



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



**EFEITOS DO PRÉ-AQUECIMENTO E PARÂMETROS DE PULSO SOBRE A  
MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLDA EM AÇO  
ARBL**

**JACKSON MEDEIROS DA LUZ**

BAURU-SP  
FEVEREIRO – 2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Bauru



**EFEITOS DO PRÉ-AQUECIMENTO E PARÂMETROS DE PULSO SOBRE A  
MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLDA EM AÇO  
ARBL**

**JACKSON MEDEIROS DA LUZ**

Orientador: Prof. Dr. Gilberto de M. B. Gonçalves

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia da  
UNESP – Campus de Bauru,  
para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Mecânica.

BAURU-SP  
FEVEREIRO – 2014

Luz, Jackson Medeiros da.

Efeitos do pré-aquecimento e parâmetros de pulso sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de solda em aço ARBL/

Jackson Medeiros da Luz, 2014. 93 f.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014.

1. Propriedade mecânica. 2. Soldagem GMAW.  
3. Arco pulsado. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JACKSON MEDEIROS DA LUZ, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 04 dias do mês de fevereiro do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. YUKIO KOBAYASHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. PAULO CEZAR MOSELLI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UTFPR - Cornélio Procopio, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de JACKSON MEDEIROS DA LUZ, intitulado "EFEITOS DO PRÉ-AQUECIMENTO E PARÂMETROS DE PULSO SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE SOLDA EM AÇO ARBL". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES

  
Prof. Dr. YUKIO KOBAYASHI

  
Prof. Dr. PAULO CEZAR MOSELLI

“Esta é a mensagem do Senhor a  
Ciro, o homem escolhido por Deus  
para conquistar muitas nações. Deus  
mesmo dará força a ele para tirar  
autoridade dos reis; Deus mesmo  
abrirá para Ciro os grandes portões  
de babilônia, e ninguém será capaz  
de fechá-los.”

(Isaías 45:1)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, que me deu sabedoria para realizar mais um dos meus objetivos.

Aos meus pais pelas orações.

Agradeço a minha noiva pela paciência e apoio.

Ao Professor Doutor Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves pela orientação desse projeto, compreensão e acima de tudo o apoio durante estes anos de trabalho, obrigado.

Ao meu colega de trabalho Olegário que muito ajudou, obrigado.

Ao Sr. Gilson Luiz Duarte pelo voto de confiança e apoio para que este projeto fosse concretizado.

A empresa IGUAÇUMEC.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru, especialmente Hamilton pela ajuda prestada para que este trabalho fosse realizado.

## **RESUMO**

Este trabalho faz parte de um programa de pesquisa da soldagem GMAW-P no modo pulsado em aço estrutural, tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas, especificamente a resistência mecânica, a tenacidade ao impacto e dureza, de juntas soldadas pelo referido processo, com variações na corrente de pico, tempo de pico e na temperatura do tratamento térmico de pré-aquecimento. O procedimento de soldagem prevê a realização das soldas em dois passes em juntas com chanfro em X, ângulo de 60°, preparadas tiras de aço estrutural de alta resistência e baixa liga – ARBL, denominada COS-AR 50 com 16 mm de espessura. O material de adição a ser usado é um eletrodo de alma metálica AWS E70C-6M, no diâmetro de 1,2 mm, associado à proteção gasosa de CO<sub>2</sub>. Após a realização dos ensaios, os resultados foram correlacionados com as microestruturas desenvolvidas tanto no metal de solda (MS) quanto na zona afetada termicamente (ZTA).

**PALAVRAS-CHAVE:** Propriedade Mecânica, Soldagem GMAW, Arco Pulsado.

## **ABSTRACT**

This study is part of a GMAW-P welding research program at a pulsed way in structural steel. It has as the objective to evaluate the mechanical properties, specifically the mechanical resistance, the tenacity to the impact and hardness of joints welded by the mentioned process with variations in the peak power, peak time and in the thermal treatment temperature of pre-heating. The welding procedure forecasts the achievement of welds in two steps with bevel in X, bend of 60°, prepared stripes of the high resistance structural steel and low bind - ARBL, denominated COS-AR 50 with 16 mm of thickness. The addition material to be used is an electrode of AWS E70C-6 metallic soul, diameter 1,2 mm, associated to the gas protection of CO<sub>2</sub>. After the achievement of the tests, the results will be correlated with the microstructures developed in both weld metal ( WM ) and in the heat affected zone (ZAC).

**KEY-WORDS:** Mechanical Property, GMAW Welding, Pulsed Arc.

## Sumário

<b>Índice de Figuras</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1 Aços estruturais de alta resistência e baixa liga (ARBL).....	4
3.2 Processo GMAW.....	5
3.2.1 Equipamentos utilizados na soldagem GMAW.....	7
3.2.2. Variáveis do processo GMAW.....	9
3.2.3. Transferência metálica no processo GMAW.....	14
3.2.4 Processo de soldagem GMAW pulsado.....	18
3.2.5 Parâmetro do modo pulsado .....	20
3.3. Metalurgia da soldagem.....	21
3.3.1. Energia de soldagem (HEAT INPUT).....	22
3.3.2. História térmica da soldagem.....	22
3.4 Desenvolvimento microestrutural no metal de solda.....	24
3.4.1 Classificação dos principais microconstituintes do metal de solda.....	25
3.4.2. Efeito da microestrutura na tenacidade.....	29

<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
4.1.	Materiais.....	31
4.2.	Métodos.....	32
4.2.2.	Análises Metalográficas.....	38
4.2.3.	Medidas de Microdureza.....	41
4.2.4.	Avaliação da Resistência Mecânica e tenacidade ao impacto.....	42
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>44</b>
5.1	Desenvolvimento macroestrutural das soldas.....	44
5.1.1	Influência da intensidade da corrente de pico na macroestrutura das soldas.....	44
5.1.2	Influência do tempo de duração da corrente de pico na macroestrutura das soldas.....	46
5.1.3	Influência da temperatura de pré-aquecimento na macroestrutura das soldas.....	47
5.2.	Desenvolvimento microestrutural dos metais de solda.....	49
5.2.1	Influência da intensidade da corrente de pico na microestrutura das soldas.....	49
5.2.2	Influência do tempo de duração da corrente de pico na microestrutura das soldas.....	55
5.2.3	Influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura das soldas.....	60
5.3	Identificação e quantificação das microestruturas nos cordões de solda.....	64
5.3.1	Resultado da influência da intensidade da corrente de pico na microestrutura das soldas .....	67
5.3.2	Resultado da influência do tempo de duração da corrente de pico na microestrutura das soldas.....	69

5.3.3	Influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura das soldas.....	70
5.4	Propriedades Mecânicas.....	71
5.4.1	Influência da intensidade da corrente de pico na microdureza das soldas.....	71
5.4.2	Influência do tempo de duração da corrente de pico na microdureza das soldas.....	73
5.4.3	Influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura das soldas.....	75
5.4.4	Resultado do ensaio de microdureza Vickers.....	77
5.5	Influência da intensidade da corrente de pico no limite de resistência à tração das juntas.....	78
5.5.1	Influência do tempo de duração da corrente de pico no limite de resistência à tração das juntas.....	80
5.5.2	Influência da temperatura de pré-aquecimento no limite de resistência à tração das juntas.....	80
5.5.3	Resultado do ensaio de tração.....	81
5.6	Influência da intensidade da corrente de pico da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V dos metais de solda.....	83
5.6.1	Influência do tempo de duração da corrente de pico na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V dos metais de solda.....	84
5.6.2	Influência da temperatura de pré-aquecimento na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V dos metais de solda.....	85
5.6.3	5.7.3. Resultado do ensaio de Impacto Charpy V .....	85
6.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>88</b>
7.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>

## **APÊNDICES**

## Índice de Figuras

Figura 3.1	Processo de soldagem GMAW (COSTA, 2003).....	6
Figura 3.2	Representação esquemática da pulsação de corrente. $I_p$ - Corrente de pico, $I_b$ - Corrente de base, $t_p$ - Tempo de pico e $t_b$ - Tempo de base. (MODENESI, 2002).....	17
Figura 3.3	Repartição térmica de uma solda (MARQUES et al., 2005).....	23
Figura 3.4	Ciclo térmico de soldagem (FORTES e ARAÚJO, 2004).....	24
Figura 3.5	Representação esquemática de constituintes microestruturais (WELDING IN THE WORLD, 1991).....	28
Figura 4.1	Desenho ilustrativo da geometria do chanfro.....	33
Figura 4.2	Desenho ilustrativo das dimensões da junta soldada.....	33
Figura 4.3	Fonte de energia e acessórios utilizados.....	34
Figura 4.4	Detalhe do sistema do equipamento de translação e da tocha utilizados.....	36
Figura 4.5	Desenho ilustrativo do ângulo de deslocamento positivo da tocha adotados.....	37
Figura 4.6	Esquema ilustrativo da execução do primeiro cordão de solda (com cobre-junta).....	37
Figura 4.7	Esquema ilustrativo da execução do segundo cordão de solda (após a goivagem).....	38
Figura 4.8	Regiões microestruturais analisadas.....	39
Figura 4.9	Posicionamento das endentações nas medidas de microdureza Vickers (500gf).....	42
Figura 4.10	Modo de retirada dos corpos-de-prova de tração em cada junta soldada.....	42
Figura 4.11	Dimensões do corpo-de-prova de tração na junta.....	43

Figura 4.12	Modo de retirada dos corpos-de-prova para ensaio de impacto Charpy V em cada junta soldada.....	43
Figura 5.1	Solda (S-2) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C.....	43
Figura 5.2	Solda (S-4) condições: $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C.....	45
Figura 5.3	Solda (S-3) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C.....	45
Figura 5.4	Solda (S-5) condições: $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C.....	46
Figura 5.5	Solda (S-7) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 1,9$ ms, $T = 100$ °C.....	46
Figura 5.6	Solda (S-2) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C.....	47
Figura 5.7	Solda (S-6) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 2,3$ ms, $T = 100$ °C.....	47
Figura 5.8	Solda (S-1) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 29$ °C.....	48
Figura 5.9	Solda (S-2) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C.....	48
Figura 5.10	Solda (S-3) condições: $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C.....	48
Figura 5.11	Solda S-2 – primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	50
Figura 5.12	Solda S-2 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	50
Figura 5.13	Solda S-2 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	51
Figura 5.14	Solda S-4 - Primeiro cordão, ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	51
Figura 5.15	Solda S-4 - Segundo cordão, ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	52
Figura 5.16	Solda S-4 - Zona recristalizada, ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	52
Figura 5.17	Solda S-3 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	53
Figura 5.18	Solda S-3 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	53

Figura 5.19	Solda S-3 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	54
Figura 5.20	Solda S-5 - Primeiro cordão, ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	54
Figura 5.21	Solda S-5 - Segundo cordão, ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	55
Figura 5.22	Solda S-5 - Zona recristalizada, ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	55
Figura 5.23	Solda S-7 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 1,9$ ms, $T = 100$ °C).....	56
Figura 5.24	Solda S-7 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 1,9$ ms, $T = 100$ °C).....	56
Figura 5.25	Solda S-7 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 1,9$ ms, $T = 100$ °C).....	57
Figura 5.26	Solda S-2 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	57
Figura 5.27	Solda S-2 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	58
Figura 5.28	Solda S-2 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	58
Figura 5.29	Solda S-6 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,3$ ms, $T = 100$ °C).....	59
Figura 5.30	Solda S-6 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,3$ ms, $T = 100$ °C).....	59
Figura 5.31	Solda S-6 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,3$ ms, $T = 100$ °C).....	60
Figura 5.32	Solda S-1 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 29$ °C).....	60
Figura 5.33	Solda S-1 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 29$ °C).....	61
Figura 5.34	Solda S-1 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 29$ °C).....	61

Figura 5.35	Solda S-2 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	62
Figura 5.36	Solda S-2 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	62
Figura 5.37	Solda S-2 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	63
Figura 5.38	Solda S-3 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	63
Figura 5.39	Solda S-3 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	64
Figura 5.40	Solda S-3 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	64
Figura 5.41	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	72
Figura 5.42	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-4 ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	72
Figura 5.43	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-3 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	73
Figura 5.44	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-5 ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	73
Figura 5.45	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-7 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 1,9$ ms, $T = 100$ °C).....	74
Figura 5.46	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	74
Figura 5.47	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-6 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,3$ ms, $T = 100$ °C).....	75
Figura 5.48	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-1 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 29$ °C).....	76
Figura 5.49	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	76
Figura 5.50	Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-3 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	77

Figura 5.51	Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C) e S-4 ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	79
Figura 5.52	Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-3 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C) e S-5 ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	79
Figura 5.53	Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-7 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 1,9$ ms, $T = 100$ °C), S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C) e S-6 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,3$ ms, $T = 100$ °C).....	80
Figura 5.54	Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-1 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 29$ °C), S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C) e S-3 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	81
Figura 5.55	Valores da energia absorvida a $-30$ °C e $23$ °C dos metais de solda, S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C) e S-4 ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C).....	83
Figura 5.56	Valores da energia absorvida a $-30$ °C e $23$ °C dos metais de solda, S-3 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C) e S-5 ( $I_p = 470$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	84
Figura 5.57	Valores da energia absorvida a $-30$ °C e $23$ °C dos metais de solda, S-7 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 1,9$ ms, $T = 100$ °C), S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C) e S-6 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,3$ ms, $T = 100$ °C).....	84
Figura 5.58	Valores da energia absorvida a $-30$ °C e $23$ °C dos metais de solda, S-1 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 29$ °C), S-2 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 100$ °C) e S-3 ( $I_p = 435$ A, $t_p = 2,1$ ms, $T = 150$ °C).....	85

## Índice de Tabela

Tabela 4.1	Composição química do metal de base.....	31
Tabela 4.2	Propriedades mecânicas do metal de base.....	31
Tabela 4.3	Composição química do eletrodo de alma metálica AWS E70C-6M.....	32
Tabela 4.4	Propriedades mecânicas do aporte puro do eletrodo AWS E70C-6M.....	32
Tabela 4.5	Valores dos parâmetros de pulso por grupo combinatório.....	35
Tabela 4.6	Grupos de combinações de parâmetros de pulso e temperaturas de pré-aquecimentos usados.....	35
Tabela 4.7	Grupos utilizados para analisar a influência dos parâmetros.....	36
Tabela 4.8	Quantidade de pontos analisados por grupo de solda.....	40
Tabela 4.9	Quantidade de pontos analisados por grupo de solda.....	41
Tabela 5.1	Quantificação dos microconstituintes do primeiro cordão de solda.....	65
Tabela 5.2	Quantificação dos microconstituintes do segundo cordão de solda.....	65
Tabela 5.3	Quantificação média dos microconstituintes do primeiro e segundo cordões.....	66
Tabela 5.4	Valores da quantificação dos microconstituintes Ferrita e Perlita nas zonas recristalizadas dos metais de solda.....	66
Tabela 5.5	Valores da quantificação das microfases A-M.....	67

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### Letras latinas

A	Ampères
ARBL	Alta resistência e baixa liga
CA	Ciclo Ativo
C25	Mistura gasosa composta de 25%CO <sub>2</sub> + 75% Ar
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
E	Energia de soldagem ou aporte térmico
F	Frequência de pulso [Hz]
GMAW	Gas Metal Arc Welding
He	Aporte de calor efetivo [kJ/mm]
I	Corrente elétrica [A]
I <sub>b</sub>	Corrente de base [A]
I <sub>m</sub>	Corrente média [A]
I <sub>p</sub>	Corrente de pico [A]
MB	Metal de base
MIG	Metal Inert Gas
MS	Metal de solda
T	Temperatura [°C]
t <sub>b</sub>	Tempo de base [ms]

tp	Tempo de pico [ms]
V	Tensão
Vs	Velocidade de soldagem [mm/s]
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona termicamente afetada

### **Letras gregas**

$\eta$	Eficiência térmica do processo de soldagem
--------	--

### **Siglas**

AWS	American Welding Society
IIW	International Institute of Welding

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem a arco pulsado com proteção gasosa (GMAW-P) utilizando eletrodo de alma metálica (“Metal Cored”) tem se destacado na fabricação de estruturas metálicas de aço, em função principalmente do aumento considerável que pode ser conseguido na produtividade do processo.

Certamente, desde o início, essa combinação potencializa as vantagens de ambos. Por exemplo, no “metal cored” a presença de pó metálico como fluxo interno, aliado a alta densidade de corrente que se verifica na secção tubular do eletrodo, permite alcançar grandes taxas de deposição do consumível. O uso do arco pulsado, por sua vez, facilita a soldagem em todas as posições, além de proporcionar um controle mais efetivo da energia de soldagem. Outros benefícios frequentemente reportados são a ocorrência de mínima escória, pouco respingo e a soldagem com elevadas velocidades.

Contudo, para lograr tal êxito, torna-se fundamental estabelecer um correto procedimento de soldagem, incluindo também o conhecimento do estado inicial do metal de base, a influência do tipo de junta e o acerto das demais condições de soldagem, uma vez que os parâmetros de pulso (tempo e intensidade das correntes de pico e base, mais a frequência da pulsação) controlam as características da transferência metálica do eletrodo (temperatura e tamanho das gotas, e a quantidade destacada por pulso) e, por conseguinte, as propriedades e eficiência de deposição da solda.

Em atenção a este preceito, o Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP há um tempo realizou uma pesquisa em aço estrutural ARBL em que foram estudados os efeitos da temperatura de pré-aquecimento da junta e dos parâmetros de pulso na soldagem GMAW-P com eletrodo de alma metálica e proteção gasosa de CO<sub>2</sub>. Os resultados obtidos qualificaram precisamente o desenvolvimento micro estrutural nos metais de solda, porém sem posterior consideração quanto ao comportamento mecânico dos mesmos (Godoy, 2008).

Assim, assumindo o caráter de continuidade, este trabalho faz a determinação das propriedades mecânicas de juntas soldadas nas condições da referida pesquisa, buscando correlacioná-las aos efeitos microestruturais anteriormente verificados. A ideia de complementação justifica-se pela necessidade de se compreender minuciosamente essas relações visando uma melhor aplicação desta técnica.

## **2. OBJETIVO**

A partir da soldagem GMAW-P com eletrodo de alma metálica, conforme salientado na introdução, este trabalho avalia a resistência mecânica, a tenacidade ao impacto e a dureza de juntas soldadas em condições diferenciadas de temperatura de pré-aquecimento, assim como dos parâmetros de pulso, nominalmente a intensidade e o tempo da corrente de pico.

Os resultados são, então, discutidos em termos dos constituintes microestruturais quantificados nos metais de solda depositados em junta de aço estrutural ARBL de elevada resistência à corrosão ambiental.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Aços estruturais de alta resistência e baixa liga (ARBL)

Desenvolvidos a partir dos aços C-Mn laminados a quente, a maioria dos aços que se enquadram nessa classe não adquire boas características de resistência mecânica unicamente pelos tratamentos térmicos convencionais, como por exemplo, os aços temperados e revenidos. Níveis satisfatórios de resistência mecânica, tenacidade, conformabilidade, soldabilidade e resistência a corrosão atmosférica, são obtidos através de uma ação conjunta de adequadas adições de elementos de liga e tratamentos térmicos convencionais, como por exemplo, normalização, ou ainda, tratamentos termo-mecânicos, como por exemplo, a laminação controlada (PORTER e REPAS, 1982).

Aços estruturais temperados e revenidos têm como principal propriedade a resistência ao desgaste por abrasão. Procedimentos de soldagem relativamente simples podem ser usados, sem pré-aquecimento ou com pré-aquecimento a temperaturas baixas.

O teor de carbono nesses aços é normalmente mantido na faixa de 0,03 a 0,25%. Elementos de liga convencionais com Si, Cu, Mn, Ni e Cr, fundamentais no caso dos aços normalizados, são utilizados para fornecerem efeitos de endurecimento por solução sólida da ferrita, melhora na resistência a corrosão atmosférica e refinamento da microestrutura. Esse último, como um resultado do aumento da temperabilidade. Por outro lado, a adição de elementos microligantes como Nb, V, Ti, Al, entre outros, em teores não muito superiores a 0,15%, combinada com o processo de laminação controlada, tem possibilitado aos modernos aços ARBL obterem uma estrutura ferrítica de tamanho de grão muito fino (entre 5 e 10  $\mu\text{m}$ ). O refinamento de grão é reconhecidamente o meio mais apropriado de se aumentar a resistência mecânica para esses aços, devido as considerações de tenacidade (PICKERING, 1978).

Para a soldagem de aços temperados e revenidos da classe ASTM A514/A517, um baixo aporte térmico é utilizado para se conseguir uma resistência mecânica adequada da junta (MODENESI, 2008).

Atualmente, dentre as numerosas aplicações, os aços ARBL têm encontrado grande aceitação no campo das grandes construções metálicas.

### 3.2. Processo GMAW

O desafio de atender aos requisitos de produtividade, aliando qualidade com menores custos de produção justifica a escolha de um processo de soldagem. Ao se analisar os processos de soldagem, WAINER (1995) expõe dois pontos principais a serem tomados com muita atenção:

- Os processos de soldagem baseiam-se em dados empíricos e são dependentes de um grande número de parâmetros, o que dificulta sua formulação matemática;
- São dependentes quase que totalmente da habilidade e conhecimento do homem sobre o processo e suas análises são extremamente difíceis, tornando complicado o controle do processo. (IN: WAINER, 1995, p. 99-132)

Existe um enorme interesse em avaliar tais fatores, cujo conhecimento seria de grande importância e utilidade para o aprimoramento dos processos de soldagem, tanto em aspectos produtivos quanto pela redução de custos de tais processos.

Atualmente, existe uma forte tendência na utilização de processos de soldagem e consumíveis que ofereçam vantagens tais como: taxas de deposição mais altas, menor perda de material de aporte e ciclos de trabalho maiores (não há troca de eletrodos), significando economia tanto no custo da mão-de-obra, quanto no uso de consumíveis. Este é o caso de se optar pelo processo por fusão a arco elétrico com proteção gasosa (GMAW) usando arco pulsado com eletrodo consumível do tipo tubular composto com pó metálico no núcleo, também conhecido como *metal cored* (FRENCH e BOSWORTH, 1995).

O arco e a região de solda são protegidos contra contaminações da atmosfera por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos (MARQUES, 2005). O gás de proteção desempenha outras funções importantes, tais como estabilidade e direcionamento do arco.

No processo GMAW há a necessidade de selecionar as variáveis adequadamente para cada tipo de aplicação. Estas variáveis são definidas pela AWS D1.1 Structural Welding Code-Steel como variáveis essenciais, tais como tensão, corrente, tipo de eletrodo e gás de proteção, entre outros (ZAWODNY, 2001).

Neste processo, a fonte de energia fornece tensão (voltagem) constante e corrente (amperagem) retificada. O ajuste da corrente é feito variando-se a velocidade de alimentação do arame. Quanto maior esta velocidade, maior a corrente que a fonte fornece para fundir o arame de solda.

O ajuste de tensão é feito na fonte, e esta variável é que vai fornecer a energia necessária para gerar uma quantidade de corrente compatível com a velocidade de arame selecionada.

Para uma tensão de trabalho definida, existe uma velocidade de arame que torna o arco e a transferência metálica mais estável, com pouca geração de respingos.

No processo GMAW trabalha-se com polaridade reversa, isto é, o arame de soldagem está ligado na polaridade positiva e a peça-obra ligada na polaridade negativa (BRANDI, 1995).

A Figura 3.1 mostra esquematicamente o processo de soldagem GMAW.

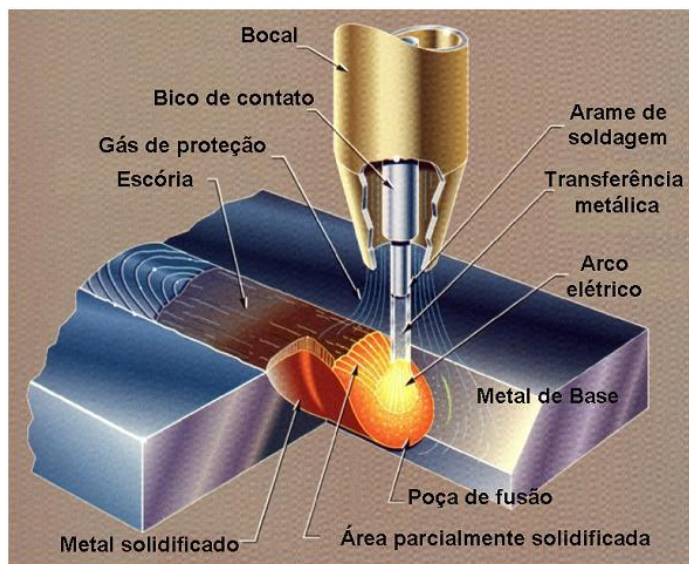


Figura 3.1- Processo de soldagem GMAW.  
(COSTA, 2003).

### 3.2.1. Equipamentos utilizados na soldagem GMAW

Os principais equipamentos do sistema de soldagem GMAW são a fonte de energia, a unidade de alimentação do arame de soldagem com seus controles, a tocha de soldagem com sua unidade de refrigeração e o sistema de alimentação de gás de proteção.

Existem dois tipos básicos de fontes de energia para o processo GMAW: as fontes convencionais e as fontes pulsadas.

As fontes convencionais fornecem corrente contínua cujo valor é praticamente constante no decorrer do tempo. Sua principal característica é a auto regulagem do arco elétrico com a variação de distância entre o bico de contato e a peça, existindo estudos que usam algoritmos para detectar a variação do arco e corrigir possíveis defeitos (QUINN et al., 1999).

As fontes pulsadas fornecem corrente contínua ou retificada, mas sua intensidade varia no decorrer do tempo entre uma corrente de pico e uma corrente de base, e a transferência da gota é feita quando a corrente atinge o valor de pico. Essas fontes propiciam soldas de alta qualidade e acabamento, sendo indicadas para soldagem de alumínio, aço inox e aços carbono, principalmente em aplicações de responsabilidade como, por exemplo, na soldagem de vasos de pressão.

Ao escolher uma fonte de soldagem, um dos fatores mais importantes a considerar é o ciclo de trabalho. Por exemplo, uma fonte que tem ciclo de trabalho de 300A a 60%, em período de 10 minutos pode operar com arco aberto por 6 minutos (GRIST, FARREL e LAWRENCE, 1993).

Uma das formas adotadas de classificação das fontes é pela sua curva característica de saída: fontes de corrente constante e fontes de tensão constante (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2005).

A principal vantagem da fonte de tensão constante é a prevenção de queimas no bico de contato, a manutenção de um comprimento de arco aproximadamente constante e uma fácil abertura do arco (BRANDI, 1995).

A principal vantagem da fonte de corrente é que, mantendo-se a corrente em torno de um valor, mesmo havendo flutuações na velocidade de alimentação do arame, produz-se uma penetração uniforme.

O início do processo se caracteriza pela abertura do arco, que é diferente para os dois tipos de fonte. Nas fontes de tensão constante, a abertura do arco é simples e segura, já que a sua corrente de curto circuito é muito elevada. Mesmo quando o arame toca a peça com velocidade de soldagem plena, o arco se inicia sem grandes dificuldades, enquanto que nas fontes de corrente constante, como não há um aumento da corrente durante o curto, o arame não pode avançar à velocidade plena e, conseqüentemente, o alimentador deve possuir um controle eletrônico capaz de fornecer uma velocidade de arame lenta no início para facilitar a abertura do arco e, depois, passar rapidamente para a velocidade de arame plena, tão logo o arco tenha sido estabelecido (ALCAN,1993).

A unidade de alimentação de arame ou cabeçote leva o arame de soldagem ou metal de adição desde o carretel ou barrica até o arco de soldagem através da tocha de soldagem e seus cabos. Ele inclui todos os sistemas de controle da velocidade de arame e da passagem do gás de proteção. Diferentes tipos de roldanas de tração podem ser montadas de acordo com o diâmetro e o tipo de arame usado, sendo as mais comuns as com canais recartilhados usados para arame tubular, as com canais em U para arame de alumínio e as com canal em V para a soldagem de arame sólido.

