

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM GMAW EM JUNTAS DE
AÇO ARBL S 700 MC**

por

Nilo Alberto Scheidmandel

**Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Projeto e Processos de Fabricação**

Passo Fundo, Dezembro de 2013.

**A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM GMAW EM JUNTAS DE
AÇO ARBL S 700 MC**

por

Nilo Alberto Scheidmandel

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Projeto e Processos de Fabricação

Área de Concentração: Seleção de materiais aplicados ao projeto e fabricação

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Pitol Boeira

Prof. Dr. Telmo Strohaecker

Prof. Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel
Coordenador do PPGPPF

Passo Fundo, Dezembro de 2013.

Dedico esta dissertação à minha família, pela paciência e apoio incondicional. Aos meus filhos, Michele, Rafael e Alberto, deixo esta dissertação como lembrança de que “a verdadeira coragem é ir atrás de seus sonhos mesmo quando todos dizem que ele é impossível” (Cora Coralina). À minha esposa Viviane, tomo a liberdade de colacionar as palavras de um poeta anônimo, “de tudo o que vem de você, permanece em mim uma vontade de sorrir. A vida é um contínuo chegar de esperanças”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao professor e mestre Luiz Fernando Prestes que, ainda nos tempos de graduação, ensinou-me o valor da palavra mestre, não como título acadêmico mas, com o seu primeiro significado: ser educador. Este fato motivou toda uma caminhada acadêmica que encontrou acolhida, anos depois, na própria Universidade de Passo Fundo – UPF a qual agradeço pela oportunidade de continuar na incessante busca pelo conhecimento e por desempenhar a função de docente. Neste contexto, agradeço ao professor Doutor José Antônio Portella, pelo auxílio na realização das análises estatísticas dos resultados da pesquisa. Agradeço ao meu orientador, Doutor Charles Leonardo Israel, que acompanhou de perto a consecução desta pesquisa, considerando todas as dificuldades encontradas para contemplar seu objetivo. Agradeço ao colega Emerson Braz Ribeiro e a todos os colegas do núcleo de tecnologia mecânica da UPF, que dedicadamente deram suporte para a realização desta dissertação.

RESUMO

Esta dissertação apresenta o resultado da análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem GMAW (tensão, intensidade de corrente, velocidade de soldagem, tempo de resfriamento, aporte de calor) na geometria do cordão de solda (largura, reforço de cordão, penetração e largura da ZAC) em junta de topo, realizada na posição plana, em aço ARBL 700 MC, com 5 mm de espessura. Foram confeccionados 576 (quinhentos e setenta e seis) corpos de prova em aço ARBL que foram soldados com eletrodo ER 110 S e gás de proteção oxidante (95% AR e 5% O₂). Foram efetuados ensaios mecânicos (tração, impacto e dureza) e metalográficos (macrografias e micrografias), bem como ensaio visual e de distorção nos corpos de prova realizados. Os dados obtidos nos ensaios foram analisados estatisticamente. Também foi utilizando software disponibilizado pela JWSE para interpretação e cálculo dos cordões de solda das juntas realizadas. Como resultado da pesquisa, tem-se a indicação estatística das influências dos parâmetros do processo de soldagem e a correção da geometria da junta para efetivação dos parâmetros estudados e suas influências comprovadas.

Palavras-chave: Aços de alta resistência e baixa liga. Processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa ativa. Parâmetros de soldagem. Junta de solda.

ABSTRACT

This thesis presents the result of the influence analysis of the process parameters of GMAW welding (tension, current intensity, welding velocity, cooling time, heat input) in the weld bead geometry (width, bead reinforcement, penetration and width of HAZ) in a top joint, performed on flat position over MC 700 HSLA steel, with 5 mm thickness.

Were made 576 (five hundred seventy-six) specimens in HSLA steel which have been welded with ER 110 S electrode and oxidizing shielding gas (95% AR and 5% O₂).

Mechanical (traction, impact and hardness) and metallographic (macrographs and micrographs) essays were realized, as well as visual and distortion trials on the bodies of proof. The data obtained from the essays were analyzed statistically, including with the assistance of the software provided by JWSE, for interpret and calculate the weld bead of the joints made.

As a result of the research, there is the statistical indication of the parameters influence of the welding process and the correction of the joint geometry for the effectiveness of the studied parameters and its comproved influences.

Key words: High-strength low-alloy steel. Gas metal arc welding process. Welding parameters. Solder joint.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: NÍVEIS DE RESISTÊNCIA DOS AÇOS DOMEX PARA CONFORMAÇÃO A FRIO.....	21
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA SEÇÃO DE SOLDA.	24
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA TOCHA DE SOLDAGEM GMAW.	25
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS DA SOLDAGEM, ÊNFASE AO ARCO VOLTAICO.	29
FIGURA 5: PERFIL TÉRMICO DE UM ARCO DE SOLDAGEM.....	29
FIGURA 6: REPRESENTAÇÃO DAS FORMAS BÁSICAS DE TRANSFERÊNCIA DE METAL DE ADIÇÃO GMAW.....	30
FIGURA 7: ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA GLOBULAR.....	32
FIGURA 8: ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA CURTO CIRCUITO.....	33
FIGURA 9: ESQUEMA DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR PULVERIZAÇÃO.....	34
FIGURA 10: CORRENTE DE SOLDAGEM X VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DOS ELETRODOS DE AÇO CARBONO.	35
FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO <i>STICK OUT</i> NO PROCESSO GMAW.....	37
FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA JUNTA DE SOLDA.	40
FIGURA 13: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CICLO TÉRMICO NA SOLDAGEM EM UM SÓ PASSE.	43
FIGURA 14: MACROESTRUTURA ESQUEMÁTICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA JUNTA SOLDADA E SUA RELAÇÃO COM AS TEMPERATURAS DE PICO: A – ZF (ZONA DE FUSÃO); B – ZAC (ZONA AFETADA PELO CALOR); C – MB (METAL BASE).	44
FIGURA 15: CICLO TÉRMICO NO CENTRO DO CORDÃO PARA SOLDAGEM DE CHAPAS DE DIVERSAS ESPESURAS.....	45
FIGURA 16: DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DE TEMPERATURA NO PLANO XZ EM TORNO DA POÇA DE FUSÃO PARA CHAPA DE AÇO CARBONO DE 5 MM DE ESPESURA. ENERGIA DE SOLDAGEM: 0,6KJ/MM.....	45
FIGURA 17: MICROESTRUTURA DO METAL BASE, METAL FUNDIDO E ZONA TERMICAMENTE AFETADA.	46
FIGURA 18 CLASSIFICAÇÃO MORFOLOGIA FERRITA.	49
FIGURA 19: DESENHO ESQUEMÁTICO DA EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA DE FERRITA.....	50
FIGURA 20: MICROGRAFIA PLACAS LATERAIS DE WIDMANSTÄTTEN SECUNDÁRIAS EM AÇO Fe/C/Mn.	51

FIGURA 21: CLASSIFICAÇÕES MORFOLÓGICAS DA BAINITA	52
FIGURA 22: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DIFERENÇA ENTRE BAINITA SUPERIOR E BAINITA INFERIOR.	52
FIGURA 23: MICROGRAFIA MOSTRANDO BAINITA INFERIOR, EM AÇO TRANSFORMADO À 250°C.	53
FIGURA 24: MICROGRAFIA MOSTRANDO BAINITA SUPERIOR, EM AÇO 4360 TRANSFORMADO À 495°C.	54
FIGURA 25: MICROGRAFIA DE MARTENSITA CONTENDO 0,8% DE CARBONO. AS REGIÕES CINZA EM FORMA DE PLACA SÃO MARTENSITA, ELAS TÊM A MESMA COMPOSIÇÃO QUE AS REGIÕES DE AUSTENITA (BRANCAS) ORIGINAIS. AMPLIAÇÃO: 1000X.....	55
FIGURA 26: CATEGORIZAÇÃO DO ELETRODO SEGUNDO NORMA AWS E SEU SIGNIFICADO TÉCNICO.	56
FIGURA 27: FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE TRABALHO	60
FIGURA 28: CONJUNTO DE PROVA SOLDADO ARBL S 700 MC	62
FIGURA 29: DESMEMBRAMENTO DOS CORPOS DE PROVA, DO CONJUNTO DE PROVA SOLDADO. .	64
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO DAS REGIÕES DO C.P SOLDADO ONDE FORAM REALIZADOS O ENSAIO DE DUREZA.	66
FIGURA 31: DISTORÇÕES DIMENSIONAIS DOS CONJUNTOS DE SOLDA.....	69
FIGURA 32: INSPEÇÃO VISUAL CONJUNTOS DE PROVA	70
FIGURA 33: CÁLCULO DO CARBONO EQUIVALENTE, SEGUNDO A JUSE.....	72
FIGURA 34: DESCONTINUIDADES EVIDENCIADAS NA ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS CORDÕES DE SOLDA: EMBICAMENTO, DESALINHAMENTO E FALTA DE FUSÃO.	78
FIGURA 35: DESCONTINUIDADES EVIDENCIADAS NA ANÁLISE MACROGRÁFICA DOS CORDÕES DE SOLDA: MORDEDURA, PENETRAÇÃO EXCESSIVA E REFORÇO DO CORDÃO DE SOLDA EXCESSIVO.	79
FIGURA 36: MICROGRAFIA METAL DE SOLDA E ZONA AFETADA PELO CALOR DAS AMOSTRAS RETIRADAS DOS CORPOS DE PROVA 2 (A), 8 (C), 9 (B) E 11(D). METAL DE ADIÇÃO	80
FIGURA 37: MICROESTRUTURA DO MATERIAL BASE, COMPOSTO DE FERRITA (ÁREAS CLARAS) E PERLITA (ÁREA ESCURA).	81
FIGURA 38: REGIÃO DE REFINO DE GRÃO (RRG) NA ZONA AFETADA PELO CALOR. MICROESTRUTURA FORMADA POR FERRITA POLIGONAL (A) E AGREGADOS DE CARBONETOS E FERRITA (B).	82
FIGURA 39: METAL DE ADIÇÃO (MS) E MORFOLOGIAS DE FERRITA; (A) FERRITA ALOTRIOMORFA; (B) FERRITA DE WIDMANSTÄTTEN; (C) FERRITA ACICULAR.	82

FIGURA 40: MICROESTRUTURA DA RCG DO C.DP 8. (A) BAINITA EM FORMA DE PENAS, (B) POSSÍVEL BAINITA ACICULAR; (C) FERRITA POLIGONAL, (D) FERRITA DE WIDMANSTÄTTEN....	83
FIGURA 41: MUDANÇA MICROESTRUTURAL NA ZAC EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO(T_8/T_5)	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 42: GRÁFICO DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA O AÇO S 700 MC.	84
FIGURA 43: GRÁFICO REPRESENTANDO AS VARIAÇÕES DOS VALORES DE TENSÃO MÁXIMA, TENSÃO DE ESCOAMENTO E ALONGAMENTO DOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS.....	86
FIGURA 44: RESULTADO DOS ENSAIOS DE IMPACTO NOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS.	88
FIGURA 45: CORRELAÇÃO DO REFORÇO DO CORDÃO DE SOLDA E ENERGIA ABSORVIDA NO ENSAIO DE IMPACTO.....	89
FIGURA 46: ENSAIO DE DUREZA DOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS	90
FIGURA 47: CÁLCULO DO PERCENTUAL DE MARTENSITA, DUREZA, $T_8/5$ DO C.P. Nº2.....	91
FIGURA 48: RETA INDICATIVA DOS VALORES DE R E SUA SIGNIFICAÇÃO NAS CORRELAÇÕES.....	93
FIGURA 49: RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DE SOLDAGEM E A INTENSIDADE DE CORRENTE	94
FIGURA 50: INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM NA LARGURA DA ZTA.....	95
FIGURA 51: RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORRENTE E LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA.	95
FIGURA 52: CORRELAÇÃO DE INTENSIDADE DE CORRENTE, VELOCIDADE DE ARAME, VELOCIDADE DE SOLDAGEM E LARGURA DE CORDÃO.....	96
FIGURA 53: CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORRENTE E PENETRAÇÃO.	96
FIGURA 54: RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORRENTE E VELOCIDADE DE SOLDAGEM.	97
FIGURA 55: CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORRENTE E APORTE DE CALOR.	98
FIGURA 56: RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORRENTE E TEMPO DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO DE SOLDA.....	98
FIGURA 57: CORRELAÇÃO INTENSIDADE DE CORRENTE E LARGURA (MM) DA ZAC.	99
FIGURA 58: CORRELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DE CORRENTE E DUREZA DA ZAC.	99
FIGURA 59: CORRELAÇÃO DA TENSÃO (V) COM A LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA.....	100
FIGURA 60: CORRELAÇÃO DA TENSÃO (V) E A PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA.....	100
FIGURA 61: CORRELAÇÃO ENTRE TENSÃO (V) E O REFORÇO DO CORDÃO (R).	101
FIGURA 62: RELAÇÃO ENTRE PENETRAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA E APORTE DE CALOR DO ARCO.....	101
FIGURA 63: RELAÇÃO ENTRE PENETRAÇÃO E TEMPO DE RESFRIAMENTO.....	102

FIGURA 64: RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO DE SOLDAGEM E O CALOR DE SOLDAGEM DO ARCO.	103
FIGURA 65: RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE SOLDAGEM E TEMPO DE RESFRIAMENTO DO CORDÃO DE SOLDA.....	103
FIGURA 66: JUNTA DE TOP, SEM CHANFRO E SEM AFASTAMENTO. P = PENETRAÇÃO; R = REFORÇO DO CORDÃO; L = LARGURA DO CORDÃO; E = ESPESSURA DA CHAPA.	104
FIGURA 67: PROPOSTA DE JUNTA PARA SOLDAGEM DE TOPO. AFASTAMENTO (F) DE 2 MM; ÂNGULO DE CHANFRO (B) DE 30° , NARIZ (S) DE 2 MM, EM ESPESSURA DE CHAPA (E) DE 5 MM.	105
FIGURA 68: MACROGRAFIA DO NOVO PERFIL DA JUNTA SOLDADA PELO PROCESSO GMAW...	105
FIGURA 69: MICROGRAFIA DO METAL BASE, COM FERRITA (BRANCO/A) E PERLITA (ESCURO/B).	109
FIGURA 70: A CARACTERIZAÇÃO DO METAL DE SOLDA E MORFOLOGIAS DE FERRITA; (A) FERRITA ALOTRIOMORFA; (B) FERRITA DE WIDMANSTÄTTEN; (C) FERRITA ACICULAR.	109
FIGURA 71: REGIÃO DE CRESCIMENTO DE GRÃOS, COM A REPRESENTAÇÃO DE (A) POSSÍVEL BAINITA SUPERIOR EM FORMA DE PENAS, (B) POSSÍVEL BAINITA ACICULAR; (C) FERRITA POLIGONAL, (D) FERRITA DE WIDMANSTÄTTEN.	110
FIGURA 72: ZONA AFETADA PELO CALOR. MICROESTRUTURA FORMADA POR FERRITA POLIGONAL (A) E AGREGADOS DE CARBONETOS E FERRITA (B).....	111

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS QUANTO AS RESISTÊNCIA EM FUNÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO	21
QUADRO 2: ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS ARBL E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DO AÇO.	22
QUADRO 3: PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A SOLDAGEM E OS EFEITOS NO PROCESSO GMAW	27
QUADRO 4 CLASSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DO METAL DE ADIÇÃO SEGUNDO IIW	31
QUADRO 5: RELAÇÃO DOS TIPOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA E OS PARÂMETROS DE SOLDAGEM GMAW	34
QUADRO 6: GASES DE PROTEÇÃO PARA GMAW.....	39
QUADRO 7: CLASSIFICAÇÃO DOS ELETRODOS SEGUNDO NORMA AWS.....	55
QUADRO 8: RESISTÊNCIA MECÂNICA DO METAL DE SOLDA.....	56
QUADRO 9: REQUISITOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA PARA O ELETRODO OU METAL DE SOLDA (% EM PESO).	57
QUADRO 10 ELETRODO SÓLIDO INDICADO PARA SOLDAGEM GMAW EM S 700 MC.....	57
QUADRO 11: INDICAÇÃO ESAB PARA CONSUMÍVEL EM CHAPA S 700MC	58
QUADRO 12: PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ARBL.	61
QUADRO 13: PARÂMETROS E VALORES DA SOLDAGEM NOS CONJUNTOS DE PROVA.....	63
QUADRO 14: RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES DA JUNTA SOLDADA E MÉTODOS DE ENSAIOS.....	65
QUADRO 15: DIMENSÕES DO C.P PARA CHAPAS FINAS, SEGUNDO NBR ISO 6892-1:2013	67
QUADRO 16: ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL.....	71
QUADRO 17: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO ARBL S 700 MC SEGUNDO NORMA EN 10149-273	
QUADRO 18: RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO PARA MATÉRIA PRIMA ARBL S 700 MC....	85
QUADRO 19: ENSAIOS DE IMPACTO NOS CONJUNTOS SOLDADOS	87
QUADRO 20: ENSAIO DE IMPACTO REALIZADO NO AÇO ARBL S 700 MC E NOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS.	87
QUADRO 21: DUREZA NA SOLDAGEM DOS CONJUNTOS DE PROVA.	89
QUADRO 22: PARÂMETROS DA SOLDAGEM E GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA	92
QUADRO 24: REPRESENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS E CONDIÇÕES DA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS ANALISADOS.....	94

QUADRO 25: PARÂMETROS DA SOLDAGEM, GEOMETRIA E DUREZA DO CORDÃO DE SOLDA JUNTA PROPOSTA.....	106
QUADRO 26: RELAÇÃO PARÂMETROS E DUREZA NA JUNTA PROPOSTA SOLDADA	107
QUADRO 27: PARÂMETROS DE SOLDAGEM E ENERGIA DE IMPACTO ABSORVIDA.....	108
QUADRO 28: ENSAIO DE TRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	108

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARBL – Aço de alta resistência e baixa liga

AWS – *American Welding Society*

ASM – *American Society for Metals*

C.P – Corpo de prova

CE – Carbono equivalente

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

HV – *Hardness Vickers*

HSLA – *High-strength low-alloy steel*

IIW – *International Institute of Welding*

JWSE – *Japan Welding Engineering Society*

MA – Metal de adição

MB – Metal base

RCG – Região de crescimento de grãos

RRG – Região de refino de grãos

ZAC – Zona afetada pelo calor

ZTA – Zona termicamente afetada

ZF – Zona de fusão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVO GERAL.....	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)	19
2.2	SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO COM PROTEÇÃO GASOSA ATIVA (GMAW)	23
2.3	PARÂMETROS DE SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO COM PROTEÇÃO GASOSA ATIVA (GMAW).....	26
2.3.1	Tensão de soldagem (arco voltaico).....	28
2.3.2	Características elétricas de transferência	30
2.3.3	Intensidade de corrente e velocidade de soldagem	35
2.3.4	Polaridade	36
2.3.5	<i>Stick out</i>	37
2.3.6	Tipo de gás utilizado	38
2.4	JUNTAS SOLDADAS	39
2.5	APORTE TÉRMICO/ ENERGIA DE SOLDAGEM	41
2.5.1	Ciclo térmico	42
2.6	METALURGIA DA SOLDAGEM.....	46
2.6.1	Microestruturas ferríticas	48
2.6.2	Microestruturas bainíticas	51
2.6.3	Martensita	54
2.7	CONSUMÍVEIS.....	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1	CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL	61
3.2	PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	61
3.3	PROCESSO DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA	64
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS	64
3.4.1	Ensaio de dureza.....	66

3.4.2	Ensaio de tração.....	66
3.4.3	Ensaio de impacto.....	67
3.5	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	68
3.5.1	Análise macroestrutural e microestrutural	68
3.6	DEMAIS ENSAIOS REALIZADOS	69
3.6.1	Avaliação da distorção dimensional.....	69
3.6.2	Avaliação por inspeção visual dos cordões de solda	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	ANÁLISE QUÍMICA.....	71
4.2	CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA	76
4.2.1	Análise macroestrutural	76
4.2.2	Análise microestrutural.....	80
4.3	ENSAIOS MECÂNICOS	83
4.3.1	Ensaio de tração.....	84
4.3.2	Ensaio de impacto.....	87
4.3.3	Ensaio de dureza.....	89
4.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA	92
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS E CONSIDERAÇÕES ACERCA DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS	104
5	CONCLUSÕES.....	112
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas tem contribuído muito para o desenvolvimento de novos materiais e o aperfeiçoamento dos materiais já existentes. Dentre estes materiais o aço se destaca devido à sua versatilidade. Assim, aços com maior resistência mecânica têm sido desenvolvidos como, por exemplo, os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL).

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) têm substituído os aços convencionais. Permitem a construção de equipamentos mais leves combinando alta resistência mecânica com boa tenacidade. Suas vantagens em relação às propriedades mecânicas, resistência à corrosão e soldabilidade permitem a redução de peso na construção de estruturas sem prejudicar sua resistência. Entretanto uma das principais características para aplicação de um novo tipo de aço é a sua soldabilidade, portanto, foi necessário um desenvolvimento nesta área para viabilizar sua utilização e comercialização.

Suas propriedades mecânicas são aprimoradas a partir da adição de pequenas quantidades de elementos de liga, associados à aplicação de processos termomecanicamente controlados. Assim, obtém-se elevada resistência mecânica em função do refino de grão e endurecimento por precipitação, mantendo-se a soldabilidade do aço e sua ductilidade.

O processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa ativa (GMAW) utilizado na fabricação de componentes mecânicos é um processo metalúrgico especial e demanda estudo aprimorado e procedimentos condizentes. Deve-se estabelecer estreita relação entre a técnica requerida e a adequada realização do processo. Portanto, a análise da microestrutura do aço e de suas propriedades mecânicas levará ao entendimento da influência dos parâmetros e variáveis no resultado deste método.

Com base nos parâmetros de solda GMAW, serão verificadas as influências de seus valores no aço ARBL S 700 MC quanto a sua microestrutura e propriedades mecânicas da junta soldada. Para tanto, além de uma sólida revisão bibliográfica, serão realizados ensaios mecânicos e análise metalográfica em conjuntos de solda. Posteriormente, a partir da análise dos resultados obtidos, serão apresentadas as conclusões verificadas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Como já foi adiantado, a questão dos equipamentos utilizados na indústria é de suma importância, em especial pelo binômio uso X segurança. Cada equipamento é construído e projetado para uma finalidade, o projeto deve agregar a si elementos de segurança em relação ao uso do equipamento. Portanto, os processos de soldagem, sob uma ótica generalista, são de suma importância.

Máquinas e equipamentos industriais são, na sua maioria, construídos com a utilização de processos de soldagem. A solda é um processo metalúrgico especial, o qual requer a aplicação de procedimentos especiais e cuidados específicos. A não observação destas condições poderá acarretar fragilidades estruturais nas juntas soldadas.

Os aços do tipo ARBL, em razão de suas propriedades, são comumente utilizados na composição estrutural das máquinas e equipamentos industriais. Na soldagem dos aços ARBL devemos calcular as variáveis e os parâmetros do processo. O êxito nesta tarefa depende do estudo do material de base utilizado no projeto, do material a ser adicionado no processo de soldagem e dos procedimentos adotados na construção do produto.

O aço ARBL S 700 MC, utilizado nesse trabalho, exige variáveis e parâmetros específicos para ser soldado. Caso não sejam observadas as indicações técnicas para seu adequado processo de soldagem, têm-se comprometidas suas propriedades mecânicas, sua soldabilidade e sua resistência à corrosão.

As variáveis e os parâmetros técnicos indicados no processo GMAW de soldagem do aço ARBL S 700 MC devem ser entendidos e utilizados na fabricação de componentes e produtos. É necessário que se estabeleça estreita relação entre a técnica requerida e a adequada realização do processo. Portanto, a análise da microestrutura do aço e de suas propriedades mecânicas nos levará ao entendimento da influência dos parâmetros e variáveis no resultado deste processo.

Ademais, nesta dissertação a abordagem do estudo será em aço ARBL com espessura de 5 mm e junta de topo sem espaçamento, em soldagem plana no processo GMAW. Isto, pois, verifica-se na literatura de soldagem quantidade expressiva de publicações acerca do aço ARBL em estudo, com espessuras acima de 6,35 mm. No entanto, para espessuras inferiores há poucas informações disponíveis.

1.2 OBJETIVO GERAL

Verificar a influência dos parâmetros do processo de soldagem GMAW em aço ARBL, com vistas à análise do alcance dos reflexos desta na microestrutura e nas propriedades mecânicas da junta soldada.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os parâmetros utilizados no processo de soldagem GMAW no aço ARBL;
- Analisar o comportamento microestrutural dos materiais da junta soldada;
- Analisar as propriedades mecânicas dos materiais da junta soldada;
- Avaliar a influência dos parâmetros analisados no comportamento microestrutural e nas propriedades mecânicas da junta soldada.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é composta de seis capítulos. No primeiro capítulo serão apresentadas as considerações iniciais, a justificativa, os objetivos geral e específico, a limitação e abrangência da dissertação. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica com base em publicações de artigos e livros que abordam os temas relacionados aos aços ARBL; comportamento do aço no processo de soldagem e as principais variáveis no processo de soldagem GMAW; os parâmetros de soldagem no processo GMAW; aspectos que influenciam o processo de soldagem de juntas em aços ARBL; juntas soldadas e ensaios destrutivos.

No terceiro capítulo é apresentada a caracterização do material empregado, a junta soldada, o procedimento de soldagem GMAW, a realização do filete de solda e a avaliação das propriedades mecânicas das juntas soldadas através dos ensaios mecânicos, ensaios visuais e de distorção dimensional. Também será utilizado o software da Japan Welding

Engineering Society (JWES), para cálculos referentes à junta soldada. No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados nas juntas soldadas em aço ARBL e discutida a sua importância para o processo GMAW. No quinto capítulo são apresentadas as considerações finais referentes ao desenvolvimento da pesquisa e, no sexto capítulo, são destacadas as sugestões para a continuação de trabalhos relacionados ao tema abordado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos e ideias provenientes de vários autores pesquisados na literatura pertinente ao assunto da pesquisa, iniciando-se pela apresentação do conceito de aços ARBL, processo de soldagem GMAW, os parâmetros de soldagem no processo GMAW, consumíveis de soldagem, aspectos que influenciam o processo de soldagem de juntas em aços ARBL, juntas soldadas e metalurgia da soldagem.

2.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)

Segundo Shackelford (2008) aços ARBL ou high-strength low-alloy steel (HSLA) tem surgido em resposta aos requisitos de redução de peso no uso em veículos. A composição de muitos aços ARBL comerciais são patenteadas e especificadas pelas propriedades mecânicas, em vez da composição metalúrgica. A alta resistência dos aços ARBL é resultado da seleção da liga ideal e do processamento controlado na fabricação.

Para Gorni (2008):

A resistência mecânica de um aço estrutural corresponde à somatória das contribuições dos diversos mecanismos de endurecimento atuantes em sua microestrutura.

Os principais tipos são:

- Resistência básica dos átomos de ferro;
- Endurecimento por solução sólida proporcionada pelos elementos de liga solubilizados (C, N, P, Mn, Si, Cr, Mo, etc.);
- Endurecimento por refino do tamanho de grão;
- Endurecimento por precipitação de compostos intermetálicos;
- Endurecimento por segunda fase;
- Endurecimento por discordâncias.

A contribuição desses mecanismos de endurecimento varia conforme o tipo de aço considerado.

Todos eles elevam as propriedades mecânicas determinadas sob condições estáticas, ou seja, as que são medidas sob baixas velocidades de deformação, como é o caso dos limites de escoamento e resistência, levantados por meio de ensaios de tração.

O mesmo autor [Gorni, 2008] afirma, também, que o endurecimento por precipitação é muito comum nos aços microligados, em razão das partículas extremamente finas que precipitam na ferrita durante o resfriamento lento desses aços após laminação a quente ou tratamento térmico. A intensidade desse endurecimento depende das características das partículas precipitadas, tais como resistência mecânica, estrutura, espaçamento, tamanho, formato e distribuição.

As microestruturas de muitos aços de ARBL caracterizam-se pela presença de ferrita e perlita, podendo apresentar também estruturas ferrita-bainita, martensita temperada ou bainita.

Os mecanismos de endurecimento empregados nos aços ARBL incluem o refino de grão, precipitação, aumento da densidade de discordâncias e endurecimento por solução sólida. A obtenção de tais aços requer pequenas adições de elementos formadores de carbeto e nitretos, laminação controlada, resfriamento controlado e controle de formas das inclusões.

O endurecimento obtido na estrutura do material se deve ao refino do tamanho de grãos pela precipitação dos compostos intermetálicos, pelas discordâncias presentes e pela solução sólida proporcionada pelos elementos de liga que elevam as propriedades mecânicas determinadas em condições estáticas, como é o ensaio de tração [Dieter, 1988], [Mei e Silva, 2006].

A classificação dos aços ARBL é genérica e frequentemente é mal-entendida. Há uma superposição natural entre o conceito de aços ARBL e classificações baseadas no emprego destes aços. Aços ARBL são utilizados como aços estruturais, aços para indústria automobilística, aços para tubulações, vasos de pressão, dentre outras aplicações. O difícil balanço entre as várias propriedades mecânicas e metalúrgicas possíveis e a intenção crescente de aproveitá-las ao máximo, sugere que cada aplicação crítica seja discutida antecipadamente com o fabricante do aço, para que se tenham as melhores aplicações de cada aço.

É importante que sejam realizados testes preliminares para a qualificação e ou homologação do aço, especialmente quando se consideram propriedades relativamente subjetivas, como soldabilidade e/ou conformação [Mei e Silva, 2006].

Os aços ARBL são aços de baixa liga que apresentam o limite de escoamento entre 460 e 700 MPa (Quadro 1). As elevadas propriedades mecânicas são decorrentes tanto da composição química quanto da forma de fabricação.

Quadro 1: Classificação dos aços quanto as resistência em função do limite de escoamento

Classificação Aço	Limite de Escoamento (MPa)
Baixa Resistência	< 315
Alta Resistência	315 – 460
Extra-Alta- Resistência	460 – 700
Ultra-Alta Resistência	> 700

Fonte: Cardoso Jr. (2008).

Na figura 1 podemos identificar as características dos aços ARBL, conforme o fabricante SSAB AB (Suécia):

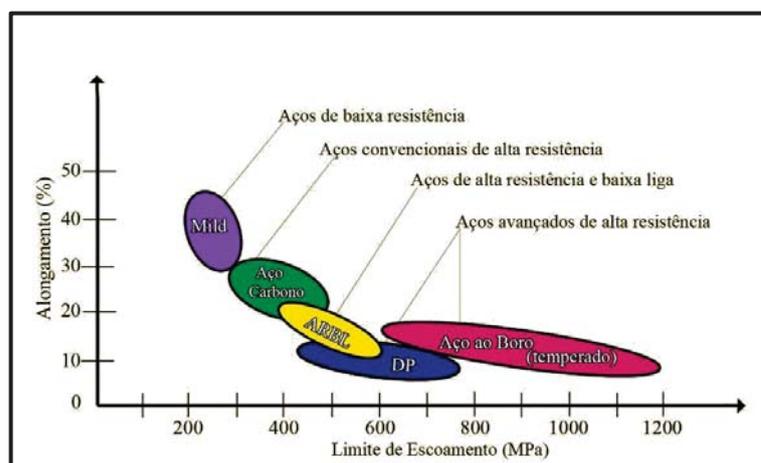


Figura 1: Níveis de resistência dos aços DOMEX para conformação a frio

Fonte: Adaptado do catálogo SSAB – AB, DOCOL (2013).

