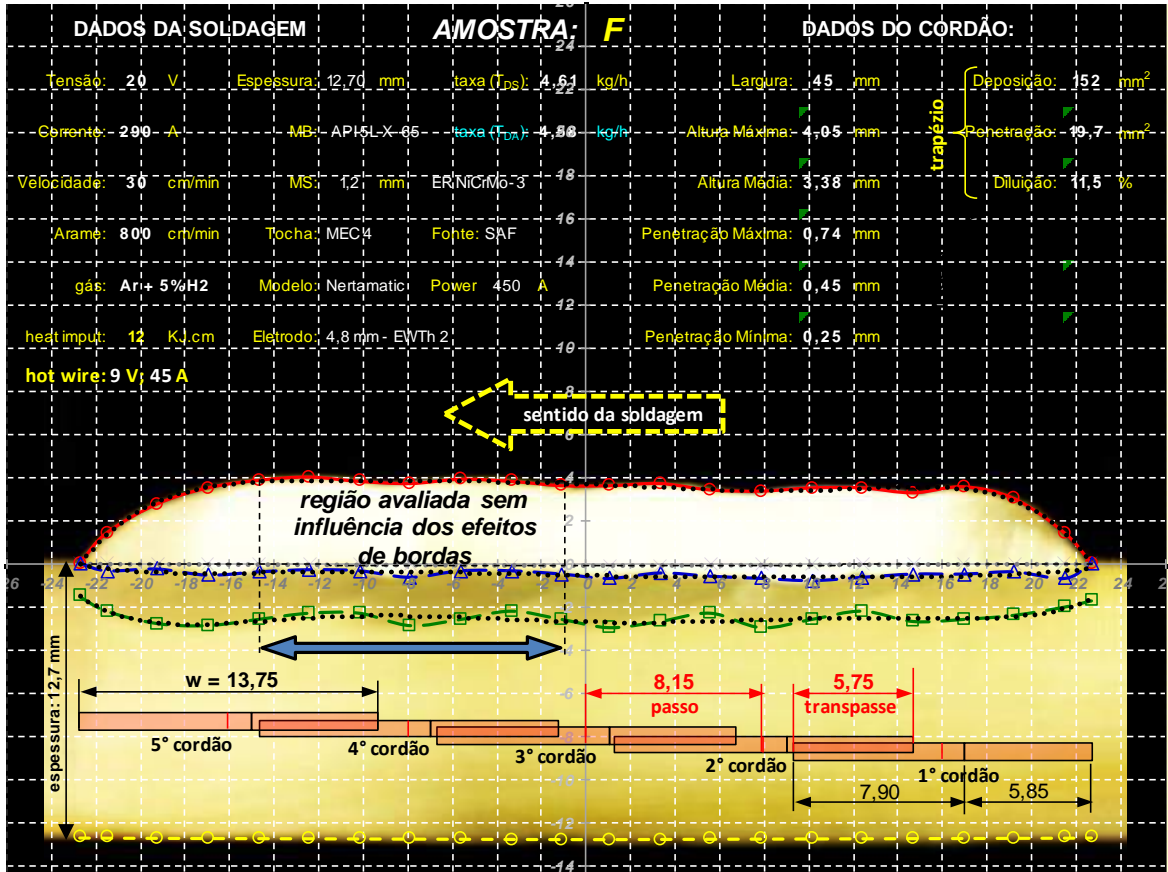


Figura 102. Grade cartesiana de processamento do aplicativo *VIRTUAL MACRO* para o revestimento helicoidal da superfície interna de um tubo de aço, pelo autor.

A figura 103 apresenta uma visão ampliada e mostra detalhes da região do 4° cordão de solda onde estarão concentradas as avaliações requeridas.

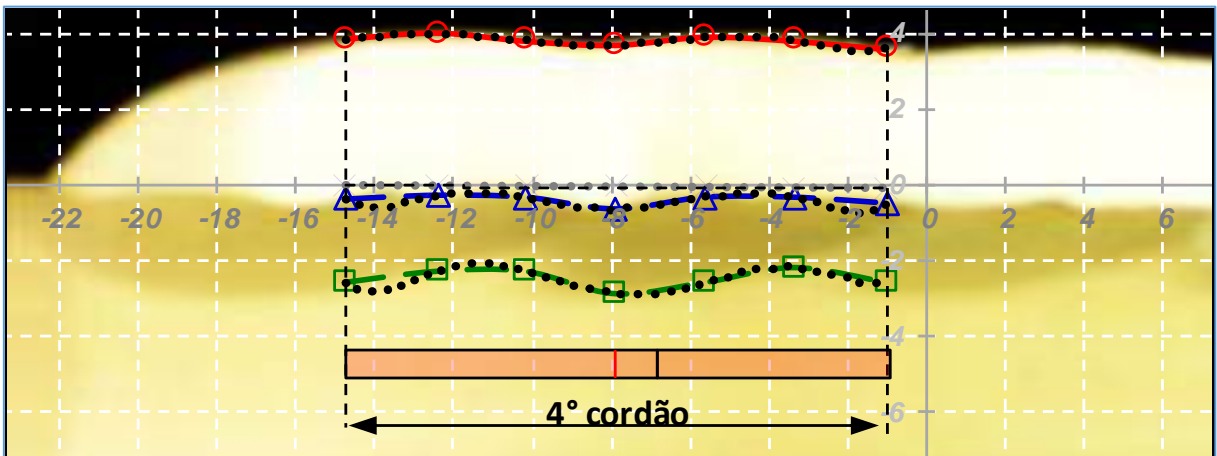


Figura 103. Detalhe ampliado da região de avaliação (4° cordão), pelo autor.

4.3.6 – ANÁLISE DO REVESTIMENTO (*VIRTUAL MACRO*)

Conforme estabelecido em Materiais e Métodos (3.2.3), as avaliações foram conduzidas sobre uma seção restrita ao quarto cordão, de tal forma que efeitos de borda e uma condição de regime permanente fosse preservada, ou seja, conter os efeitos de pré-aquecimento do cordão anterior e os efeitos de pós tratamento do cordão subsequente (figura 103).

- **LARGURA DO REVESTIMENTO ($w_{med} = 13,75 \text{ mm}$):** o revestimento apresentou uma largura total de 45 mm.

O diagrama inserido sobre o metal de base na figura 102, mostra a largura média individual de cada cordão justaposto.

A largura do cordão obtido foi de 13,75 mm e relativamente ao experimento C2 ($w = 13,7 \text{ mm}$) não apresentou variação ($< 0,4\%$) significativa.

O passo helicoidal obtido foi de 8,15 mm e o transpasse obtido foi de 5,75 mm, o que significou uma sobreposição de 41,8%.

- **ALTURA DO REVESTIMENTO ($r_{4 \text{ med}} = 3,88 \text{ mm}$):** considerando-se o intervalo restrito do 4º cordão, conforme mostrado na figura 103, a altura máxima verificada foi de 4,05 mm e a altura mínima foi de 3,70 mm, com valor médio de 3,88 mm, significando oscilações da ordem de $\pm 9,5\%$ em relação ao valor médio.

Considerando-se os cinco cordões, a altura média de deposição por cordão foi de 3,38 mm.

- **ÁREA DE DEPOSIÇÃO ($S_{D4} = 53,5 \text{ mm}^2$):** considerando-se o intervalo restrito do 4º cordão, conforme mostrado na figura 103, a área individual de deposição foi de 53,5 mm².

Considerando-se os cinco cordões, a área total de deposição foi de 152 mm², com média de 30,3 mm². Relativamente ao experimento C2 ($S_D = 31,1 \text{ mm}^2$) verificou-se uma redução de 2,6%.

- **ÁREA DE PENETRAÇÃO ($S_{F4} = 4,6 \text{ mm}^2$):** considerando-se o intervalo restrito do 4º cordão, conforme mostrado na figura 103, a área individual de penetração foi de 4,6 mm².

Considerando-se os cinco cordões, a área total de deposição foi de 19,7 mm², com média de 3,95 mm². Relativamente ao experimento C2 ($S_F = 3,6 \text{ mm}^2$) verificou-se um aumento de 9,7%.