A tocha de soldagem tem como função manter o arco-elétrico e levar o arame de soldagem continuamente até a poça de fusão. Algumas tochas podem conter em seu corpo sua própria unidade de assistência ao tracionamento de arame (HOLLIDAY, 1993).

Segundo MARQUES et al. (2005), a tocha de soldagem consiste basicamente de punho ou suporte, que sustenta um bico de contato (onde se energiza o arame), de um bocal que orienta o fluxo de gás e de um gatilho de acionamento do sistema, que quando acionado movimenta um contactor ligado ao primário do transformador da máquina de solda, energizando o circuito de soldagem, além de acionar o alimentador de arame e uma válvula solenóide, que comanda o fluxo de gás protetor.

Uma vez que o arco tenha sido iniciado, a tocha deve ser conduzida mantendo-se uma distância entre o bico de contato e a peça de 12 a 15 mm, devendo ser inclinada no sentido do deslocamento (soldagem empurrando) num ângulo de 5 a 15° com a vertical, de forma a promover a ação de limpeza da camada de óxido à frente da poça, melhorando a molhabilidade e reduzindo a oxidação do metal de base. O valor do ângulo deve ser ajustado de acordo com a velocidade de soldagem, posição da junta, tamanho do cordão e corrente de soldagem empregada (AWS, 1996).

### **3.2.2. Variáveis do processo GMAW**

Inúmeras são as variáveis envolvidas no processo GMAW e que devem ser consideradas. Segundo PEREZ (2007) e MIYAHARA (2008), as variáveis de soldagem são divididas em três grupos:

- Variáveis pré-selecionadas;
- Variáveis primárias;
- Variáveis secundárias de ajuste.

As variáveis pré-selecionadas (fixas), para o processo GMAW são: o diâmetro e o tipo de arame e o tipo de gás de proteção e sua vazão. Elas são determinadas pelo tipo de material soldado, a sua espessura, a posição de soldagem, o regime de deposição desejado e as propriedades mecânicas.

Os arames para a soldagem GMAW são sólidos com diâmetros de 0,6mm a 1,6mm. Utilizando-se o mesmo equipamento da soldagem GMAW poderíamos utilizar arames tubulares com diâmetros de até 2,4mm. Estes arames possuem em seu interior um fluxo semelhante ao utilizado em eletrodos revestidos. Esta característica tem como objetivo aumentar a produtividade e produzir metais de solda com propriedades físico-químicas bem específicas, ampliando o campo de aplicação dos equipamentos do processo. Estudos mostraram que ao utilizar-se de parâmetros de soldagem adequados para cada consumível, arames com fluxo metálico (metal cored) de 1,2mm de diâmetro,

apresentaram uma maior taxa de deposição que o arame sólido de 1,2mm de diâmetro (ARAÚJO, 2004).

Hoje em dia, existe uma gama muito grande de tipos de arame para o processo que seguem especificações como as ditadas pela AWS, uma das mais usadas.

Os arames para a soldagem são constituídos de metais ou ligas metálicas que possuem composição química, dureza, condições superficiais e dimensões bem controladas. Arames de má qualidade, considerando-se as propriedades citadas, podem produzir falhas de alimentação, instabilidade do arco e descontinuidades no cordão de solda (MARQUES et al., 2005).

A seleção do arame a ser utilizado, é feita em termos da composição química do metal base, do gás de proteção a ser usado e da composição química e propriedades mecânicas desejadas para a solda. Os arames podem ser fornecidos em carretéis ou em barricas.

O arame de soldagem escolhido deve proporcionar um depósito ou junta soldada com características mecânicas iguais ou superiores às características do metal de base (LINCOLN, 1998).

Os elementos contidos no fluxo de um arame tubular melhoram a estabilidade do arco, as propriedades mecânicas do metal base, bem como influenciam no acabamento do perfil da solda.

O *metal-cored* é um tipo especial de arame tubular com utilização de proteção gasosa e que tem, em destaque, o pó metálico na composição do fluxo. Apresenta algumas características similares ao arame sólido e outras similares ao arame tubular não-metálico (LYTTLE, 1996). Nestas similaridades, busca-se combinar as melhores propriedades que se destacam em cada um destes eletrodos. Assim, de forma geral, ALTEMÜHL (1998), BARHORST (2000) e BLOME (2000) creditam inúmeras qualidades ao arame tubular metálico, dentre as quais: elevada taxa de deposição, resultando em maior velocidade de soldagem para uma mesma aplicação; pequena formação de escória sobre o cordão de solda; baixa geração de fumos de soldagem; baixa probabilidade da ocorrência de porosidade, devido ao baixo teor de hidrogênio difusível e uma alta resistência à reabsorção da umidade; ótima estabilidade do arco; entre outros. Em relação à taxa de deposição, o arame tubular metálico pode apresentá-la

cerca de 10-30% maior do que os arames sólidos ou os arames tubulares não metálicos (LYTTLE, 1996)

O fluxo metálico representa uma evolução tecnológica em relação ao fluxo não-metálico e, tem como principal vantagem a baixa quantidade de escória gerada por estes arames, quase inexistente; e, desta forma, reduzindo a possibilidade de descontinuidades geradas pela retenção de escória na poça fundida (DIAS, 2003).

O *metal-cored*, a exemplo do que também ocorre com o arame sólido, apresenta inclusões de óxidos que contribuem para a nucleação da fase ferrítica acicular na solidificação do metal líquido. No entanto, essa porcentagem de óxidos é maior no arame *metal-cored* que no arame sólido; devido às camadas de óxidos nas superfícies dos pós-metálicos que estão presentes no seu fluxo interior (ARAÚJO, 2004).

Comparativamente com o arame sólido, o *metal-cored* proporciona, devido ao seu arco estável e a sua forma de transferência, uma solda isenta de falta de fusão, mantendo uma boa penetração, sendo possível um menor volume de solda para garantir as mesmas propriedades da junta (ARAÚJO, 2004).

ALTEMÜHL (1998), BARHORST (2000) e BLOME (2000) em seus trabalhos ilustram aplicações do *metal-cored* em sistemas robotizados substituindo arames sólidos. Estas aplicações incluem ganhos de produtividade (velocidade de soldagem 30-40% maiores que as obtidas com arames sólidos) e qualidade. Devido a menor densidade de corrente observada nos arames tubulares *metal-cored* em relação aos arames sólidos e pelo seu arco ser mais difuso, permite-se o uso de arames com diâmetros maiores; ficando registrado nestes trabalhos a possibilidade de utilização de uma única bitola para diversas espessuras a serem soldadas, conseguindo-se uma redução de paradas para mudanças (aumento produtividade) e nos custos de inventário. Aliado a esta possibilidade de utilização de diâmetros maiores, os arames tubulares *metal-cored* mostram-se mais tolerantes às irregularidades nas preparações de juntas e menos sensíveis a ocorrência de furos durante a soldagem de chapas finas.

A função primária dos gases de proteção é proteger o arame, a poça de fusão e o arco contra efeitos nocivos do ar atmosférico.

Vários metais têm uma forte tendência de combinar com o oxigênio, formando óxidos, reagindo com o carbono, formando monóxido de carbono. Os produtos dessa

reação são fontes de deficiência na solda, podendo-se citar os defeitos de fusão, devido aos óxidos e perda de resistência, devido à porosidade. Por esse motivo, a indústria de gases de proteção vem fazendo grandes progressos no desenvolvimento de seus gases no decorrer destes últimos 50 anos, conseguindo obter grandes contribuições para a soldagem tanto na produção quanto na purificação de diferentes gases e misturas, sendo que este estudo continua sendo feito para se estudar novos gases e seus efeitos sobre o cordão de solda (MOYER, 2002).

Como na soldagem a transferência de material é feita por gotas fundidas do material do eletrodo, a função principal do gás de proteção é fazer uma barreira de isolamento do material fundido contra o contato com a atmosfera carregada de oxigênio, visto que o critério principal na seleção do gás de proteção para determinada aplicação é a qualidade da junta a ser soldada. O gás de proteção também terá efeito sobre os aspectos da soldagem e conseqüentemente no resultado do cordão de solda que são as características do arco, o modo de transferência do metal, penetração e perfil de solda, velocidade de soldagem e ação de limpeza da solda.

As variáveis primárias ajustáveis (conhecidas também como parâmetros de soldagem) controlam o processo depois que as variáveis pré-selecionadas foram determinadas. Elas influenciam na formação do cordão, na estabilidade do arco, no regime de deposição e na qualidade da solda. Estas variáveis são: a tensão do arco, a corrente de soldagem e a velocidade de avanço.

A velocidade de avanço da soldagem influencia a energia de soldagem, ou seja, a quantidade de calor cedida à peça: quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor cedida por unidade de área. A partir do controle da velocidade, pode-se controlar a penetração e o tamanho do cordão, sendo que velocidades excessivas provocam menor penetração e menor largura do cordão. A velocidade de soldagem deve ser selecionada em conjunto com a corrente para proporcionar a penetração desejada (NILO Jr, 2003).

Necessita-se fazer a seleção da tensão empregada durante o processo de soldagem, que juntamente com as variáveis anteriormente escolhidas, eletrodo, corrente e velocidade do arame, façam com que o arco mantenha sua estabilidade, trazendo como conseqüência, a minimização do índice de respingos.

A tensão é vista como sendo um dos fatores mais influentes no resultado final do processo, por afetar tanto o modo de transferência metálica quanto a geometria do cordão de solda. A tensão de soldagem e o comprimento do arco estão diretamente relacionados sob o mesmo aspecto, ou seja, baixas tensões tenderão a produzir baixos comprimentos de arco e vice-versa (NILO Jr, 2003).

WAINER et al. (1995) sustentam que a potência do arco, dada pelo produto entre sua tensão e corrente, é responsável pela largura do cordão de solda.

De acordo com NILO Jr (2003), a corrente de soldagem tem influência na taxa de deposição, no modo de transferência metálica e nas características geométricas do cordão de solda. Desta forma sua correta escolha é dependente da espessura da peça a ser soldada, do diâmetro do arame, sendo que uma corrente de baixa intensidade pode proporcionar um arco elétrico instável.

As variáveis secundárias, que também podem ser ajustadas são, às vezes, difíceis de medir com precisão. Elas não afetam diretamente a formação do cordão, mas agem sobre uma variável primária que, por sua vez, causa modificações em sua formação. Estas variáveis são: a extensão do eletrodo (*stick-out*), o ângulo do bocal e a velocidade de alimentação do arame.

A extensão do eletrodo (*stick-out*) é a distância do bico de contato à peça.

Um excessivo *stick-out* provocará uma queda de tensão entre o tubo de contato e o metal de base, tendo como conseqüência uma menor penetração e um aumento na taxa de deposição (GUERRA, 2007).

O ângulo do bocal é a posição da tocha de soldagem com relação à junta na qual é definida por dois ângulos (transversal e longitudinal). O ângulo transversal é dado pela posição da tocha e da junta num plano perpendicular à direção de avanço. Nas soldas de ângulo, o ângulo transversal é normalmente igual à metade do ângulo formado pelas peças a soldar; nas soldas de topo, ele é de 90° em relação à superfície das peças.

O ângulo longitudinal é o ângulo entre a linha de centro da pistola e uma linha perpendicular ao eixo da solda; é este ângulo que é dado como ângulo do bocal.

### 3.2.3. Transferência metálica no processo GMAW

A transferência metálica num processo de soldagem pode ser descrita como o transporte de gotas fundidas da ponta do metal de adição (ou eletrodo) pra a poça de fusão (WANG et al., 1995).

A forma em que ocorre essa transferência acarreta efeitos importantes nos aspectos operacionais da soldagem, dentre os quais, o índice de respingos e fumos, a possibilidade do processo ser utilizado fora da posição plana, o formato do cordão, a estabilidade do arco, o grau de penetração da solda e o desempenho operacional do processo. Destaca-se que um arco estável é a chave principal para a realização de soldas com boa qualidade. A estabilidade é dependente das características.

Os modos de transferências metálicas dependem de ajustes das variáveis operacionais, tais como: corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do metal de adição utilizado, gás de proteção, comprimento energizado do eletrodo, do modo como interagem as forças atuantes no processo, entre outros (MODENESI, 2002).

KIM e EAGAR (1993) apresentam que entre os modos de transferência metálica há diferenças na estabilidade do arco, poça de fusão, penetração, produção de salpicos, porosidade e nível de gás aprisionado.

O modo de transferência metálica acarreta efeitos importantes nas características da solda e afetam a habilidade de soldagem em várias posições, o grau de penetração da solda e a estabilidade do arco, bem como o índice de respingos, (SUBRAMANIAN et al., 1998). As características da transferência metálica são dependentes da composição química do material, do tipo de gás de proteção utilizado, bem como dos parâmetros elétricos.

A transferência metálica tem sido extensivamente estudada para o processo GMAW, sendo ainda hoje um tema de interesse e, portanto, bastante investigada. Deve-se considerar que o processo GMAW oferece ótimas características para a observação da transferência de metal, dentre as quais estão: possibilidade de operar um arco aberto, sem escória, e com um menor nível de fumos ou fumaças.

Alguns autores como KIM e EAGAR (1993) e WEBER (1982) citam os modelos de Transferência por Curto-Circuito, Transferência Globular, Transferência por Arco Spray e Transferência por Arco Pulsado.

**Transferência por Curto-Circuito:** No modo de transferência por curto-circuito, a passagem de todo metal é feita quando o eletrodo está em contato com a poça do metal fundido. Neste modo de transferência a fonte controla a relação entre o estabelecimento do arco e do curto-circuito do eletrodo. Desde que o calor introduzido no processo seja baixo, a penetração da solda não tem a característica de ser profunda, contudo, esta torna possível que a soldagem seja feita em todas as posições. Este tipo de transferência se torna instável devido à extinção e ignição do arco repetidamente. Da mesma maneira que nos outros modos de transferência do processo GMAW, o modo curto-circuito sofre a influência de vários parâmetros da soldagem, como voltagem, velocidade de alimentação do eletrodo, a composição do gás de proteção e corrente.

**Transferência Globular:** No modo de transferência globular, a passagem do metal é feita em um baixo nível de energia o que gera uma transferência em forma de glóbulos irregulares, resultando em uma considerável quantidade de respingos. Esta quantidade de respingos pode ser minimizada utilizando-se  $\text{CO}_2$  como gás de proteção, sendo que o arco gerado por este gás é geralmente instável. O resultado deste modo é que a aparência da superfície soldada se torna áspera em comparação ao modo de transferência por spray. Neste modo de transferência em que a energia do arco é direcionada diretamente para baixo, o perfil da solda apresenta uma boa penetração. Uma certa estabilidade do arco pode ser conseguida utilizando  $\text{CO}_2$  como proteção do arco a partir de um alto nível de corrente.

**Transferência por Arco Spray:** A transferência por spray ou aerosol por ter altos valores de tensão utilizados a partir dos valores pré-ajustados para uma transferência por curto-circuito, o arco voltaico ganha um formato de leque e o material é transferido por meio de gotículas de diâmetro muito menor que o diâmetro do arame. O arco é bastante suave e estável, resultando em um nível bastante baixo de respingos durante a soldagem, o que confere alto grau de qualidade visual ao cordão de solda. Devido à energia do arco ser dispersa em forma de cone, o modo de transferência por spray

confere uma penetração relativamente baixa, menor que a conseguida como o modo de transferência globular. O modo por spray é estabelecido a um nível mínimo de corrente para qualquer diâmetro de eletrodo usado no processo, sendo que este nível de corrente geralmente é denominado de “corrente de transição”. Esta transferência não é aplicada em soldagem fora de posição (verticais ascendentes e descendentes e sobre-cabeça).

Os modos de transferência curto-circuito, globular e spray são considerados como modos de transferência naturais, enquanto que a transferência a arco pulsado é considerada uma forma artificial de transferência; uma vez que necessita de equipamento especial para a sua ocorrência.

Transferência por Arco Pulsado: O modo de transferência por arco pulsado é uma variação da transferência por arco spray, onde a corrente é alternada entre um valor de pico e outro valor de base em um período de tempo determinado, formando ciclos e proporcionando um nível menor de calor transferido para a peça. O modo pulsado de transferência obtém uma melhor estabilidade do arco quando utilizado maiores velocidades de alimentação do arame.

As gotas metálicas são transferidas por meio de pulsos de corrente, com frequência e amplitude pré-estabelecidas nas fontes eletrônicas modernas de soldagem que apresentam, em sua saída, formas de onda diferentes da corrente constante.

A forma de onda pulsada possibilita soldar chapas de pequenas espessuras, mais facilmente do que com a corrente convencional, devido ao menor aporte térmico, que possibilita minimizar problemas de deformação e distorção em chapas, principalmente tratando-se daquelas com espessuras menores.

Sendo a transferência da gota por spray e mantendo-se o calor de aporte em níveis apropriados, é possível soldar em todas as posições. Os eletrodos usualmente utilizados são de 1,2 a 1,6mm. No processo convencional a intensidade da corrente de transição é constante durante todo o tempo de aplicação da mesma (CORRÊA, 2000).

Entre as características deste processo alternativo de soldagem está o aumento no número das variáveis em relação ao processo convencional. Conseqüentemente há uma elevação nos parâmetros a serem ajustados antes da operação e monitorados durante a soldagem. Dentre tais parâmetros estão a corrente de pico ( $I_p$ ), tempo de pico

( $t_p$ ), corrente de base ( $I_b$ ) e tempo de base ( $t_b$ ), além da velocidade de alimentação do arame e da tensão de soldagem.

Na Figura 3.2 observa-se graficamente o comportamento de uma onda pulsado e seus respectivos parâmetros. Notam-se dois níveis extremos de corrente. Um nível inferior, chamado de corrente de base ( $I_b$ ), no qual haverá a formação da gota e suficiente apenas para manter o arco aberto, mas insuficiente para promover a transferência metálica. O destacamento da gota se dará num outro nível de corrente, superior ou anterior, chamado de corrente de pico ( $I_p$ ), a qual é estabelecida para exceder o valor crítico, e assim proporcionar a transferência do metal em gotas pequenas. Além disso, o seu valor e tempo de duração são ajustados para que em cada pulso ocorra o destacamento de uma discreta gota de diâmetro igual ou menor que o eletrodo. Então a técnica produz uma série de gotículas que resulta numa transferência do tipo névoa, que se dá por meio de uma corrente média que normalmente produziria uma transferência do tipo globular, promovendo a formação de cordões de solda uniformes e com mínimos defeitos. Os respectivos tempos de duração destas correntes são o tempo de base ( $t_b$ ) e o tempo de pico ( $t_p$ ); sendo que ambos definem a frequência de pulso ( $F$ ) e o período de ciclo ( $T$ ) (SAITO, 2001).

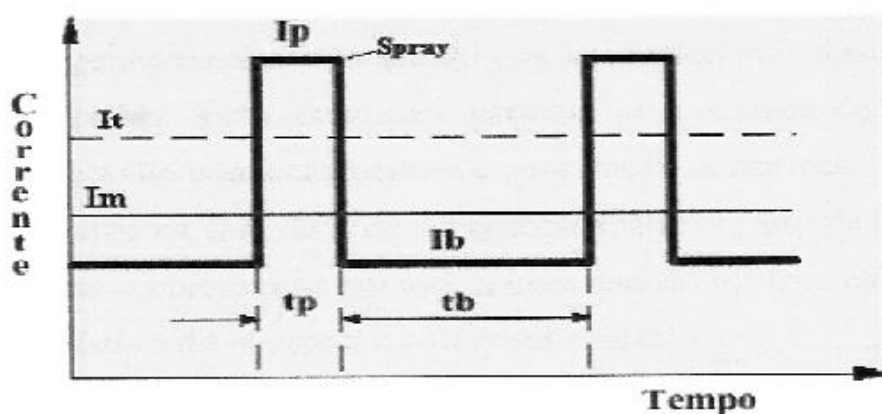


Figura 3.2 - Representação esquemática da pulsação de corrente.  $I_p$ - Corrente de pico,  $I_b$ - Corrente de base,  $t_p$ - Tempo de pico e  $t_b$ - Tempo de base. (MODENESI, 2002).

Na corrente pulsada, a transferência metálica é obtida por uma corrente média de soldagem sempre inferior ao valor da corrente de transição obtida na soldagem

convencional. Para que se tenha uma adequada estabilidade no processo de transferência metálica em corrente pulsada, é necessário satisfazer três condições (SUBRAMANIAM et al., 1999):

- a) Necessidade se ter um equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e sua taxa de fusão, de forma a manter o comprimento do arco constante. Se a taxa de alimentação do arame for maior do que a taxa de fusão do mesmo, haverá o aumento do comprimento do eletrodo acarretando a ocorrência de curto-circuito. No entanto, se a taxa de alimentação for menor do que a de fusão do arame, o comprimento do eletrodo diminuirá, aumentando a altura do arco e causando a fusão do bico de contato.
- b) Destacamento de apenas uma gota metálica por pulso de corrente. Durante todo o regime de soldagem deverá ser garantido que a transferência desta gota ocorra na fase final de cada pulso. Esta condição garante uma transferência metálica estável produzindo um cordão com acabamento e penetração uniformes.
- c) Manutenção do arco na fase de base. A combinação corrente de base e tempo de base tem simplesmente o objetivo de garantir a manutenção do arco elétrico entre os pulsos, aquecimento resistivo do eletrodo e a limpeza catódica (SUBRAMANIAM et al., 1999, p. 166-172).

#### **3.2.4. Processo de soldagem GMAW pulsado**

As aplicações do processo GMAW convencional tem sofrido fortes restrições devido às limitações sobre o controle da transferência metálica, o que torna o processo muito instável e de difícil controle. A transferência metálica por spray, por ser estável, oferece grandes vantagens como já mencionado anteriormente, entretanto esta só é possível com altos níveis de corrente, sendo que com o processo GMAW convencional, esse tipo de transferência não pode ser regulada independente da quantidade de calor transferida para a solda. Então, desenvolveu-se uma fonte de soldagem que gera ondas intermitentes, ou pulsos, de corrente elevada, possibilitando da mesma forma o tipo de transferência por spray, ao passo que menor quantidade de calor é transferida para a peça, diminuindo assim deformações e possibilitando a soldagem de chapas mais finas (COLLARD, 1988).

No modo pulsado, são muitos os fatores variáveis responsáveis pela manutenção da operação de soldagem. Neste sentido, torna-se bastante complexa a tarefa para a seleção de parâmetros que possam ser adequados às necessidades de

estabilidade do arco, vantagens econômicas, qualidade e propriedades mecânicas da solda (NORRISH, 1992). No entanto, com o uso da corrente pulsada, obtêm-se um maior controle da poça de fusão, o refino da estrutura bruta de solidificação e uma corrente média mais baixa em relação ao modo convencional e, com isso, a quantidade de calor colocada na peça é menor, podendo-se soldar espessuras de chapas menores e em todas as posições (NORRISH, 1992).

Essa tecnologia do processo GMAW pulsado foi lançada comercialmente por volta de 1970 com um controle limitado. Avanços tecnológicos conseguidos nas fontes de soldagem têm alcançado boas melhorias no desempenho dos equipamentos utilizados na soldagem GMAW e assim possibilitando seu uso em áreas que antes eram impraticáveis, por permitir melhor controle dos parâmetros envolvidos no processo.

Segundo WEBER (1982), o controle mais aprimorado dos parâmetros do processo juntamente com o baixo índice de respingos conseguido e boa estabilidade do arco são fatores que contribuem para o bom desempenho do modo pulsado quando utilizado na soldagem de chapas mais finas ou componentes que requerem maior precisão. Outra vantagem que se pode citar é a possibilidade de uso de eletrodos com diâmetros maiores que 1,6mm, o que proporciona taxas maiores de deposição de material, gerando maior eficiência do processo. Como não poderia deixar de ser, o modo pulsado traz consigo algumas desvantagens, como por exemplo, o maior número de parâmetros a serem controlados durante a soldagem em relação ao processo GMAW convencional. Estes parâmetros adicionais, chamados de parâmetros de pulso, devem ser analisados em conjunto com os já existentes do modo convencional, sendo que estes parâmetros de pulso são a corrente de pico e corrente de base, tempo de pico e tempo de base, frequência de pulso e ciclo ativo.

CORRÊA (2000) apresenta, em seu trabalho de pesquisa, algumas vantagens de se aplicar o processo pulsado em relação ao convencional:

- Possibilidade de se soldar em qualquer posição e com taxa de fusão maior do que aquela obtida em curto-circuito;
- A corrente média é bem menor do que a utilizada com uma fonte convencional, para um mesmo resultado;
- A produção de respingos é quase nula; há ótima estabilidade do arco e a velocidade de soldagem pode ser bastante elevada;
- A geometria do cordão se mantém praticamente constante;
- O sistema pode ser controlado por um único comando, quando sinérgico, facilitando o estabelecimento das condições operacionais ótimas;

- Melhor controle da transferência do metal;
- A solda executada possui melhor qualidade.
- Um mesmo diâmetro de arame pode ser utilizado num amplo intervalo de corrente. Por exemplo, o diâmetro de 1,2mm (aço) permite valores de corrente média desde 80 a 350A, com a taxa de deposição equivalente àquela de eletrodos revestidos de diâmetro de 3,2 a 5,0mm; (CORRÊA, 2000).

BARRA (2003) apresenta como desvantagens do modo pulsado:

- Necessidade de mão-de-obra mais qualificada, devido à complexidade na escolha dos parâmetros;
- Exige fontes de soldagem mais caras do que no modo convencional;
- Maior emissão de raios ultravioleta pelo arco.

### 3.2.5. Parâmetro do modo pulsado

A forma de onda da corrente do processo GMAW pulsado pode ser descrita através de alguns parâmetros, com característica periódica, em que há um valor máximo de corrente, chamado corrente de pico ( $I_p$ ), um valor mínimo de corrente em cada um dos pontos, de pico e base, denominados respectivamente de tempo de pico ( $t_p$ ) e tempo de base ( $t_b$ ). Destes parâmetros básicos pode-se gerar alguns parâmetros, como a frequência de pulso ( $f$ ), corrente média ( $I_m$ ) e ciclo ativo ( $C_A$ ). Estas variáveis precisam ser consideradas juntamente com os outros parâmetros do processo GMAW convencional, como o comprimento do arco voltaico, velocidade de alimentação do arame, gás de proteção e sua composição e diâmetro do eletrodo (AWS, 1991).

As características de transferência, deposição, fusão e desempenho são determinados pela combinação dos parâmetros de pulso, influenciando diretamente nas características geométricas do cordão de solda. A grande dificuldade está na determinação correta destes parâmetros para uma boa qualidade de solda, devido ao número de variáveis envolvidas.

Segundo a fabricante MILLER (1994) são apresentadas algumas influências dos parâmetros de pulso. Em sua análise considera o aumento de um dos parâmetros, enquanto os demais são mantidos constantes. Assim:

- O acréscimo no tempo de pico ( $t_p$ ) promove um aumento no comprimento do arco, no calor induzido, na penetração, na largura do cone do arco, na corrente média e no comprimento do arco;
- Aumentando a frequência de pulso ( $F$ ), o comprimento do arco torna-se maior, assim como a corrente média e a energia introduzida, ressaltando ainda que a frequência de pulso é um bom elemento para o ajuste do comprimento do arco, tipicamente utilizado para controlar a taxa de fusão;
- Elevando a corrente de pico ( $I_p$ ), provoca-se um acréscimo na taxa de fusão, o que afeta diretamente o comprimento do arco, como também, um ligeiro aumento na corrente média e no calor introduzido;
- O aumento da corrente de base ( $I_b$ ), acarreta um incremento no comprimento do arco, na corrente média, no aporte de energia introduzido, na penetração e na fluidez da poça de fusão. Sendo esta última, resultado da tensão superficial e viscosidade. (MILLER, 1994)

Sobre a penetração, SANTOS et al. (1989) concluíram que, utilizando-se arames tubulares com corrente pulsada, tem-se a penetração elevando-se linearmente com o crescimento da intensidade média de corrente, quando se mantém constante a velocidade de soldagem. Outro aspecto observado é a pequena influência do diâmetro do arame em relação à profundidade de penetração, notando-se, contudo uma tendência para a penetração aumentar à medida que o diâmetro do consumível diminuía. Verificaram experimentalmente que para vários diâmetros e tipos de consumíveis, as áreas de fusão e de depósito aumentam quando a intensidade de corrente aumenta. Também, a diluição assume valores crescentes com o aumento da corrente.