Os aços apresentam variação em seu limite de escoamento, representados na figura em três grupos distintos: os aços de alta resistência (315 – 420 MPa), os aços extra alta resistência (460 – 700 MPa) e os aços ultra alta resistência (800 – 900 MPa). Nos aços ARBL, tem-se a presença de elementos como o Vanádio, Titânio, Nióbio, formadores de carbonitretos e carbonetos nos aços. A presença destes elementos de liga altera as propriedades mecânicas do aço.

Em geral, a dureza e a resistência mecânica são aumentadas, mas perde-se em ductilidade e tenacidade. A principal mudança proporcionada pelo nióbio nas propriedades

finais dos aços ARBL é o aumento da resistência do material sem a necessidade de aumentar o teor de carbono, manganês ou outro elemento na composição química dos aços.

O titânio e o vanádio, adicionados em pequenas quantidades têm a função de refinar o grão. O vanádio aumenta a dureza a quente dos aços. O alumínio, adicionado em pequenas proporções, tem função desoxidante nos aços, além de refinar os grãos.

Em relação às propriedades mecânicas o nióbio aumenta a resistência do aço sem a necessidade de aumentar o teor de carbono, o teor de manganês ou outro elemento na composição do aço. O vanádio, em pequenas quantidades, tem a função de refinar o grão, também aumenta a dureza a quente e com o titânio e alumínio, refina os grãos do aço. O alumínio também atua como desoxidante neste arranjo.

Segundo a American Society of Metals (ASM – 1994), cobre (Cu), níquel (Ni) ou nitrogênio (N) em proporções ideais (quadro 2) podem melhorar a resistência à corrosão atmosférica (Cu), podem beneficiar a qualidade superficial do aço (Ni) ou contribuirá para sua resistência e melhorar soldabilidade do aço (N).

Quadro 2: Elementos de liga nos aços ARBL e seus efeitos nas propriedades do aço

Elementos de liga num aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL, BLAR ou HSLA)		
<i>Elemento</i>	<i>Porcentagem (%)</i>	<i>Efeito nas Propriedades</i>
<i>Cobre</i>	0.2 - 1,5	Melhora a resistência à corrosão atmosférica
<i>Níquel</i>	Ao menos a metade do percentual do cobre	Beneficia a qualidade superficial
<i>Nióbio</i>	0.02	Aumenta o limite de resistência e o limite de escoamento
<i>Nitrogênio</i>	0.003 - 0.012	Contribui para a resistência e pode melhorar a soldabilidade.
<i>Vanádio</i>	até 0,12	Melhora a resistência sem reduzir a soldabilidade
Obs. Pequenas quantidades de cálcio, terras raras e zircônio podem estar presentes para controle da forma de inclusões de sulfetos (globulização)		

Fonte: Adaptado de Gorni (2008).

Percebe-se que, além dos parâmetros já citados, os aços ARBL são obtidos a partir de aprimorado controle em sua microconstituição.

2.2 SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO COM PROTEÇÃO GASOSA ATIVA (GMAW)

Frequentemente costuma-se definir a soldagem como "processo de união de metais por fusão". Entretanto, deve-se ressaltar que não apenas os metais são soldáveis e que é possível soldar sem fusão [Marques; Modenesi; Bracarense, 2009].

O conceito da American Welding Society (AWS) define soldagem como "processo de união de materiais usados para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição".

Para Wainer (1992) denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo (figura 2).

Para Callister (2002) a soldagem pode ser considerada uma técnica de fabricação. Na soldagem, duas ou mais peças metálicas são unidas para formar uma única peça. Tanto metais similares como dissimilares podem ser soldados. A ligação de união é metalúrgica e mecânica, sendo possível a utilização de diferentes métodos de soldagem aos materiais. Durante a soldagem dos diversos materiais a temperatura do metal adjacente à solda atinge valores nos quais transformações microestruturais podem ocorrer.

A ocorrência destas mudanças e o seu efeito sobre a junta soldada - em termos de resistência à corrosão e propriedades mecânicas - depende do teor de elementos de liga, espessura da chapa, metal de adição (MA) usado, configuração da junta, método de soldagem utilizado e habilidade do soldador. Apesar destas transformações microestruturais, o principal objetivo da soldagem é produzir um cordão de solda com qualidade igual ou superior àquela do metal de base [Okumura, Taniguchi, 1982].

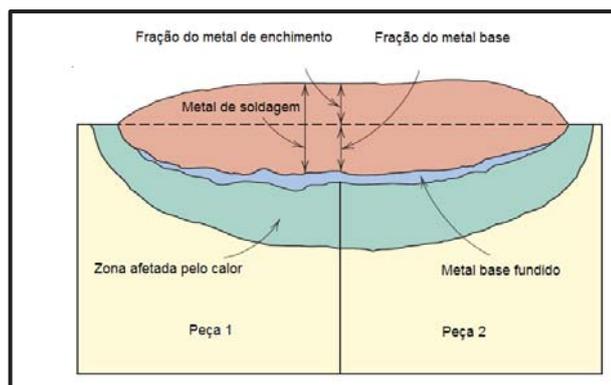


Figura 2: Representação esquemática de uma seção de solda.

Fonte: Callister (2002).

Os processos de soldagem devem disponibilizar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais similares, removendo contaminações superficiais, evitando que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem, bem como, proporcionar o controle das transformações metalúrgicas da junta soldada para que sejam garantidas as propriedades físicas, químicas ou mecânicas desejadas nesta união [Kou, 2002].

O desenvolvimento e o aprimoramento dos processos de soldagem são necessidades contínuas. Novos equipamentos de soldagem, novos materiais a serem soldados são requisitos fundamentais à obtenção de soldabilidade adequada [Machado, 1996].

A soldagem GMAW é um dos processos de união soldada muito utilizada nas indústrias metal mecânica. A seguir, trataremos desta técnica de soldagem, suas características, parâmetros e influências do processo no resultado da junta soldada.

O processo GMAW ocorre por fusão ao arco elétrico. Utiliza arame eletrodo consumível continuamente alimentado à poça de fusão e um gás ativo para proteção da região de soldagem. É um processo de soldagem onde o MA possui a mesma composição química do metal base (MB). Utiliza como fonte de energia um arco elétrico mantido entre um eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar, com a proteção da região de soldagem realizada por um de gás ativo.

A soldagem pode ser semiautomática ou automática. É adequado à soldagem de aços-carbono, aços de baixa liga, aços de média liga e aços de alta liga, bem como, aços inoxidáveis, alumínio e suas ligas, magnésio e suas ligas e cobre e suas ligas [Wainer, 1992]. Outro conceito de GMAW nos é disponibilizado por Machado (1996):

Este processo de soldagem (GMAW) se baseia na formação do arco elétrico entre a peça e um eletrodo maciço não consumível. A poça de fusão assim formada, é protegida por um gás, ou misturas de gases, inerte ou oxidante (“ativo”), e daí provém o fato de, no Brasil, ele ainda ser geralmente denominado MIG (Metal Inert Gas) ou MAG (Metal Active Gas).

A figura 3 representa o processo de soldagem GMAW na junta soldada, a partir do manuseio ou automação da tocha.

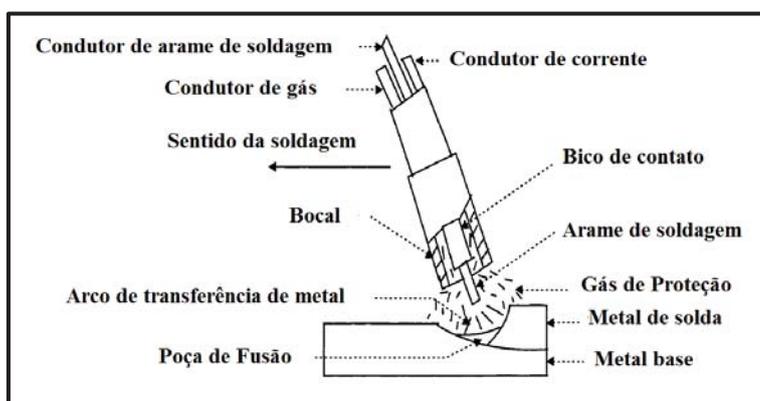


Figura 3: Representação esquemática de uma tocha de soldagem GMAW
Fonte: Adaptado de Naidu *et al* (2003).

O equipamento básico para o processo GMAW de soldagem consiste em uma fonte, um alimentador de eletrodo, uma tocha, o sistema fornecedor de gás e, se necessário, um sistema de refrigeração a água. Basicamente, o eletrodo consumível passa pelo alimentador saindo do rolo e entra pelo conduto da tocha até o tubo de contato, no bico da tocha. No mangote da tocha temos a tubulação de gás que, saindo do tubo pressurizado ou da rede de alimentação de gás, chega até o difusor da tocha, junto ao tubo de contato. No instante em que o gatilho da tocha é acionado o arame é movimentado e o gás é liberado [Machado, 1996].

No contato do arame com a peça ou junta a ser soldada estabelece-se o arco voltaico originando a fusão do arame eletrodo. A alimentação do arco é garantida pela contínua alimentação do arame eletrodo, enquanto que o comprimento do arco é, em princípio, mantido quase constante pelo próprio sistema, dentro de certos limites, independente dos movimentos do soldador [Machado, 1996].

A poça de fusão gerada é protegida pelo gás ativo e o material de adição é depositado na peça ou junta a ser soldada. O processo exige controle e determinação operacional para que se obtenham resultados satisfatórios [Machado, 1996]. Para o adequado ajuste do processo e consequente resultado projetado é necessário que se estabeleçam as variáveis/parâmetros do processo de tal maneira que o procedimento a ser desenvolvido resulte satisfatório.

2.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM AO ARCO ELÉTRICO COM PROTEÇÃO GASOSA ATIVA (GMAW)

No processo GMAW muitos são os fatores, variáveis ou parâmetros a serem observados e controlados apropriadamente. As variáveis são definidas nos parâmetros a serem controlados para que o desempenho do processo atinja seus objetivos e, podem ser classificadas em quatro grupos básicos:

- As variáveis pré-determinadas que subentendam o tipo de espessura do metal de base e as propriedades exigidas para o metal de solda e região afetada pelo calor.
- As variáveis de fundo são compostas por processo(s) de soldagem, tipo(s) de equipamento(s) a ser(em) utilizado(s), técnica básica de soldagem, projeto da junta, tipo de eletrodo, fluxo, gás e diâmetro do eletrodo.
- As variáveis primárias são a corrente, a tensão e a velocidade de soldagem.
- As variáveis secundárias compreendem o *stick out* do eletrodo (quando for o caso) e o posicionamento do eletrodo (ou tocha) em relação à peça.
- As variáveis primárias e secundárias, são estabelecidas para a definição de um procedimento de soldagem adequado aos requisitos de produtividade e qualidade [Modenesi, 2007]. [Machado, 1996].

No quadro 3 estão representados os parâmetros que influenciam a soldagem, enfatizando-se a intensidade de corrente, tensão de soldagem, velocidade de soldagem, *stick out* e os efeitos no processo GMAW.

Segundo Haupt et al, (2013) os parâmetros que influenciam o resultado na avaliação da largura do cordão depositado na junta são: a velocidade de soldagem e a intensidade de corrente. O reforço do cordão de solda depositado não é influenciado significativamente por

nenhum dos parâmetros apresentados ou suas interações. A penetração do cordão depositado é, por sua vez, fortemente influenciada pela intensidade de corrente elétrica.

Todavia, para Grong (1997) e Zeemann (2003), os valores de energia de soldagem (A.E), o aporte térmico (H.I) e o tempo de resfriamento da junta soldada ($T_{8/5}$), influenciam diretamente as possíveis transformações microestruturais e o comportamento da junta. O adequado arranjo destes valores possibilitará a apropriada parametrização do processo e seus resultados.

Quadro 3: Parâmetros que influenciam a soldagem e os efeitos no processo GMAW

Parâmetro	Afeta	Efeitos
Intensidade de corrente	<ul style="list-style-type: none"> Quantidade de metal fundido; Profundidade de penetração. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumentando a velocidade de alimentação do eletrodo aumentamos a corrente de solda e a velocidade de deposição; Quanto maior a densidade de corrente maior é a penetração.
Tensão de solda	<ul style="list-style-type: none"> Efeito na diluição. 	<ul style="list-style-type: none"> Aumentada à tensão do arco, aumenta-se a largura do cordão, para soldas em juntas sobrepostas ou juntas de topo com bordas aparadas retas e sem afastamento. Elevando a tensão podemos diminuir a penetração para juntas com pequenos chanfros.
Velocidade de soldagem	<ul style="list-style-type: none"> Profundidade de penetração; Largura do cordão. 	<ul style="list-style-type: none"> Velocidades elevadas reduzem a penetração e a largura do cordão, aumentando a probabilidade de ocorrência de porosidade; Em velocidades de soldagem elevadas devem-se usar tensões baixas, caso contrário, poderão ocorrer desvios do arco elétrico.
<i>Stick out</i>	<ul style="list-style-type: none"> Taxa de fusão. Estabilidade do arco. 	<ul style="list-style-type: none"> Quanto maior a extensão do eletrodo, maior a taxa de fusão, porém, menor será a estabilidade do arco elétrico, originando falhas e cordões irregulares.

Fonte: Adaptado de Machado (1996).

Se forem mantidas constantes todas as demais variáveis de soldagem, um aumento na tensão proporcionará alargamento e achatamento do cordão de solda, aumento da largura de fusão e aumento do aporte térmico que resultará em um aumento do tamanho da ZTA. A tensão de soldagem muito elevada poderá causar porosidades, respingos e mordeduras. Já

uma tensão muito baixa provocará o estreitamento do cordão de solda e aumento da altura do reforço do cordão [Modenesi, 2007]; [Machado, 1996]; [Okumura, Taniguchi, 1982].

A variação na tensão do arco não afeta somente as características geométricas do cordão de solda, afeta também a sua microestrutura e o resultado operacional em função da quantidade de metal depositado na junta de soldagem. Quando a tensão do arco é muito baixa a transferência de metal ocorre tanto por curto circuito (com baixa velocidade de alimentação) quanto por transferência globular (alta velocidade de alimentação). As duas características de transferência de metal proporcionam soldar em várias posições e a baixas temperaturas de soldagem, além disso, garantem melhor preservação dos elementos de liga [Machado 1996].

No processo de soldagem GMAW a intensidade de corrente (amperagem) está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame. Quando a velocidade do arame é alterada, a corrente de soldagem varia para valores diretamente proporcionais àqueles estabelecidos. Em arames de menores diâmetros, as correntes de soldagem ocasionam maior fusão do material de adição, em função do aquecimento por resistência à passagem de corrente na extensão do eletrodo até o bocal da tocha. Este aquecimento resistivo é conhecido como efeito Joule (I^2R) [Marques,2007].

Ao analisarmos o resultado obtido no processo de soldagem GMAW, poderemos encontrar parâmetros com variações inadequadas. É necessário conhecermos os parâmetros e suas influências no processo GMAW e controlá-los adequadamente para garantir os resultados definidos no projeto da junta soldada em estudo.

2.3.1 Tensão de soldagem (arco voltaico)

A tensão de soldagem é uma variável crítica e deve ser cuidadosamente controlada. O comprimento do arco é uma variável independente, mas a tensão do arco depende do comprimento do arco (figura 4) e também da composição e diâmetro do eletrodo, o gás de proteção utilizado e, ainda, da técnica de soldagem [Machado, 1996].

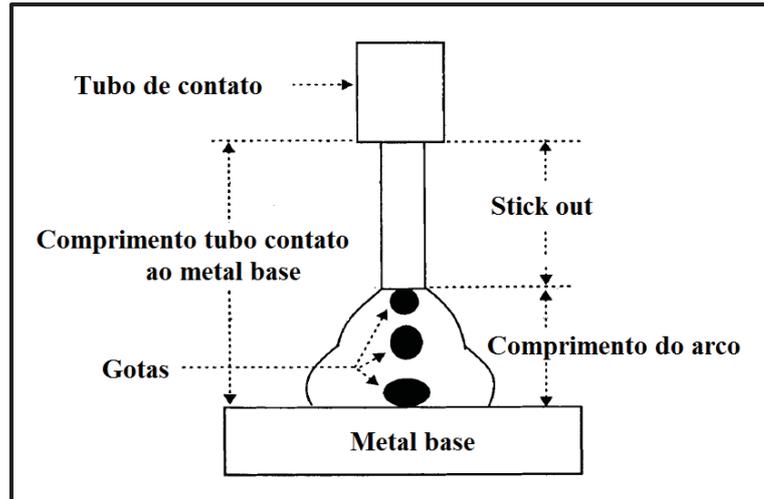


Figura 4: Representação dos elementos da soldagem, ênfase ao ARCO voltaico.

Fonte: Adaptado de Naidu *et all* (2003)

Eletricamente o arco voltaico pode ser caracterizado pela diferença de potencial (d.d.p) entre suas extremidades e pela corrente elétrica que por ele circula. O arco apresenta, em geral, grande eficiência para transformar a energia elétrica em energia térmica, transferindo-a para a peça de trabalho [Modenesi, Marques e Bracarense, 2009]. Na figura 5 tem-se a representação do arco voltaico e suas respectivas áreas térmicas correspondentes.

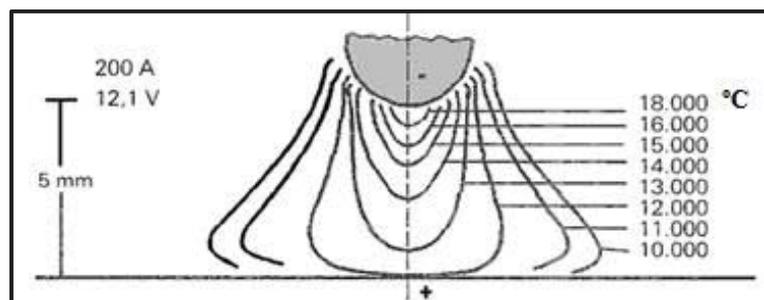


Figura 5: Perfil térmico de um arco de soldagem

Fonte: Marques *et all*. (2009).

No processo GMAW a tensão de soldagem tem grande efeito no modo de transferência do MA. A soldagem por curto-circuito requer tensões relativamente baixas, enquanto a soldagem em aerossol necessita de tensões maiores. Quando a corrente de soldagem e a taxa de fusão do arame são aumentadas, a tensão de soldagem também deve ser

aumentada para manter a estabilidade do arco e, assim, garantir-se a transferência metálica requerida [Modenesi, 2007]; [Kou, 2002]; [Okumura, Taniguchi, 1982].

Tensões elevadas do arco ocasionam excesso de respingos de solda e mordeduras no cordão de solda. Tensões baixas implicam na falta de fusão do material e cordões com perfil convexo. As variações nos parâmetros afetam as características geométricas do cordão e sua microestrutura [Moreira, 2008].

2.3.2 Características elétricas de transferência

Existem três tipos básicos de transferência de metal no processo GMAW: transferência por curto circuito, transferência globular e transferência "spray" [Kou, 2002]. Na figura 6 está a representação dos três tipos básicos de transferência relacionados à tensão e corrente:

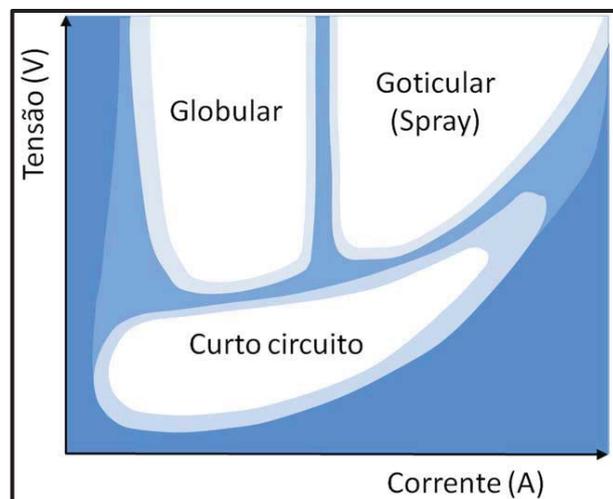


Figura 6: Representação das formas básicas de transferência de metal de adição GMAW

Fonte: Ramos (2011).

Além da relação entre níveis de tensão e corrente, a polaridade, o diâmetro e composição do MA, o tipo e composição do meio de proteção gasosa, o comprimento

energizado do eletrodo, também são fatores que influenciam as formas de transferência de MA no processo GMAW [Modenesi, 2007]; [Machado, 1996].

O *International Institute of Welding* (IIW) propõe um sistema de classificação baseado em aspectos fenomenológicos da transferência MA, conforme o quadro 4:

Quadro 4: Classificação da transferência do metal de adição segundo IIW

Tipo de Transferência	Exemplo de Processo de Soldagem
1. Queda Livre	
1.1 Globular	
1.1.1 Globular	GMAW
1.1.2 Repelida	GMAW com proteção de CO ²
1.2 Goticular ou Aerossol	
1.2.1 Projetado	GMAW corrente intermediária
1.2.2 C/Alongamento	GMAW corrente média
1.2.3 Rotacional	GMAW corrente elevada
2. Por Contato	
2.1 Curto Circuito	GMAW arco curto
2.2 Contínua	GMAW com alimentação contínua

Fonte: Adaptado de Modenesi (2007).

São quatro os tipos de transferências metálicas no processo GMAW: globular, por curto-circuito, por pulverização axial e rotacional, e por arco pulsado. A transferência globular ocorre em baixas densidades de corrente e em qualquer tipo de gás de proteção, especialmente para CO₂ e Hélio. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro maior que o eletrodo. A quantidade de calor gerada na peça a ser soldada tem valor intermediário quando comparada com os outros tipos de transferências [Machado, 1996].

Na figura 7 temos a representação esquemática da transferência globular.

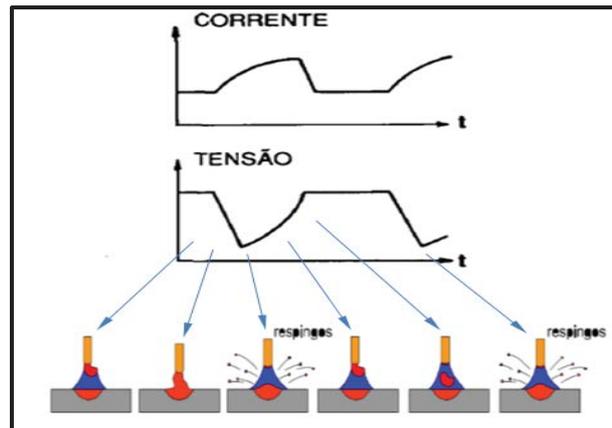


Figura 7: Esquema de transferência globular

Fonte: Adaptado de Wainer *et all* (1992).

A transferência por curto-circuito, por sua vez, ocorre para eletrodos nus de diâmetros menores que os convencionais (0,8 a 1,2 mm), para valores inferiores de corrente utilizadas na transferência globular e para qualquer tipo de gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu toca a poça de fusão formando um curto-circuito, sendo puxada pela tensão superficial da poça. A quantidade de calor gerada na peça é menor que o calor gerado na transferência globular. A penetração não é muito grande e existe problema de respingo e instabilidade do arco.

Na transferência do tipo por curto circuito o metal de adição é transferido do eletrodo para a poça de fusão quando eles estão em contato entre si, momento em que ocorre o curto circuito. Por outro lado, em ambos os tipos de transferência - globular e spray -, as gotas viajam através do arco sob a influência da gravidade ou de forças eletromagnéticas. A intensidade da corrente de soldagem, o tamanho do eletrodo e a composição do gás de proteção são os principais fatores que afetam o modo de transferência [Machado, 1996].

Na figura 8 tem-se o esquema de transferência por curto circuito.

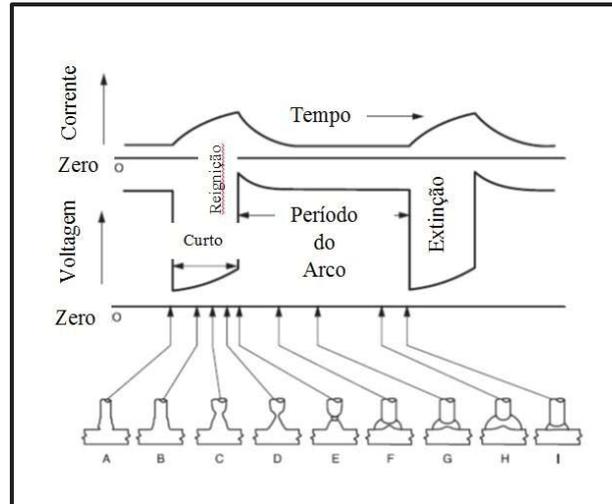


Figura 8: Esquema de transferência curto circuito

Fonte: Adaptado de Wainer *et all* (1992).

Na transferência por curto circuito, quando o arame toca a poça de fusão a corrente começa a aumentar, proporcionando uma corrente de curto-circuito. Quando esse valor de corrente é atingido o metal é transferido e o arco então é reaberto. Como o arame está sendo alimentado muito rapidamente, o arco será eventualmente extinto por outro curto. O ciclo recomeça transferido metal somente nos curtos-circuitos [Modenesi, 2007].

A transferência por pulverização ocorre para elevada densidade de corrente e quando se usa argônio ou misturas ricas em argônio como gás de proteção. A gota que se forma na ponta do eletrodo tem o diâmetro menor que o próprio eletrodo e é axialmente direcionada. A quantidade de calor colocada na peça para a solda é bastante elevada, sendo esse o modo de transferência adequado para soldar chapas grossas. No caso da soldagem aço-carbono, solda-se nas posições plana e horizontal (solda em ângulo). A penetração é bem elevada e o arco é bastante suave. A Figura 9 mostra esquematicamente este tipo de transferência [Machado, 1996].

A transferência com arco pulsado é do tipo pulverização axial. O equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. No primeiro, a corrente de base (I_b) é tão baixa que não há transferência mas, somente o início da fusão do arame. No segundo, há corrente de pico (I_p) ocasionando a transferência de uma única gota. Com isso consegue-se uma transferência com característica de pulverização, porém, com uma corrente média bem menor. A quantidade de calor colocada na peça é menor que a da pulverização axial convencional,

por isso soldam-se espessuras bem menores e consegue-se soldar em todas as posições [Machado, 1996].

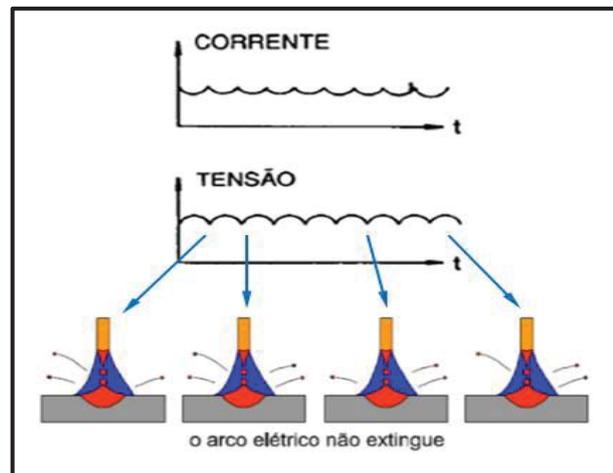


Figura 9: Esquema de transferência metálica por pulverização

Fonte: Adaptado de Wainer *et all* (1992).

No quadro 5 é apresentada a relação entre as formas de transferências metálicas e os parâmetros de soldagem.

Quadro 5: Relação dos tipos de transferência metálica e os parâmetros de soldagem GMAW

Tipo de Transferência Metálica	Gás de Proteção	Posição de Soldagem	Energia de Soldagem	Penetração	Estabilidade do Arco
Globular	Todos	Plana	1,2 Joule	Média	Intermediária
Curto-circuito	Todos	Todas	1 Joule	Boa	Ruim
Pulverização axial	Argônio e misturas ricas em Argônio	Plana/Horizontal (em ângulo)	1,8 Joule	Ruim	Boa
Arco pulsado			(1,2 - 1,6) Joule	Média	Boa

Fonte: Adaptado de Marques *et all* (2007).

Diante do exposto, percebe-se a importância existente na relação dos parâmetros de soldagem e seus resultados no filete de solda. A intensidade de corrente como parâmetro de regulagem do processo GMAW, por sua vez, será melhor entendida no tópico seguinte.

2.3.3 Intensidade de corrente e velocidade de soldagem

A intensidade da corrente de soldagem influencia diretamente na taxa de consumo de material de adição, na penetração da solda e na energia específica da soldagem. Em condições análogas às estabelecidas para o arco elétrico, um aumento na corrente de soldagem (aumento na velocidade de alimentação do arame) irá causar aumento na penetração e largura de penetração do cordão de solda, além do já mencionado aumento na taxa de deposição e aumento do cordão de solda [Machado, 1996].

A corrente de soldagem suporta variações não lineares, de acordo com a alteração da velocidade de alimentação do arame (eletrodo). Na figura 10 tem-se a representação desta relação:

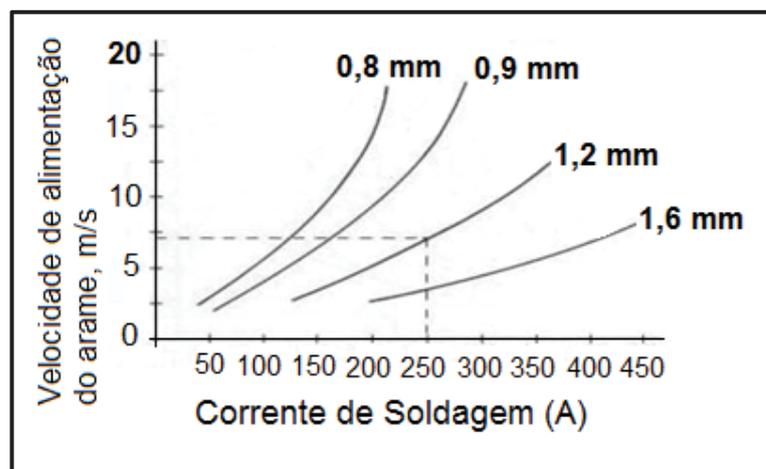


Figura 10: Corrente de soldagem X velocidade de alimentação dos eletrodos de aço carbono

Fonte: Adaptado de GMAW Guidelines (The Lincoln Electric Company), 2013.

Na figura está indicada a corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame, sendo o arame para uso do tipo com diâmetro de 1,2 mm. Para um dado diâmetro de eletrodo, o tipo de transferência metálica será caracterizado pela intensidade de corrente. Aumentando ou diminuindo a intensidade de corrente, têm-se diferentes formas de transferência: transferência por curto circuito, transferência globular e transferência por aerossol [Modenesi, 2005].