- **DILUIÇÃO ($D_4 = 8,0\%$):** considerando-se o intervalo restrito do 4º cordão, conforme mostrado na figura 103, a diluição foi de 8,0%.

Considerando-se os cinco cordões, a diluição total foi de 11,5%, aumento verificado principalmente pela maior penetração dos cordões 1 e 2.

Relativamente ao experimento C2 ($D = 10,3\%$) verificou-se uma redução de 22,3%.

- **TAXA DE DEPOSIÇÃO ($T_{DS4} = 5,42 \text{ kg/h}$):** considerando-se o intervalo restrito do 4º cordão, conforme mostrado na figura 103, a taxa de deposição foi de 5,42 Kg/h.

Considerando-se os cinco cordões, a taxa de deposição total foi de 4,61 Kg/h.

Relativamente ao experimento C2 ($D = 3,15 \text{ Kg/h}$) verificou-se um aumento de 46%.

Ribeiro, 2014, apresenta em seu trabalho a especificação de soldagem de um tradicional fabricante brasileiro de revestimento “CRA”. O revestimento de Inconel 625 sobre aço carbono, realizado em duas camadas, com uma espessura mínima de 3 mm, com um máximo de 5% de diluição, foi processado utilizando-se GTAW “arco pulsado, vertical ascendente” ($T = 12V$, $I = 170 / 260 \text{ A}$, $V_S = 34 \text{ cm/min}$; $V_A = 180 \text{ cm/min}$) cuja taxa de deposição corresponde à 1,03 Kg/h. Embora a diluição tenha sido a metade da obtida neste trabalho, a taxa de deposição é da ordem de 25% da obtida aqui.

A figura 104 apresenta de forma gráfica e ordenada os resultados dos diversos trabalhos citados, de forma a categorizar as evoluções dos estudos científicos com foco na diluição. A faixa de resultados obtida na etapa 2 deste trabalho (cordão ideal C2 com diluição de 10,3% foi destacada em amarelo. A diluição (8%) para o revestimento F obtido na etapa 3 aparece destacado em vermelho.

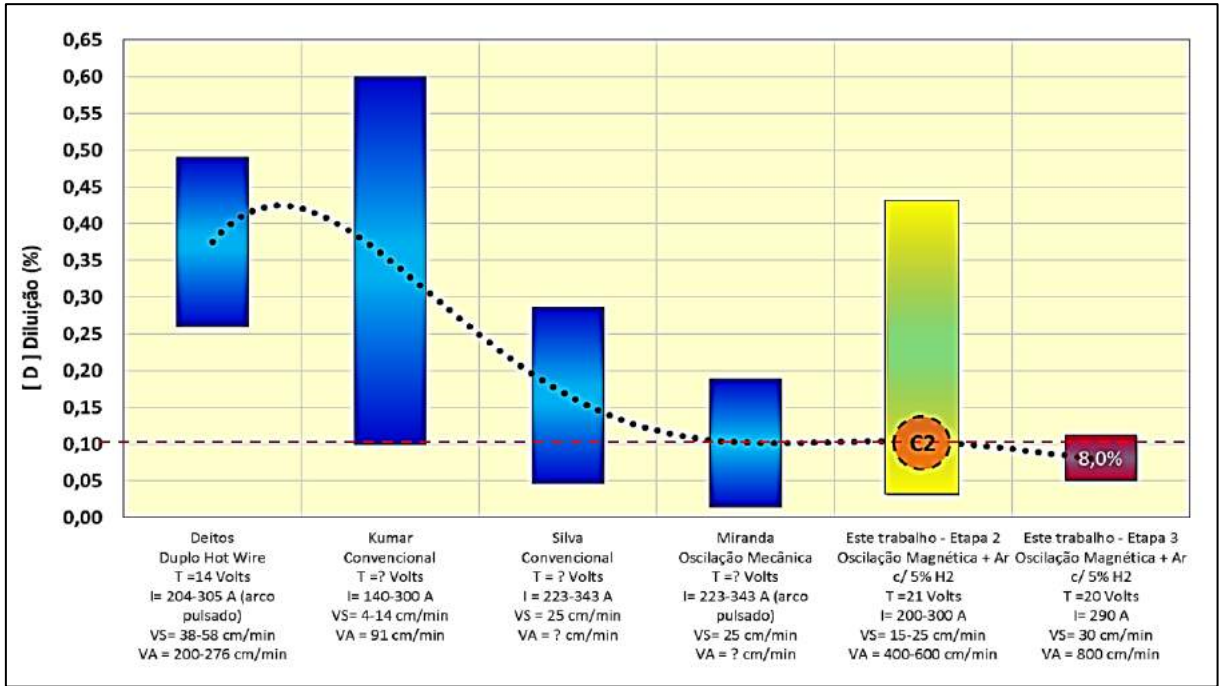


Figura 104. Resultados comparativos - diluição obtidas em diversos trabalhos.

A figura 105 apresenta de forma análoga à figura 104, os resultados para a taxa de deposição. A faixa de resultados obtida na etapa 2 deste trabalho (cordão ideal C2 com taxa de deposição de 3,15 Kg/h foi destacada em amarelo. A taxa de deposição (4,61 kg/h) para o revestimento F obtido na etapa 3 aparece destacado em vermelho. A linha tracejada em verde demarca o limite superior (3,75 kg/h) para a taxa de deposição com GTAW “hot-wire” compilada por Smith, 2012.

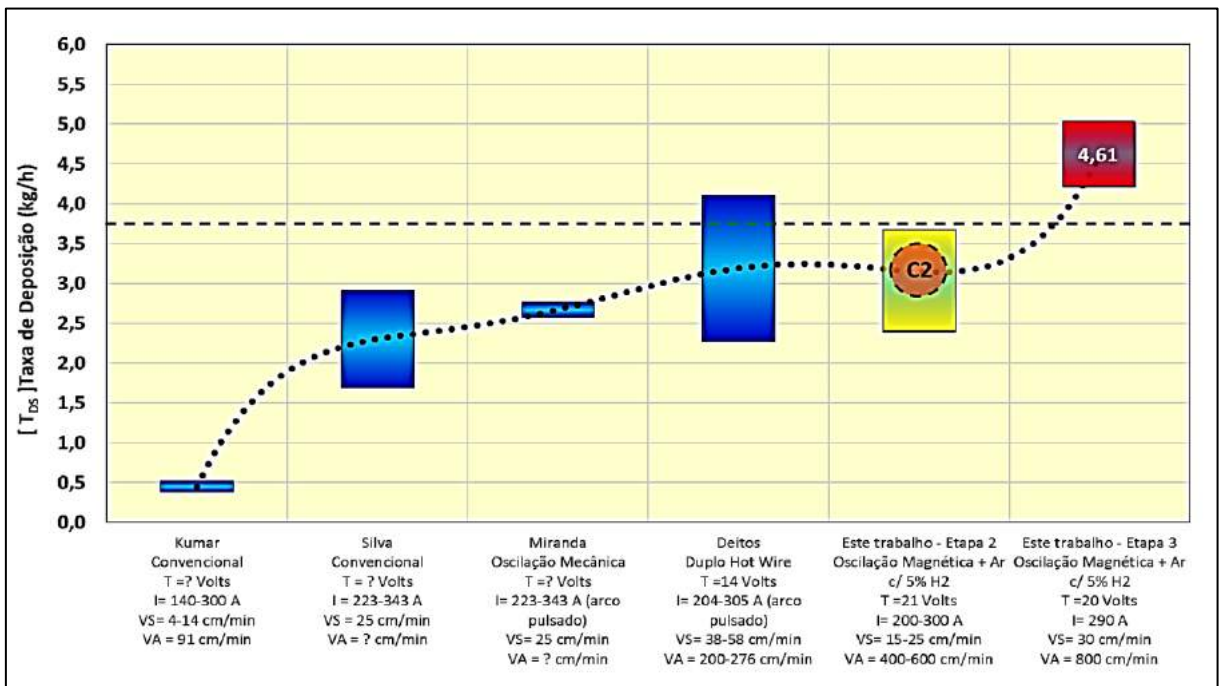


Figura 105. Resultados comparativos - taxa de deposição em diversos trabalhos

4.3.7 – CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DO REVESTIMENTO

4.3.7.1 - ANÁLISE QUÍMICA POR ESPECTROMETRIA ÓTICA:

A tabela 13 registra com destaques em verde, os valores determinados para o revestimento, enquanto que, sem destaque, na parte superior, aparecem a composição química da liga Inconel 625.

