



**Universidade Federal de Minas Gerais**

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

**Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos  
revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda**

Cláudio Turani Vaz

Março de 2014

Cláudio Turani Vaz

**Influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

**Área de concentração:** Processos de Fabricação

**Orientador:** Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2014

## Resumo

O processo de soldagem manual com eletrodos revestidos teve um papel de destaque ao longo de parte do século XX. Ainda hoje, onde há vários processos mais produtivos, eletrodos revestidos básicos são largamente empregados em soldagens de grande responsabilidade. Contudo, a elevada susceptibilidade a absorção de umidade pelo revestimento ainda é um problema a ser superado. Estudos realizados na soldagem subaquática molhada, onde o revestimento é protegido por uma camada de verniz, indicaram a possibilidade do uso de polímeros em substituição aos silicatos como aglomerante do revestimento durante a fabricação. A expansão dessa tecnologia para os eletrodos revestidos básicos destinados a soldagem convencional se mostrou satisfatória. O principal objetivo, reduzir a sensibilidade do consumível à umidade e, assim, produzir um metal de solda com baixos teores de hidrogênio difusível, foi atingido. Além disso, foi possível obter um metal de solda com microestrutura diferenciada constituída por elevadas frações volumétricas de ferrita acicular.

O objetivo desse estudo foi investigar as causas das diferenças observadas na microestrutura e avaliar a influência do polímero utilizado neste processo.

A comparação entre a microestrutura produzida por eletrodos aglomerados com polímero e a prevista na literatura para eletrodos básicos com composição química semelhante evidenciou diferenças significativas. A investigação das condições empregadas na obtenção destes metais de solda não justificou as diferenças observadas. Por outro lado, a análise dos elementos químicos residuais indicou variações nos teores de alguns destes, principalmente nitrogênio, que justificaram as alterações microestruturais. Não foi possível descartar a influência de outros elementos químicos, contudo, esses desempenharam função complementar.

O estudo das características operacionais de eletrodos com polímero e classe E7018 permitiu identificar como o polímero influencia o teor de nitrogênio no metal de solda. A comparação entre os teores de nitrogênio da alma, gotas metálicas transferidas e metal de solda confirmou que a absorção desse elemento ocorreu principalmente durante a transferência metálica, ou seja, é proveniente da contaminação pela atmosfera que envolve o arco. Resultados dos experimentos realizados indicaram o teor mais baixo de nitrogênio na presença do polímero se deve a formação de uma atmosfera protetora mais eficiente durante a soldagem e ainda por

alterações no modo de transferência metálica predominante. O teor elevado de carbono no metal de solda indicou que a decomposição do polímero forma uma atmosfera rica nesse elemento. A Difração de Raios-X das escórias indicou a alteração na atmosfera que envolve o arco. A avaliação da morfologia das gotas durante sua formação, a medição do tamanho médio das gotas coletadas e monitoramento da tensão durante a soldagem confirmaram as alterações na transferência metálica.

**Palavras chave:** eletrodos revestidos básicos, polímero, transferência metálica, nitrogênio, ferrita acicular.

## Abstract

Shielded metal arc welding were one of the most important processes along part of the twenty century. Nowadays, where there are most productive welding processes, the basic covered electrodes are largely used at high responsibility services. However, the coating moisture absorption is a problem to overcome. Underwater wet welding studies showed the availability to replace the traditional binders (silicates) by polymers on the electrode production. The use of this technology on conventional basic electrodes presented satisfactory results. The main goal, to make a moisture resistant covered electrode with low diffusible hydrogen content weld metal, was reached. Furthermore, was possible to obtain a weld metal mainly composed by acicular ferrite.

The main objective of this thesis was to explore the microstructural differences and evaluate the polymer influence on it.

Comparison between the weld metal microstructure obtained by polymer agglomerated electrodes and provided in the literature with similar chemical composition showed strong differences. The study of conditions used to obtain these weld metals did not justified the observed differences. On the other hand, the evaluation of residual chemical elements presented some differences, mainly nitrogen content, which could justify it. The influence of other chemical elements could not be disregarded. However, they had a complementary function.

The evaluation of polymer agglomerated and E7018 class electrodes operational characteristics identified how the polymer influences the weld metal nitrogen content. A comparison between wire, metallic droplets and weld metal nitrogen content confirmed the absorption during metallic transfer, thus it came from atmosphere contamination. The experiments showed that less nitrogen content can be related to most effective shielding and to metallic transfer mode changes. The high carbon content on the weld metal produced by electrodes with polymer indicated a rich carbon atmosphere. The slag X-Ray Diffraction indicated changes on the atmosphere which involves the arc. The formed droplet morphology, average droplet size and voltage monitoring during welding confirmed the metallic transfer changes.

**Key words:** basic coated electrodes, polymer, metallic transfer, nitrogen, acicular ferrite.

A Fernanda e a Marina pelo  
carinho e paciência.

A meus pais e irmãos pela  
confiança.

*“Só sei que nada sei...”*

*Sócrates, Filósofo Grego*

## **Agradecimentos**

A Deus e a minha família.

Ao Professor Alexandre Queiroz Bracarense pela oportunidade, dedicação, ensinamentos e paciência.

Aos Professores Ezequiel, Ivanilza e Paulão pelos conselhos e “pitacos”.

Aos bolsistas Gustavo, Juliano, Gustavo “Mixirica”, Kenny, Guilherme e Alexandre.

Aos colegas do LRSS ao longo desses anos: Ariel, Warley, André e Frank.

Aos Professores Manuel e Lorenzo da UCLV.

A Elbras Eletrodos do Brasil pelo fornecimento dos consumíveis e realização de ensaios, em especial ao Engenheiro Aurecyl e aos amigos da fábrica (Maurício, Baiano e Silvano).

A ESAB S.A. Indústria e Comércio pelas análises químicas realizadas, em especial aos Engenheiros Welerson Reinaldo de Araújo e Leonardo Augusto Vieira..

Ao Laboratório de Difração de Raio-X do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, em especial a Andréia e ao Professor Vicente Buono.

Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, em especial ao Alberto.