Na prática de soldagem o soldador experiente diferencia a transferência metálica pelo ruído característico ocasionado no processo de soldagem [Machado, 1996].

Quanto à velocidade de soldagem, pode-se afirmar que é a relação entre a distância percorrida pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto neste percurso. Esse parâmetro pode ser expresso em cm/min ou mm/min. A velocidade de soldagem tem relação direta com a espessura do material a ser soldado. Quando a espessura da peça aumenta, a velocidade de soldagem deve diminuir. Para uma determinada espessura de peça e tipo de junta, quando a corrente de soldagem aumentar a velocidade de soldagem também deve aumentar e vice-versa. Maiores velocidades de soldagem são alcançadas empregando a técnica de soldagem empurrando [Okumura, 1982].

Por fim, cumpre ressaltar que a velocidade de soldagem do filete é influenciada também pelo tipo de gás de proteção utilizado no processo, a estabilidade do arco necessária ao deslocamento do filete e à polaridade da tensão utilizada.

2.3.4 Polaridade

Para Modenesi (2007) o termo polaridade está relacionado à conexão elétrica da tocha de soldagem e os terminais de corrente de saída da fonte de tensão. É utilizado para descrever a conexão elétrica da tocha em relação aos terminais de saída da fonte de tensão. Quando a tocha é conectada ao terminal positivo da fonte, a polaridade é denominada de eletrodo de corrente positiva (DCEP)¹ ou polaridade inversa. Se o terminal negativo for conectado a fonte, teremos polaridade direta (DCEN)². O processo GMAW utiliza geralmente corrente contínua e polaridade inversa, pois assim obtém-se melhor penetração e estabilidade do arco elétrico. A polaridade direta pode ser utilizada para aumentar a velocidade de deposição de eletrodo, quando não for necessária grande penetração.

A polaridade do arco voltaico, o arco voltaico, a corrente de soldagem e os demais parâmetros já citados, determinam a técnica necessária para o melhor resultado de filete de solda no processo GMAW. A grande maioria das aplicações no processo GMAW utiliza a polaridade positiva. Nesta condição, o arco é estável, a transferência metálica é equilibrada, a

¹ Em inglês, direct current electrode positive (DCEP).

² Em inglês, direct current electrode negative (DCEN).

quantidade de respingos é menor, o filete de solda tem boas características e apresenta maior penetração do cordão para uma extensa faixa de correntes de soldagem [Machado, 1996]; [Modenesi, 2007].

2.3.5 *Stick out*

Define-se como *stick out* a distância entre o último ponto de contato elétrico do arame e a ponta do eletrodo ainda não fundida. Quando esta distância aumenta, aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, aquecendo-o pelo efeito Joule. Com esta elevação da temperatura do eletrodo, podemos reduzir a corrente elétrica para fundir o eletrodo na mesma proporção da taxa de alimentação, ou seja, para a mesma corrente de soldagem utilizada se obterá maior taxa de deposição, porém, com menor penetração. O *stick out* desejável para processo de soldagem GMAW, na posição plana, varia entre 6 mm e 13 mm, para transferência globular e 13mm a 25mm para outras formas de transferência [Machado, 1996].

Na figura 11 tem-se a representação esquemática do *stick out* no processo GMAW.

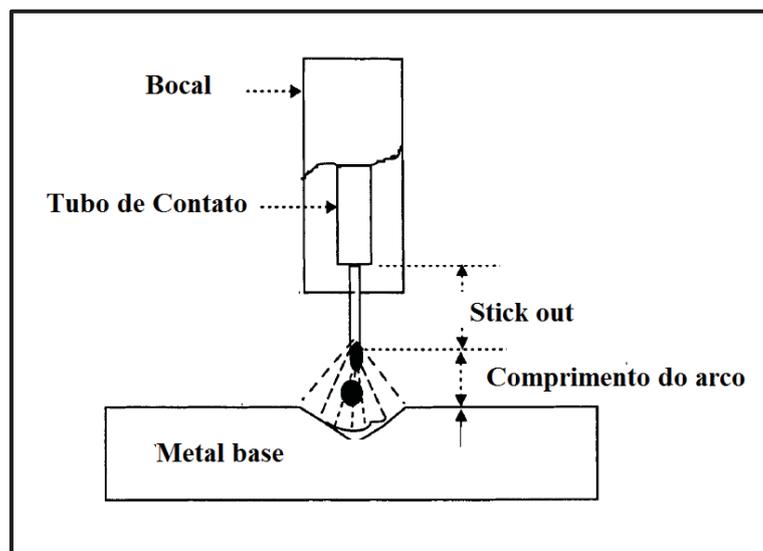


Figura 11: Representação esquemática do *stick out* no processo GMAW

Fonte: Adaptado de Naidu *et all* (2003).

O *stick out* incorpora a extensão do eletrodo e o arco voltaico. Para cada posição de soldagem e preparação de junta teremos o dimensionamento do *stick out* adequado. Como visto anteriormente, com o arco voltaico longo a velocidade de soldagem deverá ser ajustada. A corrente de soldagem deverá garantir a fusão do eletrodo para que se consiga a estabilidade no processo GMAW.

2.3.6 Tipo de gás utilizado

O tipo de gás de proteção, entre outros fatores, influencia na forma de transferência e nas características do arco e do cordão de solda. Essa proteção é feita através de gases inertes (argônio, hélio ou suas misturas) ou de gases ativos [Wainer, 1992].

Os gases de proteção podem ser utilizados puros ou combinados entre si e, provocam efeitos sobre o modo de transferência do metal desde o eletrodo à peça. Influenciam as propriedades mecânicas e metalúrgicas da junta soldada, a geometria e aparência desta e a estabilidade do arco e operacionalidade do processo [Machado, 1996].

A principal função dos gases de proteção é preservar a poça de fusão eliminando o contato do ar atmosférico ao metal fundido. Os metais, quando aquecidos até seu ponto de fusão, tendem a formar óxidos e eventualmente nitretos. Para garantir a formação adequada do cordão de solda, sem porosidades, devemos criar uma atmosfera de proteção localizada na poça de fusão dos metais através do uso de gases específicos [Modenesi, 2007]; [Machado, 1996]. No quadro 6 temos a relação de gases utilizados no processo GMAW:

Quadro 6: Gases de Proteção para GMAW

MATERIAL	GÁS	OBSERVAÇÕES
Aços ao Carbono e alguns Baixa Liga	Ar + 3 a 5% O₂	A tenacidade do metal de solda é menor do que outras misturas. Transferência em aerossol.
Aços ao Carbono e Baixa Liga	Ar + 2 a 5% O₂ + 10% CO₂	Tenacidade decai com o grau de oxidação. Transferência em curto-circuito e aerossol. Mínima incidência de porosidade.
Aço Baixa Liga	60 a 70% He + 25 a 35% Ar + 4 a 5% CO₂	Metal de solda com alta tenacidade, em transferência por curto-circuito.

Fonte: Adaptado de Machado (1996).

Segundo a AWS os gases utilizados neste trabalho são classificados em SG-AC-25 (75% Argônio + 25 %CO₂) e SG-AO-5 (95 % Ar + 5 % O₂).

2.4 JUNTAS SOLDADAS

Na soldagem por fusão o arco elétrico provoca fusão localizada. O movimento físico da fonte de calor provoca mudanças físicas de estado do material (solido-líquido-sólido), ocasionando transformações metalúrgicas na região soldada. A perda de calor por convecção, radiação e condução afetará o rendimento térmico do processo de solda. Tem-se uma variação térmica na formação da junta soldada, caracterizando três regiões metalúrgicas distintas: a zona de fusão (ZF); a zona termicamente afetada (ZTA) pelo calor e o material base.

Este ciclo térmico do processo é determinado também pela taxa de solidificação do material fundente, pela taxa de resfriamento da poça de fusão, pela temperatura de pico do processo e a taxa de resfriamento dos materiais. O calor aportado, a geometria da junta, a espessura do material e o tipo de material a ser soldado influenciam os resultados finais do processo de soldagem. O tamanho da ZTA pelo calor dependerá da partição térmica (temperatura x distância) e as modificações da estrutura do material será função do ciclo térmico do processo (temperatura x tempo) [Barra, 2003].

A metalurgia da soldagem entende como junta soldada qualquer região em que, por decorrência dos efeitos da soldagem, tenham ocorrido consideráveis alterações em suas condições iniciais [Peixoto, 2012]. A fusão do metal de base e o MA (figura 12), denominada poça de fusão, é constituída de parte de metal de base e parte de MA. A relação entre as quantidades presentes desses elementos (base + adição) no metal de solda é denominada diluição.

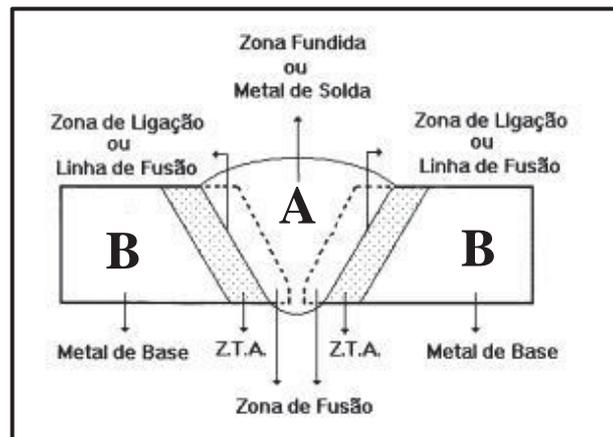


Figura 12: Representação esquemática de uma junta de solda.

Fonte: Adaptado de Peixoto (2012).

A diluição é a quantidade percentual de metal de base que entra na composição do metal de solda na soldagem por fusão, podendo variar desde valores muito baixos como 5% até 100% na soldagem autógena (sem MA) [Zeemann, 2003]. A diluição da junta soldada é representada pela equação abaixo:

$$Diluição \% = \frac{\text{Área A}}{\text{Área A} + \text{Área B}} \quad \text{Equação n}^\circ 1$$

O procedimento utilizado, o tipo de junta, o processo de soldagem, a temperatura de pré-aquecimento, os consumíveis e os parâmetros elétricos influenciam no valor da diluição. Para que tenhamos uma diluição elevada, devemos observar também:

- Configuração da junta para soldagem de raiz;
- Soldagem com processos de elevada energia;
- Técnicas de soldagem que favoreçam maior penetração;
- Utilização de alta temperatura de pré-aquecimento;
- Parâmetros ou consumíveis de soldagem que favoreçam alta penetração [Zeemann, 2003] e [Peixoto, 2012].

Zeemann (2003) ainda explica que:

Na soldagem por fusão chama-se “DILUIÇÃO” a parcela de metal de base que entra na composição da zona fundida (metal de solda). Para a maioria das aplicações (em aços de baixo carbono) a diluição apresenta pequena importância no que diz respeito ao comportamento da junta de serviço, porém em algumas aplicações “especiais” esta característica pode ser determinante no desempenho do componente, podendo inclusive favorecer falhas durante a operação do equipamento, sem problema – elevada diluição – possa ser detectado durante a fabricação.

A diluição da junta soldada para aços ARBL é determinante para o desempenho do componente soldado. O estudo da metalurgia da junta e sua micro composição determinam as características alcançadas no processo adotado.

2.5 APORTE TÉRMICO/ ENERGIA DE SOLDAGEM

O processo GMAW de soldagem é caracterizado pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia pode acarretar em pequenas regiões de altas temperaturas, altos gradientes térmicos, mudanças bruscas de temperatura e amplas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material [Grong, 1997].

Na soldagem a arco elétrico o aporte térmico (*heat input*) é definido como o calor cedido à junta soldada por unidade de comprimento e é calculado pela equação:

$$\text{Aporte Térmico} = \eta \frac{\text{Tensão} \times \text{Corrente}}{\text{Velocidade de Soldagem}}$$

Equação nº 2

Ou seja:

$$\text{Aporte Térmico} \left(\frac{KJ}{mm} \right) = 0,006 \frac{\text{Tensão (V)} \times \text{Corrente (A)}}{\text{Velocidade de Soldagem (cm/min)}} \quad \text{Equação nº 3}$$

Para Zeemann (2003) o aporte térmico em uma junta soldada é fator determinante nas possíveis transformações microestruturais da junta soldada. Conforme segue:

Um parâmetro de grande importância metalúrgica é a energia de soldagem, pois juntamente com as características geométricas da junta, e com o nível de pré-aquecimento, é determinante nos ciclos térmicos impostos ao material e, portanto nas possíveis transformações microestruturais e no comportamento da junta.

A energia de soldagem depende muito dos parâmetros elétricos e das técnicas utilizadas no processo de soldagem. As mudanças microestruturais na junta soldada serão o efeito da ação cíclica resultante da variação da temperatura no contexto do processo. Portanto, aborda-se no próximo tópico o ciclo térmico e suas correlações.

2.5.1 Ciclo térmico

A variação de temperatura no processo de soldagem em um ponto da peça é descrita pelo seu ciclo térmico de soldagem. Cada ponto é submetido a um ciclo térmico específico que depende de vários aspectos e fatores como a localização deste ponto em relação à solda. Os principais parâmetros que descrevem o ciclo térmico são a temperatura de pico, tempo de permanência e velocidade de resfriamento [Modenesi, Marques e Santos, 2006].

O ciclo térmico influencia diretamente nas transformações microestruturais do aço. O crescimento de grãos da estrutura cristalina, o coalescimento/dissolução de precipitados e a recristalização da estrutura do material são alguns exemplos destas alterações na junta soldada.

Para Modenesi *et all* (2006) o comportamento das curvas que representam os ciclos térmicos reflete aspectos importantes a respeito das condições empregadas na soldagem. Fatores como o tipo de processo, uso ou não de pré ou pós-aquecimento, aporte térmico e soldagem multipasses são capazes de estabelecer diferenças na configuração de uma curva de ciclo térmico. As diferenças obtidas em função de alterações de um ou mais fatores podem tornar a característica do ciclo térmico mais ou menos favorável para o desenvolvimento de defeitos de soldagem.

Os principais fatores a serem observados na definição dos ciclos térmicos dos pontos constituintes de uma região soldada são mostrados na figura 13:

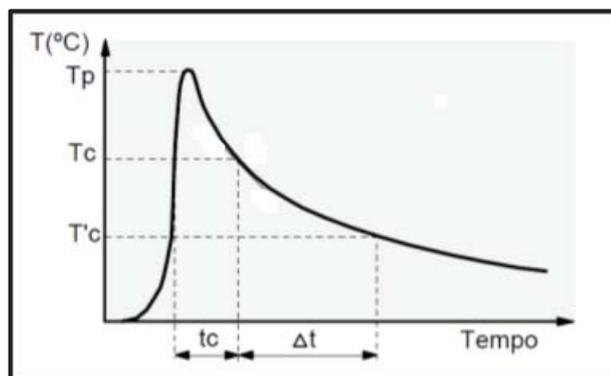


Figura 13: Representação esquemática do ciclo térmico na soldagem em um só passe.

Fonte: Modenesi *et all* (2006).

A temperatura T'_c é a temperatura de início de processamento, nem sempre é a temperatura ambiente. Em função dos procedimentos de soldagem poderá ser a temperatura de pré-aquecimento no material a ser soldado. Nos aços ARBL esta temperatura é determinada pela espessura da junta, geometria da junta e energia de soldagem.

A temperatura T_c é a temperatura crítica, ou seja, é o valor de temperatura a partir da qual o material processado tem a possibilidade de sofrer transformações metalúrgicas no estado sólido. O valor da temperatura vai depender do material a ser soldado. Estas transformações podem alterar propriedades importantes do material ou aumentar a possibilidade de ocorrência de defeitos.

A temperatura T_p é a maior temperatura de um ponto do material durante o processo de soldagem. Se a temperatura máxima ultrapassar a temperatura de fusão dos materiais envolvidos então o ponto pertence à zona fundida.

Para melhor entendimento, na figura 14 tem-se a tipificação da macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta de topo soldada e sua relação com as temperaturas de pico: A – (ZF) ; B – (ZAC) e C – (MB). Assim, pode-se estabelecer a relação entre a propagação bidimensional e a formação do cordão de solda e suas consequências metalúrgicas.

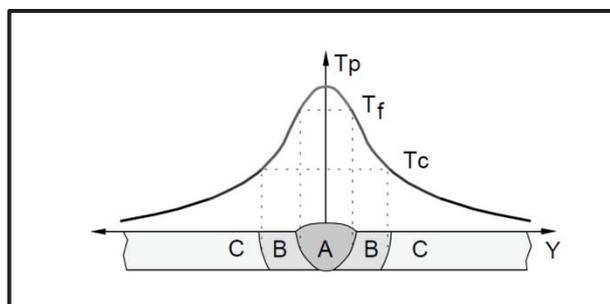


Figura 14: Macroestrutura esquemática da seção transversal de uma junta soldada e sua relação com as temperaturas de pico: A – ZF (zona de fusão); B – ZAC (zona afetada pelo calor); C – MB (metal base).

Fonte: Modenesi *et al* (2006).

Os demais fatores que influenciam a distribuição do calor na junta soldada são a condutividade térmica da peça, espessura da junta, geometria da junta, energia de soldagem e temperatura de pré-aquecimento [Modenesi, Marques e Santos, 2006]. Para chapas finas considera-se que não há fluxo de calor na direção da espessura da chapa, caracterizando um fluxo de calor bidirecional, com fonte de calor do tipo linear. [Wainer *et al*, 1992].

Na figura 15 temos a representação do ciclo térmico no centro do cordão para soldagem de chapas de diversas espessuras: energia de soldagem 0,6KJ/mm. Para chapa de 5 mm de espessura pode-se evidenciar a relação entre a temperatura do cordão de soldagem na linha de tempo (segundos), decrescendo em taxas proporcionais.

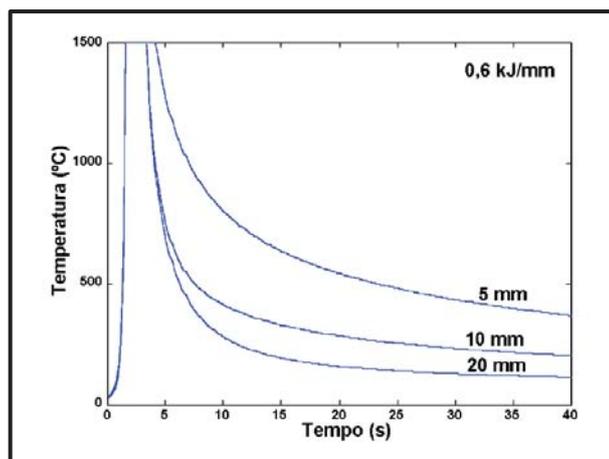


Figura 15: Ciclo térmico no centro do cordão para soldagem de chapas de diversas espessuras.

Fonte: Modenesi *et al* (2006).

Em se tratando de juntas com material base com espessura de até 5 mm considera-se no ciclo térmico a dissipação bidirecional de calor, na figura 16 tem-se a representação esquemática de uma aço de baixa condutividade térmica, com espessura de 5 mm.

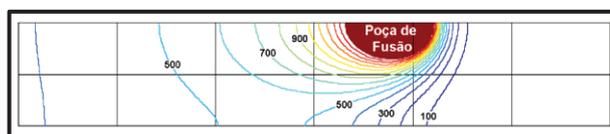


Figura 16: Distribuição teórica de temperatura no plano xz em torno da poça de fusão para chapa de aço carbono de 5 mm de espessura. Energia de soldagem: 0,6KJ/mm.

Fonte: Modenesi *et al* (2006).

Por conseguinte, pode-se afirmar que a dissipação do calor em chapas de até 5 mm ocorre em duas dimensões: a partir do centro do cordão de soldagem, decrescendo em taxas proporcionais, com sua maior temperatura no centro do cordão de solda (ZF), diminuindo sua intensidade na ZTA e alcançando os menores valores a medida que a temperatura alcançada é reduzida em função da dissipação no MB distante do centro do cordão de solda.

Nos aços ARBL o tempo de resfriamento do cordão de solda deve ser observado. A rápida dissipação térmica da energia de soldagem pode ocasionar fragilização induzida pelo hidrogênio [Gorni, 2001].

2.6 METALURGIA DA SOLDAGEM

O processo GMAW de soldagem tem como fonte de energia o calor. O calor tem grande influência sobre as transformações metalúrgicas e mecânicas que ocorrem na zona de solda. Para Figueiredo (2005) o aporte de calor/energia, bem como, o rendimento térmico do arco elétrico, a distribuição de temperatura (ciclo térmico) durante a soldagem, o tempo de permanência nessas temperaturas e a velocidade de resfriamento da zona soldada devem ser considerados no estudo da transferência de calor em juntas soldadas.

O fluxo de calor na soldagem ocorre no fornecimento de calor na junta e na dissipação deste calor pela peça. Quando pelo aporte de calor ocorre a fusão da junta soldada tem-se a diluição do MB e do MA. O resultado da diluição será evidenciado em sua microestrutura. As regiões características e suas respectivas estruturas são distinguidas conforme demonstrado na figura 17.

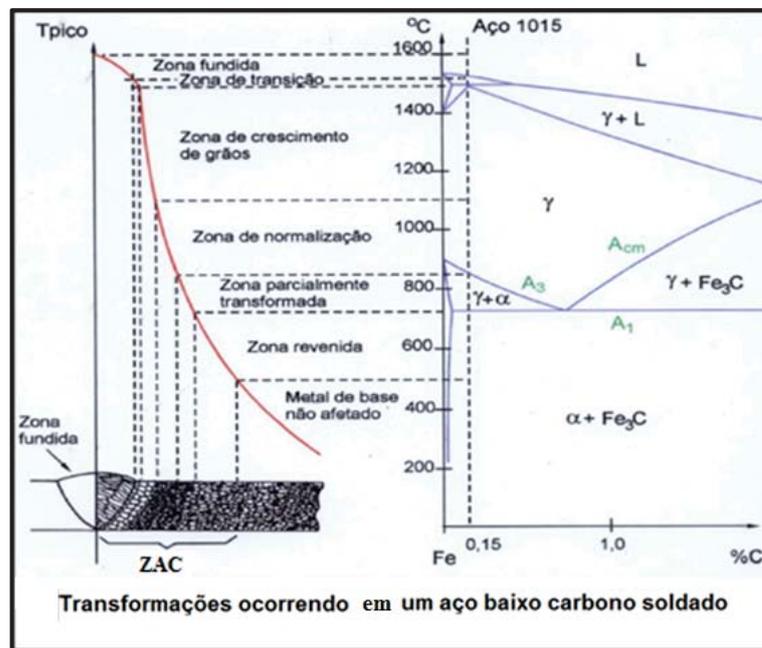


Figura 17: Microestrutura do metal base, metal fundido e zona termicamente afetada

Fonte: Adaptado de Modenesi *et al* (2005).

Cada área poderá ser identificada segundo suas características microestruturais e receberá nome específico: zona fundida, zona de ligação, zona alterada pelo calor e MB, constituindo assim os aspectos metalúrgicos da junta soldada [Wainer *et al*, 1992].

A microestrutura da zona afetada pelo calor (ZAC) é o resultado das transformações estruturais do MB associado aos ciclos térmicos e deformações que ocorrem durante a soldagem. A ZAC pode ser caracterizada por diferentes regiões:

- Região de granulação grosseira;
- Região de granulação fina;
- Região intercrítica;
- Região subcrítica.

A região de granulação grosseira é a região aquecida acima de sua temperatura de crescimento de grão, caracterizando-se pelo tamanho do grão austenítico, sendo a sua microestrutura final o resultado da transformação da austenita. O ciclo térmico da soldagem e a temperatura de crescimento do grão do material são os fatores determinantes do tamanho do grão austenítico [Rodrigues, 2012].

Para uma dada condição de soldagem, o crescimento de grão nesta região pode ser diminuído. Os aços tratados ao alumínio apresentam precipitados de nitreto de alumínio e permitem a obtenção de granulação mais fina, impedindo o crescimento de grão até temperaturas próximas de 1250°C. Acima desta temperatura os precipitados são solubilizados e o crescimento de grãos é rápido. Adições de nióbio, vanádio ou titânio ajudam a minimizar o crescimento dos grãos na ZAC [Perini, 2008].

A região de granulação fina está mais afastada da linha de fusão que a região de granulação grosseira. É caracterizada por apresentar granulação fina, semelhante aos aços normalizados. A região intercrítica apresenta transformação parcial. Parte de sua estrutura é transformada em austenita que se decompõe durante o resfriamento.

Em aços temperados e revenidos as alterações microestruturais são significativas. Ocorre o revenimento das regiões da ZAC apresentando, assim, uma redução da dureza em relação ao material base [Perini, 2008].

As propriedades da ZAC são afetadas pelo tipo de estrutura formada e pelos ciclos térmicos decorrentes da soldagem. Os fatores mais importantes que provocam mudanças na microestrutura e nas propriedades da zona da solda são: a máxima temperatura atingida no aquecimento e a velocidade de resfriamento no intervalo entre as temperaturas (T_8/T_5) de 800°C e 500°C (figura 19) [Bhadeshia, 2003; Kou, 2002 e Perini, 2008].

De acordo com o parágrafo anterior, na velocidade de resfriamento é possível ocorrer as mudanças representadas no fluxograma abaixo:

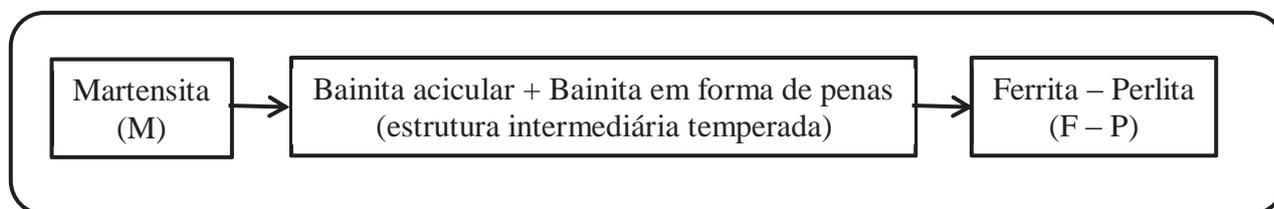


Figura 18: Mudança microestrutural na ZAC em relação à velocidade de resfriamento T_9/T_5

Segundo Martins (2005) a microestrutura do metal de solda em aços ARBL geralmente é constituída por ferrita acicular, com ferrita de contorno de grão em várias proporções e ferrita alinhada com constituintes martensita-austenita-carbonetos (M-A-C). Entretanto, a presença de elementos de liga na temperabilidade pode transformar as estruturas e, por meio da precipitação de carbonitretos, pode aumentar a resistência mecânica, diminuir a tenacidade do metal de solda e reduzir as propriedades de resistência à corrosão.

2.6.1 Microestruturas ferríticas

Segundo Modenesi *et al* (2012) nos aços ao carbono de baixa liga os constituintes mais comuns resultantes da decomposição da austenita são formados por: (i) ferrita; (ii) agregados da ferrita com carbonetos; (iii) pequenas regiões formadas ao final da transformação contendo proporções variadas de martensita, carbonetos e austenita retida e (iv) martensita.

A ferrita pode apresentar isoladamente ou em conjunto com outras fases diferentes morfologias e tamanhos de grão. Pode nuclear em diferentes locais e crescer por mecanismos diversos em função das condições de resfriamento e da composição química do aço.

As diferentes morfologias da ferrita resultantes da decomposição da austenita podem ser classificadas a partir de um sistema proposto por Dubé e estendido por Aaronson (2010) (figura 19). Esta classificação serviu de base inicial para a determinação dos constituintes da

zona fundida e da ZAC de aços carbono e de baixa liga. O metal solidificado após a soldagem é basicamente formado por ferrita.

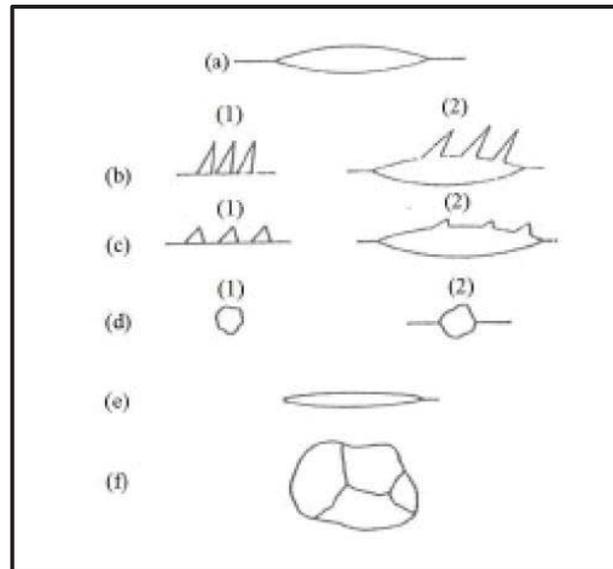


Figura 19: Classificação morfológica ferrita.

Fonte: Aaronson *et al* (2010).

- Alotriomorfa de contorno de grão (figura 19-a) são cristais que nucleiam os contornos de grão da matriz, crescendo ao longo dos contornos de grão.
- Placas laterais de Widmanstätten (figura 19-b) são cristais em formato de placas que crescem para dentro da matriz a partir dos contornos de grão. As placas laterais primárias (figura 19-b1) crescem dos contornos de grão para o interior da matriz. As laterais secundárias (figura 19-b2) crescem de cristais com outra morfologia, da mesma fase, normalmente da alotriomorfa de contorno de grão.
- Dentes de serra de Widmanstätten possuem forma triangular e crescem a partir dos contornos de grão da matriz. Quando crescem diretamente dos contornos de grão, são dentes de serra primários (figura 19-c1); quando advêm da alotriomorfia de contorno de grão, são dentes de serra secundários (Figura 19-c2).

- Cristais facetados equiaxiais são conhecidos como idiomorfos. Nas reações de ferrita e cementita formam-se no interior do grão austenítico (figura 19-d1). A forma (figura 19-d2) dificilmente será localizada em contornos de grão.
- Placas intragranulares de Widmanstätten (figura 19-e) são formadas no interior do grão austenítico.
- A estrutura massiva não é uma estrutura essencial (figura 19-f), ela surge no crescimento de cristais junto a outras morfologias, dando origem a estrutura policristalina equiaxial.

A evolução da microestrutura da ferrita é apresentada no desenho esquemático da figura 20. As placas de ferrita de Widmanstätten crescem em austenita não transformada ao longo de seu comprimento. Sua taxa de crescimento é controlada apenas pela difusão de carbono na austenita à frente da placa [Totten, 2006].