Os valores para o revestimento enquadram-se na composição do metal de adição, exceto para o elemento Ferro, conforme esperado.

Os percentuais de Ferro obtidos, destacados em amarelo na tabela, respectivamente 8,11% e 8,70 %, em duas profundidades, 1 mm e 3 mm, encontram-se dentro da meta proposta (diluição < 10%) e confirmam a razoável precisão dos valores estimados (8,0%) a partir do aplicativo VISUAL MACRO.

Por outro lado, a confirmação da razoável precisão na avaliação da diluição obtida com o aplicativo, bem como sua praticidade, estimulam buscar novos desafios, tais como obter uma diluição menor que 5%.

Tabela 13: Composição química do revestimento (Laboratório TORK-RJ)

Inconel 625	58 min	20-23	5,0 max	8-10	3,15-4,15	0,10 max	0,50 max	0,50 max	0,015 max	0,015 max	0,40 max	0,40 max	1,0 max
%	Níquel Ni	Cromo Cr	Ferro Fe	Molibdênio Mo	Nióbio Nb	Carbono C	Manganês Mn	Silício Si	Fósforo P	Enxofre S	Alumínio Al	Titânio Ti	Cobalto Co
altura ↕ 3 mm	59,100	20,720	8,110	8,010	3,430	0,003	0,034	0,077	0,004	0,006	0,130	0,189	<0,006
1 mm	58,700	20,430	8,700	8,050	3,470	0,004	0,038	0,077	0,003	0,006	0,130	0,191	<0,006

4.3.7.2 – ENSAIOS METALOGRAFÍCOS:

- EXAMES VISUAIS E MACROGRÁFICOS

A figura 106 apresenta aspectos dos ensaios metalográficos realizados.

A fotografia [a] apresenta uma macrografia destinada a se avaliar a integridade da soldagem com foco na interface do revestimento com o metal de base. Não foram verificados descolamentos ou falta de fusão em nenhuma das amostras verificadas.

A fotografia [b] apresenta a amostra em que se realizou o exame de inspeção visual com foco na superfície de soldagem do revestimento, não tendo sido identificados defeitos de porosidades ou inclusões metálicas.

A fotografia [c] revelou a zona termicamente afetada cuja profundidade média foi de 2,0 mm abaixo da interface da fusão.

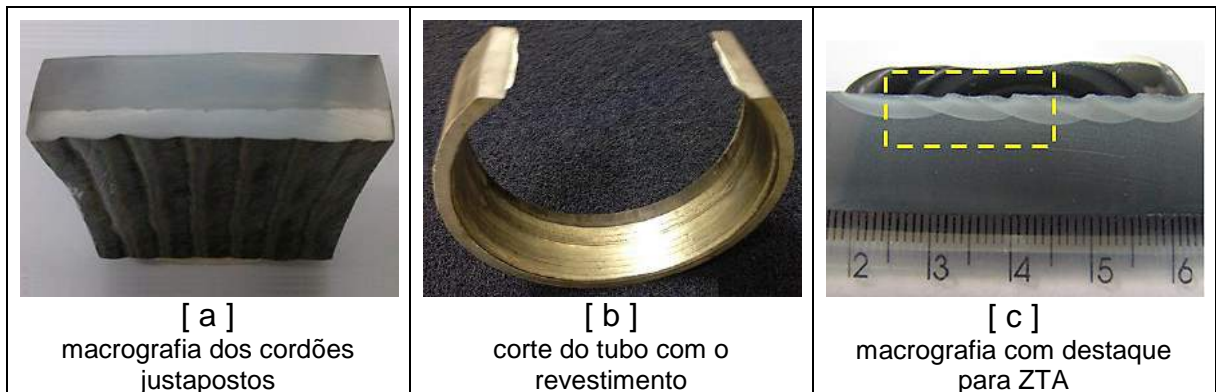


Figura 106. Ensaios Metalográficos, pelo autor.

- EXAMES MICROGRÁFICOS:

A figura 107 apresenta uma ampliação da figura 106 [c] com foco no 4º cordão do revestimento e mostra: o MB, a ZTA, a interface revestimento/substrato (Interface), e a metal de solda (MS). Estas regiões são típicas da soldagem de revestimento de materiais dissimilares. (Kejelin, *et al*, 2016.)

Na observação por microscopia ótica (MO), foi utilizado o microscópio ótico Neophot 32.

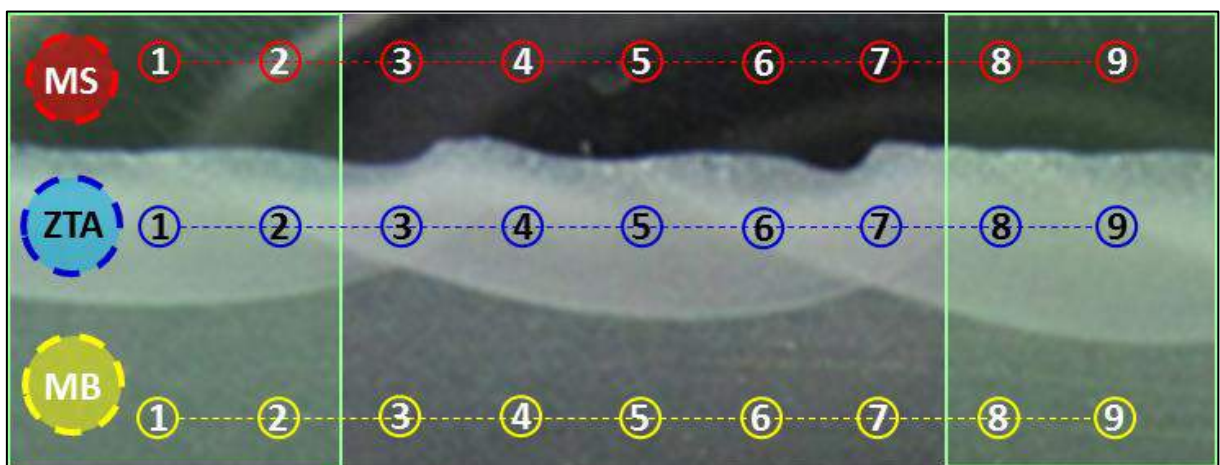


Figura 107. Caracterização do MB, ZTA e MS e plano para dureza, pelo autor.

- METAL DE BASE (MB)

A figura 108 apresenta duas micrografias, com aumentos diferentes, para o metal de base. A microestrutura se caracteriza como ferrita-bainita, predominantemente bainita. Para o aço API-X65 era esperado uma estrutura ferrítica-perlítica. Contudo, as microestruturas de muitos aços ARBL caracterizam-se pela presença de ferrita e perlita, mas alguns outros aços dessa categoria apresentam outros tipos de microestrutura, como ferrita-bainita, martensita temperada ou bainita. (Pickering, 1978.)