### 3.3. Metalurgia da soldagem

A soldagem envolve aquecimento, fusão, solidificação e resfriamento de um material ou de diversos materiais, dependendo da aplicação do componente soldado. Assim, as transformações que ocorrem no aquecimento, as fases formadas durante a fusão, a solidificação e as transformações que ocorrem no resfriamento determinam o desempenho da junta soldada. Assim sendo, a metalurgia da soldagem está intimamente ligada à qualidade da junta soldada, bem como ao conceito de soldabilidade, que é a facilidade com que uma junta soldada é fabricada de tal modo que preencha os requisitos de um projeto bem executado (BRANDI, 1995).

### 3.3.1. Energia de soldagem (HEAT INPUT)

Energia de soldagem (E) é a energia introduzida no metal de base por unidade de comprimento do cordão de solda. A energia de soldagem é calculada por meio de uma equação na qual o produto  $V \cdot I$  tem unidade de potência e está relacionado com a energia elétrica produzida no arco elétrico pelo equipamento de soldagem.

De acordo com a própria definição de energia de soldagem, a energia elétrica produzida pelo arco deve ser corrigida para a energia térmica que efetivamente foi introduzida na peça. A fração de energia térmica perdida é função das particularidades de cada processo de soldagem. Por isso, para corrigir a energia de soldagem é definido o adimensional  $\eta$  que é chamado eficiência térmica do processo de soldagem (BRANDI, 1995).

De acordo com ZEEMANN (2003), a quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é o que se chama energia de soldagem, ou aporte de calor, ou aporte térmico, ou *heat input*, representada pelas letras E ou H, e cuja unidade usual é kJ/mm, sendo também apresentada em kJ/cm ou J/mm.

Tem-se a equação:

$$H_e = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{V_s} \quad (1)$$

em que:

$H_e$  = Aporte térmico (kJ/mm);

$\eta$  = Eficiência térmica do processo de soldagem;

U = Tensão em Volts (V);

I = Corrente em Ampéres (A);

$V_s$  = Velocidade linear de soldagem (mm/s).

### 3.3.2. História térmica da soldagem

Por história térmica da soldagem, entende-se a evolução de temperatura para um dado material e procedimento de soldagem, tanto em função do tempo quanto da distância ao centro do cordão de solda. Portanto, a história térmica abrange tanto a repartição térmica quanto o ciclo térmico de soldagem.

A repartição térmica é representada pela máxima temperatura atingida em cada ponto, em função da distância deste ponto ao centro do cordão de solda. Ela está associada basicamente à extensão da zona afetada pelo calor, que por sua vez, é determinada pela mínima temperatura ( $T_c$ ), que afeta a microestrutura e/ou as propriedades do metal de base.

A curva de repartição térmica (Figura 3.3) permite definir, para uma solda por fusão, três regiões básicas:

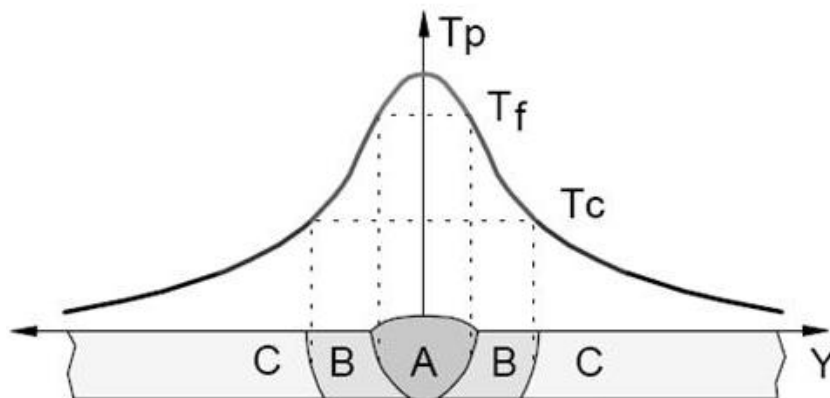


Figura 3.3 - Repartição térmica de uma solda.  
(MARQUES et al., 2005).

- Metal de base – MB (Regiões C),
- Zona termicamente afetada – ZTA (Regiões B) e
- Zona fundida – ZF (Região A).

O ciclo térmico de soldagem é o lugar geométrico dos pontos de variação da temperatura em função do tempo, em uma distância fixa a partir do centro do cordão.

O ciclo térmico está relacionado às transformações de fase que ocorrem durante o resfriamento da junta soldada como mostra a Figura 3.4.

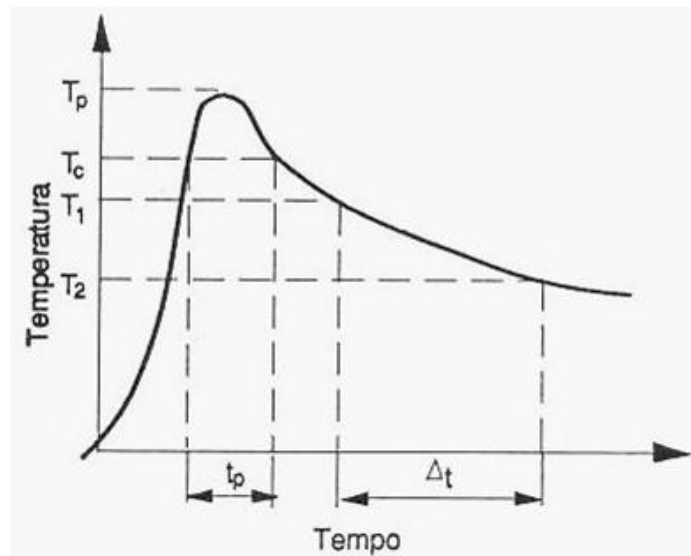


Figura 3.4 - Ciclo térmico de soldagem.  
(FORTES e ARAÚJO, 2004).

A velocidade de resfriamento é definida por  $(T_1 - T_2)/\Delta t$ , sendo o tempo necessário para a solda se resfriar de uma dada temperatura ( $T_1$ ) até outra ( $T_2$ ).

A repartição térmica e o ciclo térmico de soldagem são funções das propriedades físicas do material, geometria da junta e procedimento de soldagem. Contudo há diferenças entre eles. Na repartição térmica trabalha-se com a máxima temperatura atingida durante a soldagem em função da distância. Já no ciclo térmico utiliza-se a temperatura e não a temperatura máxima. Assim, para um dado material e condição de soldagem, existe apenas uma repartição térmica, mas infinitos ciclos térmicos de soldagem (BRANDI, 1995).

### 3.4. Desenvolvimento microestrutural no metal de solda

A microestrutura de um aço é definida pela sua composição química, estrutura cristalina e morfologia de cada fase a qual é afetada basicamente pela velocidade de resfriamento durante a solidificação (LIMA, 2000).

A microestrutura da zona fundida do metal de solda de um aço é resultado do crescimento colunar do metal de solda solidificado, sendo influenciada pelo estado

inicial da austenita e da interação complexa de muitas variáveis com; composição química do metal de solda, tamanho de grão austenítico anterior, micro-segregações, estado de deformações, das condições de aquecimento e resfriamento além da composição química e distribuição do tamanho de inclusões não metálicas e precipitados.

Quando se executa uma solda em um único passe, a microestrutura da zona fundida será composta pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita durante o ciclo de resfriamento contínuo, sendo que a ferrita pode assumir diferentes morfologias e algumas de grande semelhança.

Em operações de soldagem multipasses, a microestrutura será ainda mais complexa.

Basicamente a austenita é decomposta em ferrita, perlita e cementita, também pode ocorrer de pequenas quantidades de austenita permanecerem inalteradas, essa austenita é chamada de austenita retida. Também pode ocorrer na estrutura a presença de precipitados como carbonetos, nitretos e inclusões.

Os diferentes constituintes presentes na zona fundida nem sempre são de fácil identificação, e para facilitar essa identificação e eliminar a proliferação de diferentes nomenclaturas, Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu um sistema de classificação para os constituintes do metal de solda, baseada na análise morfológica realizada por microscopia ótica, que permite classificar os principais constituintes microestruturais de metais de solda ferríticos, na condição como soldada.

#### **3.4.1. Classificação dos principais microconstituintes do metal de solda**

Segundo o IIW, os principais microconstituintes são: ferrita primária, ferrita acicular, ferrita com segunda fase, agregado ferrita-carboneto e martensita.

Com exceção da martensita, a distinção entre os outros constituintes microestruturais pode ser esquematicamente visualizada através das ilustrações contidas na Figura 3.5, com as correspondentes características morfológicas:

- Ferrita primária (PF)

Engloba as morfologias de contorno de grão e a intragranular. A primeira, PF (G), é caracterizada como veios, ou também grãos equiaxiais, associados aos contornos dos grãos colunares da austenita anterior, enquanto que segunda, PF (I), compreende aos grãos poligonais de ferrita contidos no interior dos referidos grãos colunares.

- Ferrita acicular (AF)

A morfologia desse constituinte é tipicamente caracterizada como pequenos grãos de ferrita, não alinhados, isolados ou não, e encerrados dentro dos grãos colunares da austenita anterior. Os grãos isolados normalmente apresentam elevada relação de aspecto.

- Ferrita com segunda fase (FS)

Em função do posicionamento da fase secundária em relação à ferrita, as morfologias alinhadas e não alinhada são passíveis de identificação. A morfologia alinhada, FS (A), é caracterizada pela incidência da fase secundária entre ripas paralelas de ferrita. Particularizações em termos de ferrita de placas laterais (FS(SP)), bainita (FS(B)), ou mais específico ainda, as bainitas superior (FS(UB)) e inferior (FS(LB)), também são previstas. A morfologia não alinhada, FS(NA), caracteriza-se pela presença de grãos de ferrita circundados tanto por microfases, quanto por ripas isoladas de ferrita acicular de elevada relação de aspecto.

- Agregado ferrita-carboneto (FC)

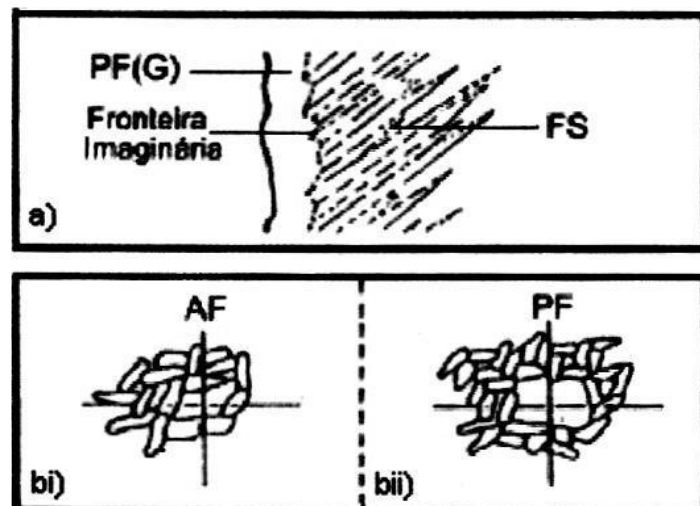
Esse constituinte pode ser interpretado como uma mistura de ferrita e carbonetos, incluindo a perlita e a ferrita com carboneto interfásico, de tamanho bastante refinado, cuja resolução freqüentemente fica abaixo da obtida por microscopia

ótica. A especificação única com respeito à perlita (FC(P)) também é prevista. Em relação ao tamanho do agregado, observa-se que no caso de uma incidência bem menor do que as ripas adjacentes de ferrita, esse constituinte pode ser tratado como uma microfase.

– Martensita (M)

Devido também a dificuldade de resolução com a microscopia ótica, a morfologia desse constituinte é interpretada sob a forma de colônias, que devem ser maiores que as ripas adjacentes de ferrita. Em ocorrendo o contrário, as mesmas podem ser consideradas como microfases. A diferenciação da martensita em ripas (M(L)) e a martensita maclada (M(T)), também são previstas.

Em relação à terminologia clássica, as equivalências das ferritas alotriomórfica e poligonal com as duas morfologias da ferrita primária na terminologia proposta pelo IIW, são bem aceitas, além, é claro, da ferrita acicular que é comum em ambas as terminologias. Dificuldades maiores de equivalências são apontadas entre os outros constituintes.



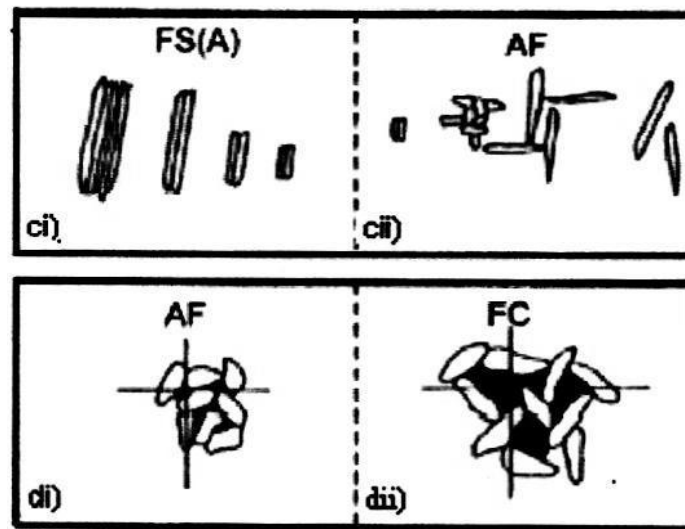


Figura 3.5 - Representação esquemática de constituintes microestruturais (WELDING IN THE WORLD, 1991).

As partes componentes desta figura têm o seguinte significado:

- a) - Fronteira imaginária entre FP(G) e FS.
- bi) - Ferrita sob o retículo  $<3x$  a largura média das ripas de ferrita que a circundam.
- bii) - Ferrita sob o retículo  $>3x$  a largura média das ripas de ferrita que a circundam.
- ci) - Duas ou mais ripas paralelas e relação comprimento/largura  $> 4/1$ .
- cii) - Duas ripas com relação comprimento/largura  $<4/1$  ou ripas não alinhadas ou ripas isoladas de alta relação comprimento/largura.
- di) - Área da colônia FC sob o retículo  $<$ área individual das ripas de ferrita.
- dii) - Área da colônia FC sob o retículo  $>$ área individual das ripas de ferrita.

Com esta classificação consegue-se analisar a metalografia quantitativa dos diversos microconstituintes presentes no metal de solda e, conseqüentemente prever as suas propriedades mecânicas.

### 3.4.2. Efeito da microestrutura na tenacidade

O motivo da realização da pesquisa é compreender a relação entre as microestruturas do metal de solda e seu comportamento mecânico, especialmente em relação à tenacidade. Busca-se desta forma, estabelecer o entendimento da resistência ao impacto na região da solda pelo conhecimento da microestrutura existente.

A proposta pioneira de DOLBY (1979) é de que a resistência a clivagem do metal de solda, avaliada através de medidas de CTOD (Crack Tip Opening Displacement), (Tenacidade à fratura), está relacionada com sua resistência mecânica, quantidade de ferrita acicular e a composição química participante.

Segundo ABSON e PARGETER (1986), é necessário distinguir o efeito da microestrutura na tenacidade avaliada por CTOD (Tenacidade à fratura) e na tenacidade avaliada por ensaio Charpy (Tenacidade ao impacto), pois a primeira avaliação de tenacidade é concernente somente com a iniciação da fratura, enquanto que a tenacidade avaliada por ensaio Charpy é também uma função da energia de propagação. Desta forma, esses pesquisadores sugeriram um possível efeito benéfico na tenacidade avaliada por CTOD, através do alcance da homogeneidade microestrutural formada com constituintes de morfologia mais grosseira.

A explicação para essa sugestão considera que, no caso da ferrita de contorno de grão, constituinte notadamente considerado bastante dúctil, quando conjugado com a ferrita acicular, constituinte mais resistente, a concentração de deformação resultante na ferrita de contorno de grão pode conduzir a iniciação de trincas por clivagem.

Uma baixa tenacidade indica a possibilidade de fratura frágil (com pouca deformação plástica visível) e instável, a qual, pela possibilidade de ocorrer de forma inesperada e plasticamente instantânea com baixos níveis de tensão (inferiores ao limite de escoamento do material) é uma importante consideração na fabricação de estruturas soldadas. A tenacidade depende de fatores como temperatura, velocidade de deformação, estado de tensões, meio ambiente e, obviamente, da microestrutura do material (MODENESI, 2004).

A ferrita acicular é caracterizada por elevada densidade de discordâncias e ausência de formação de maclas, o que favorece a deformação plástica ao invés de fraturar por clivagem (GOMES, 1996).

Analisando metais de solda de aços C-Mn, TRINDADE et al. (2005) concluíram que a microestrutura que contém maior proporção de ferrita acicular resulta no metal de solda com excelentes valores de resistência e tenacidade. Atribui-se essa característica ao pequeno tamanho de grão (1 a 3  $\mu\text{m}$ ).

Considera-se também que outro fator importante que controla a tenacidade do metal de solda é a ocorrência, a distribuição e a morfologia de microfases fragilizantes, especialmente do constituinte austenita-martensita A-M. Como regra geral, a tenacidade à fratura é reduzida com a presença do constituinte, ou microfases, A-M (SANT'ANNA, 2006).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

O metal de base utilizado foi um aço estrutural de alta resistência e baixa liga – ARBL de elevada resistência à corrosão ambiental, disponível comercialmente com a denominação COS-AR 50, e adquirido na espessura de 16 mm. Como metal de adição foi empregado o eletrodo de alma metálica com designação AWS E70C-6M, no diâmetro de 1,2 mm. As Tabelas 4.1 à 4.4 disponibilizam informações dos fabricantes desses materiais quanto à composição química e valores de alguns dos seus parâmetros de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade. O gás de proteção usado no processo foi o CO<sub>2</sub>, a uma vazão de 18 L/min.

Tabela 4.1 - Composição química do metal de base.

<b>Composição química do metal de base (% em peso)</b>						
<b>C<sub>máx</sub></b>	<b>Mn</b>	<b>P<sub>máx</sub></b>	<b>S<sub>máx</sub></b>	<b>Si</b>	<b>(Nb+V)<sub>máx</sub></b>	<b>C<sub>eq</sub><sub>máx</sub> (C+Mn/6)</b>
0,20	1,00/1,60	0,030	0,025	0,10/0,55	0,12	0,45

Fonte: Cosipa

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do metal de base.

<b>Propriedades mecânicas do metal de base (COS-AR 50)</b>	
<b>Limite de escoamento mínimo [MPa]</b>	330
<b>Limite de Resistência à Tração [MPa]</b>	500/630
<b>Alongamento mínimo [%]</b>	22

Fonte: Cosipa

Tabela 4.3 - Composição química do eletrodo de alma metálica AWS E70C-6M.

<b>Composição química do material de adição (% em peso)</b>		
<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>
0,04	0,55	1,30

Fonte: Esab

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas do aporte puro do eletrodo de alma metálica AWS E70C-6M.

<b>Propriedades mecânicas do aporte puro do eletrodo AWS E70C-6M</b>	
<b>Limite de Escoamento [MPa]</b>	500
<b>Limite de Resistência à tração [MPa]</b>	575
<b>Alongamento [%]</b>	28
<b>Energia Absorvida em ensaio de Impacto Charpy V à -30°C</b>	50 J

Fonte: Esab

## 4.2. Métodos

As chapas do metal de base foram cortadas em tiras pelo processo de oxi-corte nas dimensões de 16x75x330mm, sendo uma das faces laterais preparada com ângulo de bisel de 30°, na proporção de 2/3 e 1/3 ao longo da espessura. A Figura 4.1 ilustra a geometria da junta montada, e a Figura 4.2 o tamanho da junta soldada.

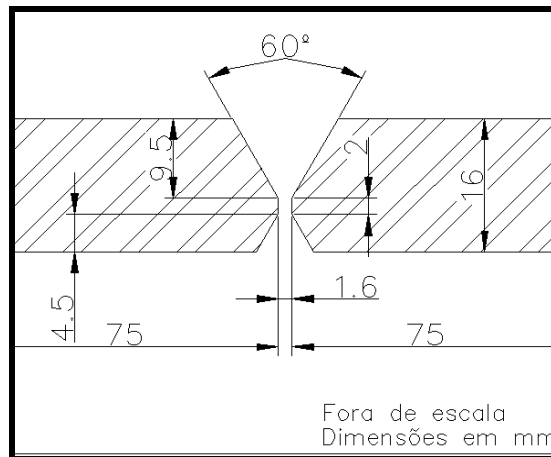


Figura 4.1 - Desenho ilustrativo da geometria do chanfro.

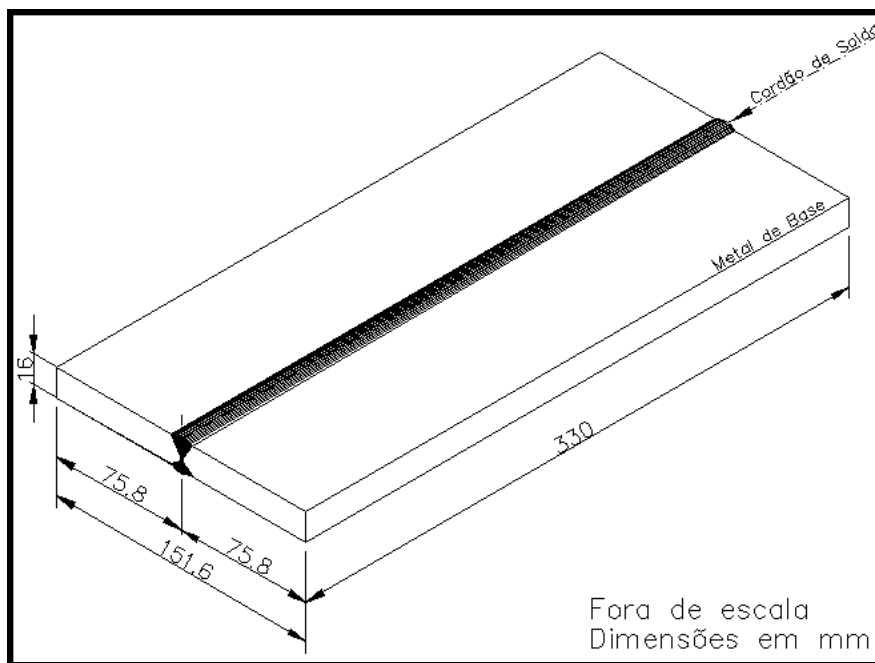


Figura 4.2 - Desenho ilustrativo das dimensões da junta soldada.

As soldas foram executadas com uma fonte de energia multiprocessos, microprocessada, modelo MAXTRON 450 e um cabeçote de alimentação do arame, modelo S-64M, ambos fabricados pela Miller. A Figura 4.3 traz a visualização desses equipamentos.



(a) - Fonte de energia



(b) - Cabeçote para alimentação do arame

Figura 4.3 – Fonte de energia e acessórios utilizados.

Considerando a proposta de se fazer variações nos parâmetros de pulso, nominalmente a corrente de pico ( $I_p$ ) nos valores de 435 e 470 A e o tempo de pico ( $t_p$ ) em 1,9, 2,1 e 2,3 ms, assim como na temperatura de pré-aquecimento dos cordões (temperatura ambiente, 100°C e 150°C), os experimentos corresponderam a sete diferentes grupos combinatórios, totalizando dezessete soldas realizadas, conforme explicitado nas tabelas 4.3 e 4.4. A frequência do pulso (F) e a corrente de base ( $I_b$ ) foram mantidas em 100 pps e 115 A, respectivamente.

Durante a soldagem os valores dos parâmetros de pulso foram registrados através de um sistema computacional composto por placa de aquisição de dados, Interdata 2, e o software MIGMAG, ambos desenvolvidos pelo LabSolda da Universidade Federal de Santa Catarina.

Ademais, as soldas foram executadas em corrente contínua com eletrodo em polaridade positiva ( $CC^+$ ) e com velocidade de alimentação de 7,6 m/min. A distância entre o bico de contato e a superfície da junta foi fixada em 6,0 mm. O controle do comprimento do arco na fonte de energia, denominado TRIM, permaneceu ajustado ao nível 50.

A velocidade de soldagem ( $V_s$ ) adotada foi de 150 mm/min, com aplicação feita por meio da regulagem de uma máquina de translação White Martins, modelo MC-46, utilizada em corte oxigás. A Figura 4.4 mostra a adaptação da tocha de soldagem ao

referido mecanismo de translação, enquanto que a Figura 4.5 ilustra o sentido e o ângulo de deslocamento da tocha.

Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros de pulso por grupo combinatório.

Parâmetros de pulso	Grupos combinatórios						
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
$I_p$ [A]	435	435	435	470	470	435	435
$I_b$ [A]	115						
$t_p$ [ms]	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,3	1,9
$F$ [Hz]	100						

Fonte: Godoy (2008)

Tabela 4.6 - Grupos de combinações de parâmetros de pulso e temperaturas de pré-aquecimentos usados.

		Grupos combinatórios						
		S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
Parâmetros de pulso	$I_p$ [A]	435	435	435	470	470	435	435
	$t_p$ [ms]	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,3	1,9
$T$ [°C]		29*	100	150	100	150	100	100

Fonte: Godoy (2008)

\* Temperatura ambiente.

A Tabela 4.7, por sua vez, apresenta a separação em grupos para análise das influências dos parâmetros de pulso, corrente de pico e tempo de pico, e as temperaturas de pré-aquecimento.

Tabela 4.7 - Grupos utilizados para analisar a influência dos parâmetros.

	Grupos combinatórios						
Parâmetros analisados	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
Influência de $I_p$		X*	X**	X*	X**		
Influência de $t_p$		X				X	X
Influência de T	X	X	X				

Fonte: Godoy (2008)

\* S-2 e S-4 soldados em temperatura de pré-aquecimento de 100°C.

\*\* S-3 e S-5 soldados em temperatura de pré-aquecimento de 150°C

Em todas as operações de soldagem tomou-se o cuidado de limpar previamente a junta, a fim de impedir a contaminação da solda por graxa, ferrugem, etc.. Adicionalmente, para evitar um desalinhamento da junta em relação à saída do eletrodo da tocha de soldagem, as tiras do metal de base foram fixadas por grampos na bancada.



Figura 4.4 - Detalhe do sistema do equipamento de translação e da tocha utilizados.

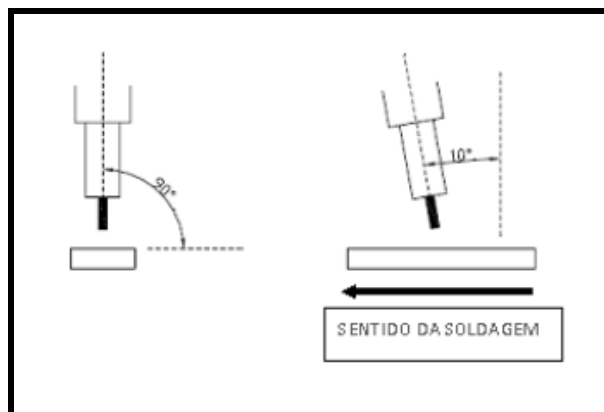


Figura 4.5 - Desenho ilustrativo do ângulo de deslocamento positivo da tocha adotados.

A seqüência de soldagem envolveu dois procedimentos, a saber: o primeiro cordão foi efetuado na posição plana e horizontal com acesso na proporção de 2/3 do chanfro e utilizando um cobre-junta para limitar a profundidade do mesmo em 11,5 mm, a partir da superfície superior da junta. O segundo cordão foi executado na proporção de 1/3 do chanfro, na posição plana e horizontal, ou seja, invertendo-se a junta, e depois da goivagem feita no primeiro cordão. Este último procedimento teve a finalidade de uniformizar a profundidade do segundo cordão em torno de 8,0 mm, e assim garantir a sua sobreposição em relação ao primeiro, em valor próximo a espessura média da junta. As Figuras 4.6 e 4.7 detalham, esquematicamente, a seqüência de soldagem e as operações realizadas.