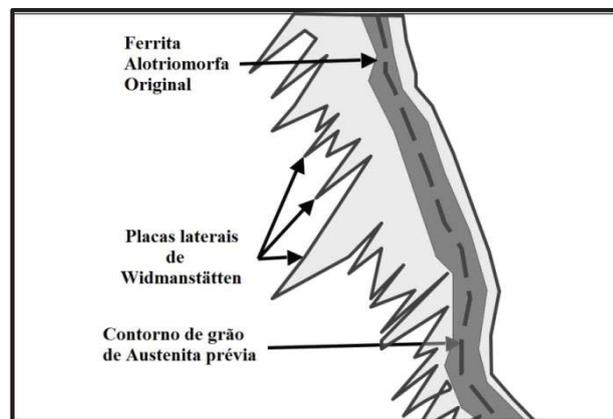


Figura 20: desenho esquemático da evolução da microestrutura de ferrita

Fonte: Totten (2007).

Na figura 21 tem-se a micrografia de um aço Fe – Cr – Mn indicando placas laterais de ferrita de Widmanstätten e ferrita alotriomorfa.

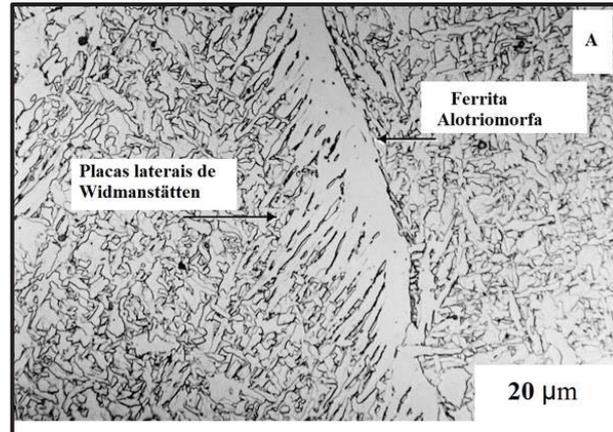


Figura 21: Micrografia placas laterais de Widmanstätten secundárias em aço Fe/C/Mn

Fonte: Totten (2007).

É visível a formação de ferrita em forma de placas laterais de Widmanstätten, ao longo do contorno de grão da austenita. Também são perceptíveis os cristais de ferrita alotriomorfa que nucleiam os contornos de grão da matriz.

2.6.2 Microestruturas bainíticas

A bainita foi descoberta pela primeira vez por Davenport e Edgar Bain durante seus estudos de decomposição isotérmica da austenita. A bainita pode ser formada durante tratamentos anisotérmicos com altas taxas de resfriamento para impedir a formação de perlita sem, no entanto, formar martensita. As características da bainita mudam com a redução da temperatura de transformação. Podem ser identificadas duas formas de bainita: a bainita superior e a bainita inferior [Bhadeshia, 2001].

A bainita é uma mistura de ferrita e cementita nos aços de médio e alto carbono. Segundo Aaronson, 2010 são seis as classificações (figura 22):

- a) Bainita nodular
- b) Bainita colunar
- c) Bainita superior
- d) Bainita Inferior
- e) Bainita alotriomorfa de contorno de grão e

f) Bainita inversa

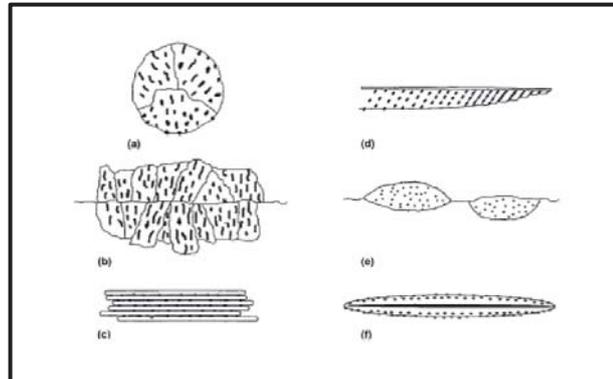


Figura 22: Classificações morfológicas da bainita

Fonte: Aaronson *et al* (2010).

São duas as morfologias mais frequentes: (i) a bainita superior e a (ii) bainita inferior (figura 21). A diferença entre a morfologia de uma e de outra se dá pela precipitação de carbonetos em temperaturas distintas. A bainita superior ocorre em temperaturas mais elevadas, enquanto a bainita inferior ocorre em temperaturas inferiores [Totten, 2007].

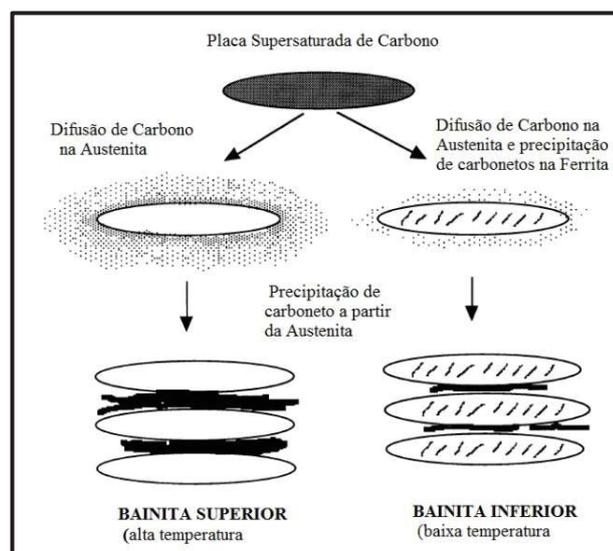


Figura 23: Representação esquemática da diferença entre Bainita superior e Bainita inferior.

Fonte: Bhadeshia (2001).

Existem dois tipos de precipitados de cementita: o que cresce a partir da austenita enriquecida em carbono e que separa as plaquetas de ferrita bainítica e, uma segunda cementita, que precipita a partir da ferrita saturada. A bainita inferior possui microestrutura e características cristalográficas similares às apresentadas pela bainita superior. A maior diferença está na precipitação da cementita no interior das ripas de ferrita (figura 24). Os carbonetos na bainita inferior são extremamente finos.

Uma vez que eles precipitam no interior da ferrita uma pequena quantidade é dividida com a austenita residual. Isto significa que um número pequeno de carbonetos finos precipitam entre as ripas de ferrita, quando comparado com a bainita superior. Uma consequência importante é que a bainita inferior usualmente apresenta maior tenacidade que a bainita superior, apesar de possuir maior resistência mecânica. Os carbonetos grosseiros de cementita na bainita superior possuem tendência em serem pontos de nucleação de micro cavidades e de trincas de clivagem [Bhadeshia, et all, 2003].

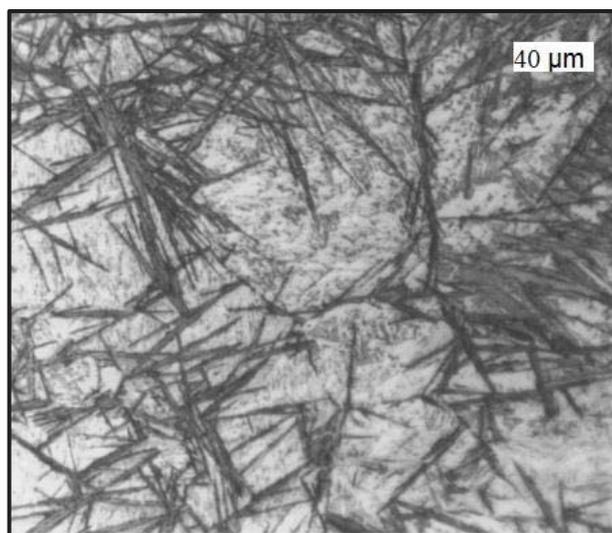


Figura 24: Micrografia mostrando bainita inferior, em aço transformado à 250°C

Fonte: Bhadeshian *et all* (2003).

Segundo Bhadeshian (2003) a formação da bainita superior envolve estágios distintos mas se inicia com a nucleação das ripas de ferrita nos contornos de grão da austenita sendo que o crescimento das ripas é acompanhado por variação de forma da região transformada (Figura 25).

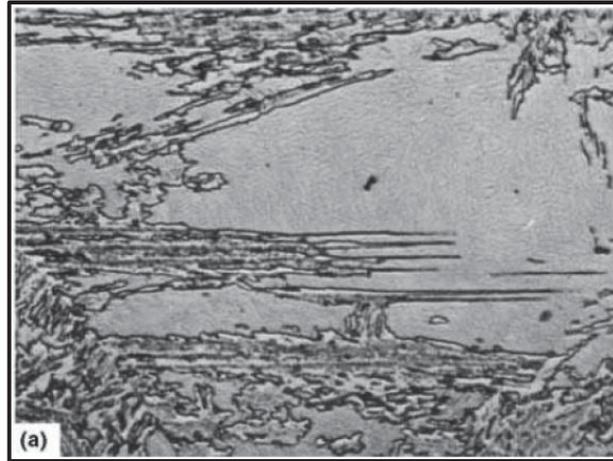


Figura 25: Micrografia mostrando bainita superior, em aço 4360 transformado à 495°C

Fonte: Krauss (2005).

A bainita cresce a temperatura relativamente alta quando comparada com a martensita. A alta tensão associada com a mudança de forma não pode ser suportada pela austenita e a resistência desta diminui com o aumento da temperatura.

2.6.3 Martensita

O resfriamento rápido do aço pode formar estruturas muito duras. Diferente da perlita ou da ferrita, a martensita se origina pela deformação do reticulado da austenita sem difusão de átomos. O resfriamento do campo da austenita permite o desenvolvimento da microestrutura martensítica. Para aços com muito carbono a taxa de resfriamento pode ser alta. Nos aços com grande quantidade de elementos de ligas estabilizadoras de austenita esta taxa será muito menor [Bhadeshia, 2006]. A martensita apresenta-se sob dois aspectos: (i) ripas ou (ii) placas. O teor de carbono no aço é fator determinante em sua morfologia (figura 26).

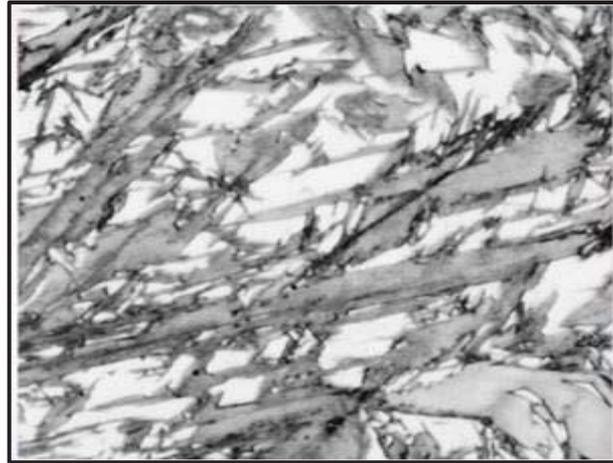


Figura 26: Micrografia de martensita contendo 0,8% de carbono. As regiões cinza em forma de placa são martensita, elas têm a mesma composição que as regiões de austenita (brancas) originais. Ampliação: 1000x

Fonte: Kalpakjian e Schmid (2006).

2.7 CONSUMÍVEIS

O termo consumível é aplicado aos produtos que são consumidos durante o processo de soldagem. No processo GMAW tem-se o gás utilizado e o arame eletrodo como principais consumíveis do processo. Os eletrodos utilizados devem ser de metais ou ligas metálicas com as propriedades semelhantes às características do MB. A seleção do eletrodo correto leva em consideração o tipo de gás que será utilizado, a composição química do MB e as propriedades mecânicas desejadas para a solda [Marques, 2007].

No quadro 7 tem-se a classificação dos eletrodos segundo a norma AWS A 5.28.

Quadro 7: Classificação dos eletrodos segundo norma AWS

Processo	Especificação do Eletrodo	Classificação Eletrodo
GMAW	A 5.28	ER110S – 1 ER 120S - 1

Fonte: AWS D1.1/D1.1 M:2010

Para melhor entendimento da classificação dos eletrodos do quadro 7, a figura 27 demonstra a classificação AWS codificada e seu respectivo entendimento.

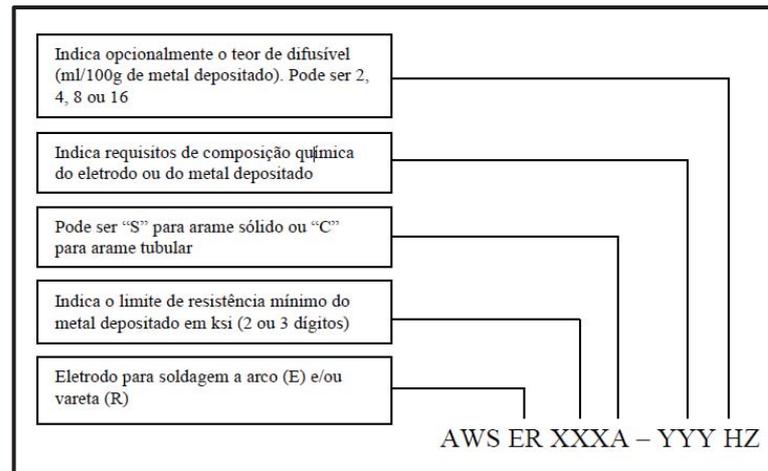


Figura 27: Categorização do eletrodo segundo norma AWS e seu significado técnico

Fonte: AWS D1.1/D1.1 M:2010.

Os eletrodos AWS A 5.28 são arames de aços de baixa liga. O limite de ruptura do eletrodo ER 110 S é de 760 MPa e o eletrodo ER 120 S alcança um valor de 830 MPa (quadro 8). A utilização do arame, como material de adição de uma junta soldada, requer conhecimento da composição química do material base da junta para definição correta do material de adição correspondente [Machado, 1996].

O uso de proteção gasosa no processo de soldagem, quando da utilização do material de adição (arame de soldagem), tem sua equivalência recomendada no estudo metalúrgico dos materiais. A conjugação de parâmetros e variantes do processo, quando adequadamente determinados, garantem os resultados técnicos exigidos em projeto [Zeemann, 2003] e [Peixoto, 2012].

No quadro 8 tem-se a resistência mecânica do metal de solda segundo a norma AWS A5.28, para os eletrodos ER 110 S - G e ER 120 S - G.

Quadro 8: resistência mecânica do metal de solda

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO METAL DE SOLDA						
Classificação AWS A 5.28	Gás de Proteção	Limite de Resistência		Limite de Escoamento		Alongamento % mínimo
		Psi	MPa	Psi	MPa	
ER 110 S ou 110 C	Ar + 1 - 5 % O ₂	110.000	760	95.000	660	15
ER 120 S - G	Ar + 1 - 5 % O ₂	120.000	830	105.000	720	18

Fonte: Adaptado de Marques *et al* (2009).

No quadro 9 são apresentados os requisitos da composição química para os eletrodos ER 110 S - G e ER 120 S - G (% em peso) segundo a norma AWS A5.28.

Quadro 9: requisitos da composição química para o eletrodo ou metal de solda (% em peso)

REQUISITOS PARA A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ELETRO (% em peso)										
Classificação AWS A5.28	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER 110 S - I	0,09	1,4 - 1,8	0,20 - 0,55	0,01	0,01	1,9 - 2,6	0,5	0,25 - 0,55	0,4	0,25
ER 120 S - I	0,1	1,4 - 1,8	0,25 - 0,60	0,01	0,01	2,0 - 2,8	0,6	0,30 - 0,65	0,3	0,25

Fonte: Adaptado de Marques *et all* (2009).

No quadro 10 tem-se a indicação ESAB dos consumíveis (eletrodos) para a soldagem GMAW para o aço S 700 MC.

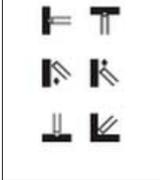
Quadro 10: Eletrodo sólido indicado para soldagem GMAW em S 700 MC

Eletrodos de Adição ESAB Indicados para processo GMAW
Eletrodo Sólido
AristoRod 13.29
OK AristoRod 69
Carbofil NiMoCr

Fonte: Adaptado do catálogo SSAB – AB, DOMEX (2012).

Para o processo de soldagem do material S 700 MC o consumível indicado pelo fabricante da matéria-prima (SSAB-AB) é o OK AristoRod 69, fornecido pela empresa ESAB que importa este arame. Entretanto, a empresa ESAB também indica o uso do eletrodo OK AristoRod 79 com diâmetro de 1,2mm. O gás sugerido para uso com o eletrodo é a mistura 95% Ar + 5% Oxigênio, ou ainda, 90% Ar + 10% CO₂, como os melhores parâmetros de soldagem do material. No quadro 11 tem-se a indicação do eletrodo e respectivos gases indicados pela empresa ESAB.

Quadro 11: Indicação ESAB para consumível em chapa S 700MC

AristoRod 79							
Metal Depositado	Propriedades Mecânicas	Posição de Soldagem	Ø (mm)	Tensão (v)	Faixa de Corrente (A)	Deposição (Kg/h)	Gás de Proteção
C = 0,10 %	Ar + 20 % CO ₂		1	18 - 28	80 - 280	1,0 - 5,4	Ar + (5 - 25) % CO ₂
Si = 0,70 %	Como soldado:						
Mn = 1,80 %	L.R = 900 MPa						
Cr = 0,30 %	L.E = 810 MPa						
Ni = 1,90 %	A = 18 %						
Mo = 0,50 %	ChV (0°C) = 70J	1,2	20 - 30	120 - 350	1,5 - 6,6	(EM 439 M21)	

Fonte: Catálogo ESAB, disponível online.

Na composição química do eletrodo (MA) tem-se a presença de carbono, silício, manganês, cromo, níquel e molibdênio. Todavia, a composição química da chapa a ser soldada é mais complexa, apresentando em sua estrutura outros elementos que não estão contemplados na estrutura do MA.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Após a revisão bibliográfica, a qual apresentou noções técnicas sobre os aços ARBL, o processo de solda GMAW, parâmetros de soldagem, juntas de solda, aporte térmico, metalurgia da soldagem e consumíveis, é necessário identificar as variáveis dos parâmetros de soldagem. Para isso, foram coletadas informações sobre os parâmetros utilizados em uma indústria metal-mecânica, a qual realiza soldagem GMAW de uma junta de topo com 5mm de espessura, na posição plana em um aço ARBL.

Em seguida, foram realizados dezesseis filetes de solda em dezesseis conjuntos de prova, utilizando-se as variáveis e os parâmetros coletados. Dos conjuntos soldados, foram retirados corpos de prova para realização de ensaios mecânicos e análise metalográfica para, então, determinar a influência dos parâmetros de soldagem GMAW na junta do aço ARBL S 700 MC. O fluxograma do procedimento adotado nesta dissertação está determinado na figura 28. O detalhamento de cada etapa é apresentado na sequência deste capítulo.

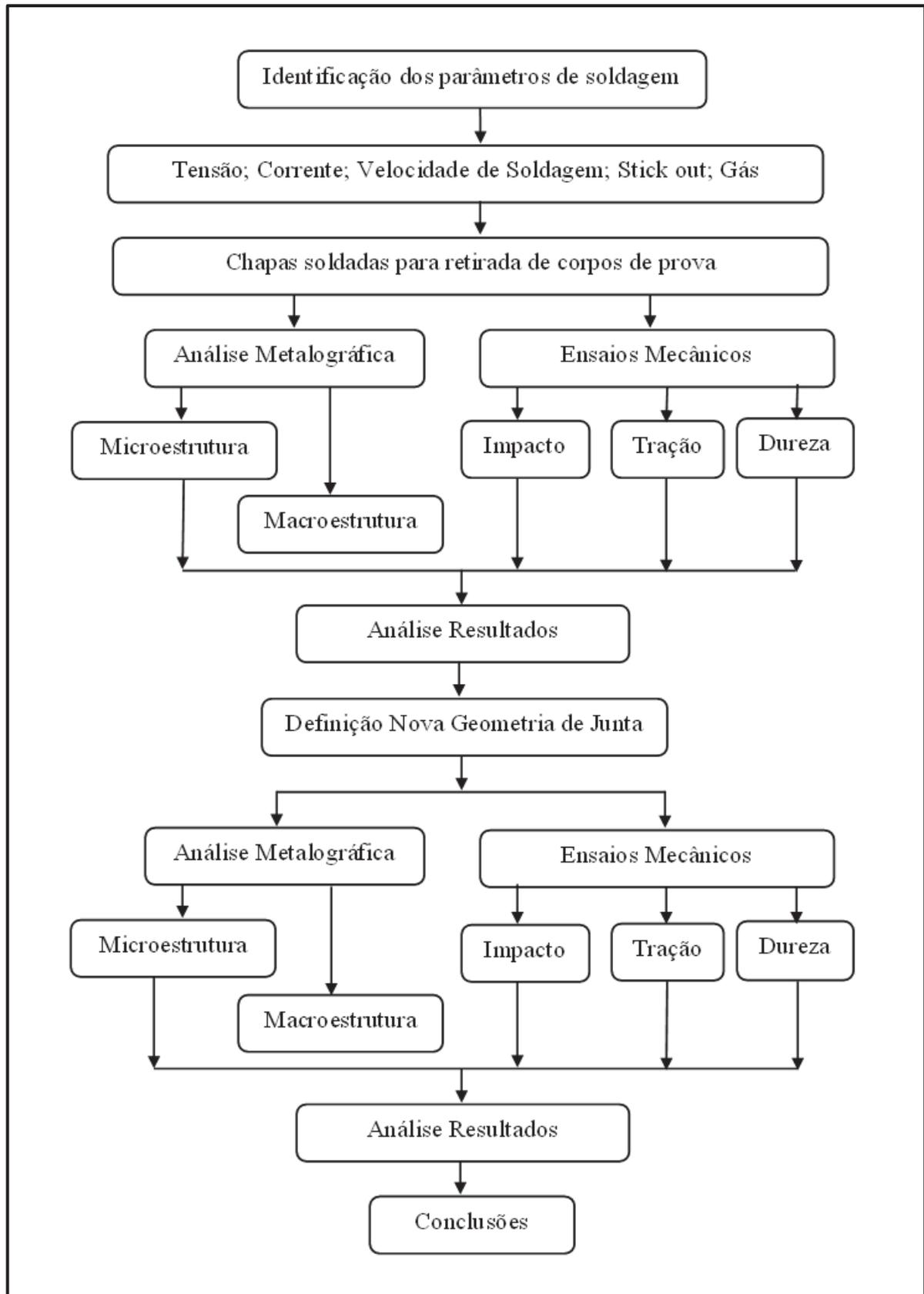


Figura 28: fluxograma do procedimento de trabalho

3.1 CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL

O material utilizado nos ensaios desta pesquisa é um tipo de aço ARBL S 700 MC com espessura de 5 mm com 110 mm de largura e 600 mm de comprimento. Foram cortados 32 conjuntos com estas dimensões para serem soldados em junta de topo na posição plana. Trata-se de um aço com alta resistência ao escoamento e baixa temperatura de transição de impacto. As propriedades mecânicas deste aço estão descritas no quadro 12.

Quadro 12: Propriedades mecânicas do aço ARBL

Propriedades Mecânicas S 700 MC							
Descrição	Tensão de Ruptura	Tensão de Escoamento	Alongamento		Raio de curvatura	Raio de curvatura	Raio de curvatura
	R_{eH} (N/mm ²) min.	R_m (N/mm ²) min.	mín. (%)		mín.(mm)	mín. (mm)	mín.(mm)
			$A_{80} t < 3$	$A_5 t \geq 3$	$t \leq 3$	$3 < t \leq 6$	$t > 6$
S 700 MC	700	750 - 950	10	12	0,8.t	1,2.t	1,6.t

Fonte: Catálogo SSAB AB, DOMEX (2012).

O limite de escoamento deste material é de 700 MPa, com limite de ruptura entre 750 MPa e 950 MPa. Seu alongamento mínimo é de 12%. Tem em sua composição química alumínio, níquel, cromo, cobre, nióbio, vanádio, chumbo e titânio. Possui baixa presença de carbono e elevado teor de manganês.

3.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Foram cortadas pelo processo a *laser* trinta e duas (32) peças com 101 mm de largura e 600 mm de comprimento do aço ARBL (S 700 MC) com 5 mm de espessura. Cada conjunto de prova foi fixado em uma mesa na posição horizontal, sem afastamento entre as bordas da junta de topo (figura 29).



Figura 29: Conjunto de prova soldado ARBL S 700 MC.

Os conjuntos foram soldados pelo processo GMAW. Foi utilizando o aparelho de soldagem do fabricante ESAB, modelo Smashweld 408. Este aparelho de solda possui faixa de tensão em vazio variável entre 18volts (v) a 45volts (v). Sua faixa de Corrente/Tensão varia de 50 ampères / 17 volts – 420 ampères / 35 volts e sua potência aparente é de 11,8 quilovolt ampère (kVA).

Foram soldados oito (8) conjuntos de prova, utilizando-se o arame de solda com diâmetro de 1,2 mm do fabricante ESAB (SFA/AWS A5.28 ER120S-G). Foi fixado um dispositivo no bocal da tocha para manter o *stick out* de 13 mm no processo de soldagem. O gás utilizado é composto por 95% de Ar e 5% de O₂ com vasão entre 10 l/min e 12 l/min.

Os demais oito conjuntos de prova foram soldados, utilizando-se arame de solda SFA/AWS A5.28 ER110S-G fornecido pela empresa SUMIG, com diâmetro de 1,2 mm. O gás utilizado é composto por 75% de Ar e 25% de CO₂ e vasão entre 12 l/min e 14 l/min. Para estes corpos de prova manteve-se o dispositivo no bocal da tocha, para garantir o *stick out*. Os parâmetros obtidos nos ensaios para cada corpo de prova (C.P) são apresentados no quadro 13.

Quadro 13: Parâmetros e valores da soldagem nos conjuntos de prova

Parâmetros e Valores da soldagem nos conjuntos de Prova								
C	G	E	Tensão (v)	Corrente (A)	Velocidade Soldagem Vs (m/min.)	(AE) Energia Arco (kJ/mm)	(HI) Entrada Calor (kJ/mm)	T8/5 (s)
1	1	1	25	290	0,86	0,506	0,405	5,7
2			23	236	0,39	0,835	0,668	12,3
3			25	270	0,73	0,55	0,44	6,6
4			22	224	0,43	0,688	0,55	9,3
5	2		25	290	0,76	0,572	0,458	7
6			21	224	0,38	0,753	0,603	10,6
7			25	277	0,75	0,563	0,45	6,7
8			21	226	0,32	0,915	0,732	14
9	1	2	23	280	0,85	0,457	0,365	4,8
10			18,4	184	0,26	0,781	0,625	11,2
11			23	280	0,42	0,944	0,755	14,6
12			18,8	188	0,3	0,707	0,566	9,7
13	2		21,5	226	0,56	0,616	0,492	7,9
14			18,5	180	0,23	0,864	0,691	12,9
15			21,5	252	0,48	0,665	0,532	8,8
16			18,5	184	0,23	0,883	0,707	13,3
Legenda:								
Gás 1 - (95% Ar + 5% O ₂)			Eletrodo 1 - ESAB (SFA/AWS A5.28 ER 120S – G)					
Gás 2 - (75% Ar + 25% CO ₂)			Eletrodo 2 - SUMIG, AWS A5.28/ ASTM SFA 5.28 E 110S - G					
E - Eletrodo		G - Gás		C - Conjunto de Prova				

Os valores dos parâmetros de tensão (v), intensidade de corrente (A) e velocidade de soldagem, bem como o tipo de eletrodo utilizado e o gás de proteção empregado, foram determinados em observações a uma empresa metal-mecânica. Esta empresa utiliza o aço ARBL com 5 mm de espessura em processo GMAW, com junta de topo na posição plana e sem afastamento de bordas, o que possibilita a utilização dos parâmetros para o estudo desta dissertação.

Após a realização das análises e ensaios dos corpos de prova com a junta já caracterizada, será determinada, se necessário, nova geometria de junta e novos parâmetros de soldagem que atendam os requisitos técnicos indicados.

3.3 PROCESSO DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova para os ensaios de tração, impacto, análise metalográfica e dureza, foram retirados das chapas soldadas, conforme figura 30.

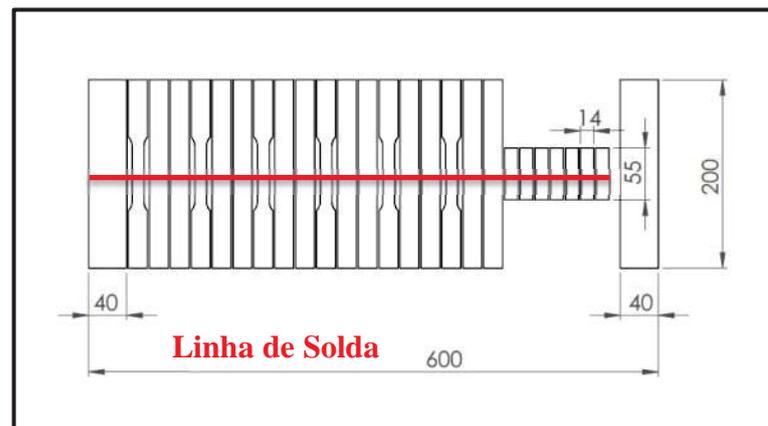


Figura 30: Desmembramento dos corpos de prova, do conjunto de prova soldado.

Os corpos de prova foram obtidos pelo processo de corte por jato de água em equipamento da *Changai Jin Jian Waterjet Equipment Manufacturing Co.Ltd.*, modelo GA SI JETSTREAM II com 400 MPa de capacidade. O corte por jato de água se faz necessário para preservação das propriedades do material na área cortada. Também foram retirados corpos de prova para ensaios de tração, impacto, dureza e análise química de uma peça com 101 mm de largura e 600 mm de comprimento, do aço ARBL (S 700 MC).

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios nos conjuntos de prova, para a determinação de propriedades dos materiais, tais como a resistência à tração, definição do limite de escoamento, ductilidade, dureza e tenacidade em presença de entalhe foram explorados na realização de ensaios de tração,

ensaio de impacto e ensaio de dureza. Ensaio não destrutivo (visual e de líquido penetrante) também foram realizados em todos os conjuntos de prova (quadro 14).

Para a realização dos ensaios, foram retirados 20 (vinte) corpos de prova de cada um dos 16 (dezesesseis) conjuntos soldados. Para os ensaios de tração foram utilizados 4 (quatro) corpos de prova, totalizando 64 (sessenta e quatro) ensaios; para os ensaios de impacto foram utilizados 8 corpos de prova, totalizando 128 (cento e vinte e oito) ensaios e para os ensaios de dureza, foram utilizados 8 corpos de prova, totalizando 128 (cento e vinte e oito) ensaios.

Na macrografia e micrografia foram utilizados 8 (oito) corpos de prova para cada situação, totalizando 128 (cento e vinte e oito) ensaios macrográficos e 128 (cento e vinte e oito) ensaios micrográficos. No total, foram realizados 576 (quinhentos e setenta e seis) ensaios. Utilizaram-se os mesmos corpos de prova para os ensaios de dureza, macrografia e micrografia.

Quadro 14: relação entre propriedades da junta soldada e métodos de ensaios

Métodos de ensaios	Ensaio de tração do metal base	Metal depositado		Junta de topo		Ensaio de dureza
		Ensaio de tração	Ensaio de impacto	Ensaio de tração	Ensaio de impacto	
Propriedades						
Resistência à tração	X	X		X		
Limite de escoamento	X	X		Y		
Ductilidade	X	X		Y		
Dureza						X
Tenacidade em presença de entalhe			X		X	
X - Bastante relacionado		Y - Relacionado, dependendo das condições				

Fonte: Adaptado de Okumura e Taniguchi (1982)

3.4.1 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados segundo a norma NBR NM ISO 6507-1:2008, na escala Vickers, no equipamento *Heckert, Werkstoffprüfmaschine*, utilizando-se carga de 5kP, medindo-se ao longo de uma linha de referência conforme demonstrado na figura 31.