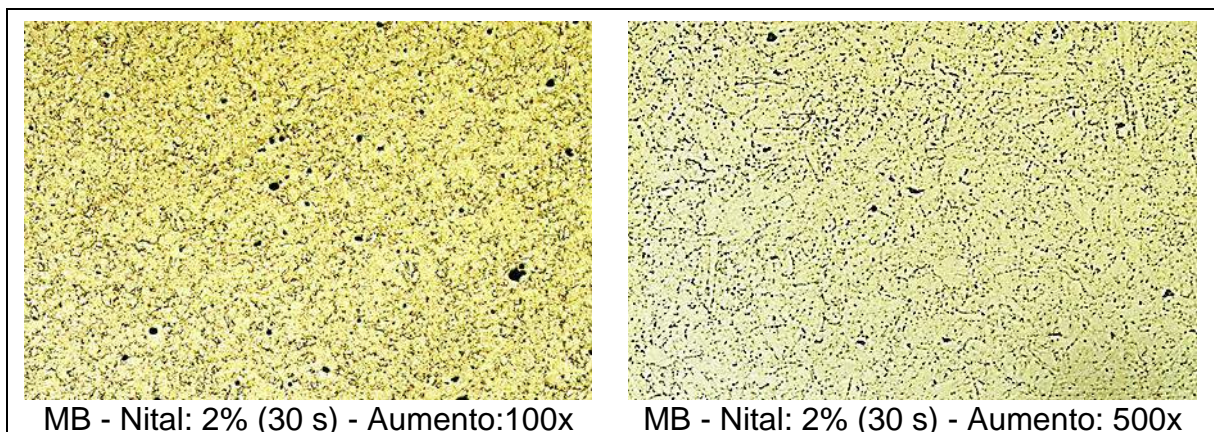


Figura 108. Micrografia do Revestimento – MB, pelo autor.

- ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

A figura 109 apresenta duas micrografias destacando a Zona Termicamente Afetada (ZTA). A espessura média verificada da ZTA foi da ordem de 2 mm. Esta consiste de grãos bainita e martensita, distribuídos com tamanhos variados em toda a extensão da ZTA. A fotografia à direita, destaca a região de grãos grosseiros (GG), próxima ao metal de solda e à esquerda a região de grãos finos (GF), próxima ao MB não afetado pelo calor.

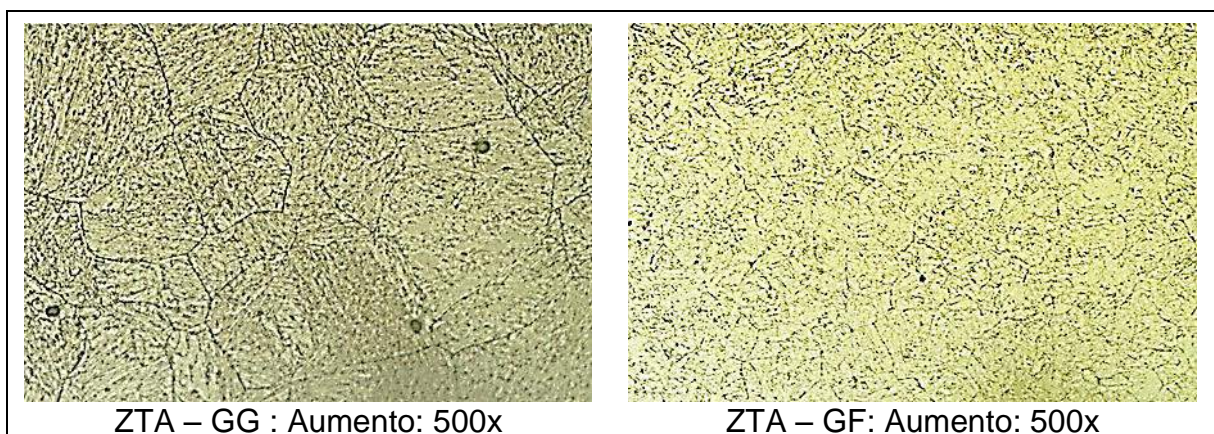
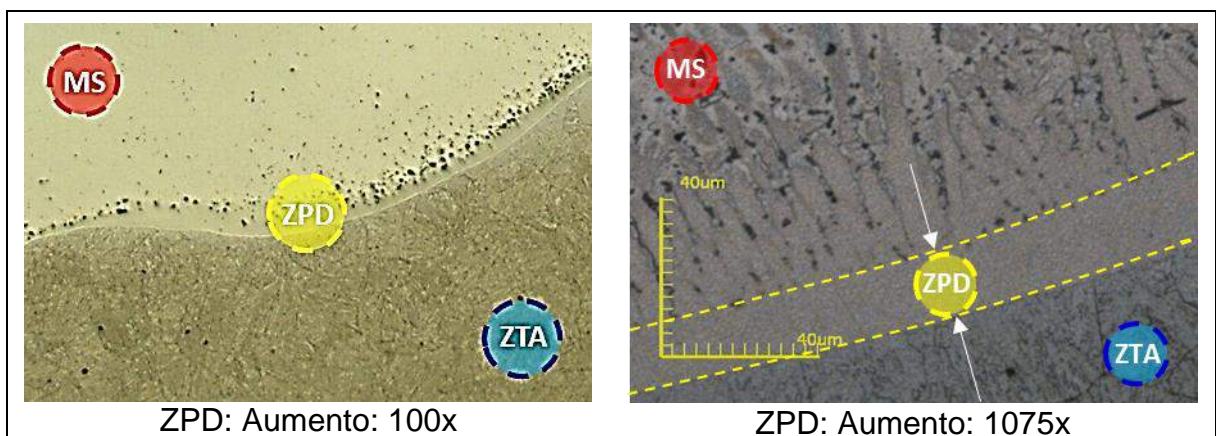


Figura 109. Micrografia do Revestimento – ZTA, pelo autor.

- ZONA PARCIALMENTE DILUÍDA (ZPD)

A figura 110 mostra duas ampliações fotográficas para a zona de ligação entre o MB e o revestimento: a ZTA, na parte inferior das imagens, com uma tonalidade mais escura onde se verifica uma microestrutura (bainita) e a linha de fusão; no extremo oposto, a camada de MS do revestimento (Inconel 625), com tonalidade mais clara. Delimitado por linhas tracejadas, a ZPD, área com tonalidade intermediária que apresentou uma largura de cerca de 20-25 μm . Embora mais estreita do que os relatados por Kejelin, *et al*, 2016, que reporta “da ordem de dezenas de micrometros”, e que os valores de dureza destas zonas situam-se muitas vezes acima dos 400 HV.



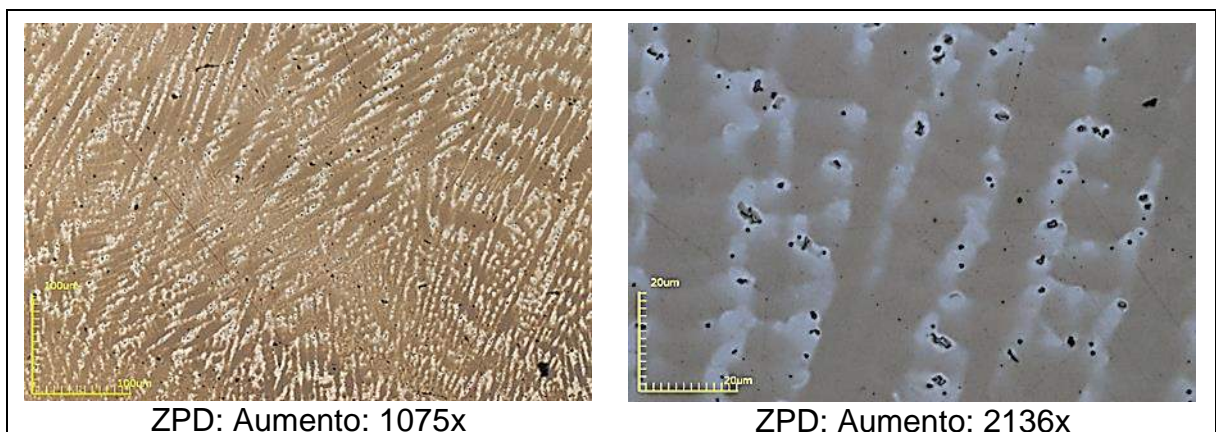
ZPD: Aumento: 100x

ZPD: Aumento: 1075x

Figura 110. Micrografia do revestimento F – ZPD, pelo autor.

- METAL DE SOLDA (MS)

A figura 111 apresenta duas ampliações micrográficas do MS, destacando uma microestrutura predominantemente caracterizada por austenita, com um arranjo dendrítico, típico de uma microestrutura bruta de fusão para uma liga de níquel. As dendritas apresentam-se com cor mais clara, enquanto que as regiões interdendríticas aparecem mais escurecidas.