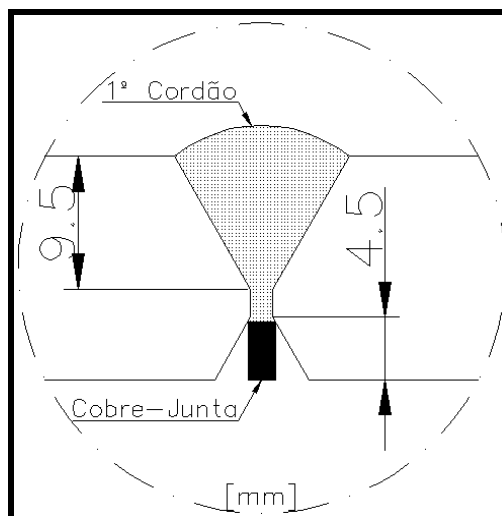


Figura 4.6 - Esquema ilustrativo da execução do primeiro cordão de solda (com cobre-junta).

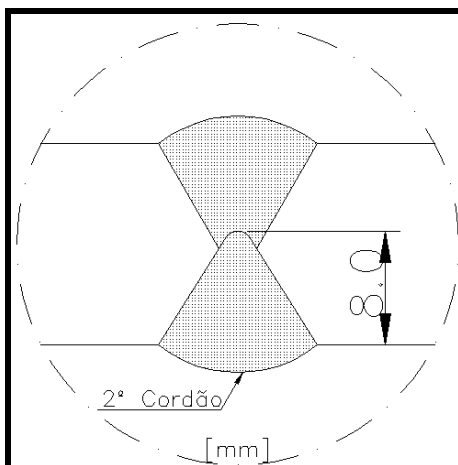


Figura 4.7 - Esquema ilustrativo da execução do segundo cordão de solda (após a goivagem).

O pré-aquecimento das soldas foi realizado em forno elétrico com controle automático de temperatura, antes da execução do primeiro cordão e, igualmente, anterior ao segundo. A temperatura do forno foi sempre ajustada em 20°C acima da temperatura desejada, 100°C ou 150°C, para precisamente compensar o resfriamento das tiras, desde a retirada do forno até o início da soldagem, passando pela montagem e fixação da junta. O monitoramento da temperatura foi efetuado por meio de um termômetro digital de contato.

Para as soldas sem pré-aquecimento, a temperatura ambiente foi de 29°C. Nas soldas com pré-aquecimento as juntas foram deixadas resfriar a temperatura ambiente, após a deposição do primeiro cordão, para em seguida serem reaqueladas até a temperatura em questão, antes da realização do segundo cordão.

#### 4.2.2. Análises Metalográficas

As análises metalográficas consistiram de exames macrográfico e micrográfico em amostras retiradas das juntas como soldadas, mediante cortes transversais ao cordão de solda, conforme pormenorizado na sequência.

No exame macrográfico dos cordões de solda foi avaliada a configuração geométrica das soldas em amostras preparadas segundo a prática metalográfica

convencional, com polimento final efetuado com alumina de 1  $\mu\text{m}$  e ataque químico na seguinte formulação: 15 ml de ácido nítrico, 85 ml de etanol 96GL e 5 ml de água destilada, com 20s de imersão.

A inspeção micrográfica identificou e quantificou as fases e microfases em três regiões das juntas soldadas: primeiro cordão (superior), região recristalizada e segundo cordão (inferior), conforme mostra, esquematicamente, a Figura 4.8.

No caso das fases, as amostras foram lixadas até a grana 1200, seguido de polimento final com pasta de diamante de 1 $\mu\text{m}$ , e ataque químico com Nital 5%.

Para a classificação das fases nessas três regiões foi utilizada a terminologia proposta pelo IIW (International Institute of Welding) nº 999-88, sendo a quantificação realizada através do método da contagem de pontos, a partir da sobreposição de uma malha quadrada de 10x10 mm às fotomicrografias digitais, resolvidas com 500 vezes de aumento em um microscópio ótico da marca CARL ZEISS, modelo NEOPHOT 32, equipado com câmera digital de 5 megapixels.

Em cada amostra foram analisados dezesseis campos microestruturais, distribuídos da seguinte maneira: seis adjacentes regiões no primeiro cordão e também no segundo, e mais quatro adjacentes regiões na parte recristalizada da solda. Referindo-se novamente a Figura 4.8, visualizam-se, esquematicamente, os locais em que foram feitas as análises microestruturais. Na Tabela 4.8 são indicadas as quantidades de pontos analisados neste procedimento.

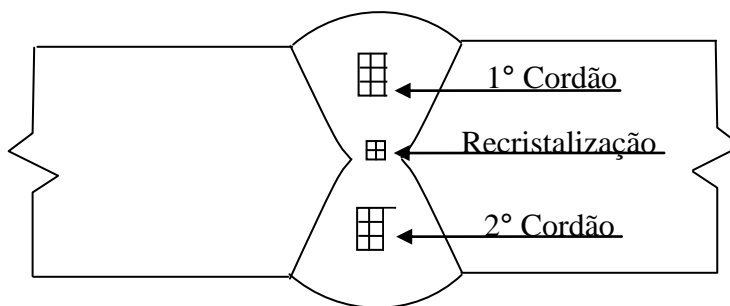


Figura 4.8 - Regiões microestruturais analisadas.

Tabela 4.8 - Quantidade de pontos analisados por grupo de solda.

		Grupos							
		S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	
Números de pontos analisados por grupos de solda	1° cordão	4032	2592						
	Zona recristalizada	1728	1152						
	2° cordão	4032	2592						

Fonte: Godoy (2008)

A quantificação das microfases A-M (austenita-martensita) foi realizada por análise de imagem com auxílio do Software Mocha Image Analysis, versão 1.2. As fotomicrografias utilizadas nesta análise foram obtidas em amostras preparadas de acordo com o procedimento seguido para a quantificação das fases, excetuando o tipo e a sequência de ataque químico, que consistiu inicialmente em se fazer um pré-ataque com Nital 2%, e logo após o tingimento colorido com o reagente Klemm II, aplicado por imersão durante 1 minuto. Assim procedendo-se, o Nital 2% foi responsável para contrastar ferrita, perlita e revelar o contorno de grão, e o Klemm II, sendo o reagente usado para destacar especificamente as microfases A-M.

A visualização e o respectivo registro fotográfico foram feitos com aumento entre 800 a 1000 vezes, utilizando o microscópio ótico, NEOPHOT 32, e câmera digital a ele acoplado. A Tabela 4.9 traz a quantidade total de micrografias analisadas.

Tabela 4.9 - Quantidade de pontos analisados por grupo de solda.

		Grupos						
		S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
Quantidade de micrografias analisadas por grupo de solda	1° cordão	36	24					
	Zona recristalizada	24	16					
	2° cordão	36	24					

Fonte: Godoy (2008)

#### 4.2.3. Medidas de Microdureza

As medidas de microdureza foram realizadas utilizando o método Vickers com carga de 0,5 kgf, em um microdurômetro Mitutoyo, modelo MicroWiZhard. Nesta avaliação a preferência foi pelo uso de uma amostra por condição de soldagem.

Para atender o propósito de caracterização do gradiente de dureza ao longo da seção transversal das juntas soldadas, foram efetuadas nos cordões medidas sob uma linha imaginária de referência, localizada na região central desses cordões, em 15 pontos equidistantes de 1 mm, e executando-se três endentações por posição, isto é, no ponto definido, acima e abaixo deste. A Figura 4.9 ilustra de modo esquemático o procedimento seguido.

A preparação metalográfica foi idêntica à aplicada na avaliação macroestrutural no que concerne ao lixamento e polimento, porém diferenciando-se pelo uso de ataque químico feito com Nital 2%. As amostras necessariamente foram embutidas em resina a frio.

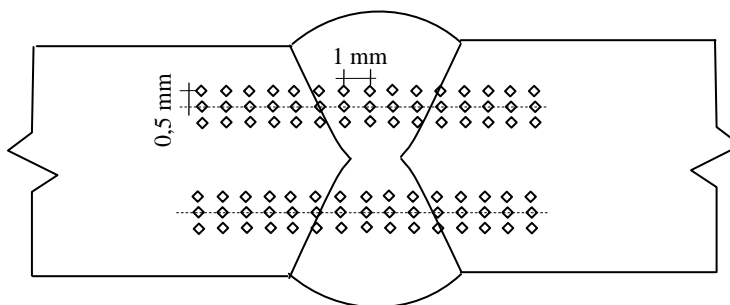


Figura 4.9 - Posicionamento das endentações nas medidas de microdureza Vickers (500 gf).

#### 4.2.4. Avaliação da Resistência Mecânica e tenacidade ao impacto

A resistência mecânica das juntas soldadas foi avaliada pela determinação do limite de resistência à tração de corpos-de-prova retirados transversalmente ao eixo longitudinal da solda, em conformidade com a norma AWS D1.1/D1.1M:2004. A Figura 4.10 detalha a maneira como foram removidos os corpos-de-prova, e a Figura 4.11 demarca suas principais dimensões. Em adição, foram obtidos também os limites de escoamento e o alongamento de fratura dessas juntas.

Optou-se pela realização de três ensaios por junta soldada, sendo utilizada uma máquina universal de ensaios EMIC DL-20000, equipada com célula de carga de 200 kN e software dedicado para aquisição e tratamento dos dados.

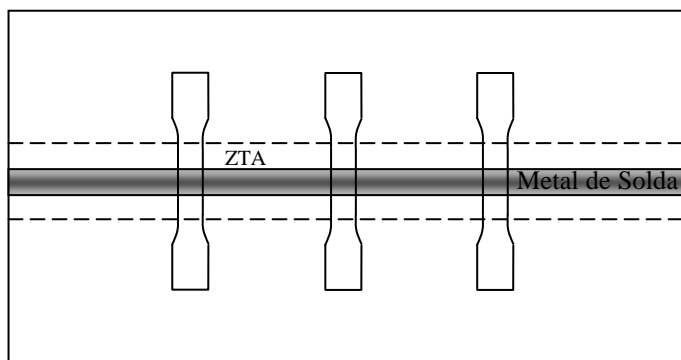


Figura 4.10 - Modo de retirada dos corpos-de-prova de tração em cada junta soldada.

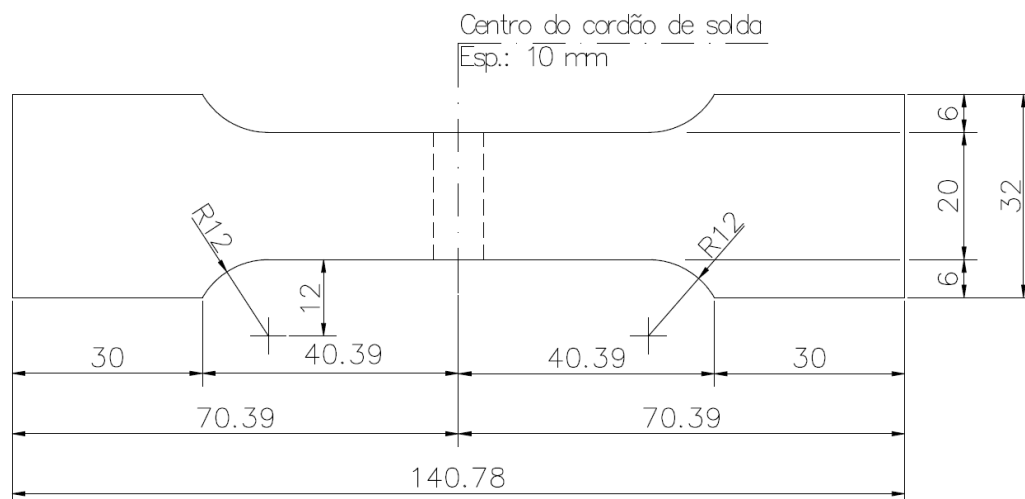


Figura 4.11 - Dimensões do corpo-de-prova de tração na junta.

Na avaliação da tenacidade ao impacto o método utilizado foi o Charpy “V”, com a orientação do entalhe dos corpos-de-prova posicionado perpendicularmente ao eixo longitudinal dos cordões de solda, de acordo com a norma BS 709. Os ensaios foram realizados as temperaturas de 25°C (temperatura ambiente) e -30°C, utilizando um pêndulo Hoytom de 300 J de energia potencial. A Figura 4.12 esboça a maneira como foram extraídos os corpos-de-prova.

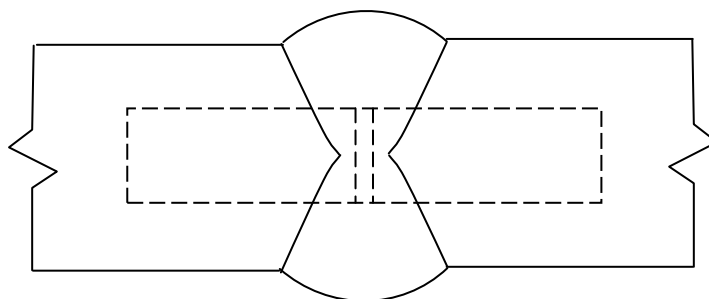


Figura 4.12 - Modo de retirada dos corpos-de-prova para ensaio de impacto Charpy V em cada junta soldada.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Desenvolvimento macroestrutural das soldas

As Figuras 5.1 à 5.10 revelam as macroestruturas das juntas soldadas, procurando-se ressaltar principalmente a comparação entre a configuração geométrica dos cordões de solda em cada grupo combinatório formado, conforme Tabela 4.7, para analisar a influência da variação dos parâmetros de pulso, corrente de pico e tempo de pico, e da temperatura de pré-aquecimento.

#### 5.1.1. Influência da intensidade da corrente de pico na macroestrutura das soldas

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram as macrografias das juntas soldadas S-2 e S-4, ressaltando a influência da intensidade da corrente de pico em temperatura de pré-aquecimento 100 °C.

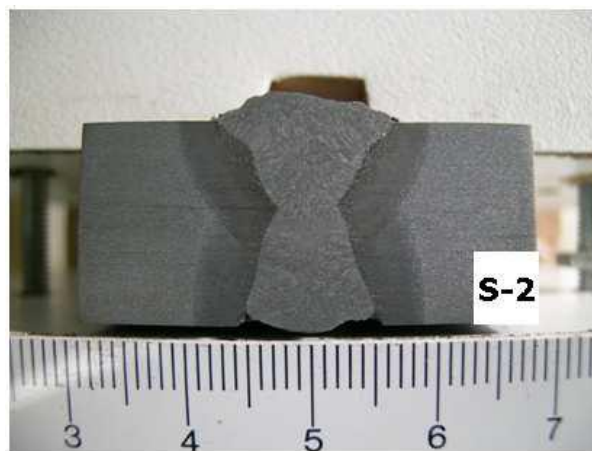


Figura 5.1 - Solda (S-2) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C.

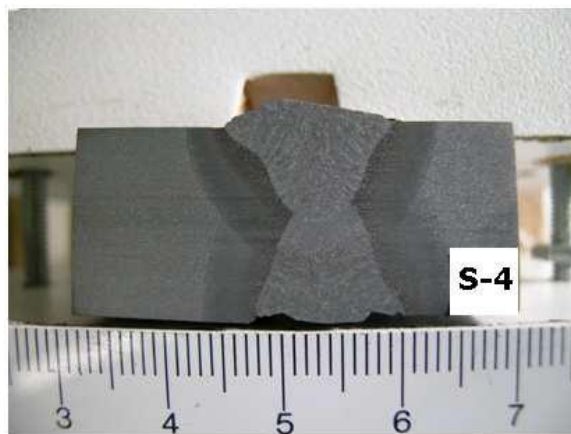


Figura 5.2 - Solda (S-4) condições:  $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C.

Já as Figuras 5.3 e 5.4 mostram as macrografias das juntas soldadas S-3 e S-5, mostrando a influência da intensidade da corrente de pico, considerando temperaturas de pré-aquecimento 150 °C.

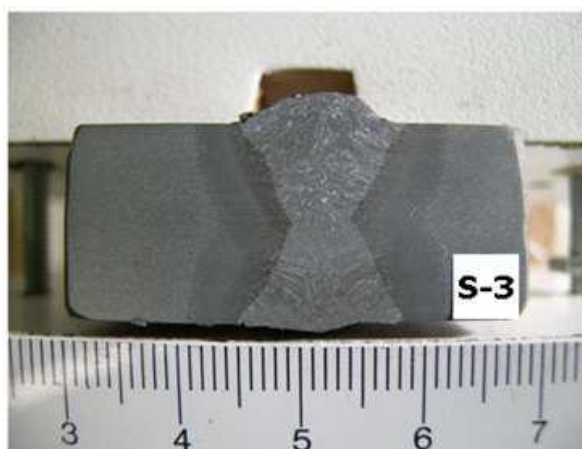


Figura 5.3 - Solda (S-3) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C.

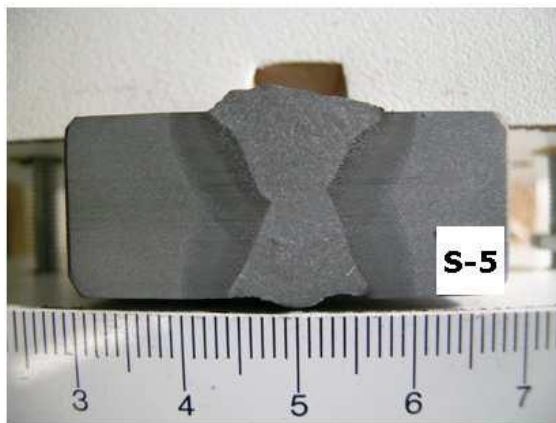


Figura 5.4 - Solda (S-5) condições:  $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C.

### 5.1.2. Influência do tempo de duração da corrente de pico na macroestrutura das soldas

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 mostram as macrografias das juntas soldadas S-7, S-2 e S-6, ressaltando a influência do tempo de duração da corrente de pico em temperatura de pré-aquecimento 100 °C.

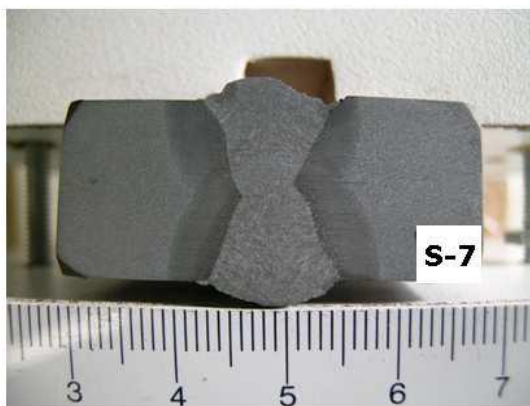


Figura 5.5 - Solda (S-7) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 1,9$  ms,  $T = 100$  °C.



Figura 5.6 - Solda (S-2) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C.

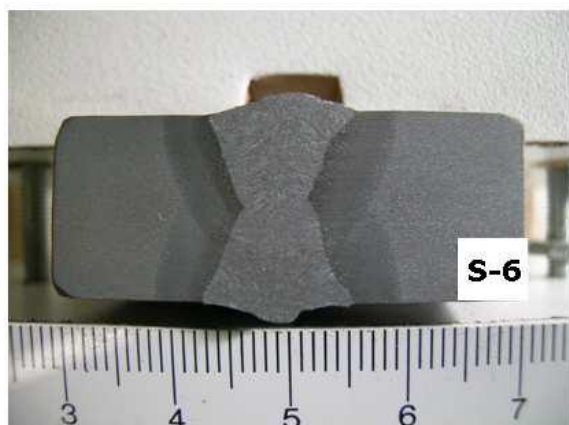


Figura 5.7 - Solda (S-6) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,3$  ms,  $T = 100$  °C.

### 5.1.3. Influência da temperatura de pré-aquecimento na macroestrutura das soldas

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 mostram as macrografias das juntas soldadas S-1, S-2 e S-3, ressaltando a influência da temperatura de pré-aquecimento, submetidas a uma temperatura de 29 °C (S-1), 100 °C (S-2) e 150 °C (S-3).

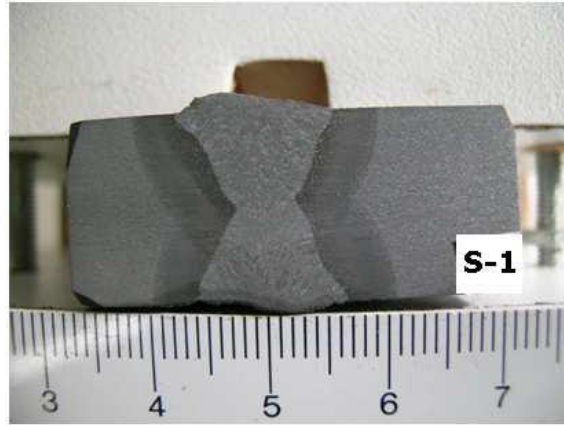


Figura 5.8 - Solda (S-1) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 29$  °C.

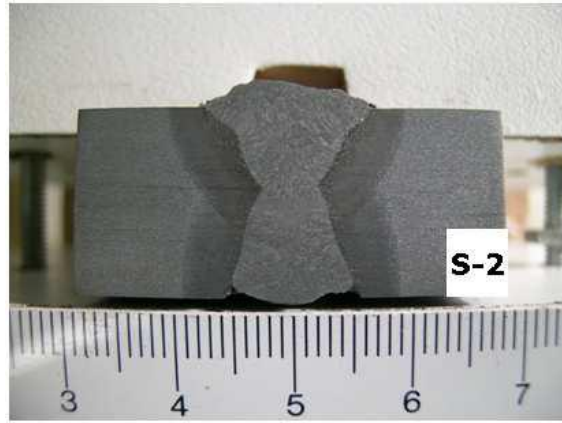


Figura 5.9 - Solda (S-2) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C.

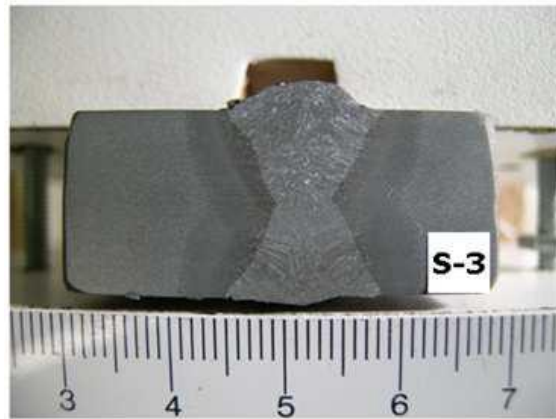


Figura 5.10 - Solda (S-3) condições:  $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C.

Observou-se nas macrografias que as soldas apresentaram boas características visuais de deposição, estendendo-se simetricamente nos dois lados do cordão de solda, caracterizando em geral num aspecto bastante satisfatório.

## **5.2. Desenvolvimento microestrutural dos metais de solda**

Seguindo o mesmo artifício de apresentar comparativamente os efeitos da variação da intensidade e tempo da corrente de pico, assim como da temperatura de pré-aquecimento, as figuras 5.11 à 5.40, ilustram o desenvolvimento microestrutural das fases identificadas e quantificadas nos metais de soldas.

### **5.2.1. Influência da intensidade da corrente de pico na microestrutura das soldas**

As Figuras 5.11 à 5.16 apresenta as fotomicrografias da microestrutura dos cordões de soldas com influência das correntes de pico, com as peças submetidas a um pré-aquecimento de 100 °C, analisando-se as soldas S-2 (435 A) e S-4 (470 A).



Figura 5.11 - Solda S-2 – primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

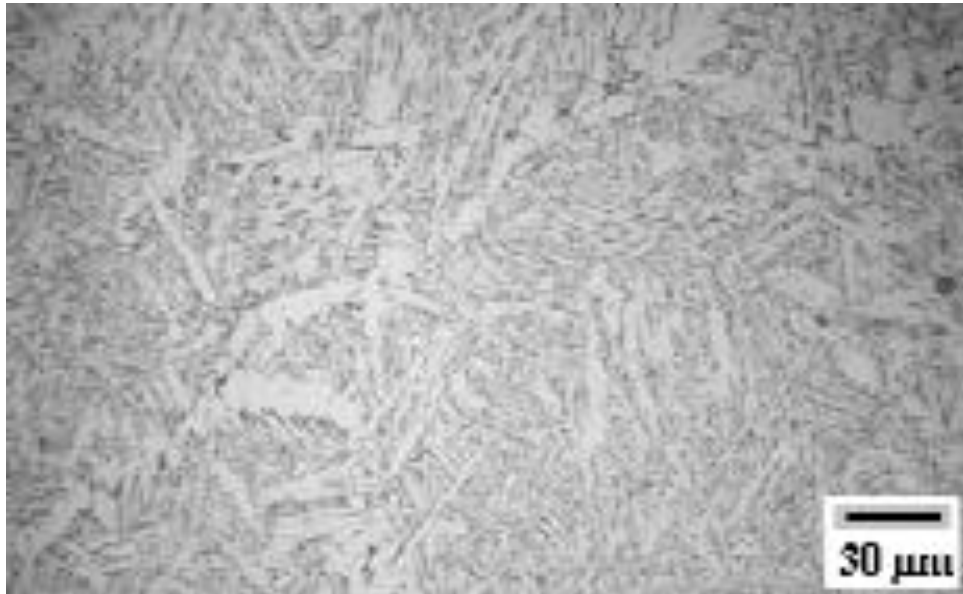


Figura 5.12 - Solda S-2 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).



Figura 5.13 - Solda S-2 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).



Figura 5.14 - Solda S-4 - Primeiro cordão, ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

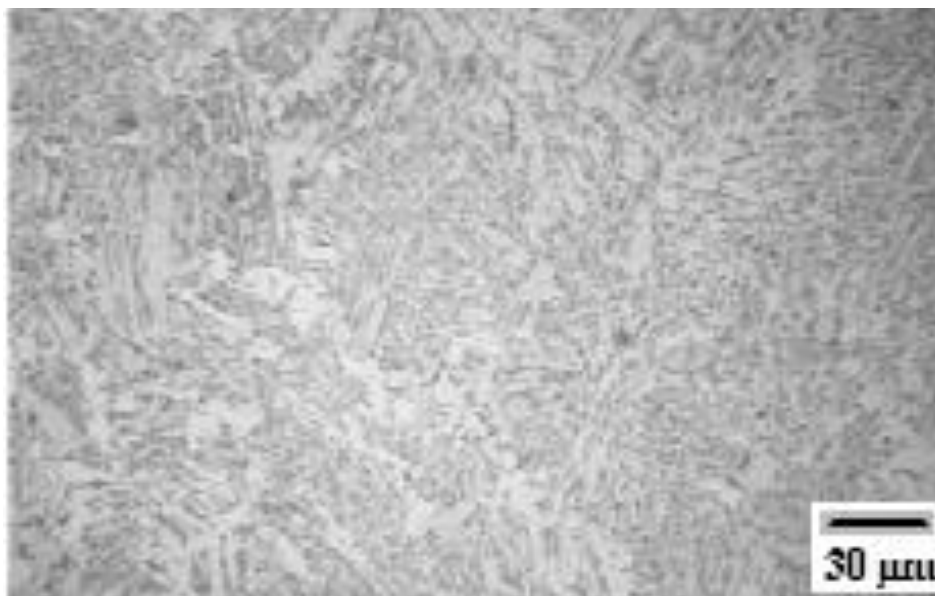


Figura 5.15 - Solda S-4 - Segundo cordão, ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).



Figura 5.16 - Solda S-4 - Zona recristalizada, ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

As Figuras 5.17 à 5.22 apresenta as fotomicrografias da microestrutura dos cordões de soldas com influência das correntes de pico, que foram submetidas a um pré-aquecimento de 150 °C, analisando-se as soldas S-3 (435 A) e S-5 (470 A).