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação deste estudo .....	1
1.2. Objetivo.....	3
<b>2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>5</b>
2.1. Soldagem com eletrodos revestidos.....	5
2.1.1. Modos de transferência metálica.....	5
2.1.2. Reações químicas durante a soldagem .....	8
2.2. Utilização de polímeros em eletrodos revestidos.....	12
2.3. A ferrita acicular .....	13
2.3.1. Características gerais e morfologia .....	14
2.3.2. Formação da ferrita acicular.....	15
2.4. Variáveis que influenciam a formação da ferrita acicular .....	20
2.4.1. Influência da taxa de resfriamento no metal de solda.....	20
2.4.2. Influência da composição química .....	22
2.4.3. Inclusões não metálicas.....	30
2.4.4. Tamanho de grão austenítico.....	33
2.4.5. Presença de ferrita alotromórfica .....	35
2.4.6. Deformação plástica .....	36
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>39</b>
3.1. Equipamentos .....	39
3.1.1. Fonte de energia.....	39
3.1.2. Dispositivo para soldagem por arraste .....	39
3.2. Materiais utilizados.....	40
3.2.1. Eletrodos revestidos.....	40
3.2.2. Metal de base .....	43
3.3. Estudo das características operacionais dos eletrodos .....	44



3.3.1.	Monitoramento dos parâmetros de soldagem e medição do perfil dos cordões de solda.....	44
3.3.2.	Análise da escória produzida .....	47
3.3.3.	Avaliação da formação das gotas metálicas na ponta do eletrodo .....	48
3.3.4.	Monitoramento da temperatura do eletrodo durante a soldagem .....	49
3.3.5.	Coleta e análise das gotas transferidas.....	50
3.4.	Estudo do metal de solda produzido pelo eletrodo com polímero.....	52
3.4.1.	Análise microestrutural.....	52
3.4.2.	Análise química.....	53
3.4.3.	Taxa de resfriamento .....	54
<b>4.</b>	<b>Resultados e discussão .....</b>	<b>58</b>
4.1.	Avaliação do metal de solda produzido pelo eletrodo aglomerado com polímero .....	58
4.1.1.	Análise microestrutural.....	58
4.1.2.	Composição química.....	61
4.1.3.	Condições de soldagem.....	62
4.2.	Comparação entre a microestrutura obtida e a prevista pela literatura.....	65
4.3.	Investigação das variáveis responsáveis pelas diferenças microestruturais.....	71
4.4.	Influência do polímero sobre os teores de nitrogênio e boro .....	74
4.4.1.	O boro.....	74
4.4.2.	O nitrogênio .....	74
4.5.	Influência do polímero sobre as características operacionais do eletrodo .....	75
4.5.1.	Avaliação do perfil dos cordões de solda .....	75
4.5.2.	Monitoramento da tensão e corrente de soldagem.....	78
4.5.3.	Formação das gotas na ponta do eletrodo .....	81
4.5.4.	Coleta e análise das gotas transferidas.....	83
4.5.5.	Análise química das gotas coletadas .....	91
4.5.6.	Análise da escória gerada por Difração de Raios-X .....	96

4.6. Modelo proposto para explicar o efeito do polímero sobre a formação da ferrita acicular no metal de solda .....	98
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>103</b>
<b>6. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>105</b>
<b>7. Bibliografia .....</b>	<b>106</b>
<b>8. Anexos .....</b>	<b>113</b>
8.1. Calibração do sistema de medição de temperatura do metal de solda e eletrodo revestido .....	113
8.2. Microestrutura dos metais de solda.....	118
8.3. Fluxograma para quantificação dos constituintes em metais de solda ferríticos proposto pelo IIW.....	123
8.4. Carta do ICDD para o Fluoreto de Cálcio.....	124

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Hidrogênio difusível do metal de solda depositado por eletrodos revestidos E7018 (convencional) e aglomerado com polímero após fabricação e exposição de 30 dias. Fonte: Vaz et al.(2). .....	2
Figura 1.2: Fração volumétrica de ferrita acicular em diferentes regiões do metal de solda depositado por eletrodos E7018 (convencional) e aglomerado com polímero. Fonte: Vaz et al.(2). .....	2
Figura 2.1: Ilustração da ponta fundida do eletrodo mostrando as diferentes forças que atuam na transferência da gota metálica. Fonte: Brandi et al (4). .....	7
Figura 2.2: Diagrama de energia livre para formação de óxidos. Fonte: Gaskell (6). ....	8
Figura 2.3: Reações metal gás na soldagem com eletrodos revestidos. Fonte: Lancaster (3). .....	10
Figura 2.4: Teores de oxigênio e nitrogênio esperados em diferentes processos de soldagem. Fonte: Rein (11). .....	12
Figura 2.5: Ferrita acicular em um metal de solda ferrítico. Ataque: Nital 5%. Microscópio eletrônico de varredura. Fonte: Babu et al. (20). .....	15
Figura 2.6: Diagrama Tempo x Temperatura representando o ciclo térmico selecionado e registrado no forno infravermelho. Fonte: Terasaki e Komizo (17). .....	17
Figura 2.7: Desenvolvimento morfológico “in situ” da ferrita acicular. Registros realizados a 621°C(a), 618°C(b), 615°C(c) e 613°C(d). .....	17
Figura 2.8: Nucleação da ferrita acicular a partir de inclusões. Fonte: Terasaki e Komizo (17). .....	18
Figura 2.9: Nucleação da ferrita acicular a partir da interface $\alpha$ - $\gamma$ (ferrita acicular – austenita). Fonte: Terasaki e Komizo (17). .....	18
Figura 2.10: Ilustrações dos diferentes mecanismos de nucleação da ferrita acicular. Fonte: Babu (25). .....	19