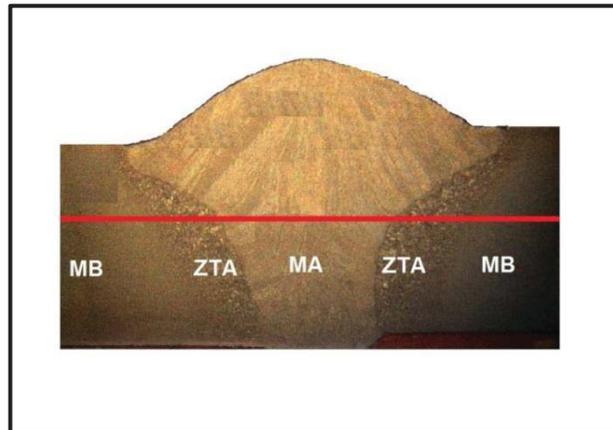


Figura 31: Representação das regiões do C.P soldado onde foram realizados os ensaios de dureza.

3.4.2 Ensaio de tração

Os corpos de prova de tração para chapas finas têm suas dimensões definidas na norma NBR ISO 6892-1:2013 e são apresentadas no quadro 15. Os ensaios foram realizados em chapa ARBL S 700 MC com espessura de 5 mm. As dimensões do C.P para ensaio de tração têm comprimento de 200 mm, largura inicial de 20 mm e largura menor de 12,5 mm, com um raio de concordância entre as larguras de 20 mm. O ensaio de tração foi realizado na máquina universal de ensaio, marca SCHENK, tipo UPM 200.

Quadro 15: Dimensões do C.P para chapas finas, segundo NBR ISO 6892-1:2013

Corpo de Prova	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	R (mm)
Chapa Fina - ABNT	75	12,5	20	200	20
Chapa Fina - ASTM	60	12,5	20	200	12,5

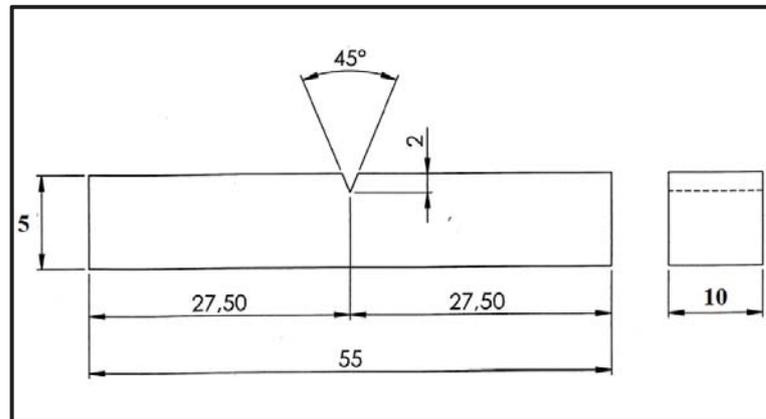
Fonte: Adaptado de Souza (1982).

A caracterização mecânica das juntas soldadas será o comparativo entre os resultados obtidos no ensaio de tração do material base e o ensaio da junta soldada. Desta forma, pode-se evidenciar se os resultados obtidos no ensaio de tração da junta soldada atende às especificações técnicas estabelecidas na norma NBR ISO 6892-1:2013.

3.4.3 Ensaio de impacto

Os corpos de prova para os ensaios de impacto foram definidos conforme a norma BS EN 10045 – 2:1993 e são apresentadas no quadro 16. Os fornecedores do aço ARBL utilizam esta norma para realização dos ensaios. Realizaram-se os ensaios de impacto em dispositivo de ensaio Charpy, marca HECKERT, com capacidade de 300J. O entalhe foi realizado na região do cordão de solda.

Quadro 16: Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto, segundo norma EN 10045 – 2:1993.



Fonte: Adaptado da norma EN 10045 – 2 : 1993.

3.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A análise metalográfica constituiu-se no estudo da composição e estrutura do aço ARBL e seu relacionamento com as propriedades mecânicas e químicas apresentadas e/ou esperadas. Foram realizadas análises macroestruturais e microestrutural no aço.

3.5.1 Análise macroestrutural e microestrutural

As análises macroestruturais e microestrutural foram realizadas nos corpos de prova cortados no sentido transversal à solda. As amostras foram embutidas em baquelite e lixadas gradativamente até a condição para acabamento espelhado por alumina. Foi utilizado ataque químico (Nital 3%) para revelação da microestrutura, conforme procedimento usual para análise metalográfica. A macroestrutura foi observada após as amostras serem submetidas ao ataque químico (Nital 3% + Iodo).

3.6 DEMAIS ENSAIOS REALIZADOS

Na soldagem dos conjuntos de prova, ocorreram variações mecânicas no resultado do processo realizado. Em razão desta evidência, foram realizados os ensaios visual e de distorção dimensional, para registrar a condição mecânica de pós-soldagem.

3.6.1 Avaliação da distorção dimensional

Foram verificadas as distorções dimensionais nos conjuntos de prova, medindo-se cada conjunto na máquina tridimensional, conforme figura 32:

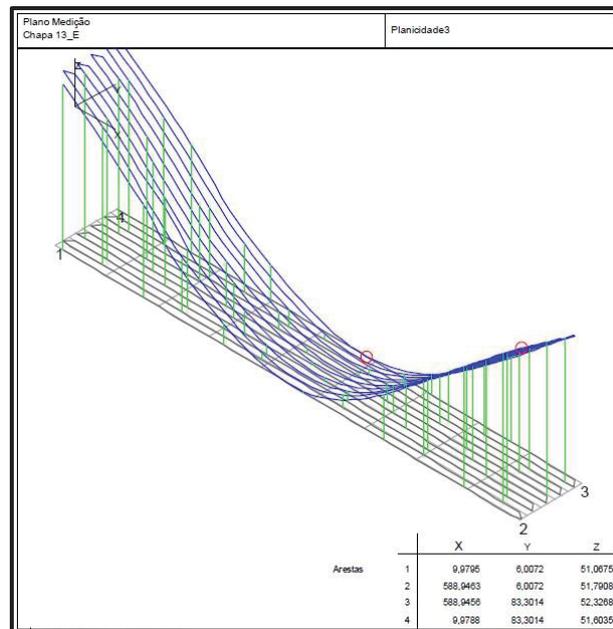


Figura 32: Distorções dimensionais dos conjuntos de solda.

3.6.2 Avaliação por inspeção visual dos cordões de solda

Depois de verificadas as distorções dimensionais, os conjuntos de prova foram submetidos à avaliação visual do cordão de solda conforme figura 33. Neste ensaio procurou-se evidenciar possíveis descontinuidades na execução da junta realizada.

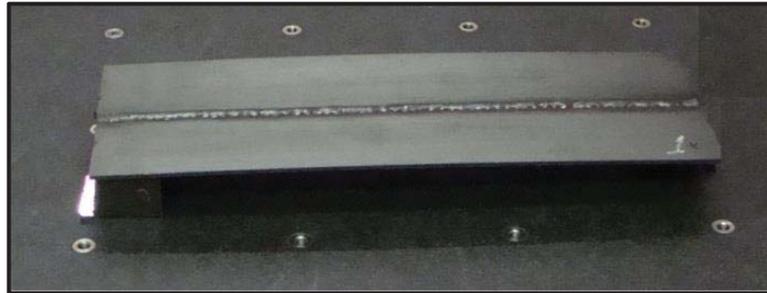


Figura 33: Inspeção visual conjuntos de prova

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos ensaios mecânicos, metalográficos, visual e de distorção dimensional, apresenta-se neste capítulo os resultados e respectivas discussões acerca da influência dos parâmetros de soldagem GMAW em AÇO ARBL S 700 MC.

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química do material ARBL S700 MC (quadro 16) indica a conformidade de valores estabelecidos pelo fornecedor e determinados pela norma EN 10149-2 no material base utilizado (quadro 17). Com base nos dados obtidos nesta análise não foram confirmadas alterações nos elementos químicos especificados pelos fabricantes, em atendimento à norma especificada. A análise foi realizada com um espectrômetro de emissão ótica (Espectro Lab S).

Quadro 17: Análise química do material

Análise Química do Material													
Qualidade	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Al	%Cu	%Ti	%V	%Ce	%Pb
S 700 MC	0,07	0,06	1,93	0,009	0,006	0,033	0,019	0,032	0,01	0,082	0,012	0,013	0,002

Entretanto, uma das principais informações a ser considerada para a soldabilidade do material é a definição dos teores de carbono e de micro constituintes no aço. O cálculo do carbono equivalente (CE) é necessário e orientará ações e cuidados no processo de soldagem. A aplicação das equações de CE para aços ARBL é válida, entretanto, podem gerar erros. Elementos como oxigênio, nitrogênio, titânio e boro são frequentemente omitidos nessas equações. O cálculo CE baseado no resultado da análise química realizada no material ARBL

é demonstrado na figura 34. Os valores foram obtidos utilizando-se o software disponível no site The Japan Welding Engineering Society (JWSE)³.

A soldabilidade e a resistência a trincamento pelo hidrogênio pode ser melhorada pela redução do teor de carbono e do carbono-equivalente do material, bem como, a utilização de aços com baixo limite de escoamento e alta ductilidade. Baixo teor de enxofre é recomendável para melhorar a soldabilidade geral dos aços. Quanto maior o valor do CE de um aço, maior sua sensibilidade à fissuração [Modenesi, 2009]. Um MB com o CE < 0,40 é considerado de fácil soldagem. Quanto menor o CE, maior será sua soldabilidade.

Composição Química de entrada (% em peso)						
C (<0,8)	0.07	Mo (<1,0)	0	Cu (<2,0)	0.01	N (<0,01)
Si (<1,5)	0.06	V (<0,1)	0.012	Ni (<10,0)	0.019	O (<0,01)
Mn (<3,0)	1.93	Nb (<0,1)	0.09	Cr (<10,0)	0.033	B (<0,003)
P (<0,025)		Ti (<0,1)	0.082			0.0001
S (<0,025)		Al (<0,1)	0.032			
Equivalentes de carbono (% em peso)						
		CE (IIW)		0,403		
		CE (WES)		0,402		
		Pcm		0,173		
		CEN		0,267		

Figura 34: Cálculo do carbono equivalente, segundo a JWSE.

Fonte: Software disponível em <http://www-it.jwes.or.jp>.

Considerou-se para o cálculo de CE as fórmulas de CE (IIW), CE (WES), CE (Pcm) e CE (CEN). Segundo Modenesi (2009), o cálculo de CE deve levar em consideração a verdadeira composição do material. Os valores resultantes indicam variações acentuadas para uma mesma composição química.

Quanto à utilização da fórmula para o cálculo adequado, Faria (2010) indica as fórmulas CE (PCM) e CE (CEN). Adotaremos o cálculo de CE (CEN) como referência e resultado. A especificação do material ARBL (quadro 18) indica os teores máximos de

³ Sociedade de Engenharia de Soldagem do Japão.

carbono, silício, manganês, fósforo, enxofre, alumínio, nióbio, vanádio e titânio. Os valores indicados foram utilizados para cálculo do CE, segundo IIW, WES Pcm e CEN.

Quadro 18: Composição química do aço ARBL S 700 MC segundo norma EN 10149-2

Composição Química S 700 MC									
Qualidade	%C máx.	%Si máx.	%Mn máx.	%P máx.	%S máx.	%Al min.	%Nb máx.	%V máx.	%Ti máx.
S 700 MC	0.12	0.10	2.10	0.025	0.010	0.015	0.09	0.20	0.15

Fonte: Catálogo SSAB – AB, DOMEX e norma EN 10149-2.

Os cálculos efetuados a seguir, consideraram a composição química indicada pela norma EN 10149-2 e os dados fornecidos pelo fabricante (composição máxima). O cálculo do CE, considerando a fórmula desenvolvida pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW), é a seguir apresentado:

$$CE (IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Ni+Cu)}{15} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} \quad \text{Equação nº 4}$$

Substituindo-se os valores na equação 4:

$$CE (IIW) = 0.12 + \frac{2.10}{6} + \frac{(0+0)}{15} + \frac{(0+0+0.20)}{5} ; \quad CE (IIW) = 0,51$$

O JWES utiliza a seguinte fórmula:

$$CE (WES) = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad \text{Equação nº 5}$$

Substituindo-se os valores na equação 5:

$$CE (WES) = 0,12 + \frac{0,10}{24} + \frac{2,10}{6} + \frac{0}{40} + \frac{0}{5} + \frac{0}{4} + \frac{0,20}{14}$$

$$CE (WES) = 0,488$$

A norma API 5L especifica que, quando o conteúdo de carbono é menor ou igual a 0,12 %, deve ser utilizada a fórmula de Ito e Bessyo para calcular CE:

$$CE (Pcm) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + (5xB) \quad \text{Equação nº 6}$$

Substituindo-se os valores na equação 6:

$$CE (Pcm) = 0,12 + \frac{0,10}{30} + \frac{2,10}{20} + \frac{0}{20} + \frac{0}{60} + \frac{0}{20} + \frac{0}{15} + \frac{0,20}{10} + (5x0)$$

$$CE (Pcm) = 0,248$$

Estudo realizado por Yurioka *et al* (1983) apresenta a seguinte fórmula para cálculo de CE:

$$CEN = C + f(C) \left\{ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{(Cr+Mo+Nb+V)}{5} + 5B \right\} \quad \text{Equação nº 7}$$

$$\text{Onde: } f(c) = 0,75 + 0,25 \tanh\{20(C - 0,12)\}$$

Substituindo-se os valores na Equação 7:

$$CEN = 0,12 + 0,026 \left\{ \frac{0,10}{24} + \frac{2,10}{6} + \frac{0}{15} + \frac{0}{20} + \frac{(0+0+0,09+0,012)}{5} + 5x0 \right\}$$

$$CEN = 0,270$$

Conforme Faria (2010), as fórmulas para cálculo de CE utilizadas (IIW, WES, Pcm e CEN) têm suas aplicações relacionadas ao teor de carbono presente no material. Segundo esta orientação, a fórmula de CE (Pcm) é mais adequada para aços com menor teor de carbono ($C \leq 0,16\%$). A fórmula CE (IIW) foi obtida a partir dos estudos em aços com teores mais elevados de carbono ($C \geq 0,18\%$). Já a fórmula CEN (combinação das fórmulas IIW e Pcm) é adequada para aços com diferentes teores de carbono (0,01 a 0,30%).

Para a realização dos cálculos de CE foi considerada a composição máxima indicada pelo fabricante do material e a composição química do material obtida em análise laboratorial. Os valores de CE obtidos variam segundo a metodologia empregada e são apresentados no quadro 19.

Quadro 19: Comparação do Resultado do cálculo do Carbono Equivalente (CE) para S 700 MC

Material	Carbono Equivalente			
	IIW	WES	CEN	Pcm
S 700 MC Fabricante	0,510	0,488	0,270	0,248
S 700 MC Analisado	0,403	0,402	0,267	0,173

O maior valor para CE (IIW) = 0,510 obteve-se considerando a máxima composição química do aço. Em seguida, têm-se CE (WES) = 0,488 como o segundo maior valor equivalente para a mesma composição. Considerando-se a análise química do material, os demais valores de CE calculados são inferiores a CE = 0,403.

O CE (Pcm) apresentou variação de 39% no resultado calculado para as composições consideradas. O CE (IIW) calculado para as duas composições do material apresentou variação de 26% no resultado. Já o CE (WES), calculado para as mesmas composições do material, apresentou variação de 21% no resultado. A menor variação (1%) foi obtida no cálculo do carbono equivalente total (CEN). Considerando-se os valores obtidos, segundo a metodologia Yurioka (CEN), o material é de fácil soldabilidade.

4.2 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA

A caracterização metalográfica da junta soldada será determinada através de macrografias e micrografias das juntas soldadas. Serão detalhadas a microestrutura do MB, da ZAC, região grosseira de grãos, região de refino de grãos (RRG) e metal de solda.

4.2.1 Análise macroestrutural

As discontinuidades encontradas na análise macrográfica do cordão de solda foram (a) embicamento, (b) desalinhamento, (c) falta de penetração, (d) mordeduras, (e) penetração excessiva e (f) reforço excessivo. Como cada conjunto de prova foi soldado utilizando-se valores diferentes para as variáveis do processo de soldagem, temos distintos fatores para cada discontinuidade evidenciada. Desta forma, podemos afirmar que os parâmetros de soldagem devem ser revisados para que sejam evidenciados os causadores das discontinuidades.

O embicamento, assim como o desalinhamento da junta soldada, pode ser consequência da inadequada preparação da junta; as mordeduras, perfurações e a penetração excessiva podem ser resultado da excessiva corrente de soldagem adotada ou baixa velocidade de soldagem da junta; a falta de fusão pode estar relacionada à baixa corrente de soldagem ou alta velocidade de soldagem do cordão de solda. O reforço excessivo, a alta taxa de deposição e presença de respingos indica baixa velocidade de soldagem, alta velocidade do arame e possível excesso da vazão de gás no procedimento de soldagem [Rodrigues, 2010].

No quadro 20 é apresentada a relação dos corpos de prova e suas discontinuidades e defeitos:

Quadro 20: Relação dos C.P e suas descontinuidades e defeitos

Corpo de Prova	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Embicamento	10	8	3	5	7	8	11	6	4	6	8	10	10	6	8	5
Desalinhamento	5	4	6	4	3	2	4	2	6	2	3	2	3	6	3	5
Falta Fusão	2	0	4	1	3	2	3	5	4	1	1	2	2	1	1	5
Mordedura	0	1	3	4	2	2	0	0	0	1	1	3	1	3	1	1
Penetração Excessiva	1	3	2	3	3	1	0	2	5	5	2	2	2	2	3	2
Reforço do Cordão Excessivo	2	2	2	3	2	5	2	5	1	5	5	1	2	2	4	2
TOTAL	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

As figuras 35 e 36 caracterizam as descontinuidades evidenciadas na análise macrográfica dos cordões de solda realizados.

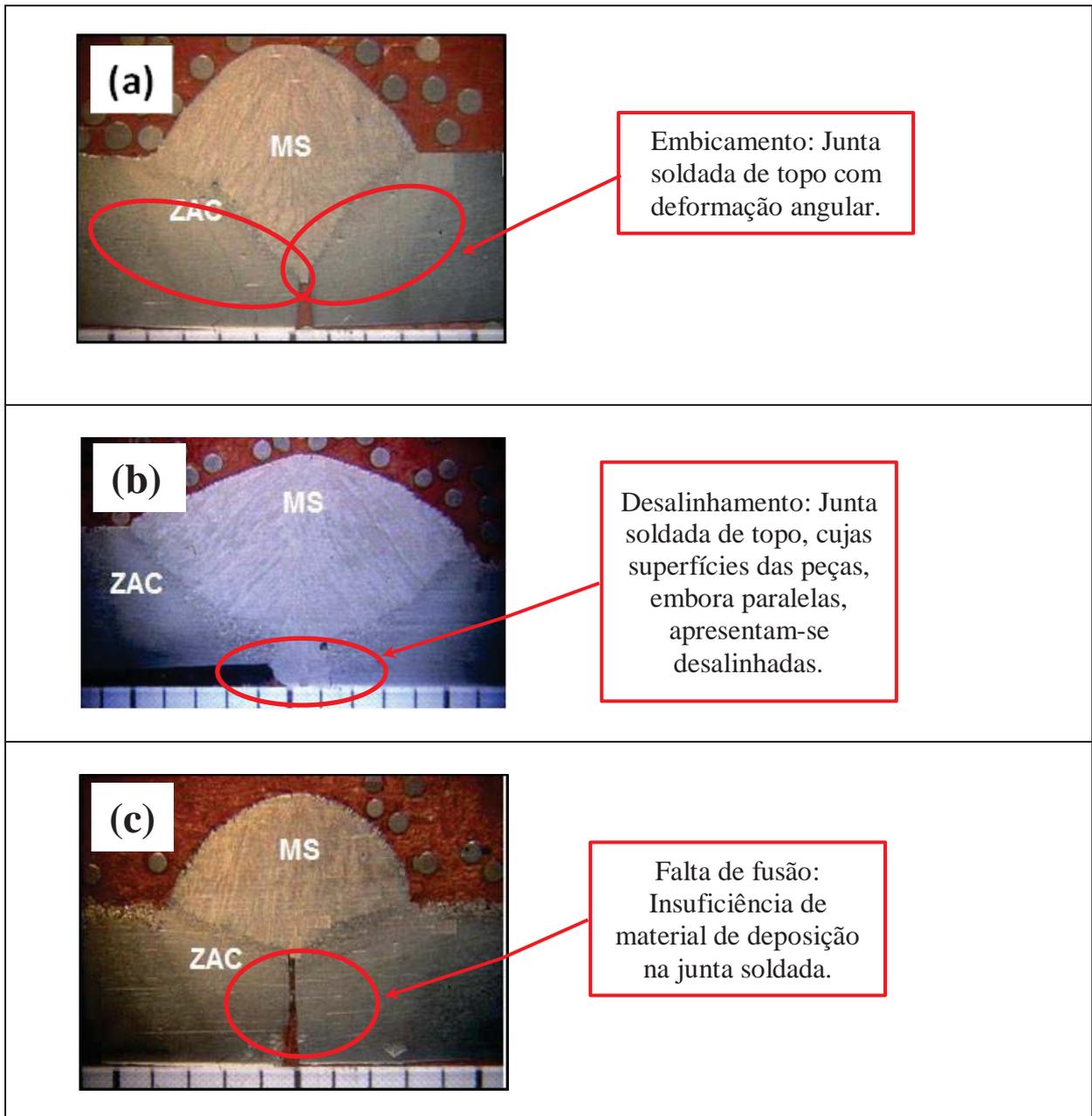


Figura 35: descontinuidades evidenciadas na análise macrográfica dos cordões de solda: embicamento, desalinhamento e falta de fusão.

Os defeitos e descontinuidades são interrupções na estrutura típica de soldagem. O embicamento, o desalinhamento e a falta de fusão foram evidenciados na maioria dos cordões soldados. Na figura 36 são apresentadas mordeduras, penetração excessiva e reforço excessivo. Todos os defeitos e descontinuidades são resultantes das práticas operativas no processo de soldagem GMAW em estudo.

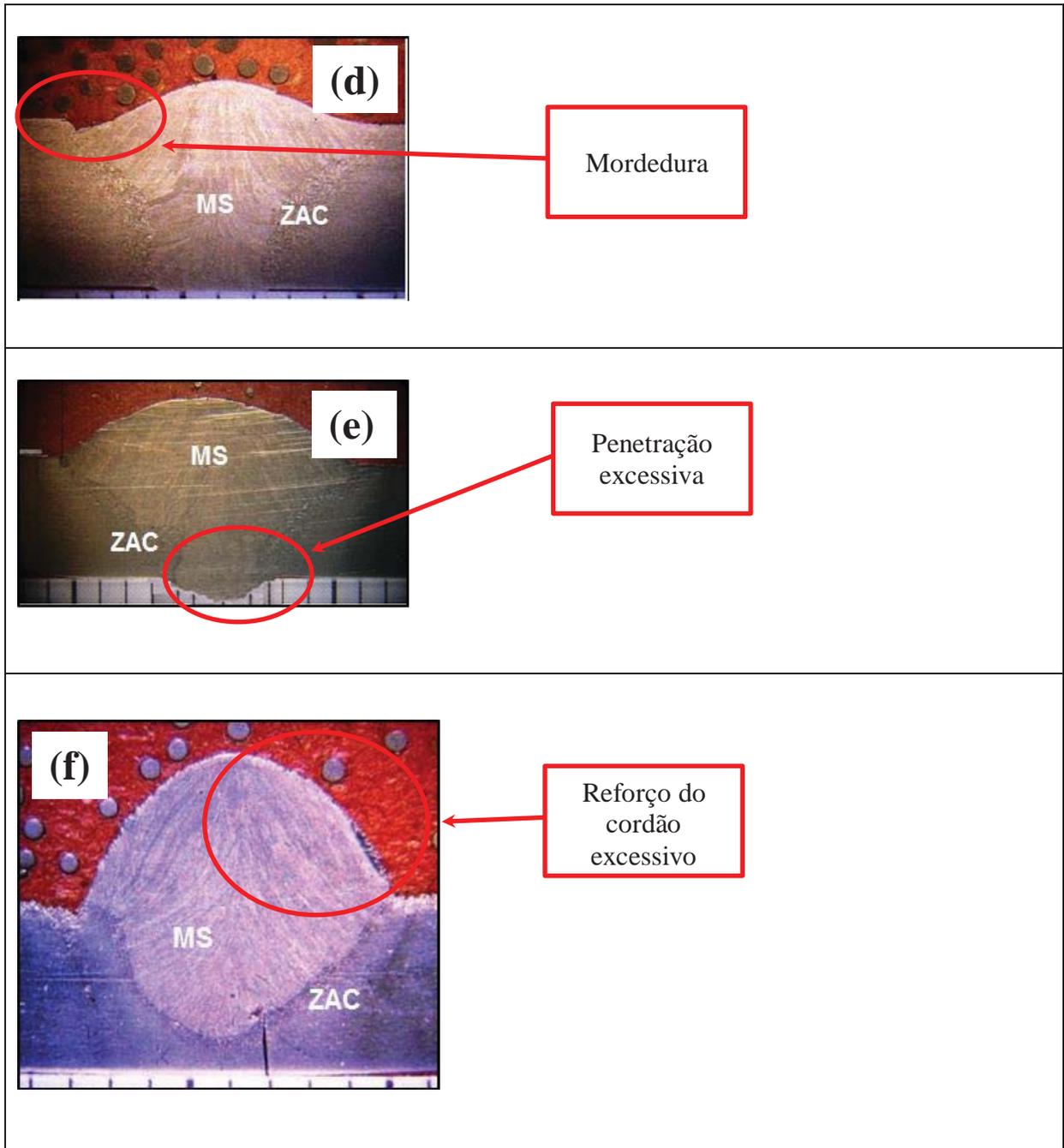


Figura 36: descontinuidades evidenciadas na análise macrográfica dos cordões de solda: mordedura, penetração excessiva e reforço do cordão de solda excessivo.

As mordeduras e a penetração excessiva podem ser ocasionadas pela inadequada regulação da intensidade de corrente (intensidade elevada), arco voltagem muito longo (mordedura) ou velocidade de soldagem muito lenta. O reforço excessivo do cordão de solda

pode ser ocasionado pela velocidade de soldagem lenta e intensidade de corrente baixa, aliada a tensão de arco elevada.

4.2.2 Análise microestrutural

Foram realizadas micrografias das diversas regiões da junta soldada em todos os corpos de prova. Na figura 37 apresenta-se a identificação microestrutural do material base. Percebe-se o material de adição, a zona atacada pelo calor com indicações das regiões de crescimento de grão (RCG) e região de refino de grão (RRG).

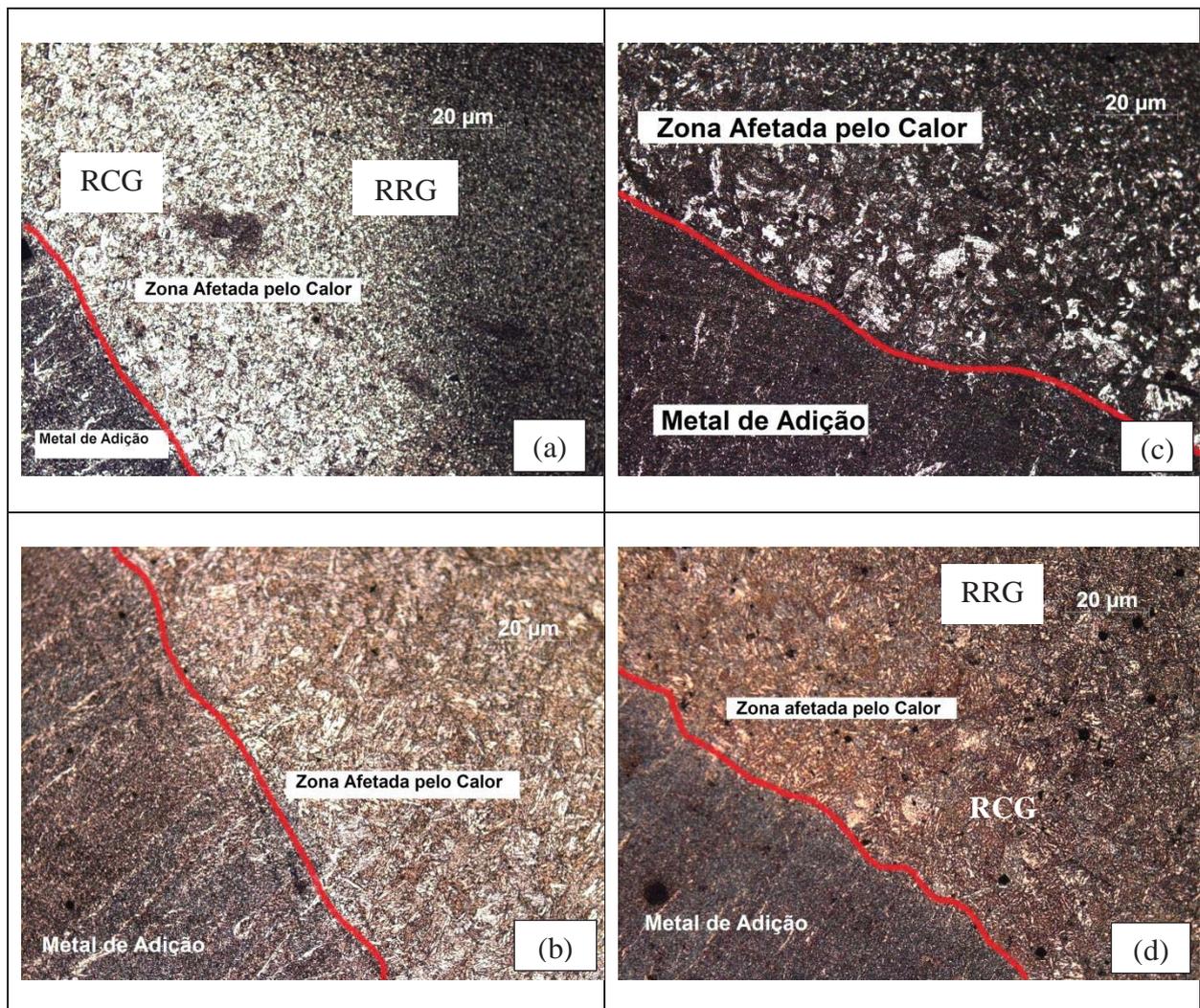


Figura 37: Micrografia metal de solda e zona afetada pelo calor das amostras retiradas dos corpos de prova 2 (a), 8 (c), 9 (b) e 11(d). Metal de adição.