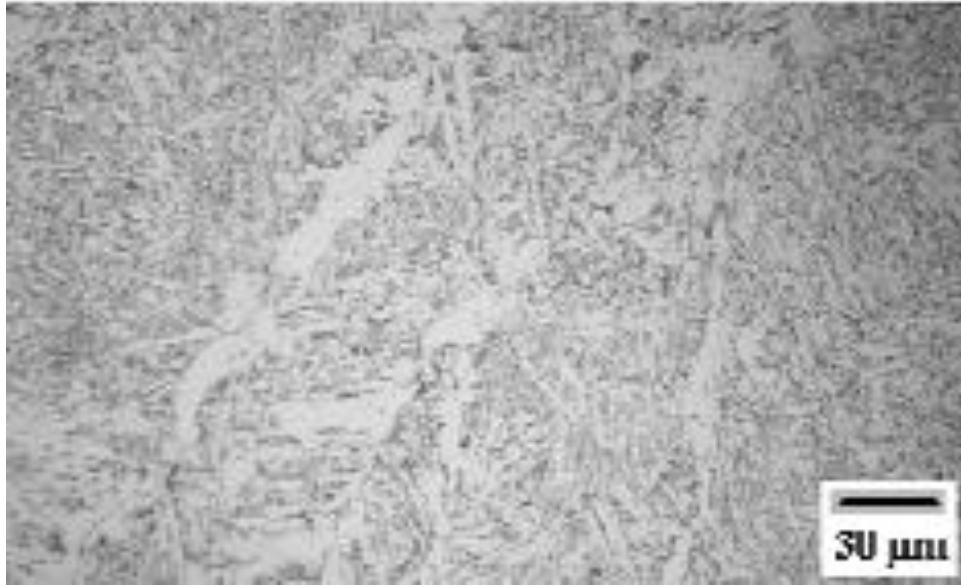


Figura 5.17 - Solda S-3 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

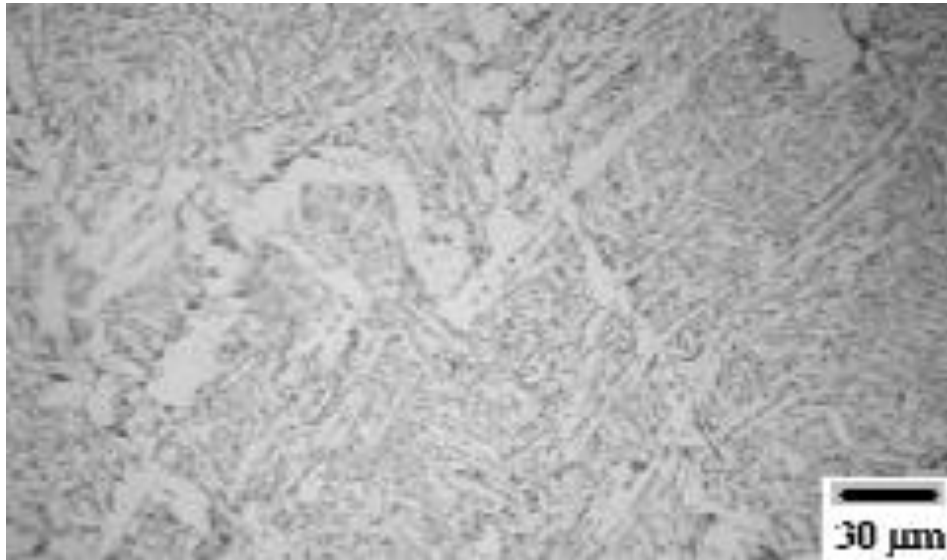


Figura 5.18 - Solda S-3 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

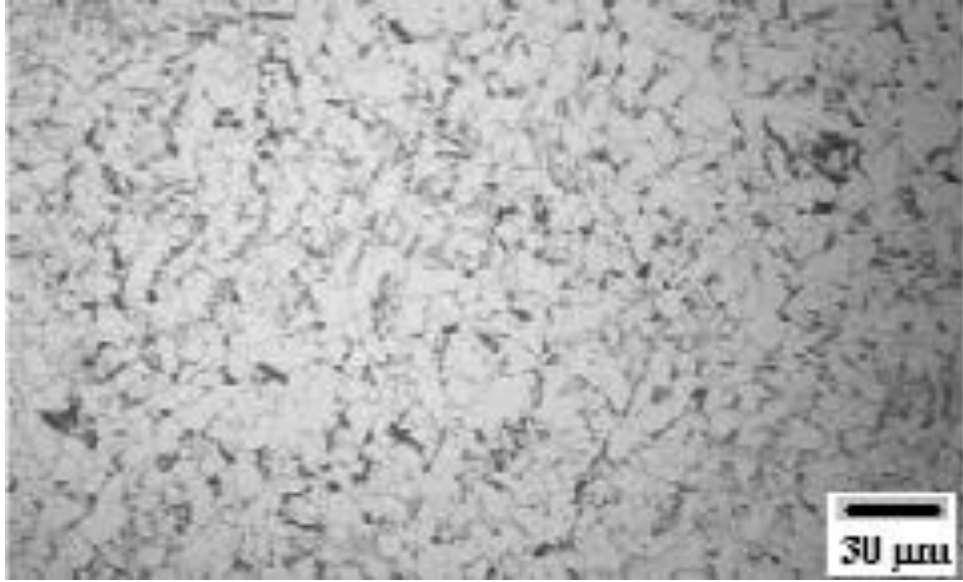


Figura 5.19 - Solda S-3 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

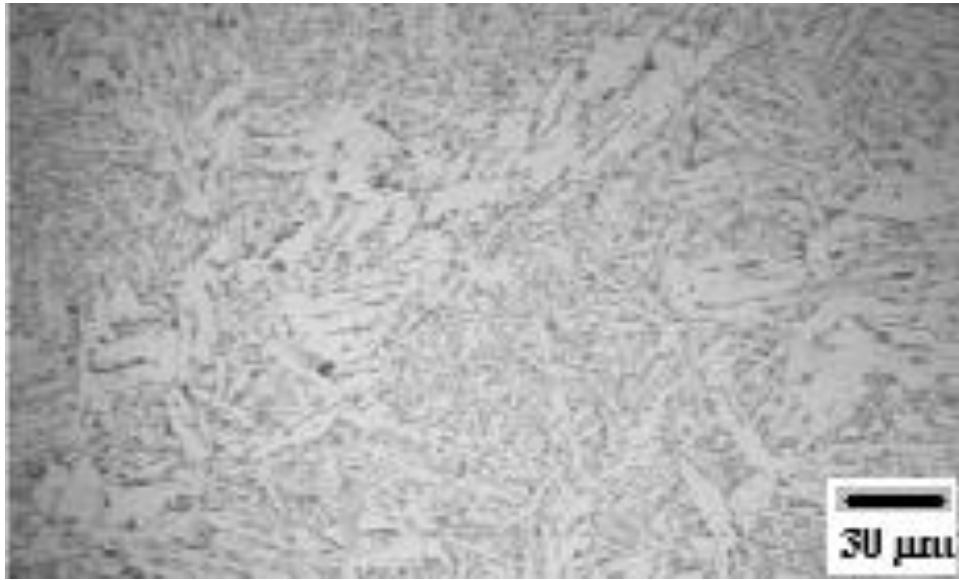


Figura 5.20 - Solda S-5 - Primeiro cordão, ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

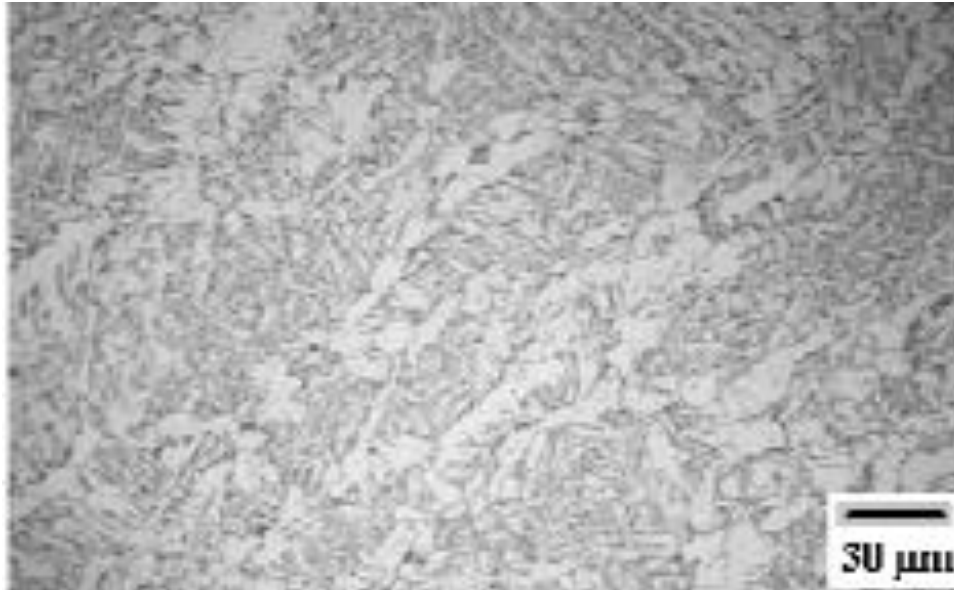


Figura 5.21 - Solda S-5 - Segundo cordão, ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

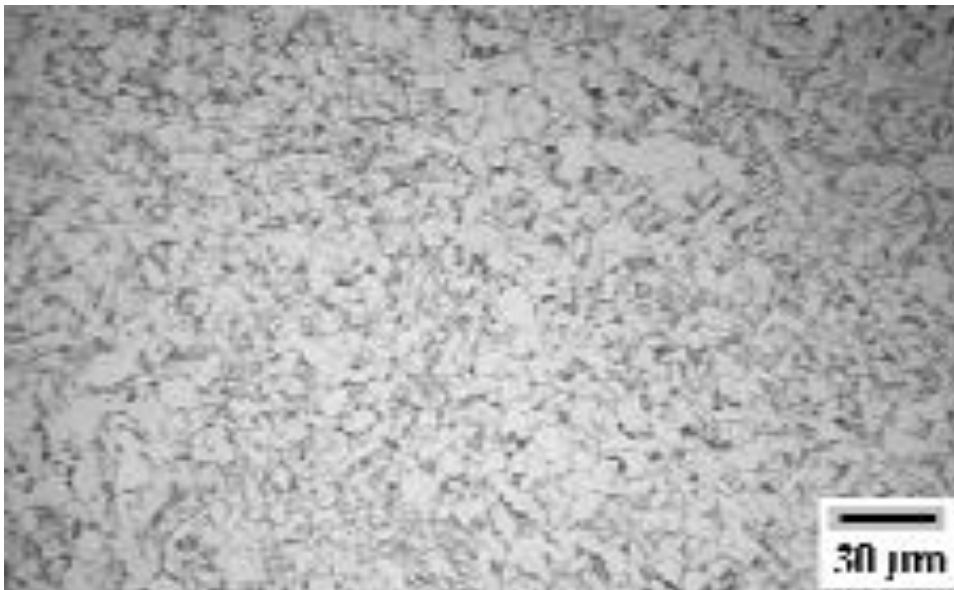


Figura 5.22 - Solda S-5 - Zona recristalizada, ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

### 5.2.2. Influência do tempo de duração da corrente de pico na microestrutura das soldas

As Figuras 5.23 à 5.31 apresenta a influência do tempo de pico na microestrutura dos cordões de solda, analisando-se as soldas S-7 (1,9 ms), S-2 (2,1 ms) e S-6 (2,3 ms), na temperatura de pré-aquecimento de 100 °C.

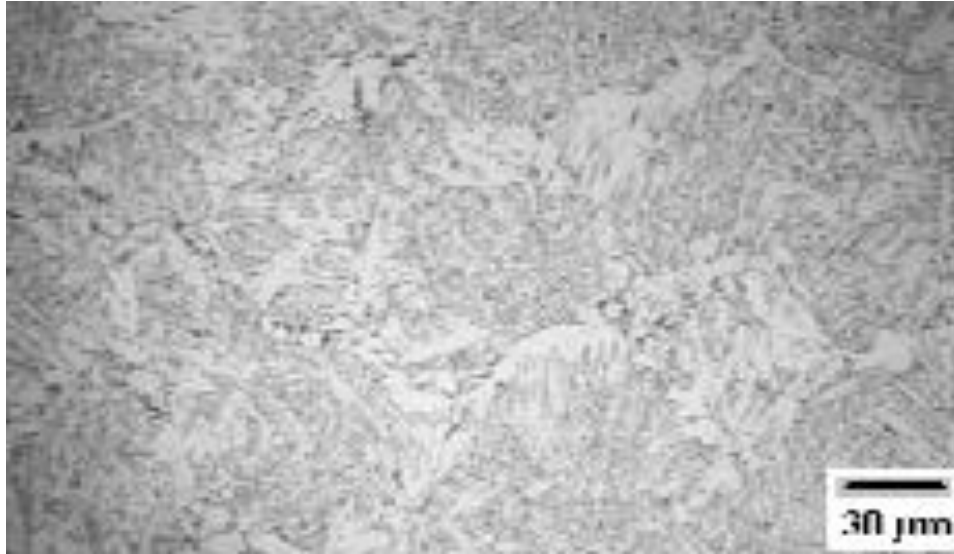


Figura 5.23 - Solda S-7 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 1,9$  ms,  $T = 100$  °C).

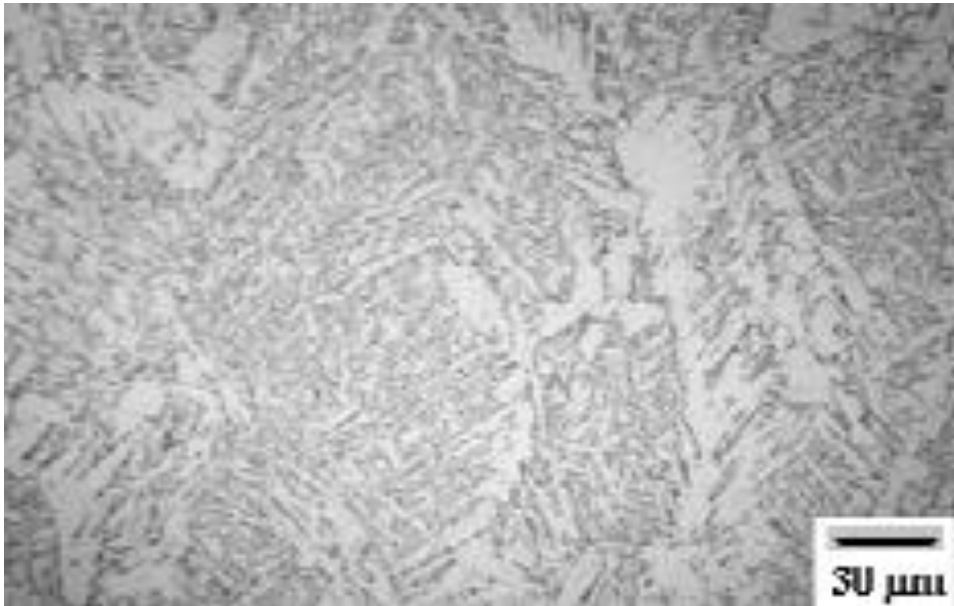


Figura 5.24 - Solda S-7 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 1,9$  ms,  $T = 100$  °C).



Figura 5.25 - Solda S-7 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 1,9$  ms,  $T = 100$  °C).



Figura 5.26 - Solda S-2 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

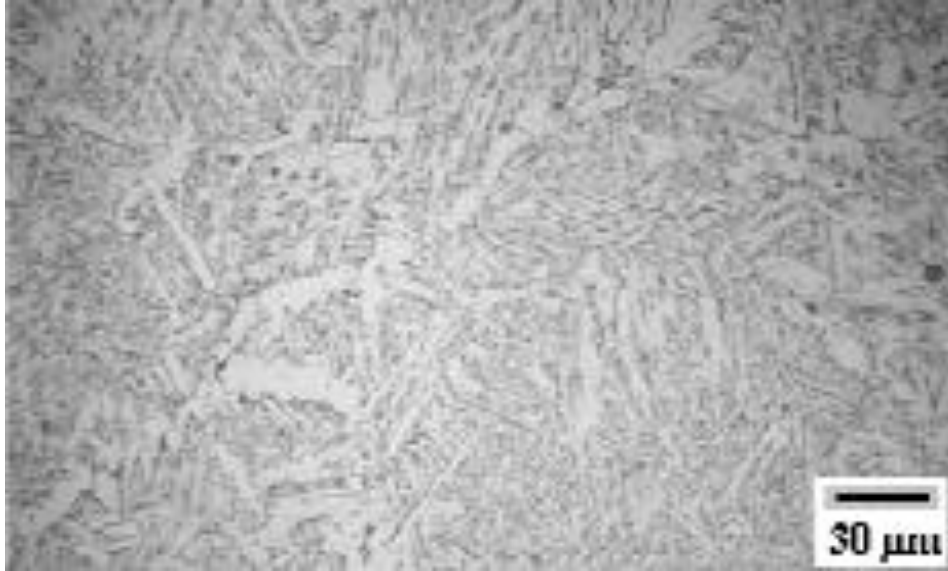


Figura 5.27 - Solda S-2 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).



Figura 5.28 - Solda S-2 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

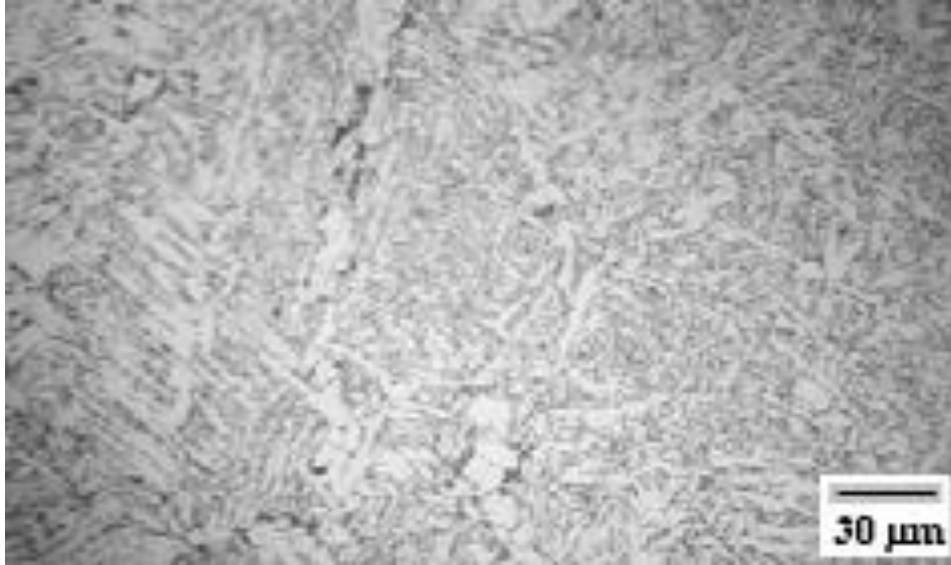


Figura 5.29- Solda S-6 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,3$  ms,  $T = 100$  °C).

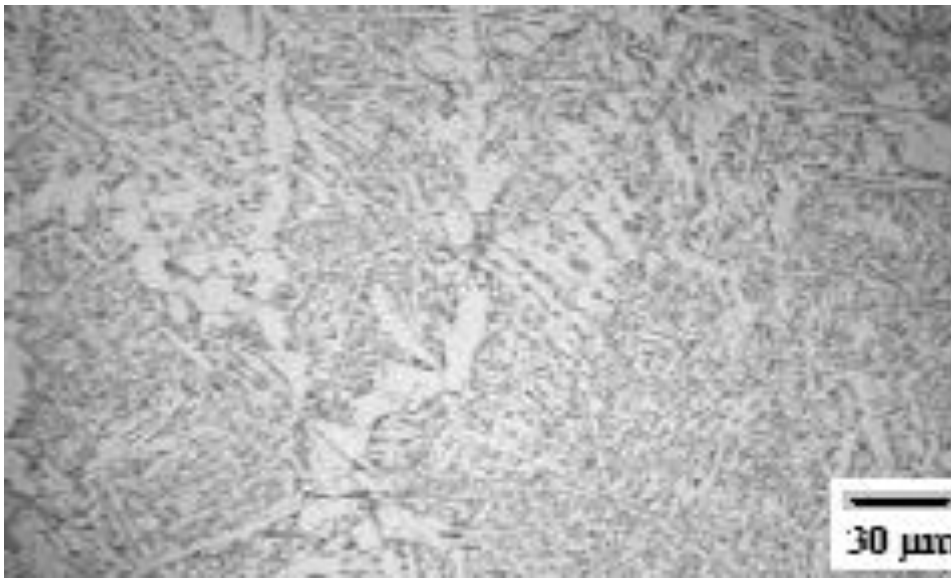


Figura 5.30 - Solda S-6 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,3$  ms,  $T = 100$  °C).

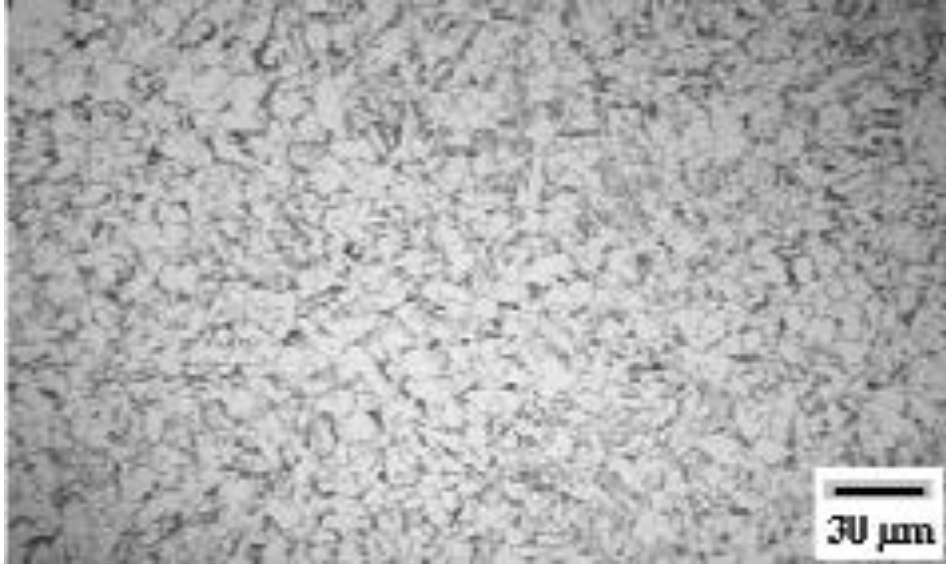


Figura 5.31 - Solda S-6 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,3$  ms,  $T = 100$  °C).

### 5.2.3. Influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura das soldas

As figuras 5.32 à 5.40 mostra a influência da variação da temperatura de pré-aquecimento de 29 °C (S-1), 100 °C (S-2) e 150 °C (S-3).

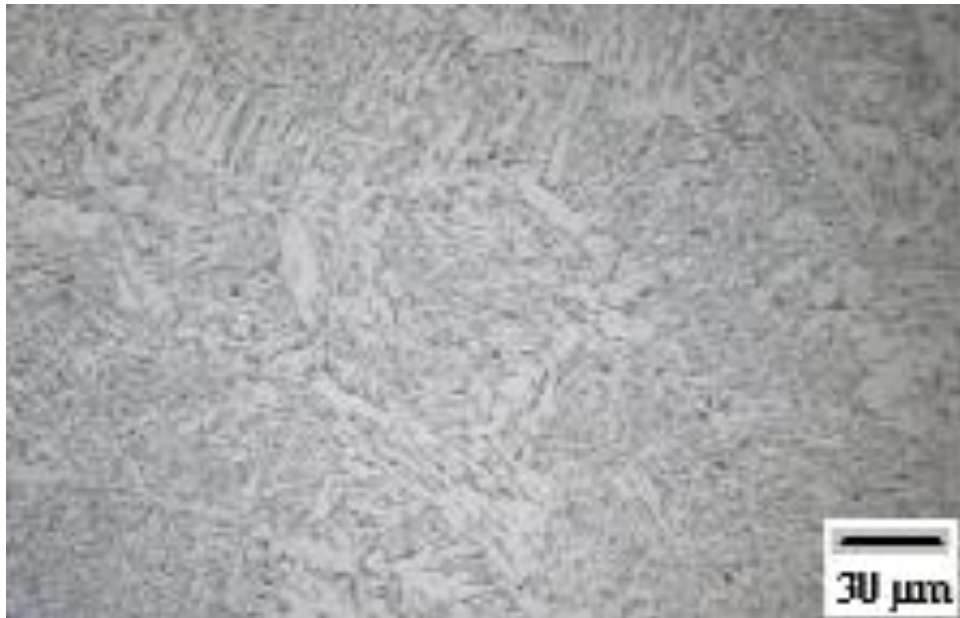


Figura 5.32 - Solda S-1 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 29$  °C).



Figura 5.33 - Solda S-1 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 29$  °C).

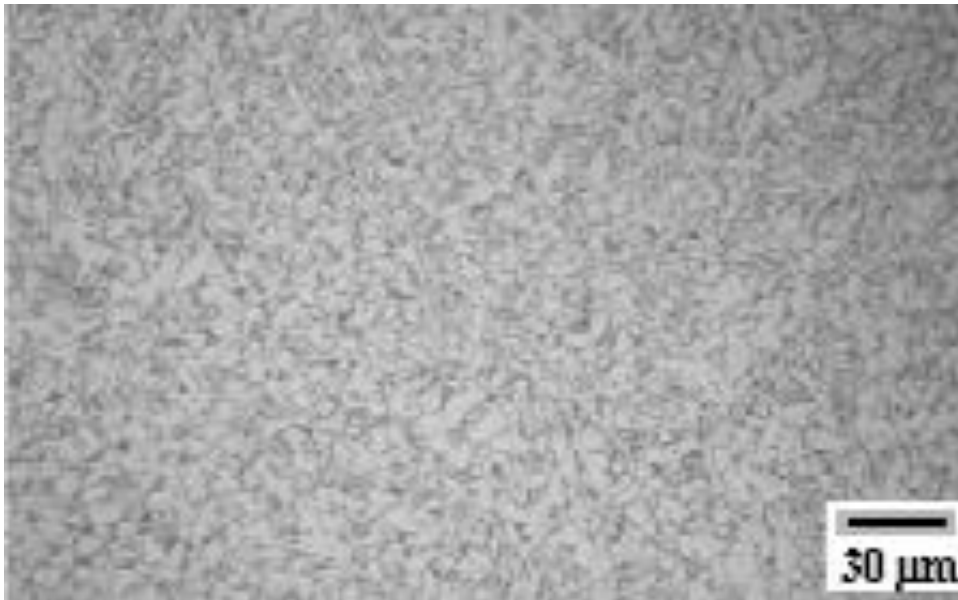


Figura 5.34 - Solda S-1 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 29$  °C).