Figura 2.11: Modelo esquemático mostrando a influência da taxa de resfriamento, tamanho de grão austenítico e elementos de liga no superresfriamento e relações propostas entre o superresfriamento, taxa de nucleação e microestruturas desenvolvidas durante o resfriamento contínuo. Fonte: Farrar e Harrison (29). .....	21
Figura 2.12: Efeito do silício na microestrutura do metal de solda contendo 0,6%Mn (a) e 1,4% (b) de Mn. Fonte: Evans (37).....	23
Figura 2.13: Efeito do níquel na microestrutura do metal de solda contendo 1,0%(a) e 1,8% (b) de Mn. Fonte: Evans (38).....	23
Figura 2.14: Mudanças na microestrutura do metal de solda em função do teor de cromo e molibdênio. Fonte: Evans (39). .....	24
Figura 2.15: Efeito do teor de alumínio na microestrutura de um metal de solda com 40ppm de titânio . Fonte: Evans (41).....	25
Figura 2.16: Efeito do teor de titânio na microestrutura do metal de solda. Fonte: Evans (42). .....	25
Figura 2.17: Efeito do teor de alumínio sobre a microestrutura do metal de solda com diferentes teores de titânio (A – 5ppm, B – 40ppm, C – 220ppm e D – 450ppm). Fonte: Evans (43).....	26
Figura 2.18: Efeito do boro sobre a microestrutura do metal de solda com diferentes quantidades de titânio(<5, 35, 120, 260, 400 e 600ppm). Fonte: Evans (45).....	28
Figura 2.19: Efeito do teor de vanádio na microestrutura do metal de solda. Fonte: Evans (46).....	29
Figura 2.20: Efeito do teor de nióbio na microestrutura do metal de solda. Fonte: Evans (49). .....	30
Figura 2.21: Ilustração esquemática do mecanismo segundo o qual há formação de ferrita acicular e bainita em microestruturas com diferentes tamanhos de grão austeníticos. Fonte: Bhadeshia (16). .....	34
Figura 2.22: Efeito do tamanho de grão austenítico na fração volumétrica de ferrita acicular. Fonte: Barbaro et al (32). .....	34

Figura 2.23: Ilustração esquemática do mecanismo segundo o qual a presença de ferrita alotrópica induz a transição de bainita para ferrita acicular. Fonte: Bhadeshia (16). .....	35
Figura 2.24: Microestrutura de amostras de metal de solda . Fonte: Lee e Bhadeshia (34). .....	36
Figura 2.25: Diagrama esquemático do processamento termomecânico utilizado no estudo de Lee e Bhadeshia. Fonte: Lee e Bhadeshia (34). .....	37
Figura 2.26: Perfil de dureza das amostras transformadas isotermicamente a 390°C após diferentes deformações. Fonte: Lee e Bhadeshia (34).....	38
Figura 3.1: Dispositivo utilizado na mecanização das operações de soldagem. ....	40
Figura 3.2: Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado no monitoramento de tensão e corrente de soldagem.....	45
Figura 3.3: Posição de retirada das amostras para medição do perfil dos cordões de solda. ....	47
Figura 3.4: Moinho pulverizador de panela.....	48
Figura 3.5: Posicionamento do termopar para medição da temperatura no eletrodo. ...	49
Figura 3.6: Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado no monitoramento da temperatura do eletrodo.....	50
Figura 3.7:Dispositivo empregado na coleta das gotas transferidas desenvolvido por Bracarense (56). .....	51
Figura 3.8: Posição de retirada das amostras destinadas à análise microestrutural. ...	53
Figura 3.9: Posição de retirada das amostras para determinação dos teores de oxigênio e nitrogênio no metal de solda. ....	54
Figura 3.10: Termopar Tipo S empregado no monitoramento da temperatura do metal de solda. ....	55
Figura 3.11: Posição de inserção do termopar no metal de solda. ....	55
Figura 3.12: Sistema empregado na soldagem dos termopares.....	56

Figura 3.13: Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado na medição da temperatura do metal de solda.....	57
Figura 4.1: Macrografia dos cordões de solda depositados pelo eletrodo aglomerado com polímero. Ampliação: 25 vezes.....	59
Figura 4.2: Microestrutura típica do metal de solda depositado pelo eletrodo aglomerado com polímero (Amostra 3P).....	60
Figura 4.3: Fração volumétrica dos constituintes presentes no metal de solda. ....	61
Figura 4.4: Macrografia do metal de solda indicando a posição do termopar. ....	64
Figura 4.5: Temperatura no metal de solda.....	64
Figura 4.6: Efeito do teor de manganês sobre a fração volumétrica dos constituintes em metais de solda produzidos por eletrodos revestidos básicos com 0,145% de carbono. Fonte: Evans e Bailey (58). ....	66
Figura 4.7: Comparação entre as frações volumétricas dos constituintes presentes no metal de solda produzido pelo eletrodo aglomerado com polímero e pelo Eletrodo A com 0,145% de carbono do estudo de Evans e Bailey (58).....	67
Figura 4.8: Influência do diâmetro do eletrodo sobre a fração volumétrica dos constituintes no metal de solda produzido pelo Eletrodo A com 0,045% de carbono. Fonte: Evans e Bailey (58). ....	69
Figura 4.9: Influência da energia de soldagem sobre a fração volumétrica dos constituintes no metal de solda produzido pelo Eletrodo A com 0,045% de carbono. Fonte: Evans e Bailey (58) .....	70
Figura 4.10: Influência da taxa de resfriamento sobre a fração volumétrica dos constituintes no metal de solda produzido pelo Eletrodo A com 0,045% de carbono. Fonte: Evans e Bailey (58). ....	71
Figura 4.11: Oscilogramas de tensão e corrente típicos obtidos durante a soldagem do eletrodo E7018.....	78
Figura 4.12: Oscilogramas de tensão e corrente típicos obtidos durante a soldagem do eletrodo com polímero.....	79