É possível evidenciar a grande semelhança da microestrutura nas amostras. Na ZAC é nítida a formação da RCG e a RRG. A linha vermelha indica a fronteira entre o material de adição e a ZAC. Os corpos de prova nº 2, 8, 9 e 11 da figura 36 representam os quatro grandes grupos de variação microestruturais evidenciadas neste estudo.

Na ZAC da junta soldada é possível identificar a recristalização ocorrida após o processo de soldagem GMAW. A RCG na ZAC apresenta grãos maiores que os grãos percebidos no MA. NA RRG é possível identificar a redução dos grãos, que são menores e com diferente estrutura micrográfica, como veremos a seguir.

Na figura 38 é apresentada a microestrutura do material base. Foi possível verificar que esta microestrutura é constituída por perlita e grãos muito finos de ferrita. A granulação refinada é resultado da presença de carbonetos, que foram produzidos na laminação controlada para retardar o crescimento dos grãos.

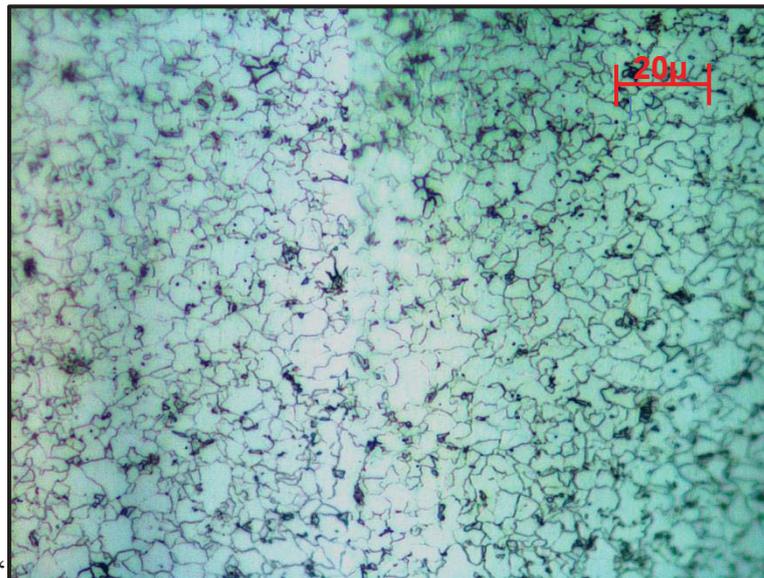


Figura 38: Microestrutura do material base, composto de ferrita (áreas claras) e perlita (área escura).

Na figura 39 observa-se a microestrutura da ZAC na RRG. Percebe-se a redução do tamanho de grão ferrítico, indicação de alteração por aquecimento nesta região. A microestrutura é composta por ferrita poligonal e agregados de carbonetos e ferrita.

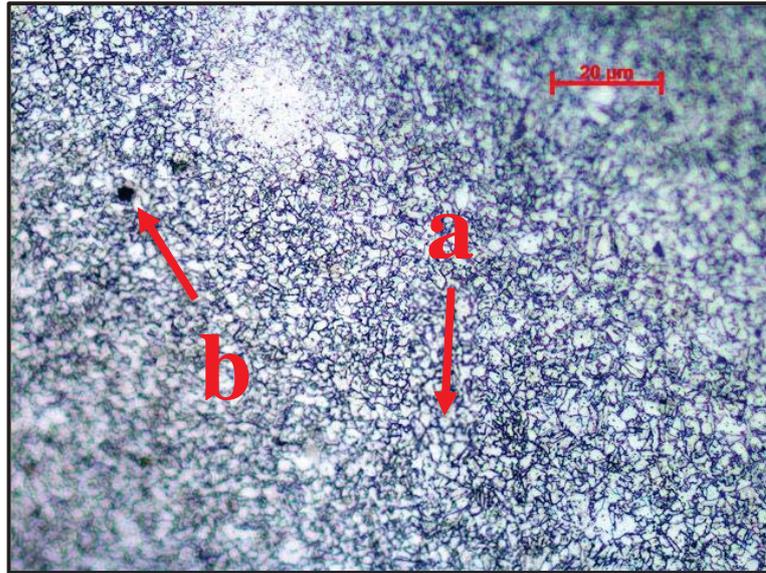


Figura 39: Região de refino de grão (RRG) na zona afetada pelo calor. Microestrutura formada por ferrita poligonal (a) e agregados de carbonetos e ferrita (b).

A micrografia do MA nos corpos de prova ensaiados pode ser observada na figura 40. Três morfologias de ferrita podem ser vistas: (a) ferrita alotriomorfa, (b) ferrita de Widmanstätten e (c) ferrita acicular.

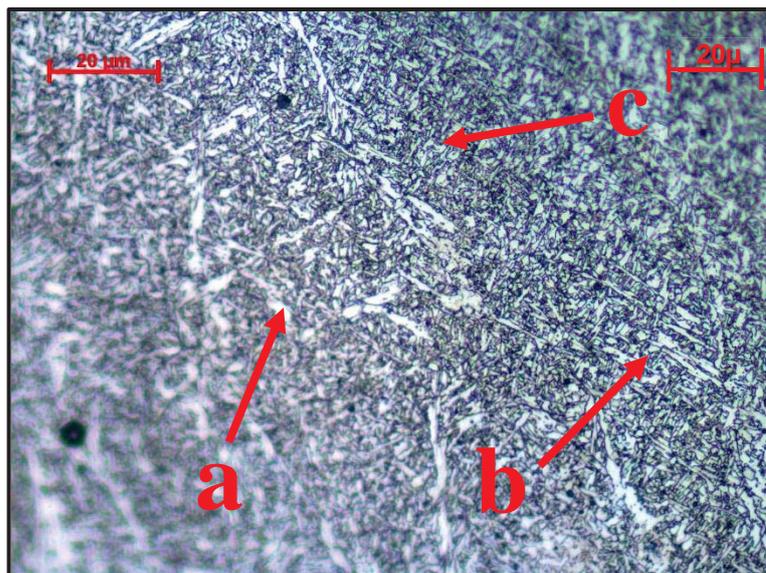


Figura 40: Metal de adição (MS) e morfologias de ferrita; (a) ferrita alotriomorfa; (b) ferrita de Widmanstätten; (c) ferrita acicular.

A figura 41 mostra a micrografia da ZAC em sua RCG. Podemos evidenciar : (a) Bainita em forma de penas, (b) possível Bainita Acicular; (c) Ferrita poligonal, (d) Ferrita de Widmanstätten.

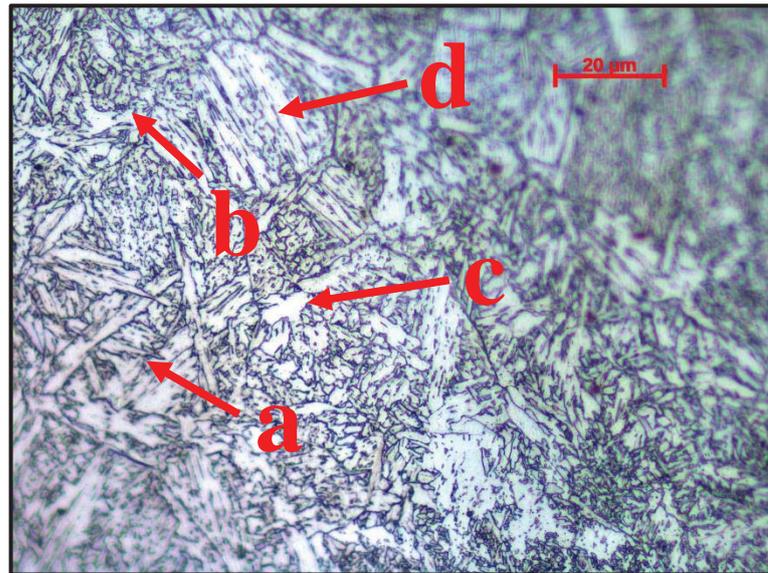


Figura 41: Microestrutura da RCG do C.P 8. (a) Bainita em forma de penas, (b) possível Bainita Acicular; (c) Ferrita poligonal, (d) Ferrita de Widmanstätten.

Foram identificadas nas micrografias realizadas, as microestruturas características no material base, no material de adição e na zona afetada pelo calor. Para melhor determinar as propriedades mecânicas da junta soldada, serão realizados os ensaios mecânicos, apresentados no próximo tópico.

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Foram realizados os ensaios de tração, dureza e impacto (Charpy) nos corpos de prova soldados. Ainda, foram avaliadas as juntas soldadas quanto aos perfis dos cordões de solda e os parâmetros de soldagem identificados.

4.3.1 Ensaio de tração

Na figura 42 tem-se a caracterização do gráfico tensão X deformação obtido para o aço ARBL S 700 MC, observando-se o sentido de laminação do material. Os valores correspondentes à máxima tensão de ruptura do material situam-se entre 700 MPa e 900 MPa. A fase elástica do material situa-se entre 0 % e 2% da deformação (alongamento) inicial e a fase plástica finalizam entre 8% e 10% da deformação (alongamento).

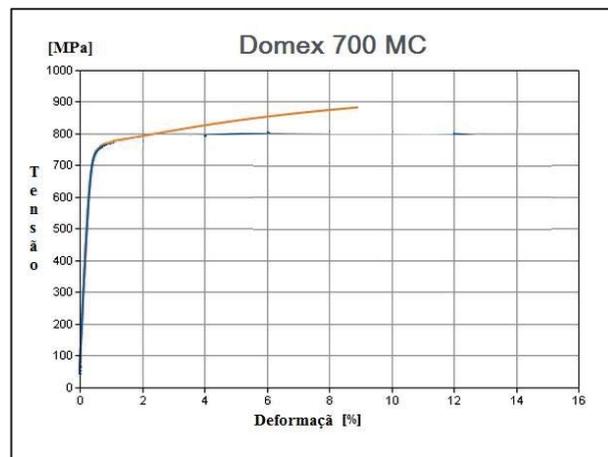


Figura 42: Gráfico de Tensão x Deformação para o aço S 700 MC.
Fonte: Catálogo SSAB – AB (2012)

Os resultados médios dos ensaios realizados na matéria prima e nos corpos de prova soldados são apresentados no quadro 18. Para o ensaio da matéria prima, os valores médios obtidos nos ensaios foram de 818 MPa para tensão máxima; 770 MPa para tensão de escoamento e o alongamento foi de 16%.

Os valores especificados na norma EN 10149-2 e as especificações determinadas pelos fabricantes da matéria prima têm seus valores máximos assim determinados: (i) tensão máxima 700 MPa; (ii) Tensão máxima de escoamento entre 750 MPa e 950 MPa , sendo o alongamento máximo estabelecido em 10%.

O resultado obtido nos ensaios confirma e qualifica a matéria prima utilizada como sendo um aço ARBL desenvolvido segundo a norma EM 10149-2, quanto aos aspectos

mecânicos aqui abordados. É importante ressaltar que estes valores obtidos serão referência para comparação dos resultados dos ensaios de tração nos corpos de prova, para determinação de suas propriedades mecânicas.

Foram ensaiadas dezesseis (16) variações de corpos de prova para determinação dos valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento nas juntas em estudo (quadro 20).

Quadro 19: Resultados do ensaio de tração para matéria prima ARBL S 700 MC

Valores indicados norma EN 10149-2		
Tensão de ruptura (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	Alongamento (%)
700	750 – 950	10
Valores médios obtidos matéria prima		
Tensão de ruptura (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	Alongamento (%)
818	770	16
Valores médios obtidos nos corpos de prova		
Tensão de ruptura (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	Alongamento (%)
408	394	3
Diferenças entre os valores: matéria prima e corpos de prova		
Tensão de ruptura (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	Alongamento (%)
-411	-376	-13

As variações encontradas foram significativas e diferem dos valores encontrados nos ensaios de tração realizados anteriormente na matéria prima. A Tensão de Ruptura encontrada, na média, foi de 408 MPa. Este valor representa, aproximadamente, 54% do valor resultante do mesmo ensaio na matéria prima. A tensão de escoamento média obtida no ensaio foi de 394 MPa. Este valor representa aproximadamente 51% do valor obtido no mesmo ensaio para matéria prima deste aço. O alongamento, por sua vez, alcançou o valor médio de 3%. No ensaio com a matéria prima, o alongamento máximo chegou a 16 %. Neste caso, o alongamento obtido nos ensaios das juntas soldadas representa somente 18,7% do que se estabeleceu no ensaio de referência (matéria prima). O resultado do cálculo do desvio padrão

para a tensão máxima de ruptura e o desvio padrão para a tensão máxima de escoamento foi de 30,2 MPa.

Os resultados individuais dos corpos de prova ensaiados encontram-se no gráfico da figura 43.

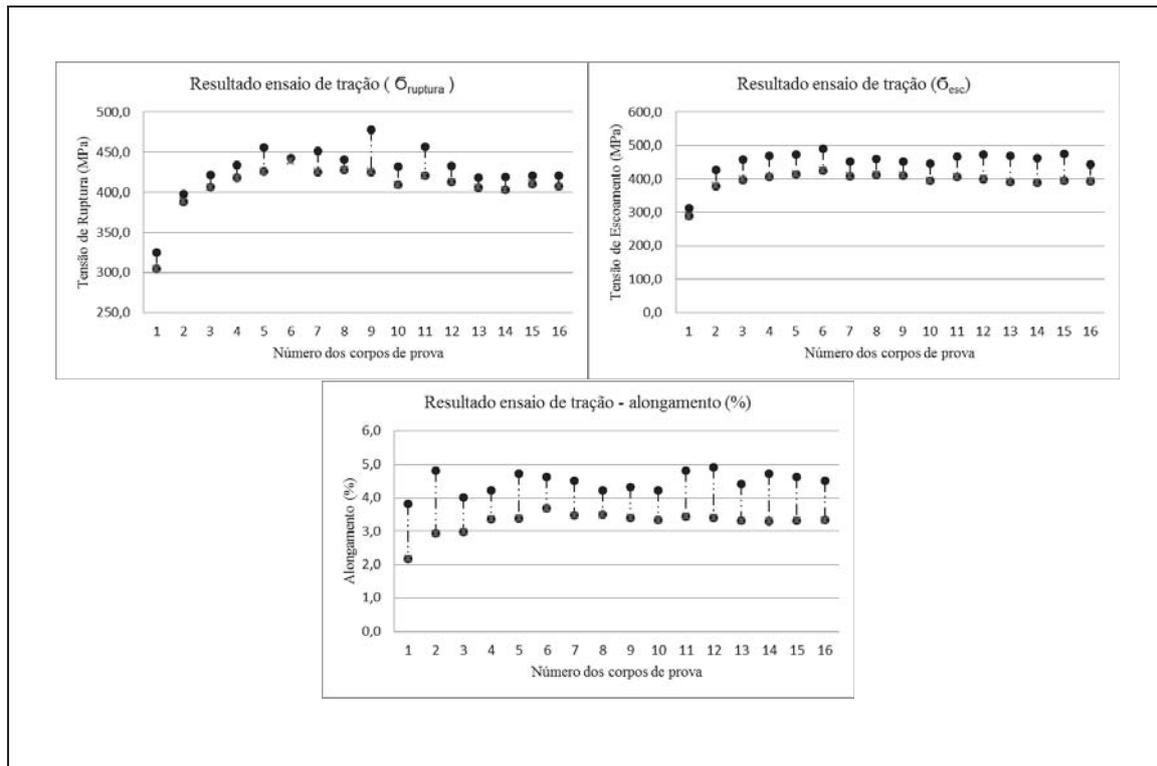


Figura 43: Gráfico representando as variações dos valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento dos corpos de prova soldados.

Os valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento máximo apresentaram uma relação linear e proporcional entre si. A amplitude obtida na análise da tensão máxima é de 134,5 enquanto o valor da amplitude para a tensão de escoamento é de 135,7. São valores que corroboram a proporcionalidade e indicam a homogeneidade dos resultados.

4.3.2 Ensaio de impacto

A matéria prima e os corpos de prova foram ensaiados em temperaturas de -20°C e -40°C. Cada conjunto soldado (16 conjuntos) foi ensaiado segundo a norma já citada. Os resultados médios obtidos nos ensaios e o resultado do desvio padrão são apresentados no quadro 21. Ressalta-se que o entalhe no corpo de prova foi realizado na região do cordão soldado, segundo indicação da norma EN 10045 – 2: 1993.

Quadro 20: Ensaios de impacto nos conjuntos soldados

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	σ padrão
- 20 ° C (J)	49	17	41	83	47	66	44	70	27	48	33	17	25	20	45	25	19,61
- 40 ° C (J)	27	31	43	103	29	34	20	43	15	25	31	10	25	19	17	7	22,04

No quadro 22 têm-se os resultados do ensaio de impacto na matéria prima e os valores determinados pelo fabricante para o ensaio da junta soldada, conforme segue.

Quadro 21: Ensaio de impacto realizado no aço ARBL S 700 MC e nos corpos de prova soldados.

Ensaio Impacto Aço ARBL S 700 MC		
Valores Indicados	-20 °C (J)	-40 °C (J)
Fabricante	40	27
Ensaio Matéria Prima S 700 MC	38	27
Ensaio dos Corpos de Prova Soldados	41	30

Os valores médios dos ensaios de impacto nos corpos de prova soldados atingiram valores condizentes com aqueles obtidos no mesmo ensaio na matéria prima. Os valores obtidos também atendem às especificações estabelecidas na norma EN 10045-1. O gráfico da figura 44 demonstra os valores do ensaio de impacto para os corpos de prova soldados. O desvio padrão calculado para os valores ensaiados em - 20° C foi de 19,61 J. Para o ensaio em

– 40 ° C o desvio padrão foi de 22,04 J. Os resultados do ensaio de impacto foram os que apresentaram maior discrepância nos valores de absorção de energia para cada C.P avaliado.

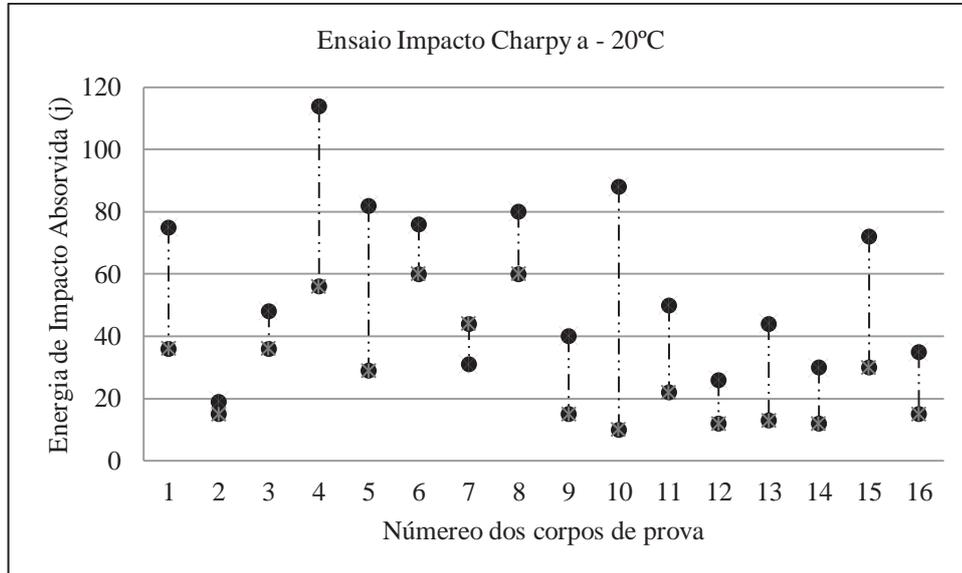


Figura 44: Resultado dos ensaios de impacto nos corpos de prova soldados.

O C.P nº 2 apresentou menor valor de absorção de energia em -20°C. O C.P nº 4 apresentou o maior valor de absorção de energia a -20°C. Quando submetidos ao impacto na temperatura de -40°C, os corpos de prova nº 4 e nº 16 apresentaram, respectivamente, o maior e o menor valor de absorção de energia.

É subentendida a influência dos defeitos e imperfeições das juntas soldadas nos valores de absorção de energia nos ensaios de impacto. As possíveis variações micrográficas nas regiões características das juntas também corroboram este entendimento. Considerando-se a penetração do cordão de solda, a largura do cordão realizado, a altura do reforço do cordão e a largura da ZAC, foram correlacionadas as dimensões citadas com os valores de absorção de energia obtidos no ensaio. Através de cálculos estatísticos (coeficiente de Pearson) obteve-se uma forte correlação entre o reforço do cordão de solda e a energia absorvida no ensaio (figura 45).

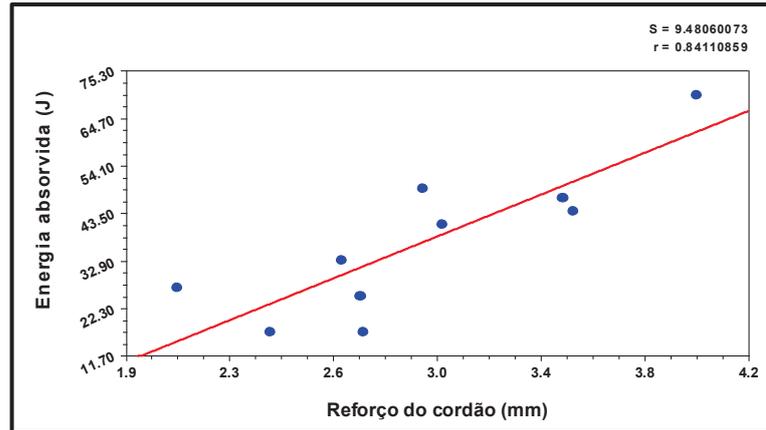


Figura 45: correlação do reforço do cordão de solda e energia absorvida no ensaio de impacto.

Quanto maior é o reforço do cordão de solda realizado, maior será o resultado de absorção de energia no ensaio de impacto. As demais dimensões do cordão de soldagem não apresentaram correlação significativa com os resultados obtidos.

4.3.3 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram realizados em 16 variações de corpos de prova soldados. Os pontos avaliados situam-se no MB nos dois lados do cordão de solda, na zona atacada pelo calor e no MA. As variações e resultados estão representados no quadro 23. Na figura 46 têm-se o gráfico sequencial dos valores do ensaio de dureza dos corpos de prova soldados.

Quadro 22: Dureza na soldagem dos conjuntos de prova.

C (HV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	$\bar{\sigma}$ PADRÃO
	MB	267	252	261	255	261	258	259	271	251	266	252	262	266	264	277	258
ZTA	246	245	229	223	237	230	242	224	225	225	226	216	225	223	243	243	9,67
MA	243	247	247	237	241	242	246	244	232	225	248	241	232	243	266	233	9,24
ZTA	237	235	231	233	231	231	238	219	215	221	227	223	226	227	245	224	7,76
MB	261	260	268	264	263	261	264	226	231	286	247	272	264	254	224	257	16,81

Considerando-se o resumo estatístico da análise de dureza do perfil da junta soldada, pode-se afirmar que no material base tem-se a dureza máxima de 286 Hardness Vickers (HV) e a dureza mínima de 224 HV. A amplitude, na variação da dureza do MB, foi de 62 HV. Considerando-se as variações relativas à aferição do equipamento de medição, o procedimento de medição e a homogeneidade do material a variação média é de 25% na dureza do material.

Em relação à ZAC, temos a dureza máxima de 246 HV e a dureza mínima em 215 HV. A amplitude na variação da dureza da ZAC ficou em 31 HV, ou seja, uma variação média de 13% na dureza da ZAC. No MA registrou-se a máxima dureza de 266 HV, e a mínima dureza de 225 HV. Tem-se uma amplitude de 41 HV, que corresponde a uma variação média de 16,5 %.

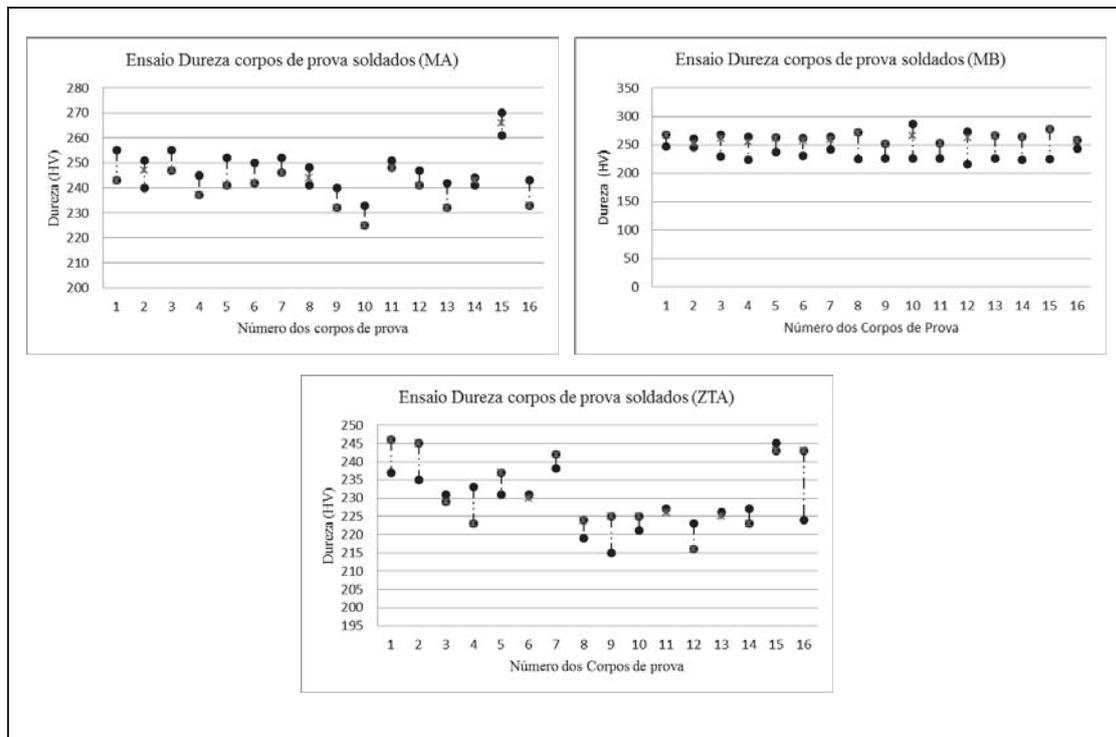


Figura 46: Ensaio de dureza dos corpos de prova soldados.

Considerando-se os fatores relacionados no processo de soldagem da junta pelo processo GMAW e calculando-se (figura 47) o percentual de martensita e a dureza através do software da JWSE para o C.P nº 2, o valor da dureza corresponde a 261 HV. A entrada de

calor corresponde a 0,668 kJ/mm, a percentagem de martensita é de 31 % e o tempo de resfriamento ($T_{8/5}$) é de 13 segundos.

Comparando-se os valores calculados (dureza; H.I; $T_{8/5}$) com os demais valores já obtidos (quadro 21), verifica-se uma variação de 5% nos valores da dureza do perfil da junta soldada e o tempo de resfriamento ($T_{8/5}$). Os demais valores são iguais. A variação entre os valores obtidos e os valores calculados (5%) indica homogeneidade dos resultados. A discrepância pode ser atribuída aos fatores inerentes ao processo de medição (método, aferição do equipamento, histerese...).

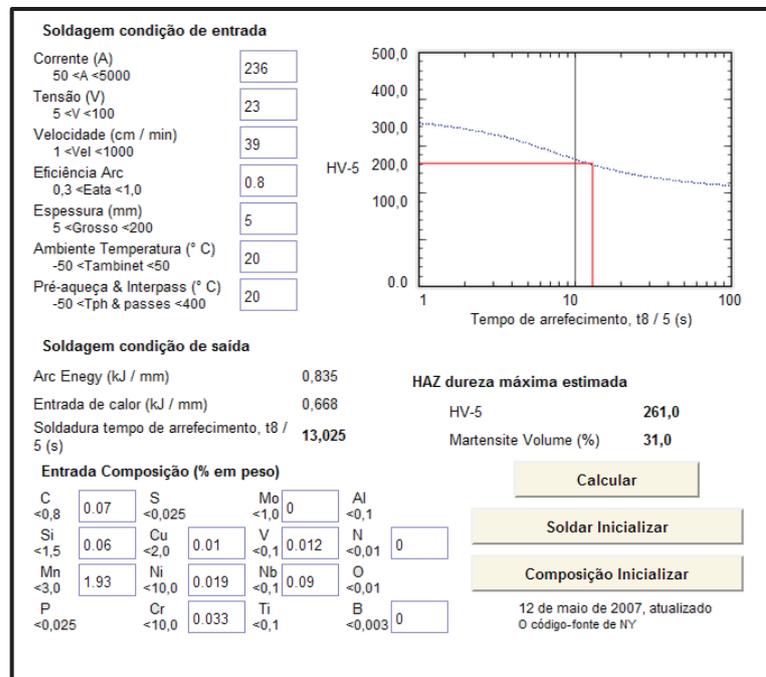


Figura 47: Cálculo do percentual de martensita, dureza, $T_{8/5}$ do C.P. nº2.

Os valores médios obtidos na avaliação de dureza do perfil da junta soldada (quadro 21) são respectivamente: 258 HV de dureza para o MB; 230 HV para a ZAC e 242 HV para o MA. A diferença entre a dureza da zona afetada pelo calor e o MB é de 10,8%. A diferença entre a dureza do metal de solda e o material base é de 6,2%. A diferença entre a dureza da ZAC e o MA é de 5%.

4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

O quadro 24 apresenta as dezesseis variações das geometrias dos perfis de cordões soldados na junta de topo. No quadro estão relacionados os parâmetros de soldagem utilizados na confecção das juntas, a entrada de calor na junta soldada (H.I), a velocidade de soldagem, a largura do cordão (L), a penetração da solda (P), o reforço do cordão obtido (R) e a medida da zona afetada pelo calor (Z).

Quadro 23: Parâmetros da soldagem e geometria do cordão de solda

	C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Opadrão
L (mm)	7,55	8,47	11,87	10,03	7,72	10,6	6,45	13,28	11,67	10,28	11,38	9,78	9,22	13,32	9,06	10,54	1,97	
R (mm)	2,98	2,76	3,05	3,49	3,49	2,84	3,53	3,98	2,08	1,10	2,68	2,42	2,75	2,94	2,96	2,85	0,66	
P (mm)	2,48	3,37	1,91	1,73	3,12	3,68	3,28	2,90	2,75	2,07	3,04	1,81	2,23	2,21	1,94	1,74	0,65	
Z (mm)	0,95	1,21	1,32	1,53	1,31	1,28	1,54	1,89	1,41	2,26	1,27	1,64	1,11	1,46	0,73	1,25	0,36	

Para os valores ajustados no processo de soldagem (tensão, corrente e velocidade de soldagem) têm-se diferentes resultados para a geometria do cordão de solda (largura, reforço, penetração e ZTA).

É notável a diferença em todas as dimensões geométricas dos cordões. A variação na largura do cordão tem amplitude média de 6,87 mm; a altura do reforço do cordão apresenta amplitude média de 2,88 mm e, na medida da penetração do cordão, a variação média da amplitude é de 1,95 mm. Na ZTA a amplitude média é de 1,53 mm.