Figura 5.35 - Solda S-2 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

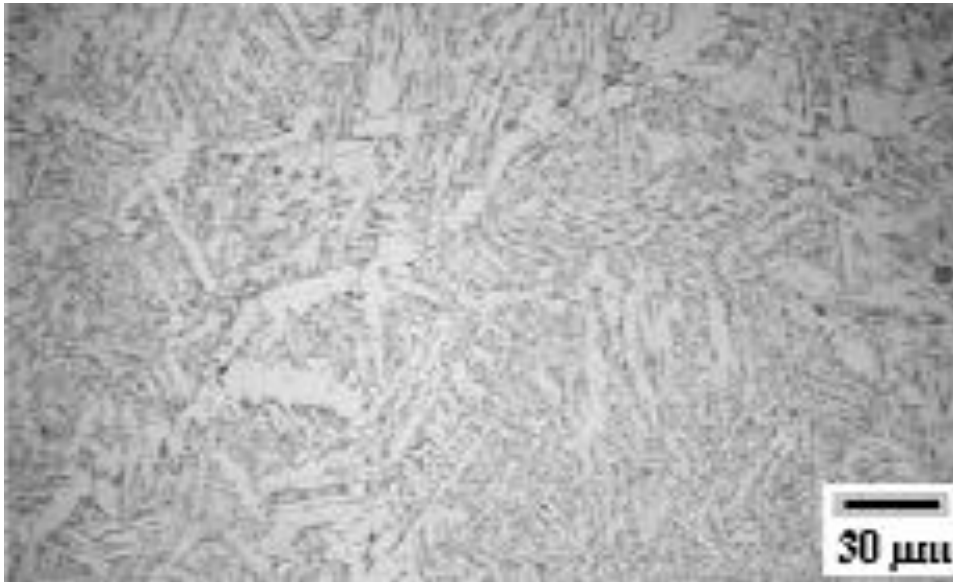


Figura 5.36 - Solda S-2 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

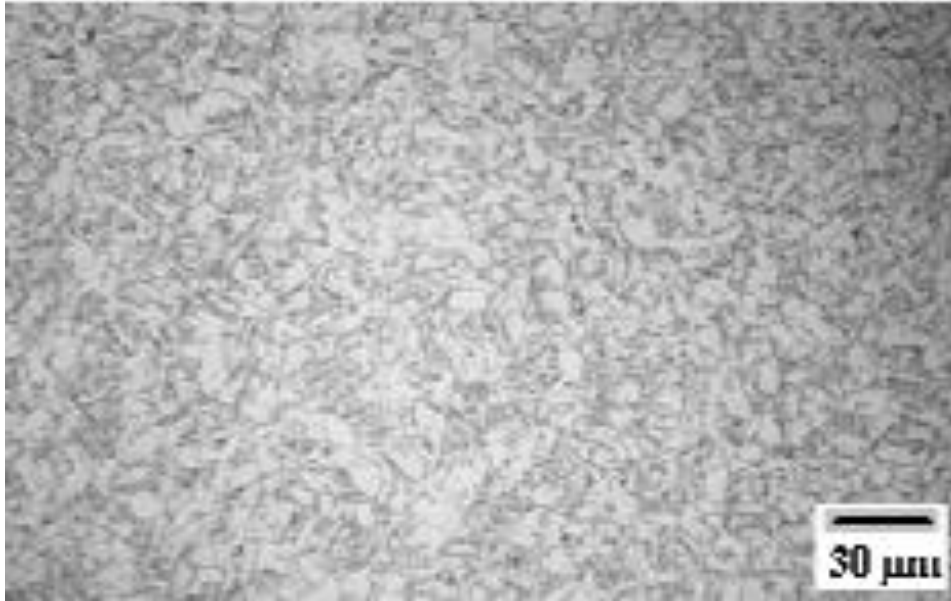


Figura 5.37 - Solda S-2 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

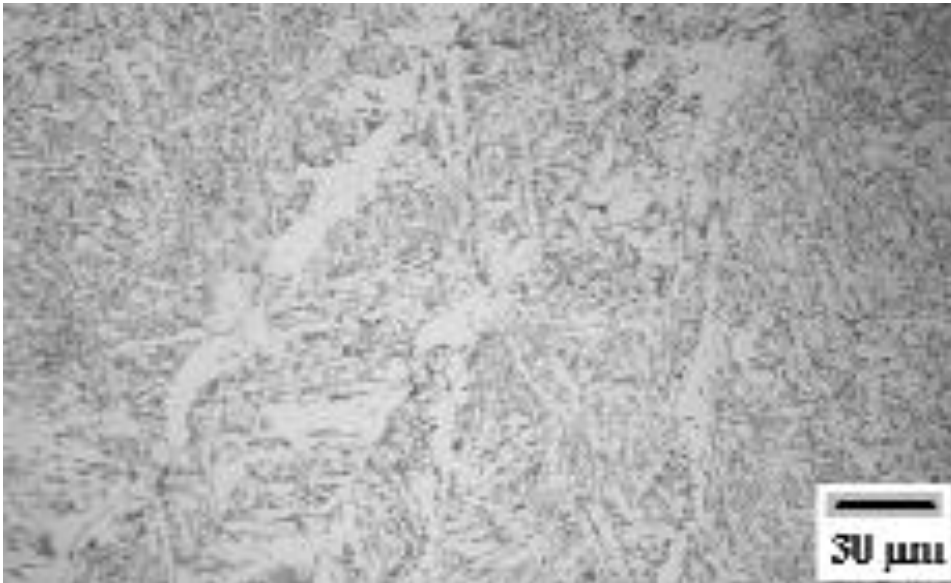


Figura 5.38 - Solda S-3 - Primeiro cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

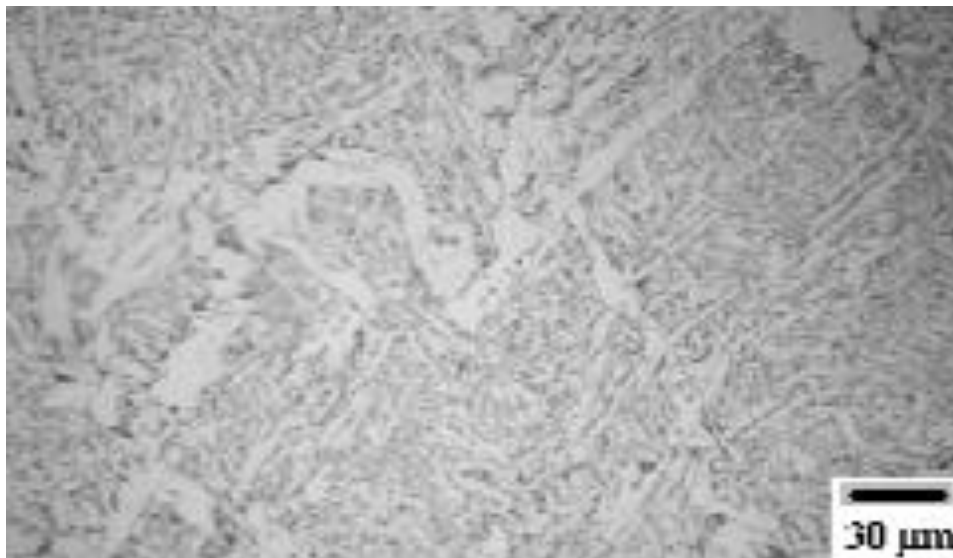


Figura 5.39 - Solda S-3 - Segundo cordão, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

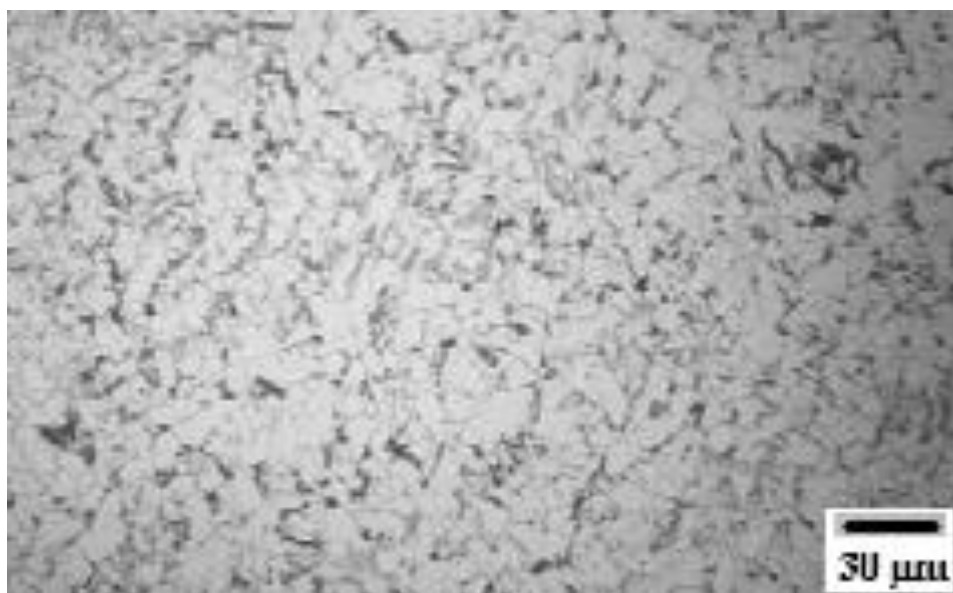


Figura 5.40 - Solda S-3 - Zona recristalizada, ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

### 5.3. Identificação e quantificação das microestruturas nos cordões de solda

Os resultados da quantificação dos microconstituintes , bem como as médias dos metais de solda, em regiões do primeiro e segundo cordões, classificados segundo a proposta do IIW (doc. nº 999-88), são apresentados no conjunto das

Figuras entre 5.11 à 5.40. Ferrita Primária – (FP), Ferrita Acicular – (FA), Ferrita com Segunda Fase – (FS), Carboneto – (FC).

Tabela 5.1 – Quantificação dos microconstituintes do primeiro cordão de solda.

Solda	Soldas						
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
FP [%]	20,4	21,9	21,7	22,7	22,9	23,4	18,9
FA [%]	57,6	55,2	54,0	52,8	50,8	49,9	58,1
FS [%]	21,7	22,5	23,2	24,3	24,8	26,0	22,6
FC [%]	0,3	0,4	1,1	0,2	1,4	0,7	0,4

Tabela 5.2 – Quantificação dos microconstituintes do segundo cordão de solda.

Solda	Soldas						
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
FP [%]	21,0	23,1	21,8	23,0	25,0	24,9	21,4
FA [%]	53,6	51,2	50,1	49,1	46,9	46,8	53,6
FS [%]	25,3	25,4	27,0	27,1	27,2	27,9	24,8
FC [%]	0,1	0,3	1,1	0,2	1,1	0,4	0,2

Tabela 5.3 – Quantificação média dos microconstituintes do primeiro e segundo cordões.

Solda	Soldas						
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
FP [%]	20,7	22,5	21,8	22,9	24,0	24,2	20,2
FA [%]	55,6	53,2	52,1	51,0	48,8	48,4	55,9
FS [%]	23,5	24,0	25,0	25,9	26,0	26,9	23,6
FC [%]	0,2	0,3	1,1	0,2	1,2	0,5	0,3

Quanto às fases presentes nas zonas recristalizadas dos metais de solda, a tabela 5.4 traz os resultados auferidos em termos da proporção relativa entre Ferrita e Perlita.

Tabela 5.4 – Valores da quantificação dos microconstituintes Ferrita e Perlita nas zonas recristalizadas dos metais de solda.

Fases	Soldas						
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
Ferrita [%]	87,2	86,7	84,5	86,1	81,8	83,8	86,3
Perlita [%]	12,8	13,3	15,5	13,9	18,2	16,2	13,7

Os resultados da quantificação da incidência das microfases A-M nos metais de solda, considerando o primeiro e segundo cordões, e a zona recristalizada, estão contidos na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores da quantificação das microfases A-M.

	Soldas						
	S-1	S-2*	S-3**	S-4*	S-5**	S-6	S-7
Primeiro Cordão	1,28%	1,20%	1,15%	0,96%	0,81%	0,79%	1,74%
Zona Recristalizada	0,77%	0,70%	0,67%	0,57%	0,53%	0,50%	1,06%
Segundo Cordão	1,74%	1,63%	1,56%	1,21%	1,19%	1,18%	2,00%

(\* S-2 e S-4) Variação na corrente de pico com temperatura de pré-aquecimento de 100°C.

(\*\* S-3 e S-5) Variação na corrente de pico com temperatura de pré-aquecimento de 150°C.

(S-7, S-2 e S-6) Variação no tempo de pico.

(S-1, S-2 e S-3) Influência da temperatura de pré-aquecimento.

### 5.3.1. Resultado da influência da intensidade da corrente de pico na microestrutura das soldas

Analisando as Figuras 5.11 a 5.16, observa-se o comportamento dos valores médios da quantificação microestrutural dos dois cordões de solda, que com o aumento da corrente de pico de 435 A (solda S-2) para 470 A (solda S-4) promoveu uma redução na quantidade média de ferrita acicular no metal de solda de 53,2% para 51,0% e, conseqüentemente elevou as participações de ferritas primarias e de ferritas com segundas fases na microestrutura do cordão de solda.

Segundo MILLER (1994), o aumento da corrente de pico influencia num aumento da energia de soldagem e, por conseqüência na redução da velocidade de resfriamento. Assim, a redução da velocidade de resfriamento estaria favorecendo uma redução na formação de ferrita acicular.

De acordo com a Tabela 5.4 a influência da corrente de pico sobre as incidências ferrita e perlita da região de recristalização, intensificou o aumento da perlita de 13,3% para 13,9%. Isto se justifica pelo aumento da energia de soldagem e

na redução da velocidade de resfriamento, visto que associada na velocidade a redução de resfriamento pode ter favorecido o aparecimento da perlita.

Das Figuras 5.17 à 5.22 os resultados médios da quantificação microestrutural dos dois cordões nas soldas S-3 (435 A) e S-5 (470 A), em temperatura de 150 °C de pré-aquecimento. Que com o aumento da corrente de pico 435 A (S-3) para 470 A (S-5) promoveu uma redução média de ferrita acicular no metal de solda de 52,1% para 48,8%, onde essa redução pode estar relacionada a uma elevação do aporte térmico de 1,55 kJ/mm (solda S-3) para 1,59 kJ/mm (solda S-5). De acordo com MILLER (2004), a elevação da corrente de pico promove um aumento na energia de soldagem que implica na redução da velocidade de resfriamento e conseqüentemente na menor formação de ferrita acicular.

Já na região de recristalização observaram-se as porcentagens de ferrita e perlita. Nesta análise da solda S-3 ( $I_p = 435$  A) para a solda S-5 ( $I_p = 470$  A) observa-se que o aumento da energia de soldagem, implicou numa redução da velocidade de resfriamento, conforme apresentado pela MILLER (1994). A redução na velocidade de resfriamento favorece o aparecimento da perlita. Também, favoravelmente à formação de perlita nesta análise está no fato de que foram submetidas a uma maior temperatura de pré-aquecimento ( $T = 150$  °C).

Comparando as soldas S-3 e S-5, obtidas a 150 °C de pré-aquecimento com as soldas S-2 e S-4, obtidas a uma temperatura de pré-aquecimento (100 °C), houve uma maior média na redução na quantidade de ferrita acicular. Sendo que esta ocorrência pode estar justificada pela influência da temperatura de pré-aquecimento na redução da velocidade de resfriamento e assim favorecendo uma redução na formação de ferrita acicular.

No comportamento médio das microestruturas, conclui-se que, com o aumento da corrente média de pico, o resultado obtido na microestrutura foi à redução de ferrita acicular na formação da microestrutura do metal de solda.

Para a temperatura de pré-aquecimento obteve uma redução da ferrita acicular quando se aumentou a temperatura de pré-aquecimento de 100 °C e 150 °C.

### 5.3.2. Resultado da influência do tempo de duração da corrente de pico na microestrutura das soldas

Observa-se na Tabela 5.3 a quantificação média dos microconstituinte que com a elevação do tempo de pico da corrente pulsada, ouve uma redução da quantidade de ferrita acicular nos cordões das soldas.

Para a solda S-7 o tempo de pico que foi aplicado é 1,9 ms, que resultou em 55,9% de ferrita acicular, para S-2 o tempo de pico que foi aplicado é 2,1ms, que resultou em 53,2% de ferrita acicular e para S-6 o tempo de pico que foi aplicado é 2,3, que resultou em 48,4% de ferrita acicular na quantificação média da microestrutura dos cordões de solda.

No caso da redução da ferrita acicular, o que pode ter influenciado é a redução da velocidade de resfriamento. GRONG e MATLOCK (1986) apresentaram que a velocidade de resfriamento é alterada pela variação do aporte térmico, isto é, quanto menor o aporte térmico maior a velocidade de resfriamento.

Assim, constatou-se que, quando aumentava o aporte térmico ouve uma redução da ferrita acicular, onde a solda S-7 apresentou o menor aporte térmico ( $E = 1,51 \text{ kJ/mm}$ ) foi o cordão de solda com a maior proporção de ferrita acicular: 58,1%, para o aporte térmico das demais soldas foi de  $E = 1,57 \text{ kJ/mm}$  (solda S-2) e  $E = 1,61 \text{ kJ/mm}$  (solda S-6).

Em geral, observou que à medida que se aumentaram os tempo de pico, ouve uma redução da ferrita acicular e conseqüentemente um aumento proporcionais das ferritas primarias e secundarias. A menor média dos aportes térmicos manteve-se para a solda S-7 ( $E = 1,51 \text{ kJ/mm}$ ), o que contribuiu para a presença da maior proporção média de ferrita acicular na microestrutura do cordão de solda, ou seja, 55,9 %; contra 53,2% para a solda S-2 e 48,4% para a solda S-6.

Já nas regiões de recristalização, a influência do tempo de pico nas proporções das microestruturas, ferrita e perlita, considerando as soldas S-7 (1,9 ms), S-2 (2,1 ms) e S-6 (2,3 ms). Observa-se na Tabela 5.4 um aumento de perlita à medida que se eleva o tempo de pico. Justifica-se que ao aumentar o tempo de pico, aumenta-se a

energia de soldagem o que implica numa menor velocidade de resfriamento, favorecendo o aparecimento de perlita.

### **5.3.3. Influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura das soldas**

As Figuras 5.32 a 5.40 apresentam a influência da temperatura de pré-aquecimento nas microestruturas dos cordões de solda, analisando-se as soldas S-1 (temperatura ambiente de 29 °C), S-2 (pré-aquecimento de 100 °C) e S-3 (pré-aquecimento de 150 °C).

Observa-se que quando a microestrutura média dos cordões de solda atinge a maior temperatura de pré-aquecimento na solda S-3 (150 °C) tem-se o menor volume de ferrita acicular 52,1% em relação às demais temperaturas. A proporção média de ferrita acicular ficou em 55,6% na solda S-1 (29 °C) e reduziu para 53,2% na solda S-2 (100 °C).

ZEEMANN e EMYGDIO (2001) apresentam que entre os fatores importantes a serem analisados quanto se trata das transformações no material está a velocidade de resfriamento; sendo que, a mesma varia inversamente com a temperatura inicial da peça sendo soldada. MODENESI (2004), quanto maior a temperatura de preaquecimento menor a velocidade de resfriamento e conseqüentemente, numa redução na formação de ferrita acicular.

Em relação o aporte de energia médio, observa-se que houve uma pequena variação entre os três níveis de temperatura analisados, ou seja, entre 1,55 a 1,57 kJ/mm, que podem ser considerados constantes. Portanto, o aporte térmico não influencia na proporção de ferrita acicular para a formação da microestrutura média dos dois cordões.

Já nas regiões de recristalização, a influência da temperatura de pré-aquecimento nas microestruturas, ferrita e perlita, considerando as soldas S-1 (temperatura ambiente de 29 °C), S-2 (temperatura de pré-aquecimento de 100 °C) e

S-3 (temperatura de pré-aquecimento de 150 °C). Observa-se que quando se eleva a temperatura de pré-aquecimento aumenta-se a participação de perlita na região recristalizada da solda. Isto pode ser justificado pela redução que se tem na velocidade de resfriamento o que favorece a formação deste microconstituente. A presença de perlita sempre é prejudicial à tenacidade TAYLOR (1975).

#### **5.4. Propriedades Mecânicas**

Iniciando pelas medidas de microdureza realizadas, das Figuras 5.41 até a 5.50 são mostrados o comportamento do perfil de dureza estabelecido ao longo da linha central das juntas, abrangendo os metais de solda, nas regiões do primeiro e segundo cordões.

##### **5.4.1. Influência da intensidade da corrente de pico na microdureza das soldas**

As Figuras 5.41 à 5.42 mostram o comportamento das microdureza dos metais de solda em função da variação da intensidade da corrente de pico, com as peças submetidas a um pré-aquecimento de 100 °C. Analisando-se as soldas S-2 (435 A) e S-4 (470 A).

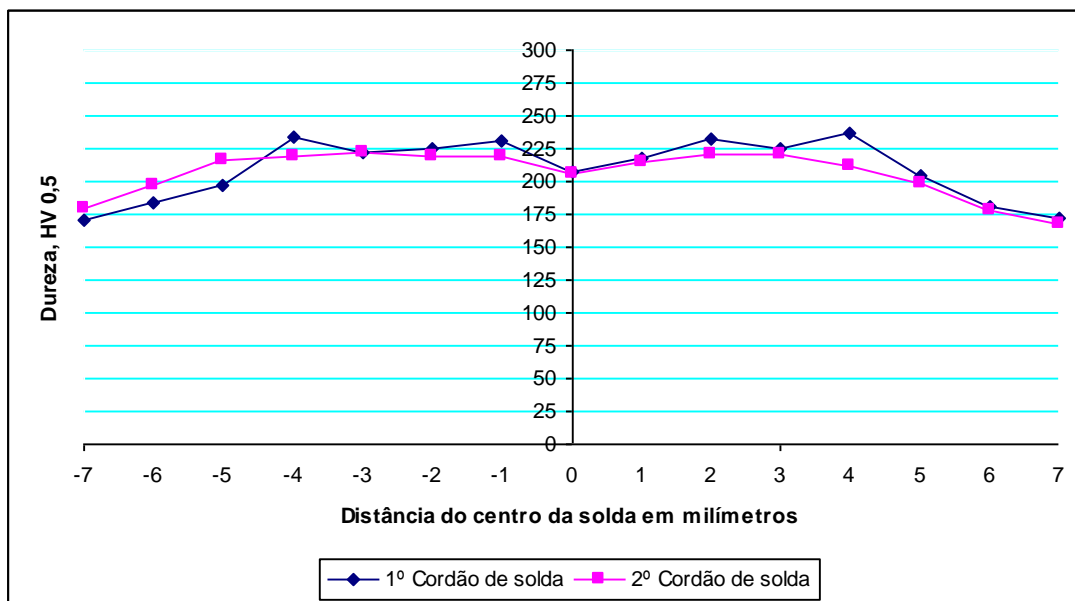


Figura 5.41 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

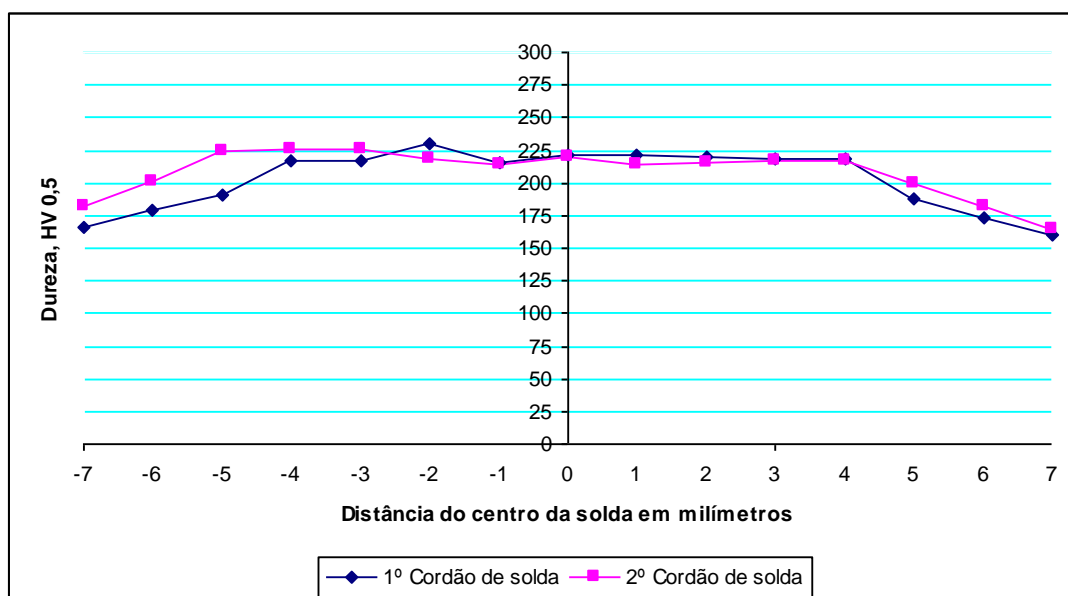


Figura 5.42 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-4 ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

As Figuras 5.43 à 5.44 mostram o comportamento das microdureza dos metais de solda em função da variação da intensidade da corrente de pico, com as peças submetidas a um pré-aquecimento de 150 °C. Analisando-se as soldas S-3 (435 A) e S-5 (470 A).

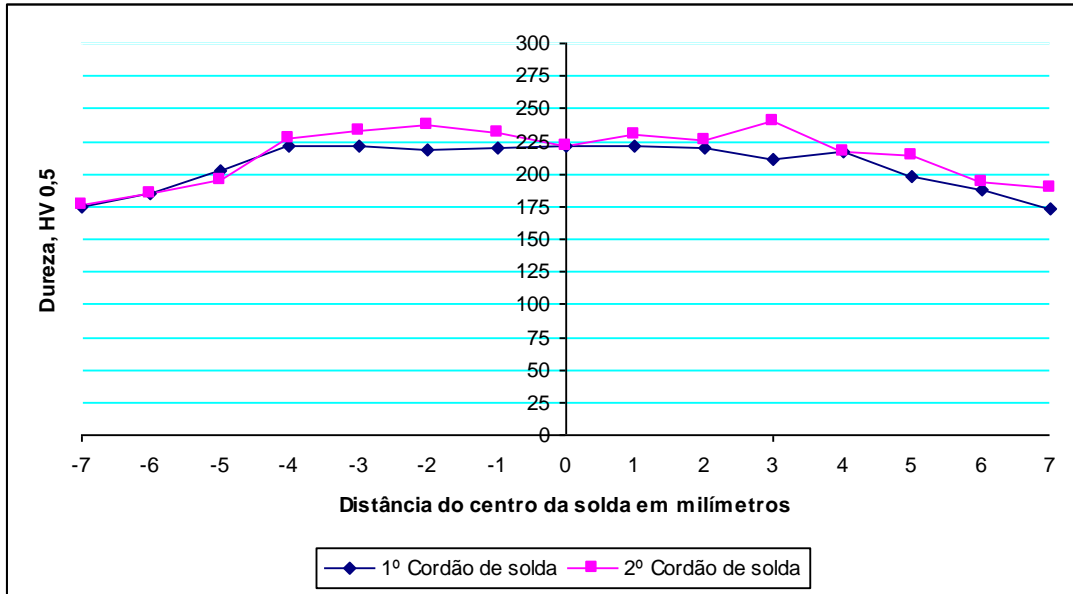


Figura 5.43 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-3 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

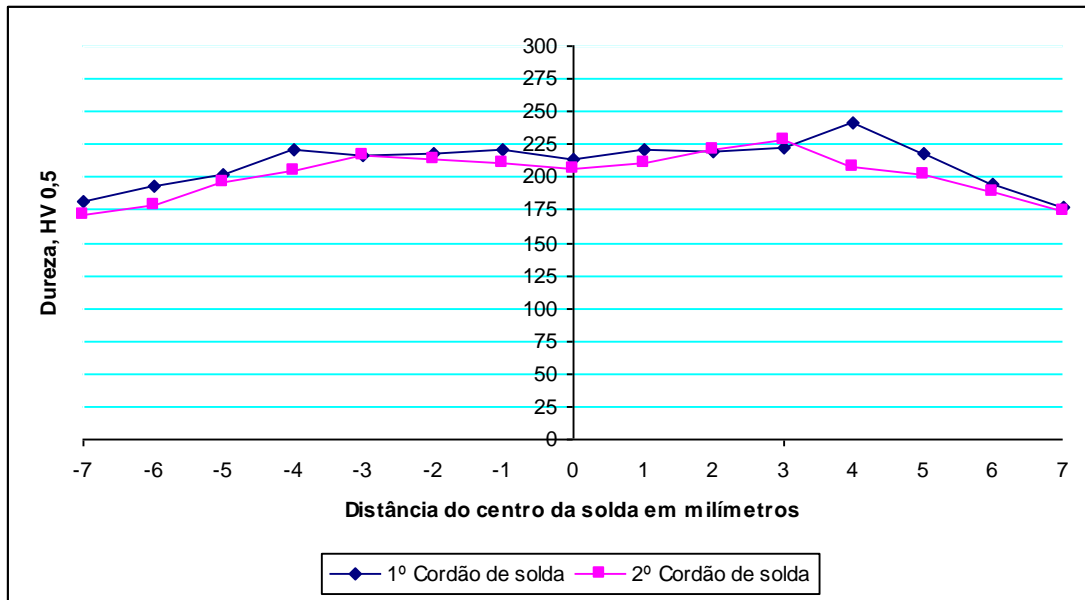


Figura 5.44 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-5 ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

#### 5.4.2. Influência do tempo de duração da corrente de pico na microdureza das soldas

As Figuras 5.45 à 5.47 apresenta a influência dos tempos de pico na microdureza dos cordões de solda, analisando-se as soldas S-7 (1,9 ms), S-2 (2,1 ms) e S-6 (2,3 ms), na temperatura de pré-aquecimento de 100 °C.