Figura 4.13: Sinais de tensão coletados no intervalo entre 20 e 30s de coleta.....	79
Figura 4.14: Frequência de curtos circuitos na soldagem com os eletrodos (Intervalo de confiança: 95%).....	80
Figura 4.15: Frequência de curtos circuitos para 1/3, 2/3 e 3/3 do tempo total de soldagem (Intervalo de confiança: 95%).....	81
Figura 4.16: Gotas formadas na ponta dos eletrodos obtidas através da interrupção abrupta da soldagem a 30s do início.....	82
Figura 4.17: Macrografia das pontas dos eletrodos revestidos (Ampliação: 25x) .....	82
Figura 4.18: Gotas transferidas pelos eletrodos E7018 e com polímero.....	84
Figura 4.19: Gotas retidas em cada uma das malhas após classificação granulométrica. ....	85
Figura 4.20: Análise granulométrica das gotas coletadas (porcentagem retida simples). ....	85
Figura 4.21: Análise granulométrica das gotas coletadas (porcentagem retida acumulada). As linhas tracejadas indicam os valores de $d_{50}$ para os eletrodos. ....	86
Figura 4.22: Imagem das sombras das gotas produzidas pelos eletrodos E7018 e com polímero retidas nas malhas #6, #8 e #10.....	87
Figura 4.23: Etapas de processamento da imagem realizadas no programa Image J®. ....	88
Figura 4.24: Macrografias das gotas produzidas pelos eletrodos que ficaram retidas nas malhas #6, #8 e #10.....	89
Figura 4.25: Temperatura do eletrodo medida à 50mm da extremidade da ponta de pega em função do tempo normalizado.....	90
Figura 4.26: Teor de carbono das gotas retidas nas malhas #6, #8 e #10 (Intervalo de confiança: 95%). ....	91
Figura 4.27: Teor médio de carbono das gotas (Intervalo de confiança; 95%). ....	92

Figura 4.28: Teor de nitrogênio das gotas retidas nas malhas #6, #8 e #10 (Intervalo de confiança: 95%).....	93
Figura 4.29: Teor médio de nitrogênio das gotas (Intervalo de confiança: 95%).....	93
Figura 4.30: Modelo esquemático com os teores de carbono medidos. ....	94
Figura 4.31: Modelo esquemático com os teores de nitrogênio medidos.....	95
Figura 4.32: Difratoogramas de seis amostras de escórias produzidas na soldagem com eletrodo E7018.....	97
Figura 4.33: Difratoogramas de seis amostras de escória produzidas na soldagem com eletrodo aglomerado com o polímero. ....	97
Figura 4.34: Efeito do nitrogênio sobre a formação da ferrita acicular em metais de solda contendo Ti e B. Adaptado de Bhadeshia e Svensson (19). ....	99
Figura 4.35: Fluxograma do modelo proposto para explicar o efeito do polímero sobre o teor de nitrogênio do metal de solda.....	100
Figura 8.1: Arranjo utilizado para ajuste da tensão de alimentação.....	114
Figura 8.2: Arranjo utilizado na calibração do sistema de aquisição de dados. ....	116
Figura 8.3: Gráficos de erro absoluto antes e após a correção em função da temperatura. Transdutor 1 (Termopar tipo K) .....	117
Figura 8.4: Gráficos de erro absoluto antes e após a correção em função da temperatura. Transdutor 2 (Termopar tipo S) .....	117
Figura 8.5: Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 1P).....	118
Figura 8.6: Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 2P).....	119
Figura 8.7: Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 4P).....	120
Figura 8.8: Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 5P).....	121



Figura 8.9: Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 6P).....	122
Figura 8.10: Fluxograma para identificação de constituintes em metais de solda ferríticos. Traduzido a partir do IIW Doc. No. IX-1533-88 (14).....	123
Figura 8.11: Carta do ICDD para o composto Fluoreto de Cálcio.....	124

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação dos modos de transferência metálica proposto pelo IIW. Fonte: Lancaster (3).....	6
Tabela 2.2: Microconstituintes de metais de solda ferríticos conforme proposto pelo IIW(14). .....	14
Tabela 2.3: Minerais classificados de acordo com sua influência sobre a formação da bainita Fonte: Gregg e Bhadeshia (27).....	31
Tabela 2.4: Influência da composição química das inclusões no potencial de nucleação intragranular de ferrita acicular. Fonte: Sarma et al (33).....	32
Tabela 3.1: Parâmetros utilizados no dispositivo de soldagem por arraste.....	39
Tabela 3.2: Fórmula do eletrodo aglomerado com polímero (porcentagem em peso no revestimento) .....	41
Tabela 3.3: Análise química da alma do eletrodo revestido aglomerado com polímero (Intervalo de confiança: 95%).....	42
Tabela 3.4: Composição química do metal de solda sem diluição produzido pelo eletrodo revestido aglomerado com polímero (Intervalo de confiança: 95%).....	42
Tabela 3.5: Técnicas analíticas empregadas na determinação da composição química da alma e metal de solda. ....	43
Tabela 3.6: Dimensões dos eletrodos empregados no estudo das características operacionais (Intervalo de confiança: 95%).....	43
Tabela 3.7: Composição química do metal de base sobre o qual foram depositados os cordões destinados à análise metalográfica (Intervalo de confiança: 95%). ....	44
Tabela 4.1: Diluição ( $\delta$ ) dos cordões depositados sobre chapa (Intervalo de confiança: 95%) .....	62
Tabela 4.2: Composição química do metal de solda (Intervalo de confiança: 95%).....	62

Tabela 4.3: Energia de soldagem (HI) empregada na obtenção dos metais de solda (Intervalo de confiança: 95%).....	63
Tabela 4.4: $\Delta t_{8-5}$ dos metais de solda produzidos (Intervalo de confiança: 95%) .....	65
Tabela 4.5: Teores de carbono, silício e manganês presentes nos metais de solda....	65
Tabela 4.6: Condições de soldagem utilizadas na obtenção dos metais de solda depositados pelo eletrodo com polímero e pelo Eletrodo A com 0,145% de carbono do trabalho de Evans e Bailey (58).....	68
Tabela 4.7: Teores de elementos químicos residuais presentes nos metais de solda produzidos pelo eletrodo aglomerado com polímero (Intervalo de confiança: 95%) e básico convencional do estudo de Evans e Bailey (58). .....	72
Tabela 4.8: Teor de nitrogênio na alma do eletrodo com polímero (Intervalo de confiança; 95%) .....	74
Tabela 4.9: Largura (L), reforço (R), penetração (P) e diluição( $\delta$ ) dos cordões depositados com os eletrodos (Intervalo de confiança: 95%). .....	76
Tabela 4.10: Taxas de fusão ( $T_f$ ), deposição( $T_d$ ), energia de soldagem (HI) e densidade de corrente ( $d_c$ ) médias dos cordões de solda (Intervalo de confiança: 95%). .....	76
Tabela 4.11 : Razão entre as áreas do revestimento e alma do eletrodo (Intervalo de confiança: 95%) .....	77
Tabela 4.12: Densidade média das gotas transferidas pelos eletrodos. ....	88
Tabela 8.1: Coeficientes do polinômio para os termopares Tipo K (66) e Tipo S (67). .....	113
Tabela 8.2: Tensões de entrada e saída nos transdutores. ....	115
Tabela 8.3: Coeficientes das equações que relacionam a tensão de entrada e saída dos transdutores. ....	115
Tabela 8.4: Fatores de correção adicionados aos polinômios. ....	116