ZPD: Aumento: 1075x

ZPD: Aumento: 2136x

Figura 111. Micrografia do revestimento F – MS, pelo autor.

○ DUREZA

As durezas foram amostradas conforme o plano apresentado na figura 107. A tabela 14 apresenta os valores encontrados para o MS, ZPD, ZTA e MB.

As durezas verificadas no MS, com valor médio de 241 HV, no intervalo 226-259 HV, são típicas para a condição fundida de uma liga Inconel 625. Os resultados de dureza obtidos no material como soldado estão próximos do máximo recomendado pela NACE MR075, 2003, onde a dureza máxima é de 22 HRC (250 HV) para juntas soldadas submetidas a ambientes agressivos. Esses resultados sugerem a necessidade do aumento do transpasse ou a realização em duas camadas para melhorar as propriedades do revestimento.

As durezas verificadas na ZPD, bastante superiores, tiveram valor médio de 429 HV, no intervalo 359-507 HV. Alguns autores (Doody, 1992 e Kejelin, *et al*, 2016) encontraram durezas acima de 400HV e algumas vezes acima de 500HV na ZPD, o que foi semelhante às durezas encontradas neste trabalho. Doody, 1992 comenta que não há limites de dureza definidos com relação às ZPDs.

As durezas verificadas na ZTA, tiveram valor médio de 353 HV, no intervalo 293-417 HV. Valores de dureza, nos aços carbono, acima de 350 HV são indícios da formação de constituintes frágeis como martensita, bainita e constituintes A-M, segundo Marques, *et al*, 2011.

As durezas verificadas no MB, tiveram valor médio de 207 HV, no intervalo 199-213 HV.

Tabela 14. Durezas (HV): MB – ZTA – ZPD – MS

<i>plano de amostragem conforme figura 105</i>										
DUREZA HV	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Média
MS (300 gf)	240	242	247	259	250	232	234	226	241	241
ZPD (10 gf)	374	507	453	448	481	402	472	363	359	429
ZTA (1000 gf)	417	400	381	385	379	313	317	293	296	353
MB (1000 gf)	212	206	213	205	203	208	208	205	199	207

A microestrutura do metal de base (bainita), que embora prescrito como típico, não é mais característico de aços ARBL API X65 (ferrita e perlita) obtidos pela indústria moderna.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

O presente trabalho explorou uma técnica de revestimento de Inconel 625 sobre aço carbono ARBL, utilizando-se variantes do processo *TIG*, visando alta produtividade e baixa diluição. Em etapas progressivas, três novas variantes tecnológicas (arco oscilante, gases de proteção aditivados e arame quente) foram aplicadas e as seguintes conclusões foram obtidas:

Para se conhecer o efeito das variáveis de entrada (corrente, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem) sob a configuração destas variantes tecnológicas, desenvolveu-se o aplicativo *VIRTUAL MACRO* que se mostrou prático e funcional para se determinar a geometria do cordão de solda e mensurar as variáveis de resposta (largura, altura, área de deposição, área de penetração, diluição e taxa de deposição).

Utilizando-se somente duas variantes (oscilação eletromagnética e gases aditivados) produziu-se um conjunto de amostras e determinou-se os efeitos dos parâmetros de soldagem obtendo-se referenciais norteadores para melhor atender às prerrogativas de baixa diluição com alta taxa de deposição. Desta etapa, extraiu-se que:

- A corrente de soldagem afeta principalmente e de forma direta a largura do cordão e a área de penetração.
- A velocidade de soldagem afeta principalmente e de forma indireta a altura do cordão e a área de deposição.
- O aumento na velocidade de alimentação do arame afeta principalmente, de forma direta a taxa de deposição, e, de forma indireta a diluição.

Os resultados foram em seguida interpretados pelo método de Taguchi verificando-se taxa de diluição menor que 10% e taxa de deposição maior que 3,5 kg/h. Notou-se que a velocidade de alimentação do arame é que principalmente contribui para o duplo objetivo (baixa diluição e alta taxa de deposição), o que reforçou o potencial de se utilizar a variante *TIG "hot-wire"* para incrementar estes resultados.

O uso conjunto das três variantes tecnológicas, aumentou a taxa de deposição em mais de 25%, atingindo-se o patamar de 4,7 kg/h, bastante superior aos indicados na literatura (3,75 Kg/h) e reduziu a taxa de diluição para o patamar de 8%.

CAPÍTULO 6: SUGESTÕES

O trabalho apresentado, embora aplicado no sentido de se explorar a compreensão de efeitos na geometria do cordão no uso conjunto de modernas variantes GTAW obteve uma prematura soldagem de revestimento com sucesso. É certo que repetições do ciclo de investigação dos parâmetros de soldagem deveriam ser implementados, redefinindo-se o plano amostral, refinando-se os conceitos, inserindo-se melhorias e recursos, expandiriam os resultados para aumentar a taxa de deposição e reduzir a taxa de diluição.

As sugestões abaixo se referem a realizar novos ciclos de investigação com o uso das três variantes estudadas (oscilação magnética, arame quente e o uso de gases de proteção aditivadas (Ar-H) com os seguintes focos:

- Com relação ao eletrodo de tungstênio – aplicar a mesma metodologia de investigação para as variantes combinadas, mas considerar os efeitos do aumento do diâmetro do eletrodo de tungstênio (sugestão: 6,35 mm), do ângulo de afiação e do ângulo de trabalho.
- Com relação à tensão de soldagem - explorar a possibilidade de se soldar com tensões mais altas, com a possibilidade de se aumentar a área de varredura da oscilação magnética. (sugestão: 24 V)
- Com relação ao gás de proteção, investigar outras combinações percentuais de Argônio e Hidrogênio (sugestão: 10%)
- Com relação à oscilação magnética – explorar o uso sincronizado de corrente pulsada, explorando os efeitos que se pode obter considerando-se a assimetria dos cordões justapostos, de tal forma que o aporte de calor seja distribuído de um modo assimétrico entre as 3 posições de oscilação, mas com o compromisso de se obter uma penetração mais uniforme. (sugestão: maior corrente sobre o ombro do cordão justaposto, corrente média no centro, e corrente menor no lado oposto)
- Com relação à temperatura de pré-aquecimento: a soldagem helicoidal em interiores de tubos promove o pré-aquecimento do metal de base para o futuro passo helicoidal. Investigar se este efeito seria benéfico ou nocivo parece ser importante.

CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS

API 5L – Specification for line pipe - American Petroleum Institute – 44ª Edição - 2008

Araújo, C., Sampaio, M. – Engenharia de microestrutura de aços para tubos de grandes diâmetros. Revista ABM, São Paulo, v.64, n. 588, p.212-214, maio, 2008.

ARC PRODUCTS - AVC-5 Arc Voltage Control – Lincoln Electric Company - <http://www.arcproducts.com/avc5-arc-voltage-control.shtml> - acessado em 2016.

ASM #06835G – Introduction to Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, 2001; disponível em www.asminternational.org; acessado em 2016.

ASTM A572 - Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, 2015; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/A572.htm>; acessado em 2016.

ASTM A735 - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Low-Carbon Manganese-Molybdenum-Columbium Alloy Steel, for Moderate and Lower Temperature Service, 2012; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/A735.htm>; acessado em 2016.

ASTM A736 - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Low-Carbon Age-Hardening Nickel-Copper-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy Steel, 2012; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/A736.htm>; acessado em 2016.

ASTM A737 - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, High-Strength, Low-Alloy Steel, 2013; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/A737.htm>; acessado em 2016.

ASTM B444 - Standard Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloys (UNS N06625 and UNS N06852) and Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N06219) Pipe and Tube, 2016; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/B444.htm>; acessado em 2016.

ASTM B446 - Standard Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Columbium Alloy (UNS N06625), Nickel-Chromium-Molybdenum-Silicon Alloy (UNS N06219), and Nickel-Chromium-Molybdenum-Tungsten Alloy (UNS N06650) Rod and Bar, 2014; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/B446.htm>; ; acessado em 2016.