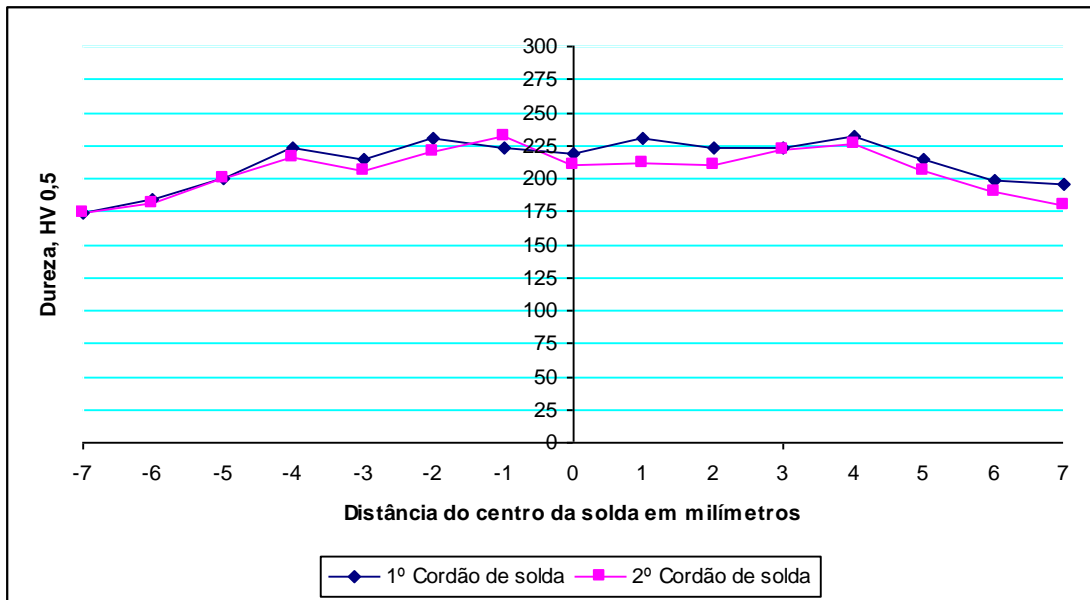


Figura 5.45 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-7 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 1,9$  ms,  $T = 100$  °C).

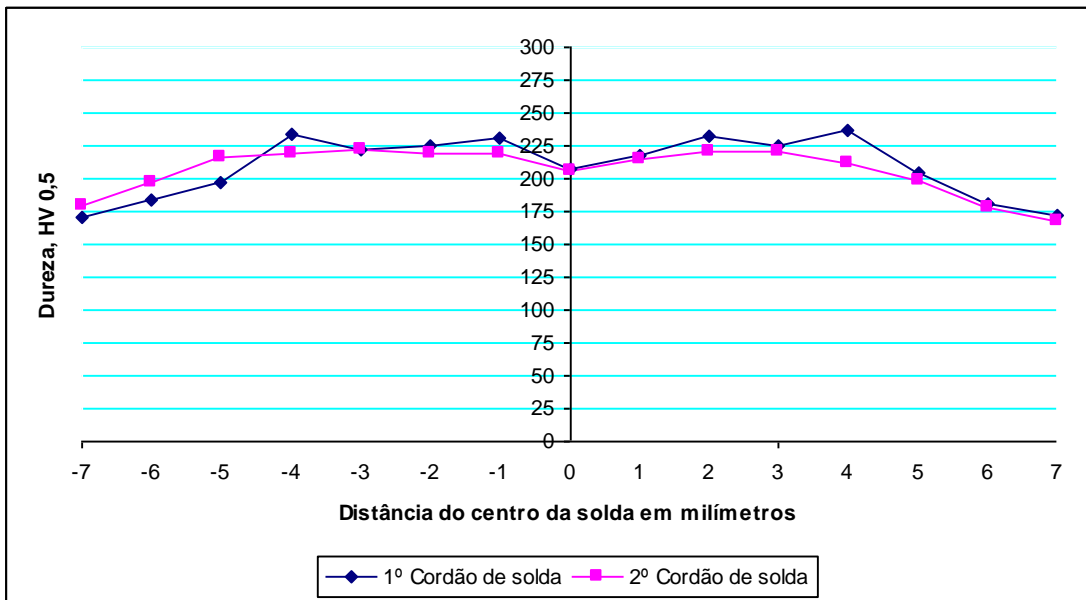


Figura 5.46 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

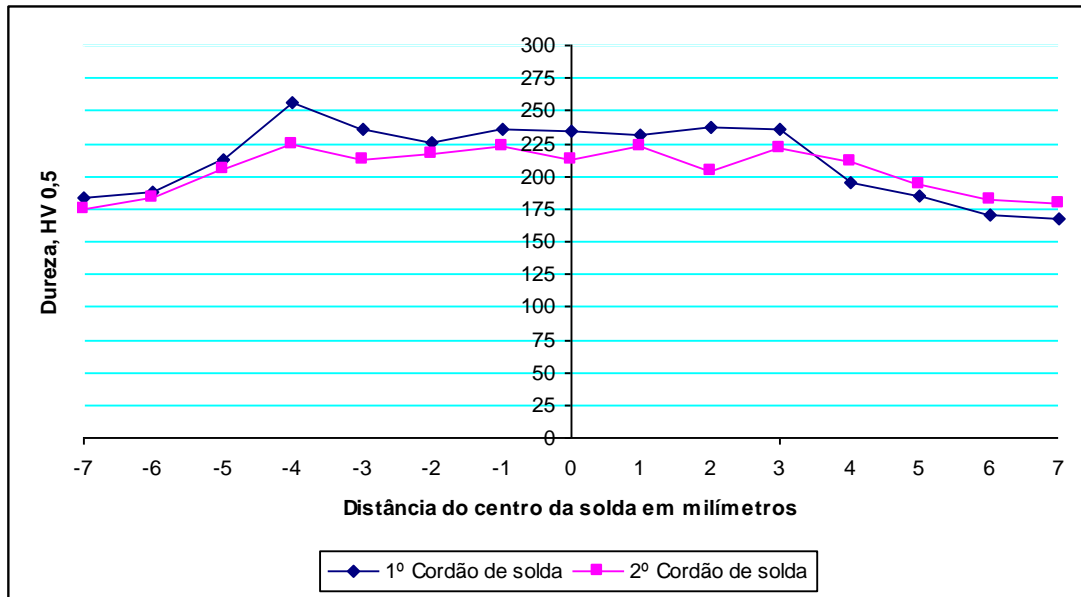


Figura 5.47 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-6 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,3$  ms,  $T = 100$  °C).

### 5.4.3. Influência da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura das soldas

As Figuras 5.48 à 5.50 mostra a influência da variação da temperatura de pré-aquecimento de 29 °C (temperatura ambiente), 100 °C e 150 °C, na microdureza do metal de solda.

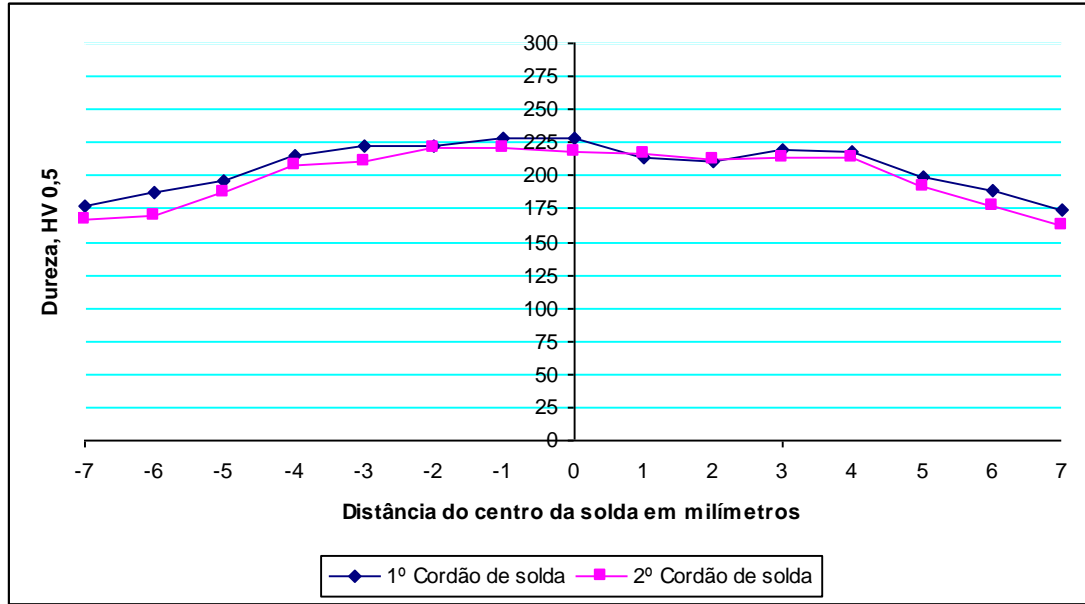


Figura 5.48 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-1 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 29$  °C).

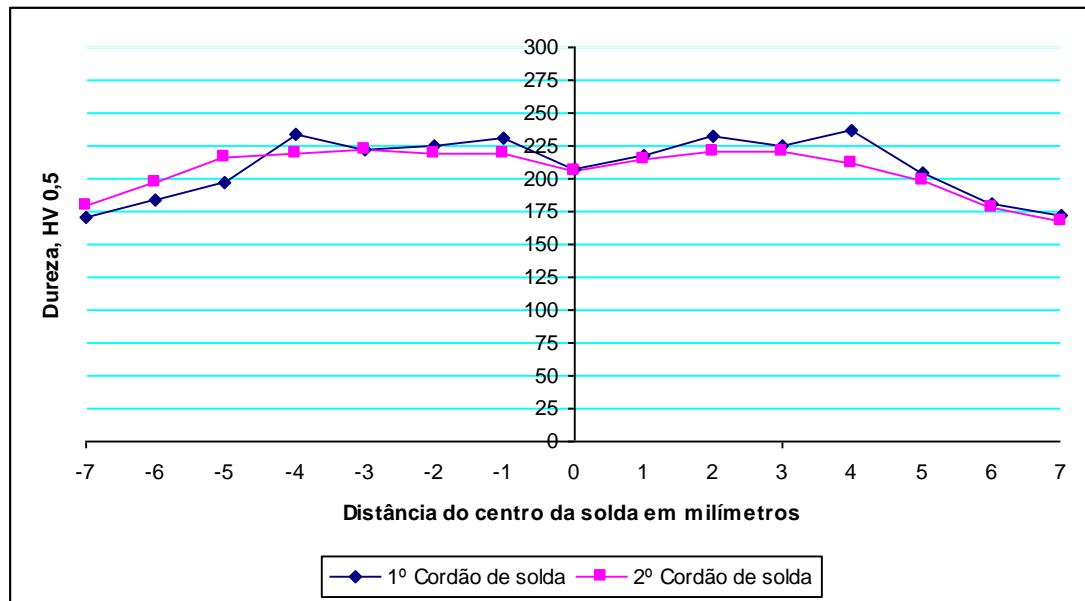


Figura 5.49 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

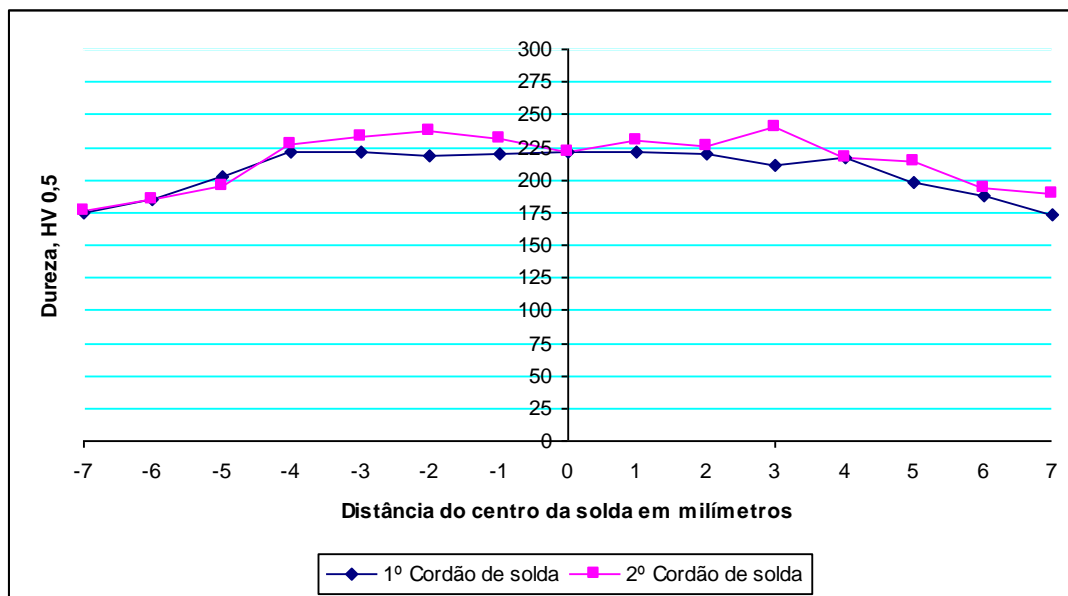


Figura 5.50 – Valores médios das medidas de microdureza Vickers ao longo da junta soldada S-3 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

#### 5.4.4. Resultado do ensaio de microdureza Vickers

Iniciando pelas medidas de microdureza as Figuras 5.41 à 5.50 mostram o comportamento do perfil de dureza estabelecido ao longo da linha central das juntas, abrangendo os metais de solda nas regiões do primeiro e segundo cordões.

Os resultados do ensaio de dureza Vickers foram analisados e comparados de acordo com as Figuras apresentadas acima, onde se verificou que as diferenças no resultados dos ensaios não foram significativo.

Analisando as Figuras, pode-se notar que os resultados não apresentaram uma tendência clara do comportamento de microdureza em relação às variações: corrente de pico, tempo de pico e na temperatura de pré-aquecimento. Nota-se que os valores são muito próximos entre eles.

O comportamento da dureza na junta apresentada nos gráficos das Figuras 5.41 à 5.50, não pode ser definida uma tendência do comportamento da dureza. Muito

provavelmente que estes resultados são influenciados pela própria dispersão do ensaio de microdureza.

A dureza dos diferentes constituintes individuais da microestrutura ocasiona esta dispersão, que não permite determinar um comportamento ou tendência clara da dureza.

De acordo com LINNERT (1994), as medições de microdureza podem variar consideravelmente dependendo da natureza da microestrutura e a área onde é localizado o indentador para medir a dureza.

### **5.5. Influência da intensidade da corrente de pico no limite de resistência à tração das juntas**

No que concerne à avaliação da resistência mecânica das juntas soldadas, as Figuras compreendidas entre 5.51 a 5.54 disponibilizam os resultados dos valores do limite de resistência à tração das juntas.

A Figura 5.51 mostra os resultados dos ensaios de tração nos corpos de prova com influência da intensidade da corrente de pico, submetidas a um pré-aquecimento de 100 °C. Analisando-se os corpos de prova S-2 (435 A) e S-4 (470 A).

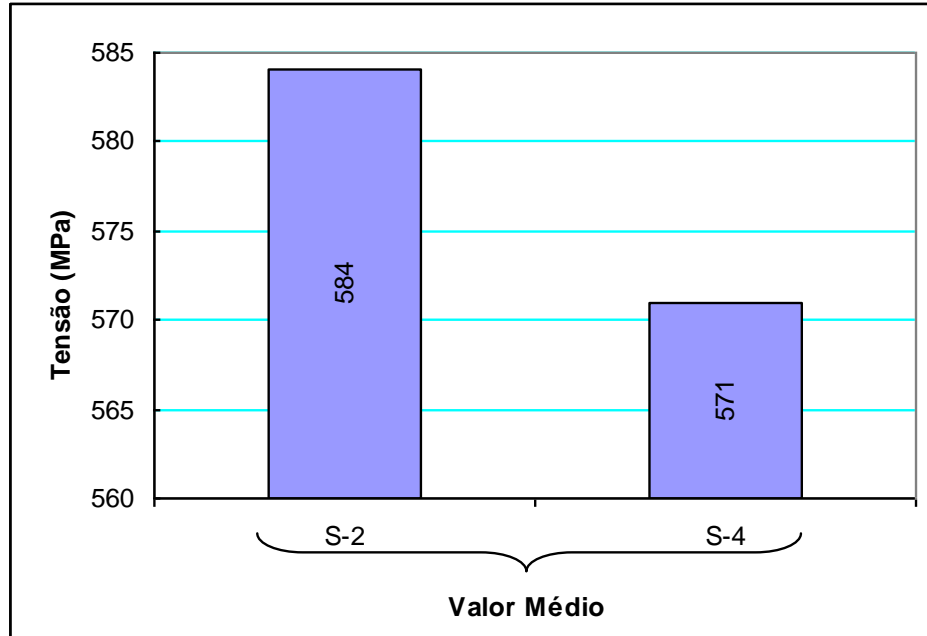


Figura 5.51 – Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C) e S-4 ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C).

Na Figura 5.52, mostra a influência da intensidade da corrente de pico, submetidas a um pré-aquecimento de  $150$  °C, analisando-se os corpos de prova S-3 (435 A) e S-5 (470 A).

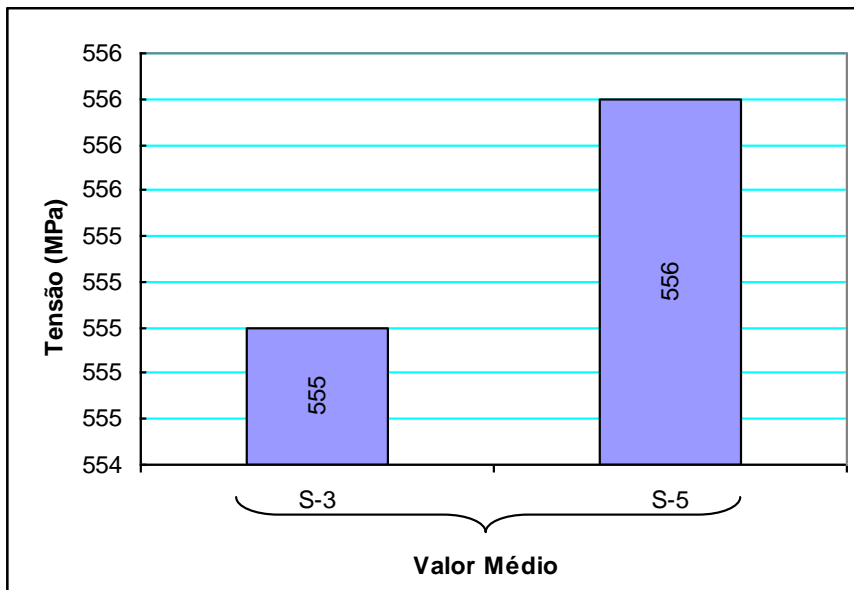


Figura 5.52 – Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-3 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C) e S-5 ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

### 5.5.1. Influência do tempo de duração da corrente de pico no limite de resistência à tração das juntas

A Figura 5.53 mostra a influência do tempo de duração da corrente de pico, nos corpos de prova de tração, analisando-se as soldas S-7 (1,9 ms), S-2 (2,1 ms) e S-6 (2,3 ms), na temperatura de pré-aquecimento de 100 °C.

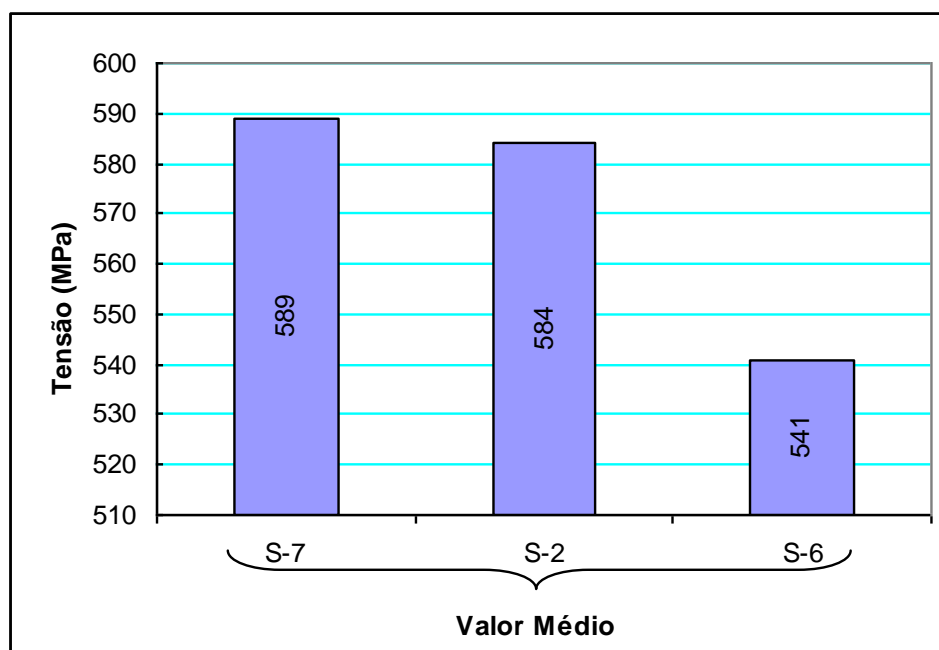


Figura 5.53 – Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-7 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 1,9$  ms,  $T = 100$  °C), S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C) e S-6 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,3$  ms,  $T = 100$  °C).

### 5.5.2. Influência da temperatura de pré-aquecimento no limite de resistência à tração das juntas

A Figura 5.54 mostra a influência da variação da temperatura de pré-aquecimento de 29 °C (temperatura), 100 °C e 150 °C nos corpos de prova de tração.

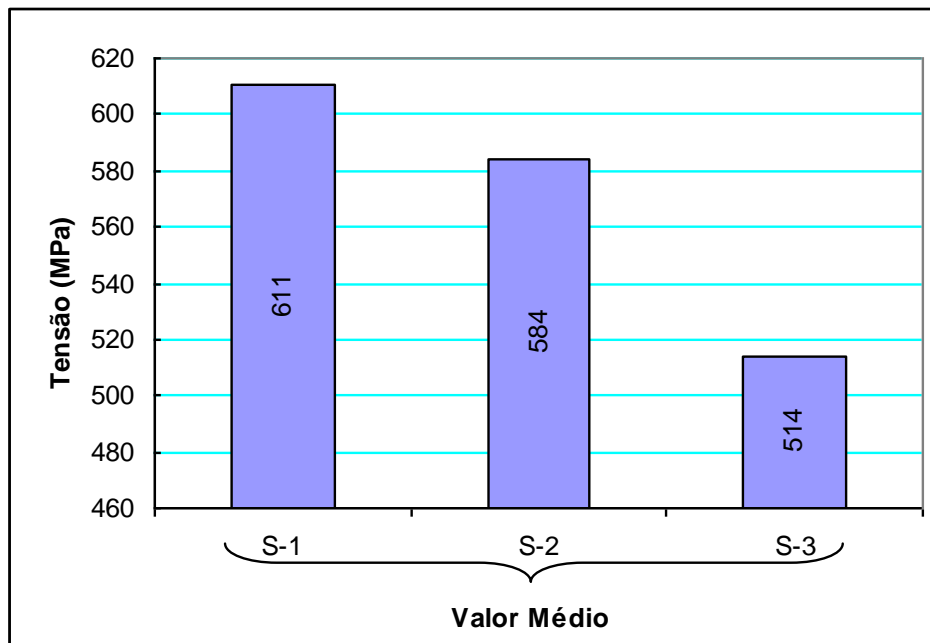


Figura 5.54 – Valores do limite de resistência à tração da junta correspondente a solda S-1 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 29$  °C), S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C) e S-3 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

### 5.5.3. Resultado do ensaio de tração

Para a análise dos resultados dos ensaios de tração no que diz respeito à influência da intensidade da corrente de pico sobre os valores do limite de resistência à tração. Observa-se na Figura 5.51 que o aumento da corrente de pico nos corpos de prova S-2 (435 A) para S-4 (470 A) a um pré-aquecimento de 100 °C promoveu uma redução do limite de resistência à tração de 583 (S-2) para 571MPa (S-4).

Esta redução do limite de resistência à tração é influenciada pelo aumento da energia de soldagem e consequentemente na redução da velocidade de resfriamento, que com a redução da velocidade de resfriamento estaria promovendo uma redução na formação de ferrita acicular. Na Tabela 5.3, podemos observar a redução média do microconstituente ferrita acicular no metal de solda de 53,2% (S-2) para 51,0% (S-5).

Já na Figura 5.52 os resultados foram praticamente os mesmos, permanecendo os mesmo parâmetros 435 A (S-3) para 470 A (S-5), com variação na temperatura de

pré-aquecimento de 100 °C para 150 °C obteve praticamente o mesmo resultado. Com o aumento da temperatura de pré-aquecimento o limite de resistência à tração foi de 555 (S-3) para 556 MPa (S-5).

Ao analisar os resultados da quantificação média do microconstituente do metal de solda com o valor da resistência à tração, observa-se que, mesmo a solda S-3 obter uma porcentagem maior de ferrita acicular, 52,1% (S-3) para 48,1% (S-5), a solda S-5 teve uma pequena vantagem em relação ao limite de resistência. Mas em relação à porcentagem de ferrita acicular a solda S-3 obteve a quantidade em peso (%) a mais desejada.

A Figura 5.53, por sua vez, traz o resultado do limite de resistência à tração, onde mostra a influência do tempo de duração da corrente de pico. Os corpos de prova analisado foram S-7 (1,9 ms), S-2 (2,1 ms) e S-6 (2,3 ms) na temperatura de pré-aquecimento de 100 °C.

Em geral, observou-se que à medida que aumentou o tempo de duração da corrente de pico, ouve uma redução no limite de resistência a tração de 589 (S-7), 584 (S-2) para 541 MPa (S-6), esta redução do limite de resistência a tração esta evidenciado pelas redução média do microconstituente ferrita acicular no metal de solda 55,9% (S-7), 53,2 (S-2) e 48,4% (S-6) conforme Tabela 5.3. Esta redução média do microconstituente ferrita acicular esta diretamente ligado ao aumento do aporte térmico.

Para a influência da variação da temperatura de pré-aquecimento no limite de resistência à tração das juntas, a Figura 5.54 disponibiliza as informações dos corpos de provas S-1 (29 °C), S-2 (100 °C) e S-3 (150 °C).

Observa-se que os maiores limites de resistência à tração são aqueles que apresentam as menores temperaturas de pré-aquecimento.

Segundo MODENESI (2004), quanto maior a temperatura de pré-aquecimento menor a velocidade de resfriamento e conseqüentemente a redução na formação de ferrita acicular.

De acordo com a Figura 5.54 a solda S-1 obteve o maior valor de resistência a tração 611MPa, reduzindo para 584 MPa (S-2) e para 514 MPa (S-3).

## 5.6. Influência da intensidade da corrente de pico da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V dos metais de solda

Por último, constam desde a figura 5.55 até a 5.58 os resultados da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V dos corpos de prova, sendo submetidos a ensaios em temperatura de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente).