## Lista de Equações

$$BI = \frac{(CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + Li_2O + 1/2(MnO + FeO))}{(SiO_2 + 1/2(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2))} \quad \text{Equação 2.1....10}$$

$$\text{Fator delta} = \left( \begin{matrix} \text{Composição} \\ \text{analítica} \end{matrix} \right) - \left( \begin{matrix} \text{Composição} \\ \text{nominal} \end{matrix} \right) \quad \text{Equação 2.2....10}$$

$$HI = \frac{V \times I}{V_s} \quad \text{Equação 3.1...46}$$

$$T_f = \frac{(Pe_{inicial} - Pe_{final})}{t_{soldagem}} \quad \text{Equação 3.2...46}$$

$$T_d = \frac{(Pc_{final} - Pc_{inicial})}{t_{soldagem}} \quad \text{Equação 3.3...46}$$

$$\delta = \frac{A_{mb}}{(A_r + A_{mb})} \times 100 \quad \text{Equação 3.4...47}$$

$$R_\phi = \frac{(D^2 - d^2)}{d^2} \times 100 \quad \text{Equação 4.1...77}$$

$$t_n = \left( \frac{t_i}{t_{250mm}} \right) \times 100 \quad \text{onde} \quad t_{250mm} = \frac{250 \times t}{l_c} \quad \text{Equação 4.2...90}$$

$$T = c_0 + c_1E + c_2E^2 + c_3E^3 + \dots + c_iE^i \quad \text{Equação 8.1..113}$$

### Lista de Símbolos e Abreviaturas

<b>GMAW</b>	Gas Metal Arc Welding	
<b>GTAW</b>	Gas Tungsten Arc Welding	
<b>ICDD</b>	International Centre for Diffraction Data	
<b>IIW</b>	International Institute of Welding	
<b>PTFE</b>	Politetrafluoretileno	
<b>SAW</b>	Submerged Arc Welding	
<b>SMAW</b>	Shield Metal Arc Welding	
<b>C</b>	Carbono	
<b>Si</b>	Silício	
<b>Mn</b>	Manganês	
<b>P</b>	Fósforo	
<b>S</b>	Enxofre	
<b>Cr</b>	Cromo	
<b>Ni</b>	Níquel	
<b>Mo</b>	Molibdênio	
<b>V</b>	Vanádio	
<b>Ti</b>	Titânio	
<b>Al</b>	Alumínio	
<b>B</b>	Boro	
<b>O</b>	Oxigênio	
<b>N</b>	Nitrogênio	
<b>A<sub>e3</sub></b>	Temperatura de transformação austenita-ferrita no equilíbrio	°C
<b>A<sub>mb</sub></b>	Área do metal de base	mm <sup>2</sup>
<b>A<sub>r</sub></b>	Área do reforço	mm <sup>2</sup>
<b>d</b>	Diâmetro da alma do eletrodo	mm
<b>D</b>	Diâmetro do revestimento do eletrodo	mm

<b><math>d_c</math></b>	Densidade de corrente	A/mm <sup>2</sup>
<b><math>d_{50}</math></b>	Tamanho médio das partículas	mm
<b><math>\Delta t_{8/5}</math></b>	Tempo de resfriamento entre 800 e 500°C	s
<b><math>\Delta T/\Delta t_{8-5}</math></b>	Taxa de resfriamento média entre 800 e 500°C	°C/s
<b>I</b>	Corrente	A
<b>HI</b>	Energia de soldagem	kJ/mm
<b>L</b>	Largura do cordão de solda	mm
<b><math>l_c</math></b>	Comprimento consumido do eletrodo	mm
<b>P</b>	Penetração do cordão de solda	mm
<b><math>p_c</math></b>	Peso da chapa	kg
<b><math>p_e</math></b>	Peso do eletrodo	kg
<b>R</b>	Reforço do cordão de solda	mm
<b><math>R_{\emptyset}</math></b>	Razão entre os diâmetros da alma e revestimento	-
<b><math>\delta</math></b>	Diluição	%
<b>t</b>	Tempo de soldagem	s
<b><math>t_i</math></b>	Tempo instantâneo	s
<b><math>t_n</math></b>	Tempo normalizado	%
<b><math>t_{250mm}</math></b>	Tempo necessário para consumir 250mm do eletrodo	s
<b><math>T_d</math></b>	Taxa de deposição	kg/h
<b><math>T_f</math></b>	Taxa de fusão	kg/h
<b><math>T_s</math></b>	Temperatura de início da transformação austenita-ferrita	°C
<b>V</b>	Tensão	V
<b><math>V_s</math></b>	Velocidade de soldagem	cm/min

## **1. Introdução**

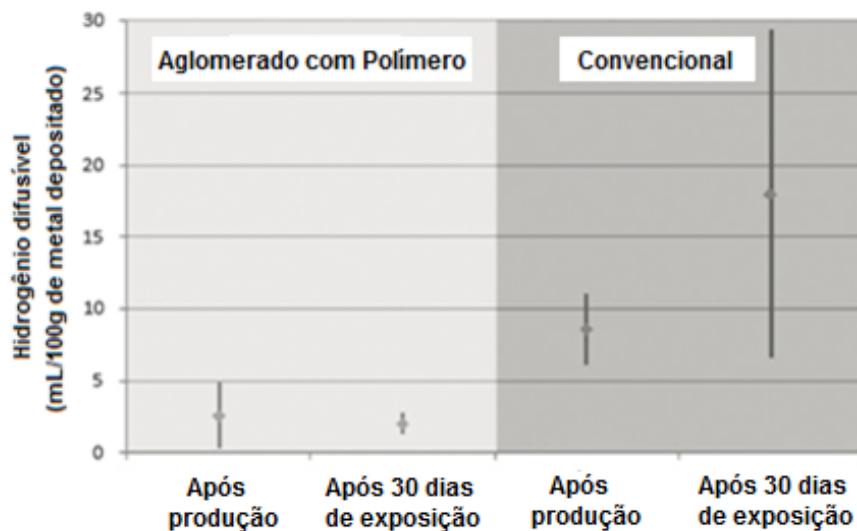
A soldagem com eletrodos revestidos (SMAW) ocupou uma posição de destaque na fabricação de equipamentos e estruturas ao longo de grande parte do século XX. Ainda hoje, onde inúmeros processos de soldagem apresentam melhores índices de produtividade, os eletrodos revestidos básicos possuem amplo emprego em soldagens de grande responsabilidade. Isso se deve às ótimas características do metal de solda depositado por esse tipo de eletrodo. Entretanto, a higroscopicidade de seu revestimento obriga o usuário a cumprir procedimentos de armazenagem e manuseio visando manter em um nível seguro o teor de hidrogênio difusível no metal de solda.