ASTM B704 - Standard Specification for Welded UNS N06625, UNS N06219 and UNS N08825 Alloy Tubes, 2014; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/B704.htm>; acessado em 2016.

ASTM B705 - Standard Specification for Nickel-Alloy (UNS N06625, N06219 and N08825) Welded Pipe, 2014; disponível em: <https://www.astm.org/Standards/B705.htm>; acessado em 2016.

AWS – Welding Process – Welding Handbook - 8th ed., volume 2 - AWS -American Welding Society; 2009.

AWS A5.12 - Specification for tungsten and oxide dispersed tungsten electrodes for arc welding and cutting - ANSI/AWS A5.12 - 2009; disponível em: https://pubs.aws.org/Download_PDFS/A5.12M-A5.12-2009PV.pdf ; acessado em 2016.

AWS A5.14 - Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods - ANSI/AWS A5.14 – 2005; disponível em: https://pubs.aws.org/Download_PDFS/a5.14-a5.14m-2005PV.pdf; acessado em 2016.

Bai, Y., Bai, Q. - Subsea Pipelines and Risers. Elsevier. 565-583 p. 2005.

Baldan, R. - Processamento e caracterização de rotores automotivos da superliga MAR-M247. Dissertação de mestrado. EEL-USP, Lorena, 2009; disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-24102012-130437/pt-br.php>; acessado em 2016.

Bell, T. - Surface engineering: past, present and future. Surface Engineering, 1990, disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/sur.1990.6.1.31> , acessado em 2016.

Berg, U. S. B. – A new production method for CRA Lined Steel Pipe based on sheet metal – 4th Pipeline Technology Conference, 2009; disponível em: https://www.pipeline-conference.com/sites/default/files/papers/PTC%202009%203.2%20Schnaut_0.pdf; acessado em 2016.

Bott, I. S. - High Grade Steel Development. Materials Science Forum, Vol. 426 - 463, p. 1463 - 1468, 2003

Bracarense, A.Q. – Processos de Soldagem – maio, 2000 - <http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo44.pdf>; acessado em 2016.

Braga, F.J.V. - Virtual ERW - A Computer Graphical Evaluation of Heat Affected Zone to ERW Steel Tubes and Pipes, 2004; disponível em <http://www.tubenet.org.uk/technical/vitrual.shtml>; acessado em 2016.

Brown, R. S. - Selecting Alloys for Severely Corrosive Environments - Carpenter Technology Corp., Reading, PA.; disponível em: <https://www.carttech.com/en/alloy->

[techzone/technical-information/alloy-selection/selecting-alloys-for-severely-corrosive-environments](#) - acessado em 2016

Calvo, W. A. P. - Avaliação e caracterização da liga Níquel tipo 600 após processo de soldagem por fusão *TIG*, arco plasma e laser. Dissertação de mestrado. IPEN. 89p.; 1997.

Chiaverini, V. – Aços e Ferros Fundidos, 7ª Edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 1996.

Choudhury, I.A., El-Baradie, M.A. - Machinability of nickel-base superalloys: a general review – Journal of Material Processing Technology, v. 77, pp.278-1998

CORROSIONPEDIA – Clad Metal; disponível em: <https://www.corrosionpedia.com/definition/276/clad-metal> - acessado em 2016.

Davis, J. R. (1) - Hardfacing, Weld Cladding and Dissimilar Metal Joining Welding, Brazing and Soldering. ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering (ASM International); Pages: 789 – 829; 1993; disponível em: http://www.asminternational.org/web/ims/store/-/journal_content/56/10192/ASMHBA0001442/PUBLICATION ; acessado em 2016.

Davis, J. R. (2) - Stainless Steel Cladding and Weld Overlays - Davis & Associates - ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, 06398G, 1994; disponível em www.asminternational.org ; acessado em 2016.

DBC - História do processo de soldagem *TIG* - DBC Guias e Tutoriais – 2014; <http://guias.oxygenio.com/guia-de-soldagem-do-processo-tig-acdc-e-dc>; acessado em 2016

Deitos Filho, M. A. - Influência das Variáveis do Processo de Soldagem *TIG* Alimentado Duplo Arame Quente na Diluição e Morfologia de Cordões de Solda de Inconel 625 Depositados em um Aço AISI/SAE 4130 – Defesa Pública de Mestrado - Universidade de Tecnologia Federal do Paraná - Fevereiro, 2016; disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1990>; acessado em 2017.

Delgado, L.C. – Estudo e Desenvolvimento do Processo *TIG* com Alimentação Automática de Arame - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000; disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/79168> ; acessado em 2016.

Doody, T. – Intermediate Mixed Zones in Dissimilar Metals Welds for Sour Service, Welding Journal, March 1992;

Dutra, J. C. - Processos e Automatização da Soldagem – LABSOLDA - Instituto de Soldagem e Mecatrônica - http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_atuais/processos_e_automatizacao_da_soldagem.php, acessado em 2016.

Egerland, S., Zimmer, J., Brunmaier, R., Nussbaumer, R., Posch, G., Rutzinger, B. - Advanced Gas Tungsten Arc Weld Surfacing Current - Status and Application – Technical Papers - Soldagem e Inspeção – Vol: 20 – 2015; disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010492242015000300300 – acessado em 2016

ESAB (1) - Processo de Soldagem - TIG (GTAW) – Centro de Conhecimento ESAB, 2014; disponível em: http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm; acessado em 2016.

ESAB (2) - What is arc voltage height control ?; ESAB Knowledge center, 2013; disponível em: <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-arc-voltage-height-control.cfm>; acessado em 2016

Fratari, R.Q.; Schvartzman, M.M.A.M.; Scotti, A. - Otimização dos parâmetros de revestimento para confecção de amantecimento em chapas de aço ao carbono pelo processo TIG com arame AWS ER309L - Revista Soldagem e Inspeção, vol.15 no.3, São Paulo, 2010; disponível em: <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/023002402.pdf> ; acessado em 2016.

GE Reports - Evolução da exploração de petróleo no Brasil – GE Reports Brasil, 2014; disponível em <http://www.gereportsbrasil.com.br/post/95834298974/um-mergulho-profundo-no-ambiente-submarino>; acessado em 2016.

Gomes, J. H. - Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico. Dissertação de Mestrado. UFI, 136p, 2010; disponível em: <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036333.pdf>; acessado em 2016.

Greene W.J. – Magnetic oscillation of welding arc – USA patent US 2,920,183; 1960

Henon B.K. - Advances in automatic hot wire GTAW (TIG) welding - Pacoima: Arc Machines Inc.; 2015; disponível em: <http://www.arcmachines.com/news/case-studies/advances-automatic-hot-wire-gtaw-tig-welding>; acessado em 2016

HFT – “Shields maintain argon gas coverage during weld cooling to prevent oxidation” – Huntingdon Fusion Techniques - The Fabricator, October 16, 2015; disponível em:

<http://www.thefabricator.com/product/arcwelding/shields-maintain-argon-gas-coverage-during-weld-cooling-to-prevent-oxidation>; acessado em 2016

Hillenbrand H. G., Niederhoff ,K. A., Hauck , G., Perteneder E., Wellnitz , G. - Procedures, Considerations for Welding X80 Line Pipe Established - Oil & Gas Journal, Vol 37, p. 47 - 56, Set/1997; disponível em: <http://www.oji.com/articles/print/volume-95/issue-37/in-this-issue/general-interest/procedures-considerations-for-welding-x-80-line-pipe-established.html> ; acessado em 2016.

Hooijmans, J. – Hydrogen Absorption in Iron and Steel during Gas Tungsten Arc Welding – thesis. ed. The Netherlands: Delft Univ. Technology., 1994; disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:6037d317-88e1-4f7b-89ce-c5146e5c4c72/datastream/OBJ> ; acessado em 2016.