Será considerado o conceito de correlação linear para análise da influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão de solda. Segundo Fonseca e Martins (1993), a correlação linear é uma correspondência entre duas variáveis, cujo gráfico aproxima-se de uma linha. É uma linha de tendência, porque procura acompanhar a tendência da distribuição de pontos, que pode corresponder a uma reta ou a uma curva. Por outro lado, é, também, uma linha média, porque procura deixar a mesma quantidade de pontos abaixo e acima da linha.

O mesmo autor afirma que o coeficiente de correlação linear pode ser apresentado como uma medida de correlação. Tem como finalidade indicar o nível de intensidade que ocorre na correspondência entre as variáveis estudadas e pode ser positivo ou negativo. O sinal positivo do coeficiente indica que o sentido da correlação corresponde a uma reta de inclinação descendente e, o sinal negativo, corresponde a uma reta de inclinação ascendente. Utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) nesta avaliação.

O valor do coeficiente r tem a variação definida pelo intervalo $[-1; +1]$. Desta forma teremos:

- $r = +1$ (correlação positiva entre as variáveis);
- $r = -1$ (correlação perfeita negativa entre as variáveis);
- $r = 0$ (não há correlação entre as variáveis ou a correlação não é linear).

Quanto mais próximo o valor de r estiver do valor zero, mais fraca a correlação linear e, quanto mais próximo de 1, mais forte será a correlação linear. O coeficiente de Pearson é semelhante ao coeficiente de regressão de uma reta ajustada num diagrama de dispersão. Na figura 48 é apresentada a reta indicativa dos valores de r e sua significação nas correlações.

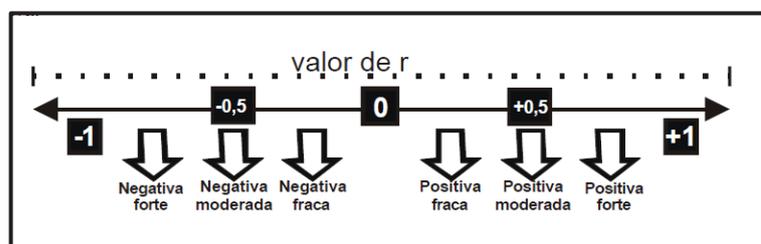


Figura 48: reta indicativa dos valores de r e sua significação nas correlações.
Fonte: Adaptado de Fonseca e Martins (1993)

A partir da reta indicativa (figura 49) foram estabelecidos critérios e condições de avaliação para os graus de relação entre os parâmetros analisados. Criou-se, então, o quadro 25 que representa a sistemática de avaliação destes parâmetros.

Quadro 24: Representação dos critérios e condições da avaliação dos parâmetros analisados

CRITÉRIO	INDICAÇÃO	CONDIÇÃO
FORTE	F	$0,8 \leq r \leq 1$
RAZOÁVEL	R	$0,39 \leq r \leq 0,79$
NENHUM	N	r inferior a 0,39
r = Coeficiente de correlação linear		

No processo GMAW os parâmetros e variáveis de soldagem estão correlacionados e, influenciam os resultados da soldagem. A tensão de soldagem e a intensidade de corrente apresentam forte correlação positiva (figura 49). As demais correlações são apresentadas considerando-se os resultados obtidos no processo de soldagem e, as influências destes na dinâmica de soldagem do cordão de solda. Aumentando-se a tensão de soldagem tem-se o aumento da intensidade de corrente, proporcional à soldagem requerida.

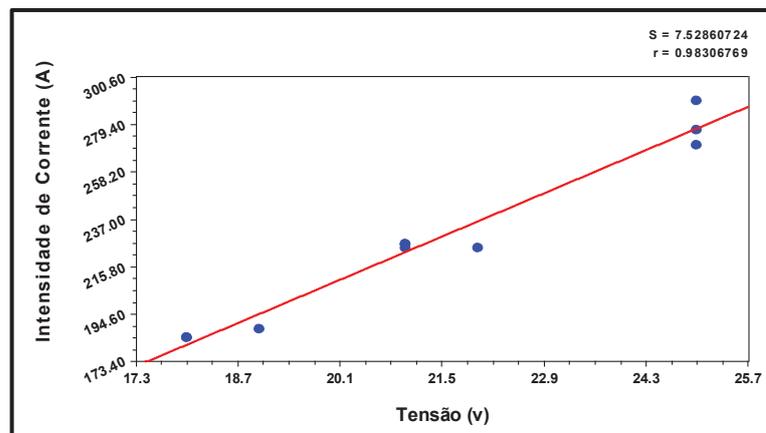


Figura 49: Relação entre a tensão de soldagem e a intensidade de corrente.

Analisando-se a influência da velocidade de soldagem na largura da ZAC, tem-se o valor de $r = 0,481$. Isto significa que a velocidade de soldagem possui razoável influência na largura da ZAC. Quanto maior a velocidade de soldagem, menor é a largura da ZTA no cordão da solda.

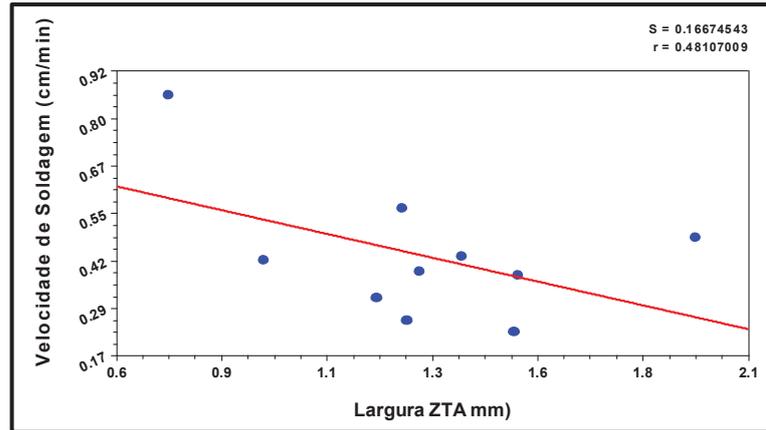


Figura 50: Influência da velocidade de soldagem na largura da ZTA.

Quando comparamos a influência da entrada de calor do arco de soldagem em relação à largura da ZAC, neste caso $r = 0,009$, é indicação de que não existe correlação entre as variáveis. O tempo de resfriamento do cordão de solda também não possui nenhuma influência na dimensão da largura da ZAC, pois o valor de $r = 0,0007$.

Analisando-se a influência da intensidade de corrente (A) em relação à largura (L), reforço (R), penetração (P), velocidade de soldagem, aporte de calor do arco (H.I), tempo de resfriamento do cordão de solda ($T_{8/5}$) e largura afetada pelo calor (Z) temos:

- A Intensidade de Corrente tem forte correlação negativa com a largura do cordão de solda $r = 0,911$;

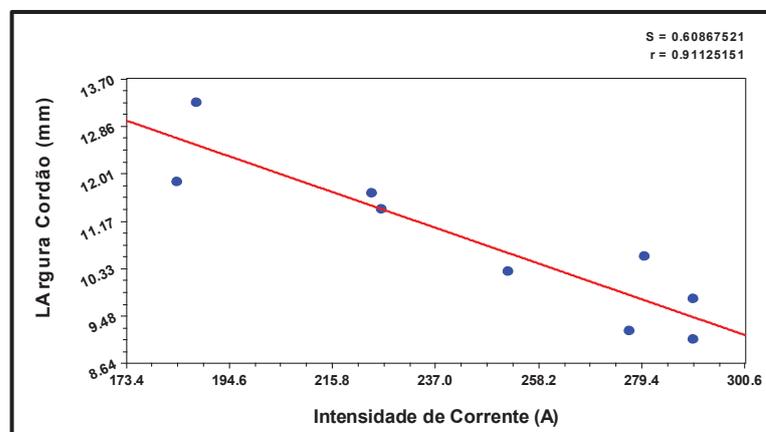


Figura 51: Relação entre intensidade de corrente e largura do cordão de solda.

A intensidade de corrente e a largura do cordão de solda são parâmetros inversamente proporcionais. Quanto maior a intensidade de corrente, menor será a largura do cordão de solda pois, no processo de soldagem GMAW a intensidade de corrente está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame. Quando a velocidade do arame é alterada a corrente de soldagem também varia, assim como, varia a velocidade de soldagem (figura 52).

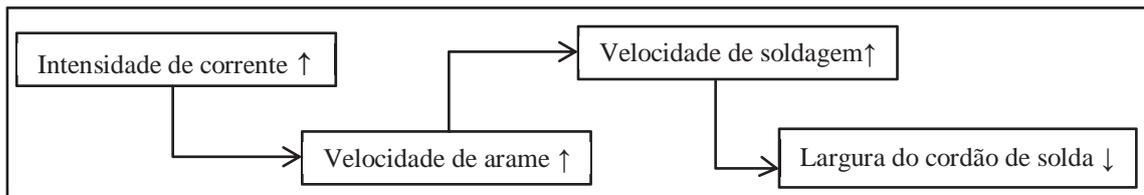


Figura 52: Correlação de intensidade de corrente, velocidade de arame, velocidade de soldagem e largura de cordão.

- A Intensidade de Corrente não tem correlação significativa com o reforço do cordão de solda $r = 0,34$. Quanto maior a intensidade de corrente, maior deverá ser a velocidade de soldagem (proporcionalmente) e, por consequência, menor será o reforço do cordão de solda.
- A Intensidade de Corrente tem forte correlação negativa com a penetração do cordão de solda $r = 0,903$ (figura 53);

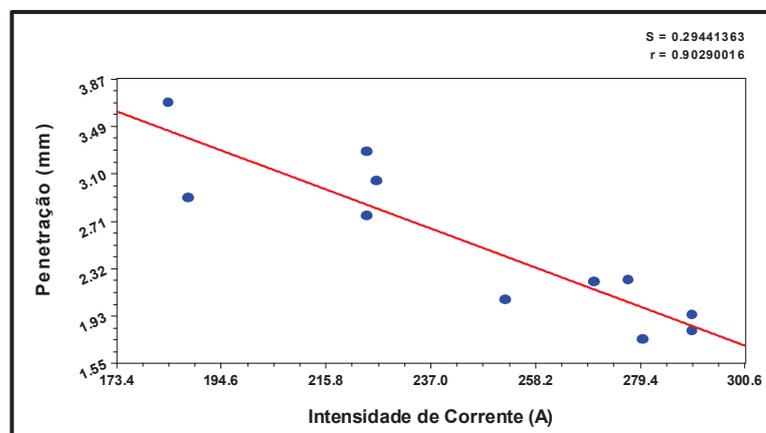


Figura 53: Correlação entre intensidade de corrente e penetração.

Aumentando-se a intensidade de corrente, tem-se menor penetração do cordão de soldagem. Isto ocorre porque a intensidade de corrente é função da velocidade de soldagem (figura 54). Aumentando a intensidade de corrente, tem-se aumento da velocidade de soldagem.

- A Intensidade de Corrente apresenta forte correlação positiva com a velocidade de soldagem (figura 54), com $r = 0,943$;

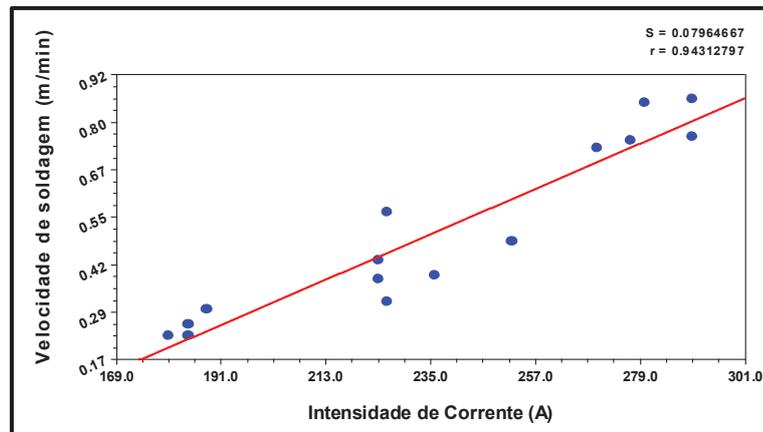


Figura 54: Relação entre intensidade de corrente e velocidade de soldagem.

A intensidade de corrente está diretamente relacionada à velocidade de soldagem. Aumentando a intensidade de corrente, aumenta-se proporcionalmente a velocidade de soldagem.

- A Intensidade de Corrente apresenta forte correlação negativa com o aporte de calor do arco (figura 55) $r = 0,905$;

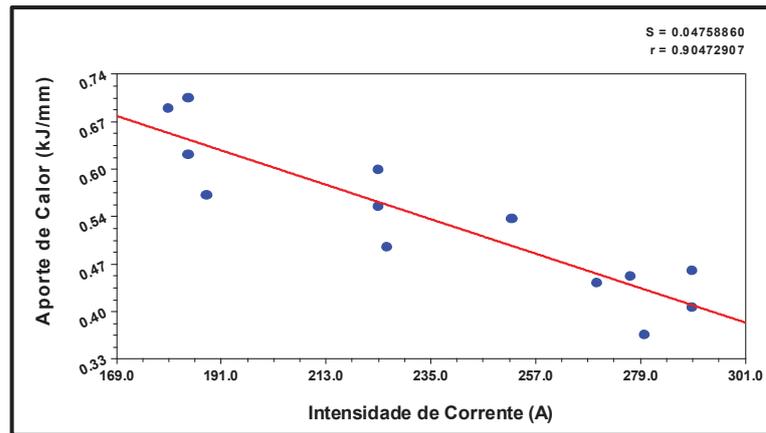


Figura 55: Correlação entre intensidade de corrente e aporte de calor.

- A Intensidade de Corrente apresenta forte correlação negativa com o tempo de resfriamento do cordão de solda (figura 56) $r = 0,908$. Aumentando a intensidade de corrente, diminui o tempo de resfriamento do cordão de solda, pois a intensidade de corrente elevada exige velocidade de soldagem mais rápida. Desta forma, o calor gerado na soldagem dissipa-se mais rapidamente em função da dinâmica do processo de soldagem do cordão.

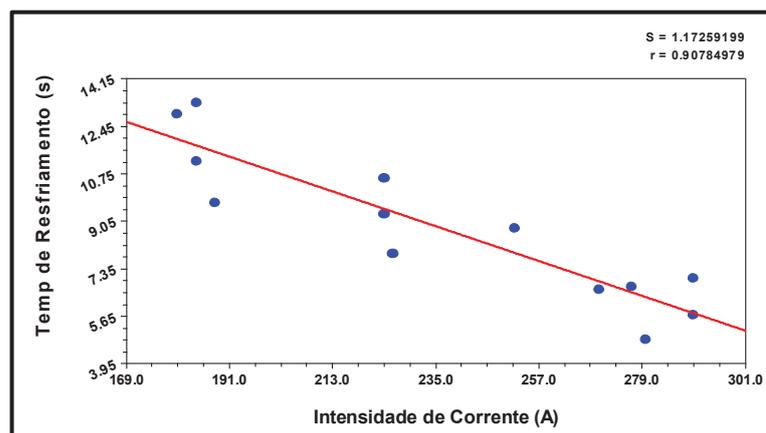


Figura 56: Relação entre intensidade de corrente e tempo de resfriamento do cordão de solda.

- A Intensidade de Corrente apresenta correlação negativa razoável com a largura da ZAC (figura 57) $r = 0,577$;

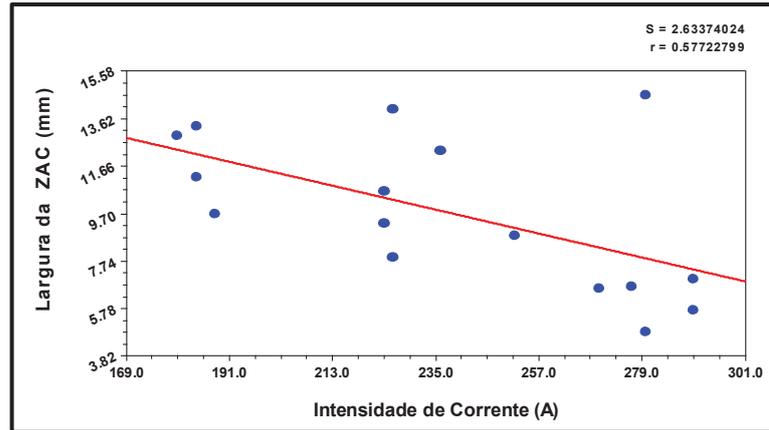


Figura 57: Correlação intensidade de corrente e largura (mm) da ZAC.

- Verificando-se a intensidade de corrente e a dureza da ZAC, constata-se a forte relação existente entre ambos. Com coeficiente $r = 0,818$, quanto maior a intensidade de corrente, maior será a dureza da ZAC (figura 58).

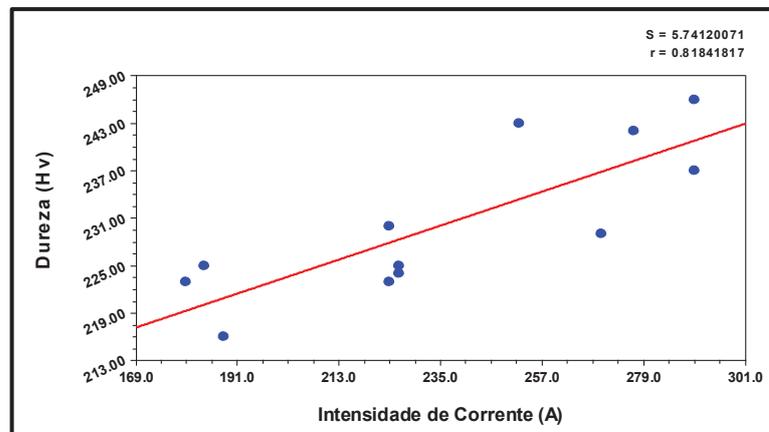


Figura 58: Correlação entre intensidade de corrente e dureza da ZAC.

Analisando-se a influência da tensão (v) em relação à largura (L), reforço (R), penetração (P) e tempo de resfriamento do cordão de solda ($T_{8/5}$), temos:

- A tensão não apresenta correlação com o tempo de resfriamento do cordão de solda $r = 0,188$;

- A tensão apresenta forte correlação com a largura do cordão de solda, sendo $r = 0,887$ (figura 59). Quanto maior a tensão de soldagem, maior será a largura do cordão realizado.

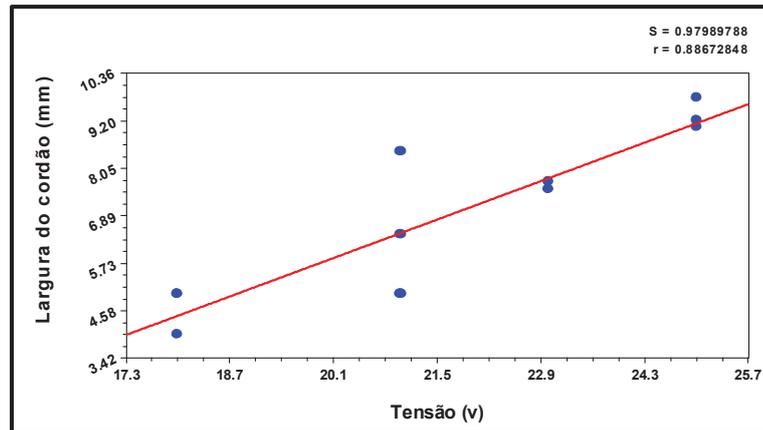


Figura 59: Correlação da tensão (v) com a largura do cordão de solda.

- A tensão apresenta forte correlação negativa (figura 60) com a penetração do cordão de solda, com $r = 0,816$. Isto significa que quanto maior a tensão, menor será a penetração do cordão de solda realizado.

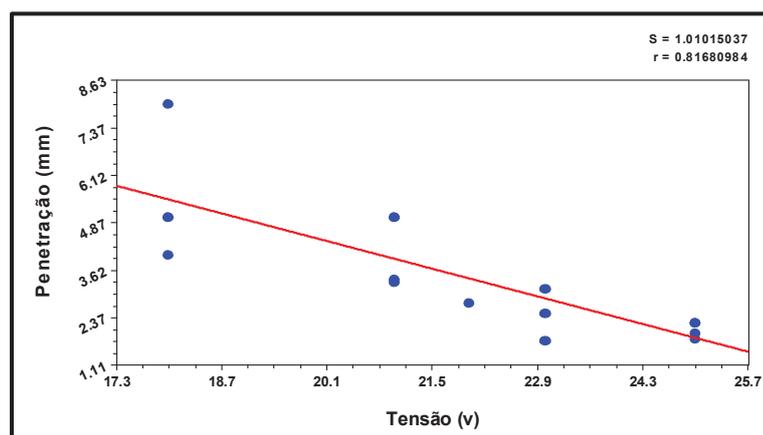


Figura 60: Correlação da tensão (v) e a penetração do cordão de solda.

- A tensão apresenta forte correlação negativa (figura 61) com o reforço do cordão de solda. Isto significa que aumentando a tensão tem-se a redução do reforço do cordão de solda.

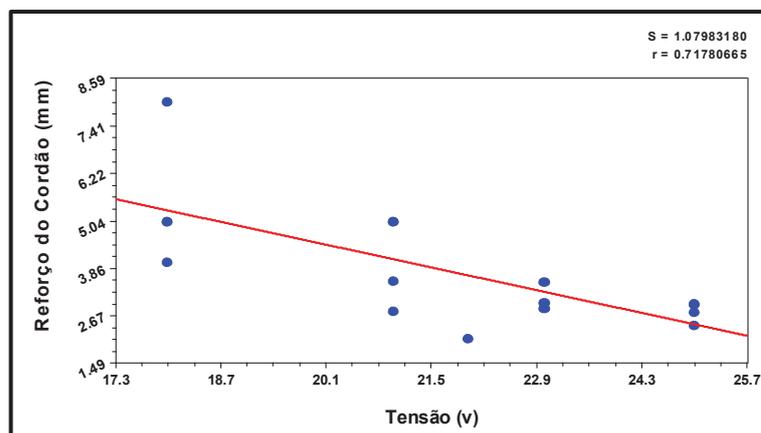


Figura 61: Correlação entre tensão (v) e o reforço do cordão (R).

Na relação entre o aporte de calor do arco de soldagem e a penetração do cordão na junta soldada, tem-se o valor de $r = 0,564$. O resultado apresentado indica razoável correlação entre o calor de soldagem e a penetração do cordão (figura 62). Aumenta o calor, aumenta a penetração.

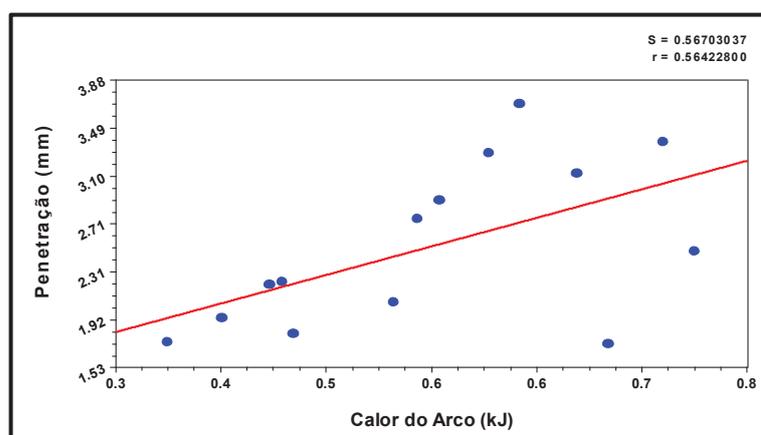


Figura 62: Relação entre penetração do cordão de solda e aporte de Calor do arco.

A correlação entre a penetração e o tempo de resfriamento do cordão de solda tem forte correlação, com $r = 0,924$. Quanto maior a penetração, maior o tempo de resfriamento (figura 63).

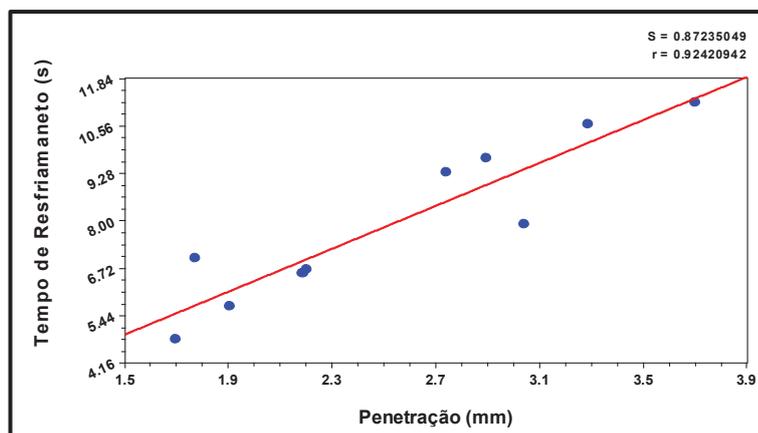


Figura 63: Relação entre penetração e tempo de resfriamento.

Na análise da influência da penetração do cordão de solda com a dureza medida na ZAC tem-se $r = 0,436$. As correlações existentes são razoáveis, porém, o coeficiente de correlação r apresenta valores próximos ao limite inferior da condição de razoabilidade na correlação estabelecida.

Na relação entre o tempo de resfriamento do cordão de soldagem e o aporte de calor de soldagem do arco (figura 64), temos forte correlação com $r = 0,999$. A forte correlação entre estes fatores também pode significar a correta coleta de dados de campo efetuada durante o desenvolvimento deste estudo. Não existe relação entre o aporte de calor do arco de soldagem e a largura da ZAC ($r = 0,006$).

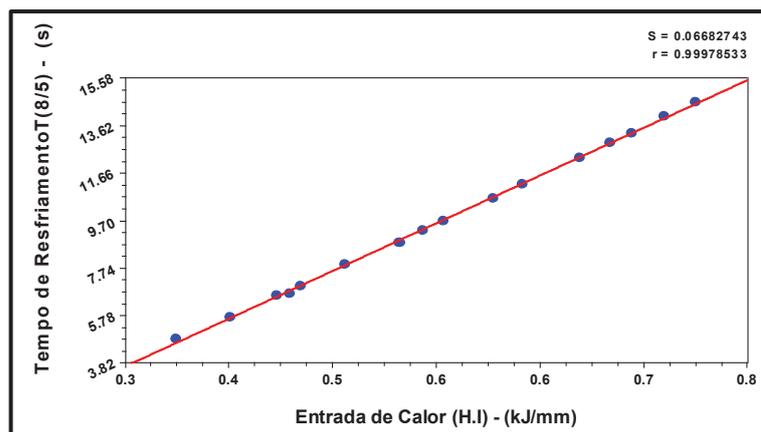


Figura 64: Relação entre o tempo de resfriamento do cordão de soldagem e o calor de soldagem do arco.

Analisando-se os fatores que influenciam a geometria do cordão de solda no processo GMAW, têm-se os parâmetros e suas variáveis como principais influenciadores do resultado alcançado. A tensão, intensidade de corrente, tempo de resfriamento de soldagem, penetração do cordão, largura da ZAC, dureza da ZAC, reforço do cordão de solda, largura do cordão de solda e reforço do cordão de solda são correlações existentes em grau e intensidade diferidos, conforme já apresentado.

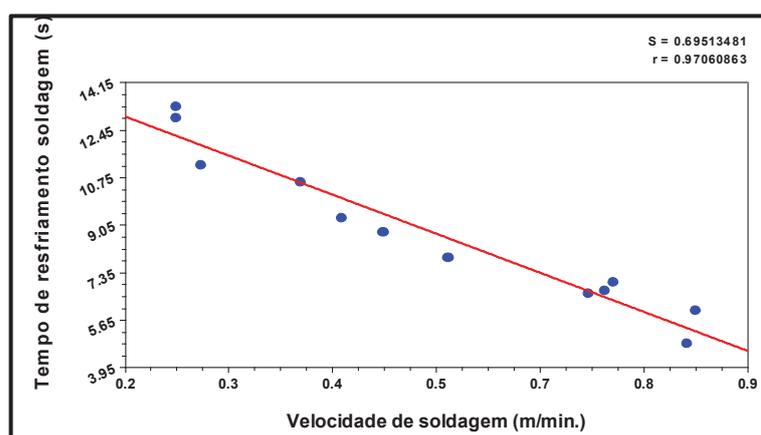


Figura 65: Relação entre velocidade de soldagem e tempo de resfriamento do cordão de solda.

O tempo de resfriamento do cordão de solda é inversamente proporcional à velocidade de soldagem. Quanto maior for a velocidade de soldagem do cordão, menor será o tempo de resfriamento do cordão soldado (figura 65).

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS E CONSIDERAÇÕES ACERCA DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS

Os resultados obtidos nos dezesseis conjuntos de solda ensaiados apresentam valores incompatíveis com os parâmetros de referência do material base. Foram evidenciadas descontinuidades e defeitos nos ensaios macrográficos que comprometem a integridade mecânica das juntas soldadas.

A tensão média encontrada representa aproximadamente 54% do valor resultante do mesmo ensaio na matéria prima. A tensão de escoamento média obtida no ensaio representa aproximadamente 51% do valor obtido no mesmo ensaio para matéria prima deste aço. O alongamento, por sua vez, representa somente 18,7% do que se estabeleceu no ensaio de referência (matéria prima).

Em relação à dureza medida na junta soldada, tem-se uma amplitude na variação da dureza do MB de 62 HV e uma variação média de 25% na dureza do material. Na ZAC tem-se uma amplitude na variação da dureza de 31 HV, ou seja, uma variação média de 13%.

A influência dos defeitos e imperfeições das juntas e, as possíveis variações microestruturais evidenciadas nas micrografias, indicam as razões pelas quais temos estes resultados. Os parâmetros de soldagem indicam variações incompatíveis com resultados estruturantes. A junta ensaiada mostrou-se inadequada às solicitações requeridas. Trata-se de uma junta de topo, sem preparação e sem folga entre as bordas de solda (figura 66).

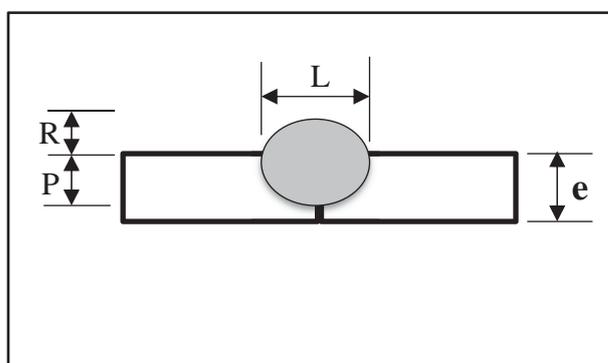


Figura 66: Junta de topo, sem chanfro e sem afastamento. P = penetração; R = reforço do cordão; L = largura do cordão; e = Espessura da chapa.

Nesta condição de soldagem, foram evidenciados defeitos e discontinuidades que comprometem o desempenho da junta realizada. Para corrigir esta situação, foi modificada a geometria da junta. A junta de topo em I será substituída por uma junta de topo em V, conforme figura 67.