Estudo (1) realizado com eletrodos destinados a soldagem subaquática molhada lançou luz sobre o emprego de novos materiais na formulação do revestimento. Polímeros anteriormente empregados na forma de verniz sobre o revestimento dos eletrodos foram utilizados como aglomerante. Esperava-se, com tal mudança, aumentar resistência do revestimento em contato com a água. Adicionalmente, foi possível obter redução no custo de fabricação dos eletrodos e metais de solda com características satisfatórias à aplicação. Tais resultados incentivaram também o uso de polímeros em eletrodos revestidos destinados a soldagem convencional. O principal ganho nesse campo seria obtenção de eletrodos com formulação básica e revestimento hidrofóbico. Com isso, pode-se vislumbrar a obtenção de metais de solda com baixíssimos teores de hidrogênio difusível sem preocupações quanto a armazenagem e manuseio do consumível antes da soldagem.

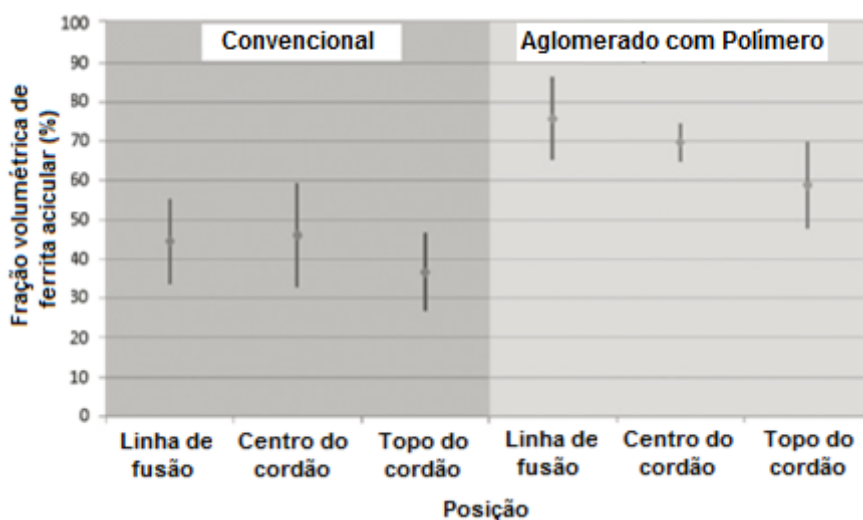
### **1.1. Motivação deste estudo**

Experimentos realizados pelo autor durante o desenvolvimento do eletrodo revestido básico aglomerado com PTFE (politetrafluoretileno) mostraram que o metal de solda depositado apresentou baixíssimos teores de hidrogênio difusível e microestrutura diferenciada em comparação a um eletrodo E7018 (2). A Figura 1.1 apresenta os teores de hidrogênio difusível do metal de solda depositado sob diferentes condições. Medidas de fração volumétrica da ferrita acicular do metal de solda depositado sobre chapa pelos eletrodos testados são apresentadas na Figura

1.2. Nesse gráfico verifica-se maior fração volumétrica do constituinte medido no metal de solda produzido pelo eletrodo com polímero para as condições de teste empregadas. A continuidade dos estudos com o intuito de elucidar as causas de tal fenômeno é a motivação desse trabalho.



**Figura 1.1:** Hidrogênio difusível do metal de solda depositado por eletrodos revestidos E7018 (convencional) e aglomerado com polímero após fabricação e exposição de 30 dias. Fonte: Vaz et al.(2).



**Figura 1.2:** Fração volumétrica de ferrita acicular em diferentes regiões do metal de solda depositado por eletrodos E7018 (convencional) e aglomerado com polímero. Fonte: Vaz et al.(2).



Os mecanismos de formação da ferrita acicular em metais de solda depositados por eletrodos revestidos foram estudados exaustivamente por diversos autores. Entretanto, a influência do polímero utilizado no eletrodo sobre a formação da ferrita acicular no metal de solda, não foi ainda investigada. Assim, há uma lacuna no campo do conhecimento que justifica a realização desse estudo. Os resultados obtidos podem ser empregados no desenvolvimento de novos eletrodos revestidos ou, até mesmo, em uma nova geração de outros consumíveis para soldagem como arames tubulares e fluxos aglomerados.

## 1.2. Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo geral explicar a influência do polímero utilizado como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação da ferrita acicular no metal de solda. Em uma primeira etapa foi realizado o levantamento das variáveis apontadas como sendo responsáveis pela formação de tal constituinte. Posteriormente, foram produzidos metais de solda sob condições monitoradas utilizando eletrodos com polímero. Por se tratar de um consumível sem similar no mercado, os resultados obtidos foram comparados com os previstos na literatura para eletrodos com a mesma base de fórmula, possibilitando a avaliação das divergências e identificação das variáveis responsáveis. A partir daí foi conduzida uma série de experimentos para avaliação de características operacionais e elaborado um modelo explicando o papel desempenhado pelo polímero sobre estas.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Produzir cordões de solda utilizando eletrodos revestidos aglomerados com polímero;
- Monitorar as variáveis apontadas como responsáveis pela formação de ferrita acicular durante a deposição desses cordões;
- Comparar a microestrutura obtida com a prevista na literatura para metais de solda produzidos por eletrodos revestidos básicos com composição química semelhante;

- Identificar as variáveis responsáveis pelas diferenças entre as microestruturas encontrada e prevista;
- Conduzir experimentos que permitam identificar o efeito do polímero sobre os fenômenos que ocorrem durante a soldagem com os eletrodos revestidos;
- Elaborar um modelo que explique como a alteração das características operacionais pelo polímero resulta em um metal de solda com microestrutura diferenciada.