Howard B. C. - Modern Welding Technology, 4th edition, published by Prentice-Hall, 1998 - <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding#sthash.mK0KUYgl.dpuf>; acessado em 2016

INFOMET - Aços Microligados - ARBL - de Alta Resistência e Baixa Liga; disponível em: <http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=199> ; acessado em 2016

INFOSOLDA - Processo TIG – eletrodo - <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/168-processo-tig-eletrodo.html>; acessado em 2016

Kahlich, C. - Industry advances with hot-wire GTAW cladding and inspection - The FABRICATOR, October, 2010; disponível em: <http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/better-cladding-better-inspection> ; acessado em 2016

Kejelin, N. Z.; Bushinelli, A. J. A.; Bohóquez, C. E. N. - Soldagem Dissimilar do Aço X-60 com Inconel 625 (Dissimilar Metal Welding of X-60 Steel with Inconel 625) - Labsolda/EMC/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2016; disponível em https://www.researchgate.net/publication/239544058_Soldagem_Dissimilar_do_Aco_X-60_com_Inconel_625_Dissimilar_Metal_Welding_of_X-0_Steel_with_Inconel_625

Koshy, P. - Alloy 625 Weld Cladding of Wellheads and Valves: Review of Dilution-Control Techniques and Weld Process Development - 17th Annual Offshore Technology Conference. Houston – Texas. 1985.

Kukuh W. S. - A study on the application of modern corrosion resistant alloys in the upstream Oil and Gas industry – Cost Optimization - Sandvik Materials Technology - NACE East Asia and Pacific CONFERENCE, 2016; disponível em:

<https://pt.slideshare.net/KukuhSoerowidjojo/a-study-on-the-application-of-modern-corrosion-resistant-alloys-in-the-upstream-oil-and-gas-industry-ver-01>; acessado em 2016.

Kumar, V., Lee C., Verhaeghe, G., Raghunathan, S. - CRA Weld Overlay - Influence of welding process and parameters on dilution and corrosion resistance – TWI – Stainless Steel World America, 2010 – disponível em: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/cra-weld-overlay-influence-of-welding-process-and-parameters-on-dilution-and-corrosion-resistance/> ; acessado em 2016

Lage, M. G., Araújo, C. S. - Estudo da precipitação em Aços Alta Resistência e Baixa Liga por Termodinâmica Computacional. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 7, n. 1-2, p. 24-28, 2010.

Larquer, T.R; Souza, D.M; Reis, R.P. – Soldagem *TIG* com Oscilação Magnética Sincronizada - Revista Soldagem e Inspeção, vol.21 no.3, São Paulo, 2016; disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242016000300363&script=sci_abstract&tlng=pt ; acessado em 2016.

Lemos, F. L. - Avaliação da vida em fadiga de juntas soldadas do aço API 5L X65 em meios aquosos salinos saturados com diferentes pressões parciais de CO₂. Dissertação de Mestrado. UFRGS. 77p., 2009; disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18982> ; acessado em 2016.

Leng X., Zhang G., Wu L. - The characteristic of twin-electrode *TIG* coupling arc pressure - Journal of Physics D, Applied Physics. 2006; 39(6):1120-1126; disponível em: https://www.researchgate.net/publication/231100559_The_characteristic_of_twin-electrode_TIG_coupling_arc_pressure ; acessado em 2016.

Leslie, W. C. - The Physical Metallurgy of Steels, McGraw – Hill Book Company, New York, p. 189 – 201, 1981.

Lippold, J.C., Kiser, D, Dupont, N. – Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Based Alloys – John Wiley & Sons, 2011.

Lohse M., Füssel, U., Schuster, H., Friedel, J., Schnick, M. - Keyhole welding with CF-*TIG* (cathode focused GTA) - Weld World - September 2013, Volume 57, Issue 5, pp 735–741, 2013; disponível em https://www.researchgate.net/publication/257809754_Keyhole_welding_with_CF-TIG_cathode_focussed_GTA ; acessado em 2016.

Lowke, J.J., Morrow, R., Haidar, J., Murphy, A.B. – Prediction of Gas Tungsten Arc Welding Properties in Mixtures of Argon and Hydrogen, IEEE Transactions on Plasma Science, V. 25, n. 5, p. 925-930, October, 1997; disponível em

Lucas, W. (1) – Arc Surfacing and Cladding Process – Welding & Metal Fabrication, p. 55-62 – Fevereiro, 1994.

Lucas, W. (2) - TIG and plasma welding: process techniques, recommended practices and applications. Cambridge: Abington Publishing; 1990.

Malcoln, J. G. - A Guide for Understanding & Specifying Chemical Composition of High Strength Linepipe Steels - Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração., 37 p. (Relatório Técnico), 2007.

Mankins, W.L. and Lamb, S. – Properties and selection of nonferrous alloys and special purposes materials - Nickel and Nickel Alloys - ASM International, Metals Handbook, v2, , USA, 1990.

Marques, P. V., Modenesi, P. J., e Bracarense, A. Q. - Soldagem: Fundamentos e Tecnologia (3ª Edição ed.). Belo Horizonte: UFMG. 362p., 2011

Mathew, M. D. ; Parameswaran, P. ; Bhanu, S. R. K. - Microstructural changes in alloy 625 during high temperature creep - Materials characterization 59. p. 508-513 ; 2007.

Mehmood T., Ahsan, S. N., Al-Saif M., and Cheema K. - Development of API Grade Linepipe Steels At Saudi Iron & Steel Company - The Saudi Engineering Conference - Dhahran: Vol. 5, p. 327-335. 2002.

Meireles, A. M. - Avaliação dos parâmetros de curvamento por indução em tubos da classe API 5L X80. Dissertação de Mestrado. IME. 118p., 2009; disponível em: http://www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/mest_ant.PDF ; acessado em 2016.

MELT TOOLS - Welding Cameras – Melt View - 2016; disponível em: <http://www.melttools.com/welding-cameras/#1448914248585-4-1>; acessado em 2016.

Miller, B. - Frequently asked questions about hardfacing - Understanding what it is and how its used - Practical Welding Today - March/April 2005; disponível em <http://www.thefabricator.com/article/cuttingweldprep/frequently-asked-questions-about-hardfacing> ; acessado em 2016.

Miranda, E. C., Silva, C. C., Motta, M. F., Miranda, H.C., Farias, J. P. - Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio - Soldagem & Inspeção.

2015;20(2):180-190; disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2002.06> ; acessado em 2016.

Modenesi, P. J. - Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte, 2007; disponível em: <http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Arco.pdf> ; acessado em 2016.

Moyer N., Davis, D. - Rethinking weld shielding gas selection - The FABRICATOR August 2010; disponível em: <http://www.thefabricator.com/article/consumables/rethinking-weld-shielding-gas-selection> ; acessado em 2016.

NACE MR075 - Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S containing environments in oil and gas production, 2003; disponível em <http://www.relisleeve.com/technicalinfo/nace-0175.pdf> ; acessado em 2016.

NSSMC - Material Selection Chart based on CO₂ content, H₂S content and temperature. - Nippon Steel & Sumitomo Metal - 2016; disponível em: <http://www.tubular.nssmc.com/product-services/octg/materials/materials>; acessado em 2016.

Olivares, E.A.G., Diaz, V.M.V - Estudo do Processo TIG Hot-Wire com Material de Adição AISI-316L Analisando o Efeito do Sopro Magnético do Arco sobre a Diluição do Cordão de Solda - Revista Soldagem e Inspeção, vol.21 no.3, São Paulo, 2016; disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-92242016000300330&script=sci_abstract&tlng=pt ; acessado em 2016..

Olsen, D. - Material Applications: Corrosion Resistant Alloy Comparison Part: 2 - Sour Gas Well Environments, Journal of Petroleum Technology, 1976; disponível em: <http://marketing.metaltek.com/smart-blog/material-applications-corrosion-resistant-alloy-comparison-part-2> ; acessado em 2016.

Palani, P. K. e Murugan, N. - Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. Journal of Materials Processing Technology, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607001732>; acessado em 2016

Palmer, A. C.; King, R. A. - Subsea Pipeline Engineering. 2º Ed. PennWell Books, 575 p, 2008.