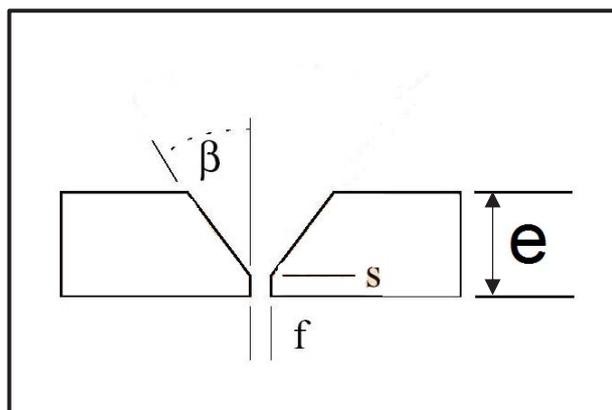


Figura 67: Proposta de junta para soldagem de topo. Afastamento (f) de 2 mm; ângulo de chanfro (β) de 30° , nariz (s) de 2 mm, em espessura de chapa (e) de 5 mm.

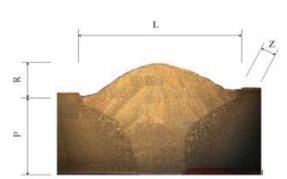
Com a geometria de junta proposta soldou-se pelo processo GMAW um C.P com as dimensões já definidas. O resultado é apresentado na macrografia da figura 68. A soldagem da junta foi realizada com o uso de um backing metálico. Os valores dos parâmetros de soldagem estão indicados no quadro 25, assim como, as dimensões dos cordões de solda ensaiados.



Figura 68: Macrografia do novo perfil da junta soldada pelo processo GMAW.

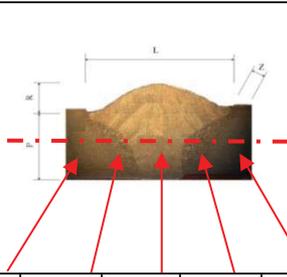
Nota-se a diluição homogênea da junta soldada e, também, a ausência de descontinuidades ou defeitos no cordão de solda. Não foram identificadas distorções no conjunto soldado. No quadro 26 apresentam-se os novos parâmetros para soldagem da nova geometria proposta para a junta. Os parâmetros foram definidos a partir da observação dos ensaios realizados nos C.P's já analisados.

Quadro 25: Parâmetros da soldagem, geometria e dureza do cordão de solda junta proposta.

Parâmetros da soldagem, Geometria e Dureza do cordão de Solda: Junta Proposta											
C	G	E	Tensão (v)	Corrente (A)	Velocidade Soldagem Vs (m/min.)	(E.A) Energia do Arco (kJ/mm)	(H.I) Entrada Calor (kJ/mm)	L (mm)	R (mm)	P (mm)	Z (mm)
1	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	8,44	1,60	5,00	1,43
2	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	7,91	1,12	5,00	2,02
3	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	8,77	1,49	5,00	1,53
4	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	8,93	1,28	5,00	1,38
5	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	8,89	1,42	5,00	1,68
6	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	8,69	1,51	5,00	1,57
Legenda:						Estatística Geometria do Cordão de Solda	Média	8,61	1,40	5,00	1,60
1 – ESAB (SFA/AWS A5.28 ER 120S – G)							Máximo	8,93	1,60	5,00	2,02
Gás 1 - (95% Ar + 5% O2)							Mínimo	7,91	1,12	5,00	1,38
E: Eletrodo		G: Gás	C - Conjunto de Prova				Amplitude	1,02	0,48	0,00	0,64

A largura média do cordão de solda é de 8,61 mm com amplitude de 1 mm. A média do tamanho do reforço do cordão é de 1,6 mm, com amplitude de 0,5 mm. A penetração do cordão foi total, ou seja, 5 mm. A ZAC tem seu valor médio em 1,38 mm, com amplitude de 0,6 mm. O cordão não apresentou descontinuidades ou defeitos. O cálculo do aporte de energia do arco foi determinado na especificação da tensão, da intensidade de corrente e da velocidade de soldagem. Em relação à dureza, os resultados obtidos são apresentados no quadro 26.

Quadro 26: Relação parâmetros e dureza na junta proposta soldada

Parâmetros da soldagem e Dureza da Junta Proposta													
C	G	E	Tensão (v)	Corrente (A)	Velocidade e Soldagem V_s (m/min.)	(E.A) Energia do Arco (kJ/mm)	(H.I) Entrada Calor (kJ/mm)						MB
								HV	HV	HV	HV	HV	
1	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	241	232	321	246	259	
2	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	256	374	271	248	266	
3	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	292	241	262	286	249	
4	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	286	246	262	263	277	
5	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	277	263	280	246	268	
6	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	296	241	249	225	254	
Legenda:							Estatística Dureza	Média	275	266	274	252	262
1 – ESAB (SFA/AWS A5.28 ER 120S – G)								Máximo	292	374	321	286	277
Gás 1 - (95% Ar + 5% O ₂)								Mínimo	241	232	249	225	249
E: Eletrodo		G: Gás		C - Conjunto de Prova				Amplitude	54	9	72	21	6

A dureza média do aço ARBL é de 264 HV, enquanto na ZAC temos 275 HV. No MA, alcançou-se a dureza média de 274 HV. Percebe-se aumento de 3,8% na dureza do material na ZAC e 4,1% de aumento da dureza no MA. As variações médias encontradas na avaliação da dureza do material base e o material de adição indicam pequena variação nas propriedades mecânicas da junta soldada.

No quadro 27 é apresentada a relação entre os parâmetros da soldagem utilizados na soldagem da junta proposta e a energia de impacto absorvida nos ensaios em -20°C e -40°C. Os resultados obtidos foram compatíveis com os resultados estabelecidos nas especificações da norma EN 10045 – 1.

O valor determinado em norma para -20° C é de 40J. No ensaio, obteve-se o valor médio de 59J, o que significa 47,5% superior ao valor normativo. Em -40° C é estabelecido o valor de 27 J de energia absorvida no ensaio normativo. O resultado médio obtido no ensaio foi de 51 J, 88% superior ao estabelecido em norma.

Quadro 27: Parâmetros de soldagem e energia de impacto absorvida

Parâmetros da soldagem e Energia de Impacto Absorvida											
C	G	E	Tensão (v)	Corrente (A)	Velocidade Soldagem Vs (m/min.)	(E.A) Energia do Arco (kJ/mm)	(H.I) Entrada Calor (kJ/mm)	Solda		ZTA	
								- 20°C (J)	- 40°C (J)	- 20°C (J)	- 40°C (J)
1	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	52,0	83,0	48,0	31,0
2	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	61,0	46,0	32,0	17,0
3	1	1	22	222	0,43	0,681	0,545	66,0	52,0	36,0	34,0
Legenda:											
1 – ESAB (SFA/AWS A5.28 ER 120S – G)											
Gás 1 - (95% Ar + 5% O2)								C = Corpo de Prova			
E: Eletrodo				G = Gás				E = Eletrodo			

O ensaio de tração dos corpos de prova, realizados a partir da sugestão apresentada, demonstra resultados que atendem às especificações da norma EN 10149-2. A média da tensão máxima de ruptura foi de 795 MPa e a média da tensão máxima de escoamento foi de 781 MPa. O alongamento foi de 7%, 33% inferior ao valor normativo conforme demonstrado no quadro 28.

Quadro 28: ensaio de tração dos corpos de prova

Valores do corpo de prova conforme proposto - S 700 MC			
Qualidade	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
S 700 MC	797,0	786,0	6,8
	793,0	770,0	7,6
	796,0	786,0	7,2
	795,3	780,7	7,2
Valores Indicados - S 700 MC			
Qualidade	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
S 700 MC Fabricante	750 -950	700	10
S 700 MC Ensaio (média)	795	781	7

Na micrografia do MB, podem ser identificados ferrita e perlita (figura 69):

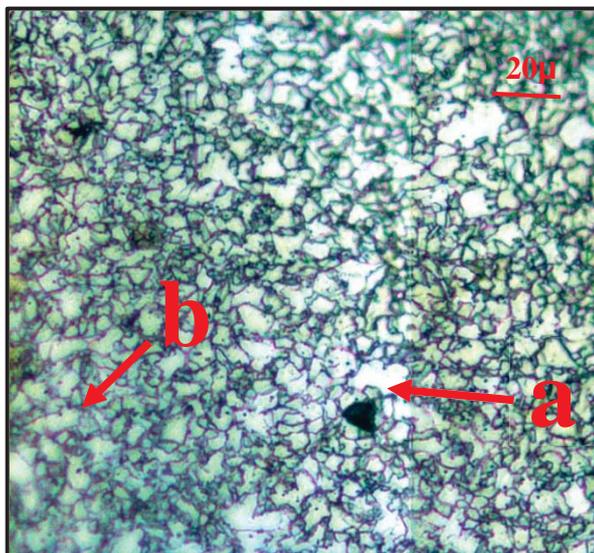


Figura 69: Micrografia do metal base, com ferrita (branco/a) e perlita (escuro/b).

Na figura 70 tem-se a caracterização do metal de solda e morfologias de ferrita; (a) ferrita alotriomorfa; (b) ferrita de Widmanstätten; (c) ferrita acicular.

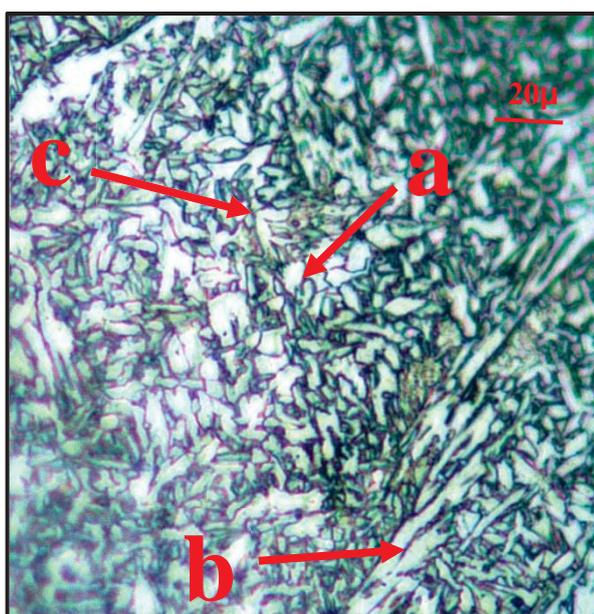


Figura 70: a caracterização do metal de solda e morfologias de ferrita; (a) ferrita alotriomorfa; (b) ferrita de Widmanstätten; (c) ferrita acicular.

Na figura 71 tem-se a micrografia da RCG, com a representação de (a) possível bainita superior em forma de penas, (b) possível Bainita Acicular, (c) Ferrita poligonal e (d) Ferrita de Widmanstätten.

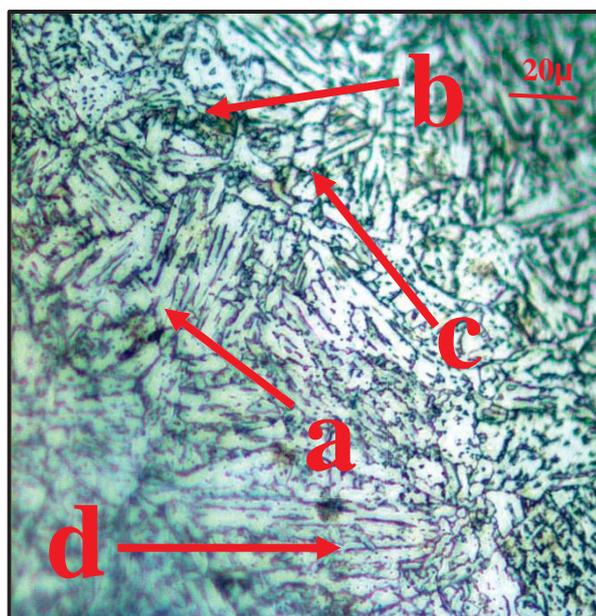


Figura 71: região de crescimento de grãos, com a representação de (a) possível bainita superior em forma de penas, (b) possível Bainita Acicular; (c) Ferrita poligonal, (d) Ferrita de Widmanstätten.

Região de refino de grão (figura 72) na zona afetada pelo calor. Microestrutura formada por ferrita poligonal (a) e agregados de carbonetos e ferrita (b).



Figura 72: zona afetada pelo calor. Microestrutura formada por ferrita poligonal (a) e agregados de carbonetos e ferrita (b).

Pode-se concluir que, modificando-se a geometria da junta soldada e adequando-se os parâmetros já analisados, tem-se melhor resultado na realização da soldagem. Ademais, a proposta apresentada atendeu adequadamente às condições de soldagem, conforme proposto neste estudo.

5 CONCLUSÕES

A análise química do aço ARBL S 700 identificou em sua composição baixo teor de carbono (0,07% C), alto teor de manganês (1,93% Mn), baixo teor de silício (0,06% Si), fósforo e enxofre com teores inferiores a 0,005%. Tem em sua micro constituição a presença de cromo, níquel, alumínio, cobre, titânio, vanádio, chumbo, cério e nióbio. O cálculo do CE, a partir da identificação dos constituintes do aço, classifica o MB como sendo de fácil soldabilidade com $CE = 0,267$.

A macrografia das juntas apresentou descontinuidades como embicamento, desalinhamento, falta de penetração, mordeduras penetração excessiva e reforço do cordão excessivo. O embicamento e o desalinhamento da junta soldada podem ser decorrência da inadequada preparação da junta ou de sua inadequada morfologia. As mordeduras, perfurações e a exagerada penetração do cordão de solda, podem ser resultado da excessiva corrente de soldagem adotada ou da baixa velocidade de soldagem da junta.

A falta de fusão da junta pode estar relacionada à baixa corrente de soldagem ou alta velocidade de soldagem do cordão de solda. O reforço excessivo está relacionado à alta taxa de deposição e, em presença de respingos, indica baixa velocidade de soldagem, alta velocidade do arame e possível excesso da vazão de gás no procedimento de soldagem.

Na junta soldada, identificou-se microestrutura ferrítica poligonal, agregados de carbonetos e ferrita na RRG da ZAC. Na RCG identificaram-se duas morfologias de bainita: bainita em forma de penas e bainita acicular. A ferrita aparece com duas morfologias distintas: (i) ferrita poligonal e (ii) Ferrita de Widmanstätten. No MA, foram identificadas três morfologias de ferrita: (i) ferrita alotriomórfica; (ii) ferrita de Widmanstätten e (iii) ferrita acicular.

As propriedades mecânicas do aço foram caracterizadas pelos ensaios de tração, impacto e dureza. No ensaio de tração, os valores médios obtidos nos ensaios do aço ARBL foram de 818 MPa para tensão de ruptura, 770 MPa para tensão de escoamento e o alongamento foi de 16%.

Os valores especificados pela norma EN 10149-2 e as especificações determinadas pelos fabricantes da matéria prima correspondem a tensão máxima 700 MPa e tensão máxima de escoamento entre 750 MPa e 950 MPa, sendo o alongamento máximo estabelecido em

10%. Portanto, estes são os valores de referência para análise das propriedades mecânicas do aço ARBL S 700 MC.

Nos ensaios dos corpos de prova soldados, a tensão média máxima obtida foi de 439 MPa. Este valor representa aproximadamente 54% do valor resultante do mesmo ensaio na matéria prima. A tensão de escoamento média foi de 394 MPa, o que significa, aproximadamente, 51% do valor do ensaio para matéria prima deste aço. O alongamento, por sua vez, alcançou o valor médio de 3%. Neste caso, o alongamento obtido nos ensaios das juntas soldadas representa somente 18,7% do valor normativo.

A discrepância ocorrida nos resultados dos corpos de prova ensaiados se deve à influência dos defeitos e imperfeições das juntas soldadas e, ainda, às possíveis variações micrográficas das regiões características das juntas soldadas.

Nos ensaios de impacto, os níveis de energia absorvidos no ensaio foram de 41 J em -20°C e 30 J em -40°C . A especificação normativa (EN 10045-1) determina valores de 40 J para -20°C e 27 J em -40°C . Nos ensaios de dureza, obteve-se no material base a dureza máxima de 286 HV e a dureza mínima de 224 HV, uma variação média de 24%, com desvio padrão de 17 HV.

Em relação à ZAC tem-se a dureza máxima de 246 HV e a dureza mínima em 215 HV. Uma variação média de 13% com desvio padrão de 7HV. No MA registrou-se a máxima dureza de 266 HV e a mínima dureza de 225 HV. Uma variação média de 16,5 com desvio padrão de 9HV.

Ao analisar-se a geometria dos cordões de solda é notável a diferença entre as larguras, reforços do cordão de solda, penetração do cordão de solda e a largura da ZAC. A variação média na largura do cordão é de 6,87 mm com desvio padrão de 2 mm. A variação média na altura do reforço do cordão é de 2,88 mm com desvio padrão de 0,7 mm. A variação média da penetração do cordão é de 1,95 mm, com desvio padrão de 0,6mm. A largura média da ZTA é de 1,53 mm com desvio padrão de 0,4mm.

Os fatores que influenciam a geometria do cordão de solda foram analisados e a largura da ZAC é razoavelmente influenciada pela velocidade de soldagem. Constatou-se que, na medida em que a velocidade de soldagem aumenta, a largura da ZAC diminui. O tempo de resfriamento do cordão de solda e o aporte de calor não influenciam a largura da ZAC.

A Intensidade de Corrente tem forte correlação negativa com (i) a largura do cordão de solda, (ii) a penetração do cordão, (iii) aporte do calor do arco e (iv) tempo de resfriamento do cordão de solda. São parâmetros inversamente proporcionais. Quanto maior a intensidade de

corrente, menor será a largura do cordão de solda, menor será a penetração, menor será o aporte térmico e menor será o tempo de resfriamento do cordão de solda.

No processo de soldagem GMAW a intensidade da corrente elétrica está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame. Quando se aumenta a intensidade da corrente de soldagem, ocorre o aumento de aporte do MA. Aumentando o aporte de MA, é necessário aumentar a velocidade de soldagem. Reduz-se o tempo de resfriamento do cordão de solda, nesta condição, pela dissipação dinâmica do processo de soldagem do cordão.

Não existe correlação significativa da intensidade de corrente de soldagem com o reforço do cordão de solda. Entretanto, há forte relação entre a intensidade de corrente da soldagem e a dureza da ZAC. A tensão não apresenta correlação com o tempo de resfriamento do cordão de solda, mas apresenta forte correlação positiva com a largura do cordão de solda. Quanto maior a tensão de soldagem, maior será a largura do cordão realizado.

Em relação à penetração e o reforço do cordão de solda, a tensão apresenta forte correlação negativa. Isto significa que quanto maior a tensão, menor será a penetração e o reforço do cordão de solda. Por outro lado, aumentando-se o aporte de calor na junta soldada, tem-se o aumento da penetração do cordão e aumento do tempo de resfriamento do cordão realizado. A penetração do cordão de solda pouco influencia a dureza medida na ZAC.

O aporte de calor de soldagem e o tempo de resfriamento do cordão de soldagem têm forte correlação. Aumentando o aporte de calor, aumenta-se na mesma proporcionalidade o tempo de resfriamento da junta soldada. Quanto ao aporte de calor do arco de soldagem e a largura da ZAC, não existe relação entre eles.

O resultado dos ensaios mecânicos da junta ensaiada não atendeu aos requisitos estabelecidos nas normas apresentadas. As discontinuidades e defeitos evidenciados no ensaio macrográfico e na inspeção visual comprometem a integridade mecânica das juntas soldadas. A influência dos defeitos e imperfeições das juntas e, as possíveis variações microestruturais evidenciadas nas micrografias, indicam as razões pelas quais temos estes resultados. Os parâmetros de soldagem indicam variações incompatíveis com resultados estruturantes.

No entanto, com a proposta de nova geometria da junta soldada e novos valores aos parâmetros analisados, alcançou-se o resultado determinado em norma. Obteve-se uma diluição homogênea da junta soldada e não foram constatadas discontinuidades ou defeitos no cordão de solda, bem como, não foram identificadas distorções no conjunto soldado. Os valores definidos para os parâmetros do processo GMAW, com voltagem em 22 v,

intensidade de corrente em 222 A, velocidade de soldagem igual a 0,43m/min., energia do arco (EA) em 0,681 J e entrada de calor (HI) em 0,545 J, proporcionaram bons resultados.

O gás utilizado na soldagem é composto por 95% de argônio e 5% de oxigênio. O eletrodo (material de adição) utilizado foi o eletrodo AWS A5.28 ER 120 S – G com 1,2 mm de diâmetro. A largura média do cordão de solda foi homogênea com 8,61 mm e desvio padrão de 0,4 mm. A média do tamanho do reforço do cordão foi de 1,6 mm e desvio padrão de 0,2 mm. A penetração do cordão foi total, ou seja, 5 mm. A ZAC tem seu valor médio em 1,38 mm e desvio padrão de 0,2 mm.

O cordão não apresentou descontinuidades ou defeitos. O cálculo do aporte de energia do arco foi determinado na especificação da tensão, da intensidade de corrente e da velocidade de soldagem utilizados nesta nova condição de soldagem. Os valores do ensaio de impacto realizado no cordão de solda e na ZAC, nas condições de -20°C e -40°C, apresentaram valores médios que atendem e superam as especificações estabelecidas pela norma EN 10045-1.

O ensaio de tração dos corpos de prova, realizados a partir da sugestão apresentada, demonstra resultados que atendem às especificações da norma EN 10149-2. A média da tensão máxima de ruptura foi de 795 MPa e a média da tensão máxima de escoamento foi de 781 MPa. O alongamento foi de 7%, sendo inferior ao valor normativo.

Os ensaios micrográficos realizados nas amostras com os novos parâmetros apresentaram morfologia e estrutura semelhantes aos já apresentados. O MB é constituído por perlita e grãos muito finos de ferrita. Na RRG da ZAC, identificou-se microestrutura ferrítica poligonal e agregados de carbonetos e ferrita.

Na RCG identificaram-se duas morfologias de bainita: bainita em forma de penas e bainita acicular. A ferrita aparece com duas morfologias distintas também: ferrita poligonal e Ferrita de Widmanstätten. No MA, foram identificadas três morfologias de ferrita: (i) ferrita alotriomórfica; (ii) ferrita de Widmanstätten e (iii) ferrita acicular.

As características metalográficas do aço ARBL demonstraram que, diante do processo de soldagem GMAW, para obtenção de uma junta soldada em conformidade com as especificações das normas, foi necessário modificar os parâmetros de soldagem. O primeiro grupo de amostras não obteve resultados dentro do esperado em razão de uma série de fatores. Analisados estes fatores, evidenciou-se que a principal mudança a ser feita estava na morfologia e geometria da junta, de I para V.

Além disso, todos os parâmetros de soldagem foram redimensionados em seus valores, permitindo obter-se uma junta de solda adequada e sem defeitos. Portanto, conclui-se que os parâmetros de soldagem influenciam no processo de soldagem, de modo a causar falhas na junta soldada como embicamento, desalinhamento, falta de penetração, mordeduras, penetração excessiva e reforço do cordão excessivo. Tais falhas são graves e devem ser evitadas, como forma de observação das normas de segurança. Além disso, devem ser corrigidas adequando-se os parâmetros de soldagem, conforme já demonstrado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta dissertação, percebeu-se a necessidade de complementar este estudo com os seguintes pontos:

- Avaliar a utilização do eletrodo AWS A5.28 – ER 90S – D2;
- Avaliar a utilização da variação de oxigênio na composição do gás de proteção;
- Avaliar a formação martensítica na zona afetada pelo calor, utilizando-se a composição de gás oxidante e arame ER 90S –D2.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARONSON H. I.; ENOMOTO, M.; LEE K. J. **Mechanisms of Diffusional Phase Transformations in Metals and Alloys**. New York: CRC Press, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 6507-1. Materiais Metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892 – 1. Materiais Metálicos – Ensaio de tração - parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM 281-1. Materiais metálicos - Parte 1: Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Specification 5L. Specification for Line Pipe. Washington: API Publishing Services, 2002. 42ª edition, Jan.

ASM Metals Handbook. **Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys**. vol. 1, 10th Edition, 1994.

ASTM (American Society For Testing Materials). ASTM E8M. **Standard Test Methods Tension Testing of Metallic Materials** [Metric], 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1/D1.1M:2010. Structural Welding Code - Steel. Miami: AWS, 2010. 22ª edition.

BARRA, Rodrigues Sérgio. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BHADESHIA, H.K.D.H. **Bainite in steels: Transformation, Microstructure and Properties**. 2ª ed. Institute Of Materials, Minerals And Mining Communications Ltd. London. 2001.

BHADESHIA H.K.D.H, CABALLERO, F.G. GARCIA-MATEO, C. **Development of Hard Bainite**. Cambridge: University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, 2003.

BRANDI, S. (Coordenação). **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1992.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 10045 – 2. Charpy impact test on metallic materials: method for the verification of impact testing machines. London: BSI, 1993.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 101499 – 2. Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming: technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels. London: BSI, 2013.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2002.

CARDOSO JR, Ronaldo. Soldagem de aços de extra-alta resistência: o que são e por que utilizá-los. **Revista Solução**, publicação institucional ESAB, n. 10, p.37-9, 2008. Disponível

em:http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/revista_solucão/upload/solu%C3%A7%C3%A3o-outubro.pdf. Acesso em 06 Dez. 2012. Contagem/MG.

CATÁLOGO DOCOL. Publicação institucional SSAB AB. (p. 5) Disponível em: http://www.ssab.com/Global/DOCOL/Brochures/pt-BR/490pt-br_Advanced%20High%20Strength%20Steels%20For%20The%20Automotive%20Industry.pdf. Acesso em: 11 Out. 2013.

CATÁLOGO DOMEX. Publicação institucional SSAB AB. Disponível em: http://www.ssab.com/Global/DOCOL/Brochures/en/312_Welding%20of%20Domex%20and%20Docol%20Advanced%20High%20Strength%20Steels.pdf?epslanguage=de Acesso em: 05 Dez. 2012.

CATÁLOGO ESAB. Publicação institucional. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/arames_solidos/aristorod79.cfm Acesso em: 12 Dez. 2012.

CORREA, Sonia Maria Barros Barbosa. **Probabilidade e Estatística**. 2ª ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.

DIETER, George Ellwood. **Mechanical Metallurgy**: SI Metric edition. Cingapura: Ed. McGraw-Hill, 1988.

FARIA, Jose Ricardo de. **Soldabilidade do aço USISA 350 na Construção Metálica**. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FONSECA, J.S.; MARTINS, G.A. **Curso de estatística**. 4ª ed. São Paulo: ed. Atlas, 1993.

FIGUEIREDO, K.M. **Tecnologia da soldagem**. São Luís do Maranhão: Centro de Educação do Maranhão – Centro de Mecânica e Materiais, 2005.

GORNI, A.A. **Desenvolvimento de Aços Alternativos aos Materiais Temperados e Revenidos com Limite de Resistência entre 600 e 800 MPa**. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

GORNI, A.A. **Aços avançados de alta resistência**: microestrutura e propriedades mecânicas. Artigo apresentado no 5º congresso de corte e conformação de metais, Aranda Eventos, São Paulo, outubro de 2009.

GORNI, A. A. Estudo traça relações entre microestrutura e propriedades mecânicas em aços estruturais. **Corte e Conformação de Metais**. Março de 2008. p. 100-110. Disponível em: http://www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_Mar2008.pdf. Acesso em 08 Dez. de 2012.

GRONG, Oystein. **Metallurgical Modelling of Welding**. 2ª ed. Norwegian: Ed. H. K. D. H. Bhadeshia, 1997.

HAUPT, William; LOSEKAN, Mauro Leandro; SANTOS, Bill Paiva; CLARKE, Thomas Gabriel Rosauo; GONZALEZ, Arnaldo Ruben. **Análise de Diferentes Parâmetros para a Soldagem MAG Pulsado Sinérgico em Tubos de Aço API 5L X 65**. Artigo aceito no XXXIX Congresso nacional de soldagem – CONSOLDA 2013. Curitiba – Paraná.

JWES (*Japan Welding Engineering Society*). Software Online Calculation. Disponível em http://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/index.jsp.

KALPAKJIAN, S. SCHMID, R.S. **Manufacturing, Engineering & Technology**. 5ª ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc., 2006.

KRAUSS, George. **Steels: Processing, Structure and Performance**. 1ª Ed. Ohio: ASM International, 2005.

LINCOLN ELETRIC, **GMAW Welding Guide**. Disponível em: http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWwires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf. Acessado em 08 de jan. 2014 às 19h

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e Técnicas Conexas**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996.

MARQUES, P V. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MARQUES, Paulo Vilani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2009.

MARTINS, F.A. **Avaliação da Junta Soldada de Aço API em Meio Corrosivo**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Rio de Janeiro, 2005.

MODENESI, P. J.; Marques, P. V.; Santos, D. B.. **Introdução à Metalurgia da Soldagem** Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Vilani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz Santos. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. 3ª ed. atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MODENESI, Paulo José. **Introdução a Física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte: Universidade de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Vilani; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Vilani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz Santos. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3ª ed. atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MOREIRA, H. S.. **Estudo da Influência dos Parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular.** Dissertação (Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

NAIDU, D. S.; OZCELIK, S.; MOORE, K. L. **Modeling, Sensing and control of Gas Metal Arc Welding.** Oxford: Elsevier Science Ltda, 2003.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de soldagem e aplicações.** Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PEIXOTO, Arildomá Lobato. **Soldagem.** Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012.

PEIXOTO, N.H. **Caracterização metalúrgica do aço SAE 1141 microligado ao Nióbio por simulação física.** Tese (doutorado). UFRGS/PPGEM, 2003.

PERINI, F. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados.** Dissertação. PPMG, UCS, 2008.

RAMOS, Esdras Godinho. **Análise da oscilação da poça de solda GMAW por meio de processamento de imagens obtidas por perfilografia.** Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

RODRIGUES, Saulo Machado. **Estudo do comportamento das juntas soldadas de aços bifásicos de alta resistência Mecânica.** Tese (mestrado em engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – UFRGS, Porto Alegre, 2012.

RODRIGUES, Emanuel Rezende. **Influência de parâmetros do Processo FCAW – G nas características da solda ASTM A-36.** Tese (mestrado em engenharia dos Materiais). UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos.** São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

SCHACKELFORD, James F. **Introdução a Ciência dos Materiais.** 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies** (Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies). Boca Raton (FL): CRC Press Taylor & Francis Group, 2007.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de (Coord.). **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Blucher, 1992.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem. **Soldagem**. São Paulo: Blücher, 1995.

Zeemann, Annelise. Diluição. Disponível em <http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol06.pdf>. Acesso em 07 de dez. de 2012.

Zeemann, Annelise. Energia de Soldagem. Disponível em <http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol05.pdf>. Acesso em 19 de dez. de 2012.

YURIOKA, N., H. Suzuki and S. Ohshita. *Welding Journal*, 62(6), 1983, pp.147-153.