## **2. Revisão bibliográfica**

### **2.1. Soldagem com eletrodos revestidos**

Os princípios que governam a soldagem com eletrodos revestidos têm sido intensivamente estudados desde seu surgimento, no início do século XX. Isso não significa, contudo, que todos os mecanismos presentes estejam esclarecidos. A dinâmica do processo e o grande número de variáveis envolvidas são fatores que dificultam a realização de pesquisas sobre o tema.

Estrutura e propriedades do metal de solda obtido dependem de sua composição química e do ciclo térmico de soldagem. Para entender a composição química é crucial conhecer como ocorre a transferência metálica e as reações metal gás e metal escória observadas durante a soldagem nesse processo.

#### **2.1.1. Modos de transferência metálica**

O IIW padroniza a classificação dos diferentes modos de transferência metálica observados nos processos de soldagem ao arco elétrico. A Tabela 2.1, extraída de Lancaster (3), apresenta essa classificação e exemplos de processos de soldagem onde são observados.

No estudo da transferência metálica durante a soldagem ao arco elétrico podem ser empregadas técnicas de visualização diretas e indiretas. Fotografia, cinematografia de alta velocidade, filmagem em alta velocidade, deposição em chapas de metal, deposição com dois eletrodos e contra eletrodos de carbono são exemplos de técnicas diretas. As indiretas se baseiam na variação da tensão e corrente durante a soldagem que podem ser gravadas para compor oscilogramas (4). Qualquer uma dessas técnicas apresenta tanto vantagens como limitações. Quando se deseja realizar um estudo detalhado sobre a transferência metálica geralmente é utilizada mais de uma técnica simultaneamente.

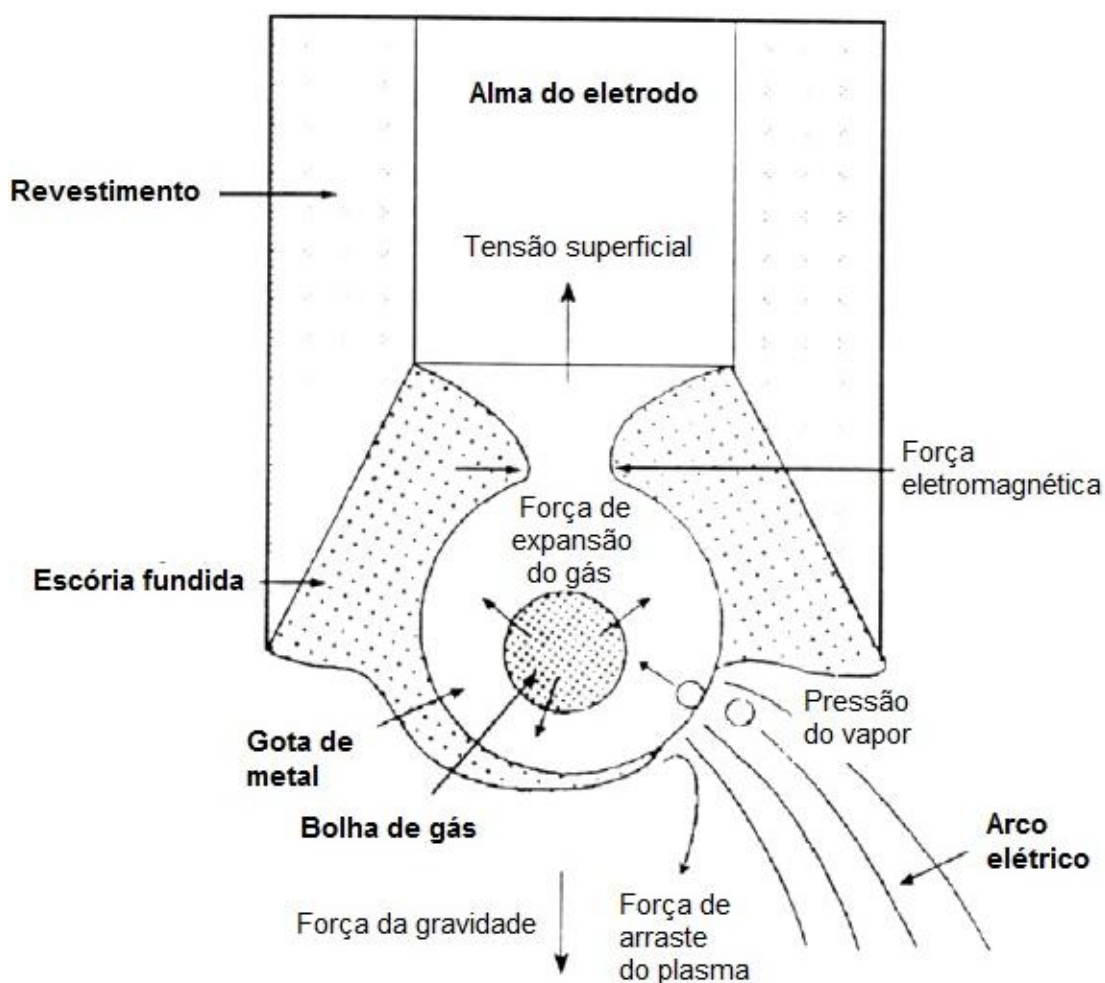
**Tabela 2.1:** Classificação dos modos de transferência metálica proposto pelo IIW.

Fonte: Lancaster (3).