Pauly, S. – Manufacturing of Large and Heavy Clad Plates by Explosion Cladding – Dillinger Pressure Vessel Colloquium, 2012 - https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dh/produkte/secdoc/90Saeni15OHygGE/manufacturing_of_large_and_heavy_clad_plates_by_explosion_cladding_process_dmc.pdf

Patel, S.J.; Smith, G.D.; Tillack, D.J. - Alloy 625 - Impressive Past, Significant Presence, Awesome Future" - TMS - The Minerals, Metals and Materials Society – 2001 - http://www.tms.org/superalloys/10.7449/2001/Superalloys_2001_35_46.pdf -

Perini, F. G. - Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados. Dissertação de Mestrado. UCS. 97p., 2008; disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/315> ; acessado em 2016.

Pickering, F.B. - Physical Metallurgy and the Design of Steels, Applied Science Publishers Ltd., London, p. 60 – 88, 1978.

POWERMIG – Robô de solda TM-1400 – Panasonic; disponível em: <https://www.powermig.com.br/pt-br/tecnologia/robo-de-solda-tm-1400-186>; acessado em 2016.

Reed, R.C. – The Superalloys: fundamentals and applications – Cambridge University Press, 2006.

Ren, W.; Swindeman, R. – Status of alloy 800 H in considerations for the Gen IV Nuclear Energy Systems – 2011, disponível em <http://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1885136>; acessado em 2016

Ribeiro, R. A. – Caracterização de junta de aço carbono revestida com Inconel 625 pelo processo *TIG* automatizado e pela soldagem por explosão; dissertação de Mestrado, em Engenharia e Ciência dos Materiais – UENF, 2014; disponível em: <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/13-03-2014-disserta%C3%A7%C3%A3o-final.pdf> ; acessado em 2016.

Ross, P. J. - Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade São Paulo - SP: McGraw-Hill Ltda. 333 p ,1991.

SAF – Automatic Welding and Cutting – Global solutions to enhance your productivity; Catalogue Automatique 2014 GB_doc; disponível em: http://www.saf-ro.ro/file/otherelement/pj/0b/a9/c2/f1/catalogue_automatique_2015_gb%20mic%20ii_5188462202136431238.pdf; acessado em 2016;

SANDVICK - Shielding gases for *TIG*/GTAW welding - Shielding the weld - acessado em 2016: <http://smt.sandvik.com/en/products/welding-products/shielding-gases/>;

SCHULZ - SX-Clad Process for Metallurgical Bonded Seamless Clad Pipes – disponível em: <http://www.schulzusa.com/schulz-xtruded-products.html> - acessado em 2016

Schwedersky, M. B. (1) - Um estudo da eficiência e produtividade dos principais processos de soldagem a arco – Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade

Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 97f, 2011; Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/site/index.php/mn-publicacoes/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/141-blank-73431396>; acessado em 2016:

Schwedersky, M. B. (2) - Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG Duplo Eletrodo - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 192f, 2015 - <http://www.labsolda.ufsc.br/site/index.php/mn-publicacoes/teses-e-dissertacoes/teses/371-estudo-e-desenvolvimento-do-processo-tig-duplo-eletrodo>, acessado em 2016

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; disponível em: https://www.researchgate.net/publication/35236028_Process_modelling_to_establish_control_algorithms_for_automated_GMAW; acessado em 2016

SEAC SIC - Time for strategic change - UK surface engineering and advanced coatings industry – Surface Engineering & Advanced Coatings / Special Interest Group, 2014; disponível em <https://www.uk-cpi.com/wp-content/uploads/2014/10/SEAC-SIG-Final-Report-.pdf>; acessado em 2016.

Sedricks, A.J. – Corrosion of Stainless Steel – 2nd Edition - Wiley-Interscience, New York, p 437, 1996.

SENAI-SP – “Soldagem - Coleção tecnológica SENAI” – 1^a ed. 1997; disponível em <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/fundamentos/223-soldagem-obotizada.html>; acessado em 2016.

Shoemaker, L. E. – Alloys 625 and 725: Trends in properties and applications – Superalloys 718, 625, and Derivatives – E.A Loria – TMS (The Mineral, Metals & Material Society, 2005 – disponível em: http://www.tms.org/Superalloys/10.7449/2005/Superalloys_2005_409_418.pdf ; acessado em 2016

Siciliano, F. - Materiais para Gasodutos: Aços de Alta Resistência para Dutos de Transporte de Gás e Petróleo - Tendências Atuais. Metalurgia & Materiais. São Paulo: Vol. 64, Nº. 588, p. 208 - 211, Mai/2008

Silva, C. C. (1), Miranda, E. C., Motta, M.F. e Miranda, H. C. - Influence of Arc Length on Dilution and Weld Bead Geometry of Ni-based Alloy using GTAW Process with Cold Wire - 20th International Congress of Mechanical Engineering - November 15-20,

2009, Gramado, RS, Brazil; disponível em: <http://www.abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-3107.pdf>; acessado em 2016.

Silva, C. C. (2) - Revestimentos de ligas de Níquel depositadas pelo processo TIG com alimentação de arame frio: aspectos operacionais e metalúrgicos – Tese de Doutorado – Universidade Federal do Ceará – Centro de Tecnologia, Departamento de engenharia Mecânica, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/15941?mode=full>; acessado em 2016.

Smith, L. - Engineering with clad steel, 2nd Edition, Nickel Institute – Technical Series Nº 10064, 2012; disponível em: https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/10064_EngineeringWithCladSteel2ndEd.ashx ; acessado em 2016.

SPECIAL METALS – High Performance Alloys Literature; disponível em <http://www.specialmetals.com/alloys>; - acessado em 2016

Sreeraj, P., Kannan, T., Subhasis, M. – Optimization of weld bead geometry for stainless steel cladding deposited by GMAW – American Journal of Engineering Research (AJER), Volume 02, 2013; disponível em [http://www.ajer.org/papers/v2\(5\)/X02501780187.pdf](http://www.ajer.org/papers/v2(5)/X02501780187.pdf); acessado em 2016.

Stoloff, N.S. – Whought and P/M supperalloys – ASM Handbook - – Properties and selection: irons, steels and high-performance alloys, Vol 1, p.950-980, 1990.

Suave, L.; Cormier, J.; Villechaise, P.; Soula, A.; Hervier, Z.; Bertheau, D; Laigo, J. – Microstructural Evolution During Thermal Aging of Alloy 625: Impact of Temperature and Forming Process – Metallurgical & Materials Transactions - Part A; Vol. 45; Issue 7; p2963 - Jun, 2014.

Talbot, D.E.J. and Talbot, J.D.R. – Corrosion Science and Technology – Chapter 5 – CRC Press – Taylor and Francis Group, 1998.

TOPWELL - AC Waveshape Controls; disponível em: <http://www.cn-topwell.com/TIG/ALUTIG-200HD.html>; acessado em 2016

Tusek, J.; Suban, M. – Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel – International Journal of Hydrogen Energy, n. 25, p-369-376, 2000.

TWI (1) - Surface Engineering and Advanced Coatings – TWI: The Welding Institute, disponível em: <http://www.twi-global.com/capabilities/materials-and-corrosion-management/surface-engineering-and-advanced-coatings/>; acessado em 2016.

TWI (2) – Cladding – TWI: The Welding Institute, disponível em <http://www.twi-global.com/capabilities/materials-and-corrosion-management/surface-engineering-and-advanced-coatings/cladding/> ; acessado em 2016.

VOESTALPINE – Roll-bonded clad plate – voestalpine Grobblech GmbH; disponível em: www.voestalpine.com/.../Folder_Grobblech_Clad_plates_1608.pdf - acessado em 2016

Voort, G. F. V. – Metallography – principles and practice – ASM Handbook, Vol 9, p. 305-329, 1985.

Watkins, M. and Green, J.B. - Corrosion Testing of Highly Alloyed Materials for Deep Sour Gas Well Environments, Journal of Petroleum Technology, 1976; disponível em <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-5622-PA>; acessado em 2016.