Na Figura 5.55 mostra o comportamento dos corpos de prova dos metais de soldas S-2 (435 A) e S-4 (470 A) em função da variação da intensidade da corrente de pico a um pré-aquecimento de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

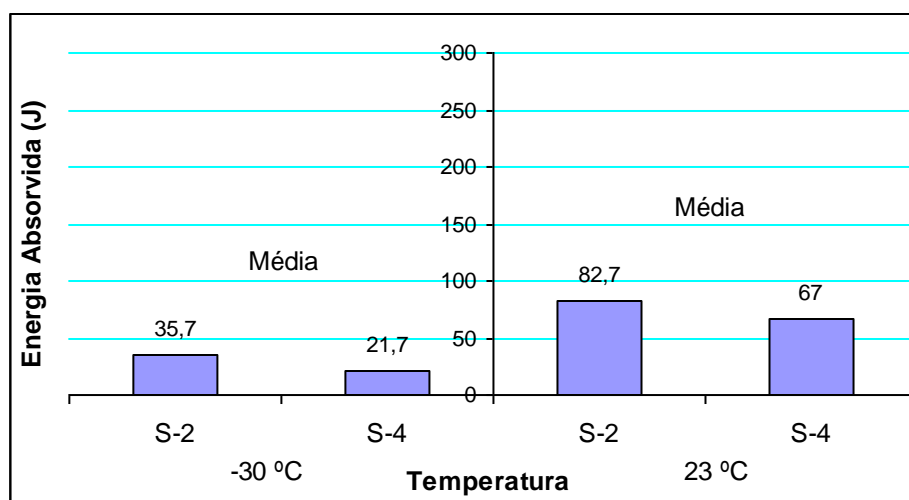


Figura 5.55 – Valores da energia absorvida a  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  dos metais de solda, S-2 ( $I_p = 435\text{ A}$ ,  $t_p = 2,1\text{ ms}$ ,  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e S-4 ( $I_p = 470\text{ A}$ ,  $t_p = 2,1\text{ ms}$ ,  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Ainda dando continuidade, a Figura 5.56 mostra o comportamento dos corpos de prova dos metais de soldas S-3 (435 A) e S-5 (470 A) em função da variação da intensidade da corrente de pico a um pré-aquecimento de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

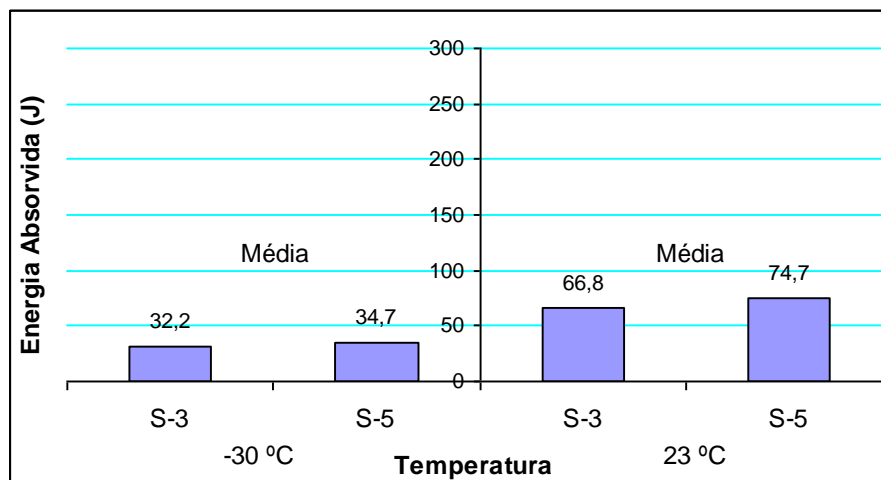


Figura 5.56 – Valores da energia absorvida a -30°C e 23°C dos metais de solda, S-3 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C) e S-5 ( $I_p = 470$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

### 5.6.1. Influência do tempo de duração da corrente de pico na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V dos metais de solda

Quanto ao resultado da influência do tempo de duração da corrente de pico, a Figura 5.57 demonstra essas informações. Os resultados foram obtidos pelos corpos de prova de tração S-7 (1,9 ms), S-2 (2,1 ms) e S-6 (2,3 ms), na temperatura de pré-aquecimento de 100 °C.

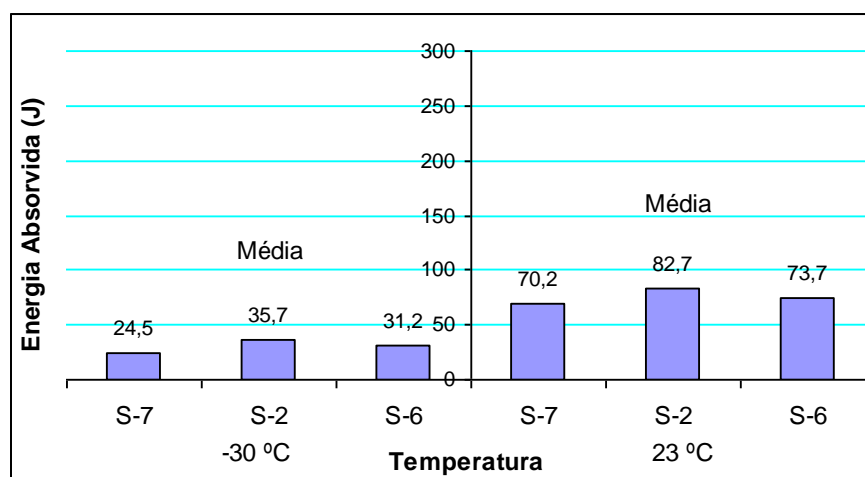


Figura 5.57 – Valores da energia absorvida a -30°C e 23°C dos metais de solda, S-7 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 1,9$  ms,  $T = 100$  °C), S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C) e S-6 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,3$  ms,  $T = 100$  °C).

### 5.6.2. Influência da temperatura de pré-aquecimento na energia absorvida no ensaio de impacto Charpy V dos metais de solda

Em fim, a figura 5.58 mostra a influência da temperatura de pré-aquecimento, sendo avaliado os corpos de prova S-1 (29 °C), S-2 (100 °C) e S-3 (150 °C).

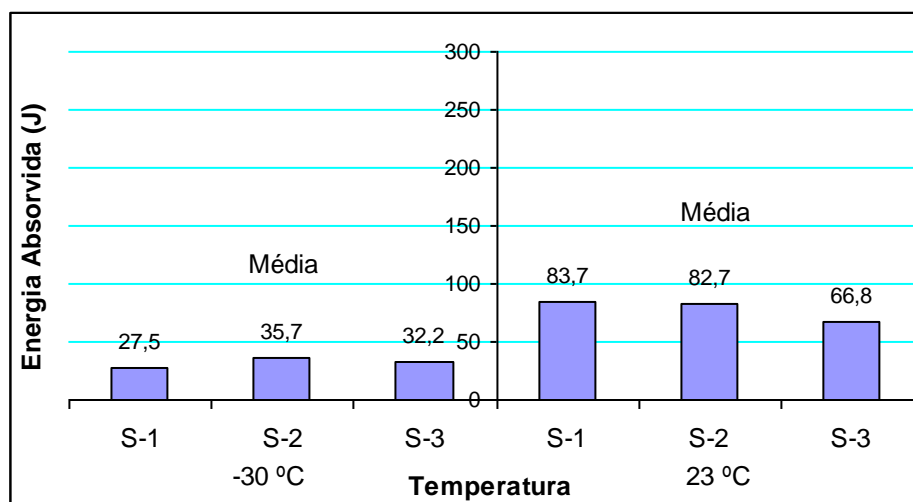


Figura 5.58 – Valores da energia absorvida a -30°C e 23°C dos metais de solda, S-1 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 29$  °C), S-2 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 100$  °C) e S-3 ( $I_p = 435$  A,  $t_p = 2,1$  ms,  $T = 150$  °C).

### 5.6.3. Resultado do ensaio de Impacto Charpy V

Quanto ao resultado dos ensaios de impacto charpy V, serão apresentados somente os ensaios que foram realizados a 25 °C (temperatura ambiente). Visto que para todos os ensaios realizados a temperatura de -30 °C as energias absorvidas foram inferiores a 50 J, valor abaixo do especificado pelo fabricante do eletrodo, conforme demonstrado na Tabela 4.4.

Analisando os resultados dos ensaios a 25 °C (temperatura ambiente), no que diz respeito à influência da intensidade da corrente de pico, o gráfico da Figura 5.55 apresenta as soldas S-2 (435 A) e S-4 (470 A) a um pré-aquecimento de 100 °C, onde

se observa que a solda S-2 obteve uma maior tenacidade de absorção quando comparamos com a solda S-4.

O aumento da corrente de pico S-2 (435) para S-4 (470) influenciou num aumento da energia de soldagem e por conseqüência numa redução da velocidade de resfriamento. A redução na velocidade de resfriamento promove uma redução na quantidade média de ferrita acicular e favorece o aparecimento da perlita. Tal fato que pode ser observado na Tabela 5.3, a solda S-2 (53,2%) de ferrita acicular e a solda S-4 (51,0%).

Para as soldas S-3 e S-5 permaneceram os mesmos parâmetros e elevou a temperatura de pré-aquecimento em 150 °C, a maior tenacidade de absorção foi obtida pela solda S-5, conforme mostrado no gráfico da Figura 5.56.

Ao confrontá-los os resultados da quantificação média do microconstituente do metal de solda com o valor da energia absorvida, observa-se que mesmo a solda S-3 obter uma porcentagem maior de ferrita acicular, 52,1% (S-3) para 48,1% (S-5), a solda S-5 teve a maior energia à absorção. Este resultado pode ter sido influenciado pela evidencia de alguma irregularidade no metal de solda, visto que para esta condição foi realizado o dobro de corpos de prova no ensaio.

Para analisar os resultados da influencia do tempo de duração da corrente de pico as soldas submetidas ao ensaio de impacto foram S-7 (1,9 ms), S-2 (2,1 ms) e S-6 (2,3 ms) na temperatura de pré-aquecimento de 100 °C conforme mostra o gráfico da Tabela 5.57. De acordo com o gráfico podemos observar que a maior tenacidade de absorção de energia foi à solda S-2 com 82,7J em seguida a solda S-6 (73,7J) e a S-7 (70,2J).

Na Tabela 5.3 disponibiliza as informações sobre à predominância da ferrita acicular, sendo 55,9% na solda S-7 (1,9 ms), 53,2 na solda S-2 (2,1 ms) e 48,4 na solda S-6 (2,3 ms). JORGE et al. (1993) apud DIAS (2003) sugerem a faixa de ferrita acicular entre 50% e 70% como a mais propícia para se ter condições mais favoráveis em relação à tenacidade, pelos dados obtidos em aços C-Mn baixa liga, concluíram que a fora desta faixa à presença de outros microconstituintes como a ferrita com agregados de carbeto (FC) e a microfase A-M podem ser notadamente influentes e, desta forma provocar uma redução significativa da tenacidade.

Por último, foi avaliada a temperatura de pré-aquecimento, na figura 5.58 são disponibilizada as informações dos corpos de prova S-1 (29 °C), S-2 (100 °C) e S-3 (150 °C). Observa-se que as maiores absorção ao impacto são aqueles que apresentam as menores temperaturas de pré-aquecimento, afirmando o que MODENESI (2004) ressalta em seu trabalho, quanto maior a temperatura de pré-aquecimento menor a velocidade de resfriamento e conseqüentemente a redução na formação de ferrita acicular.

## 6. CONCLUSÕES

Após a realização do procedimento experimental neste trabalho em relação aos parâmetros de pulso: tempo de pico e corrente de pico; conclui-se que os maiores resultados em relação aos ensaios de tração e impacto ocorreram para os menores valores destes parâmetros, o que também está relacionada com a proporção de ferrita acicular na microestrutura do cordão de solda. A justificativa desta ocorrência pode ser pela influência dos aportes térmicos, visto que os maiores valores foram mais altos para os menores parâmetros analisados.

Quanto à influência da temperatura de pré-aquecimento, o maior resultado em relação aos ensaios de tração e impacto ocorreu para os corpos de prova que foram submetidos à temperatura mais baixa. A justificativa pode estar relacionada com a velocidade de resfriamento do metal de solda à medida que diminui a temperatura de pré-aquecimento. Todos os corpos de prova romperam no cordão de solda, sendo no ensaio de tração e impacto.

Em relação ao ensaio de microdureza vickers, observou-se que os resultados não apresentaram uma tendência clara do comportamento de microdureza em relação às variações: corrente de pico, tempo de pico e na temperatura de pré-aquecimento. Esta ocorrência pode ter sido pela baixa carga aplicada de 500 gf.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSON, D.J.; PARGETER, R.J. – **Factors influencing as-deposited strength, microstructure and toughness of manual metal arc weld suitable for C-Mn steel fabrications**. International Metals Reviews, vol. 31, nº 4, p.141-94, April, 1986.

ALCAN. - **Manual de Soldagem**. Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1. ed., 1993.

ALTEMÜHL, B. - **Svedala Compaction Equipment improves robotic welding performance with new FILARC cored wire**. Svetsaren, vol.53, nº3, pp. 32-35, 1998.

ARAÚJO, W.R. - **Comparação entre soldagem robotizada com arame sólido e metal cored** – a ocorrência de “finger”. Dissertação (Mestrado), UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.

AWS. - **Welding Handbook, Welding Processes**. American Welding Society, v. 2,8. Ed., USA, 1991.

AWS. - **Welding Handbook, Materials and Applications** – Part 1. American Welding Society, v. 3, 8. ed., USA, 1996.

BARHORST, S. – **Metal Cored Electrode Basics**. Welding Journal, vol 79, nº11, p. 13-15, November, 2000.

BARRA, R. S. - **Influência do processo MIG/MAG Térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. Dissertação (Doutorado), UFSC, Florianópolis, SC, 2003.

BLOME, K. - **FILARC PZ6105R – The robot-friendly cored wire**. Svetsaren, v.54, n.1, pp.22- 24, 2000.

BRANDI, S.D. – **Processo MIG/MAG**. In: WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO. F.D. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher, Cap.2 d, p. 99-132, 1995.

COLLARD, J.F – **Adaptive pulsed GMAW control: The Digipulse system**, Welding Journal, p. 35-38, November, 1988.

CORRÊA, C.A. - **Aço inoxidável martensítico aplicado em revestimento pelo processo MIG pulsado e convencional**. Dissertação (Mestrado), UNICAMP, Campinas, SP, 2000.

COSTA, U. P. - **Soldagem com Processo Arame Tubular e com Alma Metálica nos Segmentos Naval, On e Offshore e de Construção**. XXIX Consolda, Brasil, p. 01-16, 2003.

DIAS, A.C. - **Aspectos metalúrgicos da soldagem do aço USI-SAC 350 com arame tubular**. Dissertação (Mestrado), Univ. Federal do Pará, Belém, PA, 2003.

DOLBY, R.E – **Factors Controlling HAZ and Weld Metal Toughness in C-Mn Steels**. Engineering Applications of Fracture Analysis, p. 117-34, South Africa, November, 1979.

FORTES, C; ARAÚJO, W. - **Metalurgia da Soldagem**. Apostila ESAB, São Paulo, 2004.

FRENCH, I.E.; BOSWORTH, M.R. – **A Comparison of Pulsed and Conventional Welding With Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wire**. Welding Journal, vol 74, n°6, p. 197s-205s, June, 1995.

GRIST, F. J.; FARRELL, W.; LAWRENCE, G. S. - **Power Sources for Welding**. ASM Handbook, v. 6, p. 92-102, 1993.

GUERRA, I.M. – **“Soldagem e técnicas conexas: Processo”**. Editado pelo autor, Porto Alegre, 2007.

HOLLIDAY, D. B. - **Gas-Metal Arc Welding**. ASM Handbook, v. 6, p. 577-579, 1993.

JORGE, J.C.; SOUZA, L.F.; REBELLO, J.M.A – **Uma contribuição ao estudo da relação tenacidade-microestrutura de metais de solda C-Mn baixa liga**. XIX Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, 1993.

KANG, B.Y.; KIM, H.J.; HWANG, S.K. - **Effect of Mn and Ni on the Variation of the Microstructure and Mechanical Properties of Low-carbon Weld Metals**. ISIJ International, v. 40, n.12, p. 1237-1245, 2000.

KIM, Y. S.; EAGAR, T. W. - **Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding**. Welding Research Supplement - Welding Journal, p. 279-287, July 1993.

LIMA , M.S.F., GOLDENSTEIN, H. – **Morphological instability of the austenite growth front in a laser remelted iron-carbon-silicon alloy**. Journal of Crystal Growth, vol. 208, p. 709-716, 2000.

LINCOLN, J. F. - **MIG/MAG Welding Guide**. Cleveland, OH., USA, p. 01-48, 1998.

LINNERT, G.E. – **Welding Metallurgy – Carbon and Alloy Steels**. 4<sup>o</sup> ed. Miami: American Welding Society, p.940, 1994.

LYTTLE, K.A. - **Metal Cored Wires**: Where do they fit in your future, *Welding Journal*, v.75, n.10, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. - **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MILLER ELECTRIC Mfg. Co. – **GMAW-P (Pulsed MIG) Process Guide**. USA: May 1994.

MIYAHARA, V. T. P. - **Avaliação das Propriedades Mecânicas e da Microestrutura de Aços Dissimilares ABNT 8620 e ABNT 6655 LN 28 Soldados com Arco Pulsado com Diferentes Temperaturas de Pré-Aquecimento e Tipos de Tecimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Unesp, Bauru, 2008.

MODENESI, P. J. - **Técnica Operatória da Soldagem**, UFMG, 2004.

MODENESI, P.J. - **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. UFMG, Belo Horizonte, MG, junho, 2002.

MOYER, N. – **The evolution of shielding gas**. *Welding Journal*, p. 51-52, September, 2002.

NILO Jr, L.P. – **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica de projeto e análise de experimentos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

NORRISH, J. – **Advanced welding process**. IOP Publishing LTD, Gas Metal arc Welding, p. 113-173, 1992.

PEREZ, F. R. C. - **A Influência da Temperatura de Pré-Aquecimento e Tecimento na Microestrutura e Propriedades Mecânicas na Soldagem MIG/MAG Robotizada de Aços SAE 8620 com ABNT LN28**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Unesp, Bauru, 2007.

QUINN, T.P.; SMITH, C.; MCCOWAN, C. N.; BLACHOWIAK, E.; MADIGAN, R. B. - **Arc Sensing for Defects in Constant- Voltage Gas Metal Arc Welding**. *Welding Journal Research Supplement*, p. 322-328, 1999.

SAITO, M.S. - **Análise da influência dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda e rendimento de deposição, obtidos pelo processo de soldagem com arame tubular utilizando arco pulsado**. Dissertação (Mestrado), UNESP, Bauru, SP, 2001.

SANT'ANNA, P.C. - **Influência de Tratamentos Térmicos Intercríticos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço API 5L X65**. Dissertação (Doutorado), UNICAMP, Campinas, SP, 2006.

SANTOS, J.F.O.; QUINTINO, L.; MEDEIROS, R.C. - Arames Tubulares à **Soldagem MIG com Transferência Controlada**. Soldagem & Materiais, v.1, n.4, p.44-49, 1989.

SUBRAMANIAM, S.; WHITE, D.R.; JONES, J.E.; LYONS, D.W. - **Experimental Approach to Selection of Pulsing Parameters in Pulsed GMAW**. Welding Journal: p. 166s-172s, May. 1999.

TRINDADE, V.B.; PARANHOS, R.P.R.; PAYÃO, J.C.; SOUZA, L.F.G. - **Influência da adição de níquel na tenacidade de metais de solda de aços C-Mn antes e após tratamento térmico de alívio de tensões**. Soldagem & Inspeção, v.10, n.4, p.164-171, outubro-novembro, 2005.

WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E. - **Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization**. Welding Journal, v.74, n.11, November, 1995.

WEBER, J. – **Pulsed GMAW a plus for Midwestern metalworker**. Welding Journal, pp. 51 – 52, November, 1982.

**WELDING IN THE WORLD**, vol. 29, nº 7/8, 1991, IIW - International Institute of Welding.

ZAWODNY, J. – **Welding with the right shielding gás**. Welding Journal, pp. 49-50, December, 2001.

ZEEMANN, A. - **Energia de Soldagem**. Infosolda, 2003. Disponível em: <[www.infosolda.com.br/artigos/metso105.pdf](http://www.infosolda.com.br/artigos/metso105.pdf)>.

## APÊNDICES

## APÊNDICE - A

Tabela A1: Medidas de microdurezas Vickers (500gf).

Solda – S1 (Peça - 3)														
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 29° C - Ambiente.														
Posição em (mm)														
1º Cordão - Superior														
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
181,7	183	197,1	217,9	219,9	226,3	219,6	243,1	214,8	204,4	210,7	207,1	199,4	191,2	176,6
173,9	186,8	197,1	216,6	209,6	220,8	235,6	228,1	224,2	214,5	237	230,9	208,7	191,1	175,8
176,6	194	196	209,1	239,5	218,7	231,4	214,8	202,9	215,1	211,6	216,9	188,9	184,8	170
2º Cordão - Inferior														
160,8	171,3	181,1	192,5	211,7	216,1	231,5	216,9	206,2	208,7	227	207,6	177,8	174	161,1
167,1	169,4	185,4	218,2	199,6	234,5	206	216,2	212,3	210,7	210	215,5	193,1	179,3	160,4
174	170	195,9	213,1	219,1	210,8	224,1	222,3	232,6	218,8	202,3	218,8	205	178,1	165,1

Solda – S2 (Peça - 6)														
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 100° C.														
Posição em (mm)														
1º Cordão - Superior														
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
181,5	185,8	208	269,2	235,1	230,3	226,2	193	219,9	225,4	229,5	255,1	212,7	186,5	173,9
159,5	182,9	199	212	212	227	239,4	208,5	204,9	239	228,9	241,8	206,5	183	164,2
169,5	182,1	184,8	222,4	220,8	217,4	225,4	220	230	230,5	217,6	212	193,4	175,1	179,1
2º Cordão – Inferior														
171,7	189	203,4	227,8	221,9	211,4	224,4	211,8	234,6	226,9	223,5	194,3	194,8	175,3	155,8
182,1	199	226,2	207,5	212,2	225,2	216,4	199,9	207	208,6	205,1	220,3	193,2	178	168,5
184,3	201,5	218,3	223	232,2	218,9	218,5	206,7	204,1	228,3	234,6	219,9	208,4	180,9	176,7

Solda – S3 (Peça - 8)														
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 150° C.														
Posição em (mm)														
1º Cordão - Superior														
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
174,8	199	213,5	227,9	215	223	221,2	223,6	219,1	207,5	209,5	207,1	206,2	191,6	179,4
178,5	180,7	198,3	216,8	217,2	217,2	219	216,1	232,1	231,5	209,5	224,7	201,6	184,1	171,7
169,2	174,4	195,9	217,9	233,1	216	218,4	223,6	214,4	219,9	214,6	219,5	185,5	185,8	167,5
2º Cordão - Inferior														
186,1	184,2	192,9	209,5	240,3	232,2	222,8	229	238,2	248,5	239,9	218,7	198,1	183,4	180,6
168,7	189,8	190	228	233,5	223,9	233,3	214,6	230,5	203,7	241,2	227,3	220,9	195,5	203,3
172,7	179,5	200,6	244,9	226,9	254,1	239,4	219,4	223,7	224,4	240,4	206,1	223,1	202,8	183,7

Solda – S4 (Peça - 9)														
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 470 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 100° C.														
Posição em (mm)														
1º Cordão - Superior														
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
162,7	182,7	202	227,4	224,8	229,6	214,7	219,9	220,1	215,5	215,1	225,3	202,5	175,4	163,3
170,4	179,1	185	221,9	222,4	227,6	218,3	227,1	230,6	230,3	200,9	218,9	185,1	178,2	160,2
166,9	173,4	184,4	199,6	203,2	232,2	212,1	216,1	213,6	211,9	239,5	209,5	176	167,6	157,3
2º Cordão - Inferior														
177,2	186,2	217	234,3	236,1	213,9	207,7	221,8	218,1	211,3	224,6	205,2	189,2	179,1	158,3
180,7	200,3	216,2	224,4	214,8	226,3	213,5	215,2	209,7	212	210,3	223,7	194,7	181,5	164,6
188,7	216,7	238,2	218,3	227,2	214,5	219	221,1	215	224,4	224,6	222,3	213,6	186,3	172

Solda – S5 (Peça - 11)														
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 470 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 150° C.														
Posição em (mm)														
1º Cordão - Superior														
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
180,1	202,8	217,7	232,2	221,2	217,5	223,4	205,3	218,1	222,6	227,4	240	228,9	199,5	180,7
182,3	189,7	204,7	218	209,1	216	226,6	208,2	221,8	218,8	228,1	262,4	219,9	200,4	174,6
180	188,4	184,6	211,3	221,1	221,6	211,9	228,5	223	218,2	212,2	220,3	205,1	183,5	175,4
2º Cordão - Inferior														
162,4	171,6	184,6	197,1	225,3	207,8	213	201,9	206,4	229,7	241,3	198,8	192,5	182,9	171,8
166,7	182,9	197,3	208,1	212	210,3	212,8	203,2	215,2	214,9	218,3	219,6	216,3	190,4	174,9
185,4	180,1	204,9	207,8	212	221,4	205	216	210,8	220,5	227,3	204,6	198,7	194,4	177,2

Solda - S6 (Peça -15)														
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,3 [ms] e Temperatura 100° C.														
Posição em (mm)														
1º Cordão - Superior														
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
198,8	192,8	216,7	254,8	251,4	220,4	243	246,8	242,6	230,9	238,9	197,2	199,4	171,9	160,9
174,7	187,4	214,6	265,5	227,3	236	240,9	223,5	226,2	240,2	244,4	198,8	180,2	172,2	177,5
177,9	183,4	206	246,5	227,2	220,8	225,3	231,4	224,8	239,7	224,9	190,3	175,9	167,8	162,8
2º Cordão - Inferior														
170,1	181,8	204,1	216,2	212,5	211,4	220,6	206,8	225,5	195,8	233,7	202,1	180,1	182,9	179,1
168,3	184	207,7	227	216	219,6	214,1	228,1	234,6	214,2	216,9	209,7	193,9	180,6	176,4
184,4	186,8	204,4	230,6	209,7	218,5	234,3	201	208,5	202,8	212,4	219,7	208,9	183,5	182,2

Solda – S7 (Peça - 17)

Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 1,9 [ms] e Temperatura 100° C.

Posição em (mm)

1º Cordão - Superior

-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
181,4	182,6	212,8	232,1	226,1	232,2	231	217	226,7	223,8	219,7	259,9	224,1	202,4	199,8
169,3	184,5	205,2	229,9	211	243,2	219,5	224,9	226,5	216,8	227,8	224	214,5	205,9	191,8
170,6	183,9	182,1	206,9	208,1	215,6	219,6	213,6	238,1	226,8	221,2	212,3	204,1	188,6	193,8

2º Cordão – Inferior

177,6	168,5	189,5	212,8	212,2	229,1	233,5	200,6	204,6	213,4	207,6	214,5	199,3	188,4	178,1
169,2	188,7	205,3	209,3	203,4	215	228,3	223,9	216,9	204,1	227,4	231,1	210,5	192	177,4
177	187,3	203,5	226,4	203,4	218,9	235,4	207,9	211,8	212,9	228,4	233,3	208,7	189,4	182,6

## APÊNDICE – B

Tabela B1: Energia Absorvida.

Solda – S1 (Peça - 3)					
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 29° C - Ambiente.					
Temperatura -30°C			Temperatura 23°C		
Corpos de Prova			Corpos de Prova		
A	B	C	A	B	C
31	21	30,5	84,5	81,5	85

Solda – S2 (Peça - 6)					
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 100° C.					
Temperatura -30°C			Temperatura 23°C		
Corpos de Prova			Corpos de Prova		
A	B	C	A	B	C
38	35	34	79	80,5	88,5

Solda – S3 (Peça - 8)					
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 150° C.					
Temperatura -30°C			Temperatura 23°C		
Corpos de Prova			Corpos de Prova		
A	B	C	A	B	C
32,5	28,5	35,5	68	62	70,5

Solda – S4 (Peça - 9)					
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 470 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 100° C.					
Temperatura -30°C			Temperatura 23°C		
Corpos de Prova			Corpos de Prova		
A	B	C	A	B	C
19	25	21	64,5	70	66,5

Solda – S5 (Peça - 11)					
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 470 [A], Tempo de pico 2,1 [ms] e Temperatura 150° C.					
Temperatura -30°C			Temperatura 23°C		
Corpos de Prova			Corpos de Prova		
A	B	C	A	B	C
38	31,5	34,5	74,5	72,5	77

Solda - S6 (Peça -15)					
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 2,3 [ms] e Temperatura 100° C.					
Temperatura -30°C			Temperatura 23°C		
Corpos de Prova			Corpos de Prova		
A	B	C	A	B	C
26,5	29	38	74,5	74	72,5

Solda – S7 (Peça - 17)					
Parâmetros de pulso: Corrente de pico 435 [A], Tempo de pico 1,9 [ms] e Temperatura 100° C.					
Temperatura -30°C			Temperatura 23°C		
Corpos de Prova			Corpos de Prova		
A	B	C	A	B	C
25,5	28	20	67,5	68	75