<b>Modo de transferência</b>	<b>Processos de soldagem (exemplos)</b>
<b>Transferência por vôo livre</b>	
Globular	
Gota	GMAW em baixas correntes
Repelida	GMAW utilizando CO <sub>2</sub>
Spray	
Projetada	GMAW com valores intermediários de corrente
Fluxo	GMAW com valores médios de corrente
Rotacional	GMAW com valores altos de corrente
Explosiva	SMAW
<b>Transferência em ponte</b>	
Curto circuito	GMAW com curto circuito , SMAW
Sem interrupção	GTAW com alimentação contínua
<b>Transferência protegida por escória</b>	
Guiada por parede de fluxo	SAW
Outros modos	SMAW, FCAW, ESW

A intensidade, direção e sentido das inúmeras forças que atuam em conjunto durante a soldagem definem as características da transferência. A Figura 2.1 ilustra a ponta fundida do eletrodo revestido e as principais forças que atuam sobre o mesmo durante a soldagem (força gravitacional, tensão superficial, força eletromagnética, jato de plasma, pressão de vapor e força de expansão do gás).

Brandi et al (4), ao analisarem a transferência metálica na soldagem com eletrodos revestidos, relatam a presença dos modos de transferência explosivo, por curto circuito e guiada por parede de fluxo. Nesses modos as forças predominantes são tensão superficial, pressão de vapor e força de expansão do gás. Eletrodos revestidos do tipo básico apresentam, segundo esses autores, transferência do tipo curto circuito explosiva.



**Figura 2.1:** Ilustração da ponta fundida do eletrodo mostrando as diferentes forças que atuam na transferência da gota metálica. Fonte: Brandi et al (4).

Chen et al (5) apontam a existência de relação direta entre a tensão superficial e o tamanho da gota transferida à medida que são alteradas as quantidades de fluorita e feldspato no revestimento de eletrodos. Os autores citados verificaram também que um maior volume de gases gerados pela decomposição do revestimento proporciona aumento na força do arco. Em uma das conclusões indicam que o destacamento da gota na ponta eletrodo ocorre quando forças combinadas, com destaque para a força do arco, superam a tensão superficial.

## 2.1.2. Reações químicas durante a soldagem

Na Figura 2.2 é apresentado o gráfico conhecido como diagrama de Ellingham (6).

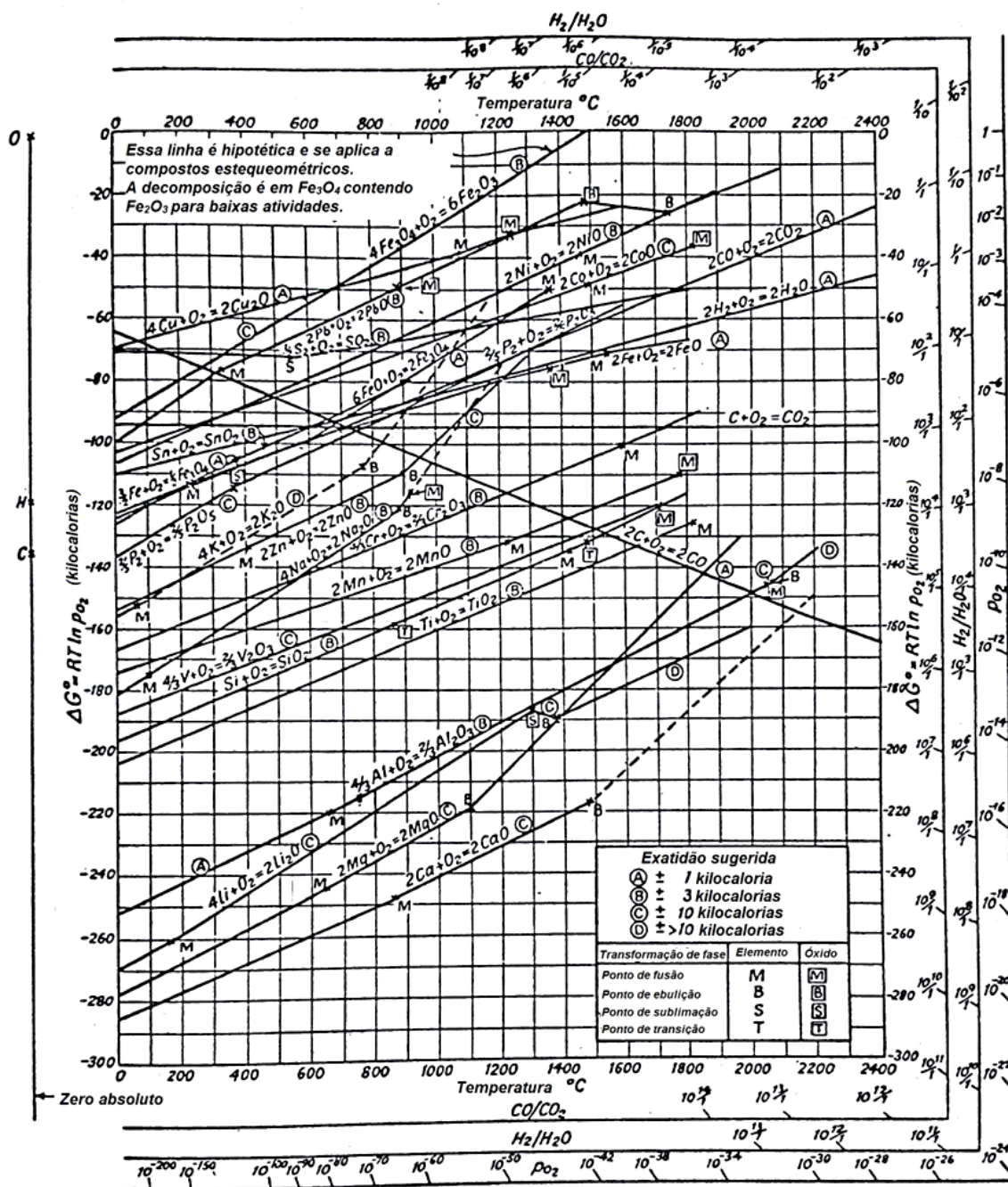


Figura 2.2: Diagrama de energia livre para formação de óxidos. Fonte: Gaskell (6).

Esse gráfico relaciona o potencial de oxigênio com a temperatura para diversos sistemas. Como os reagentes e produtos (metais/óxidos) estão no estado padrão, o potencial de oxigênio se confunde com a energia livre padrão de formação dos óxidos. Essa ferramenta termodinâmica é amplamente utilizada na metalurgia para auxiliar na definição da sequência de oxidação dos elementos químicos ou na identificação das condições onde o metal ou o óxido são a fase estável.

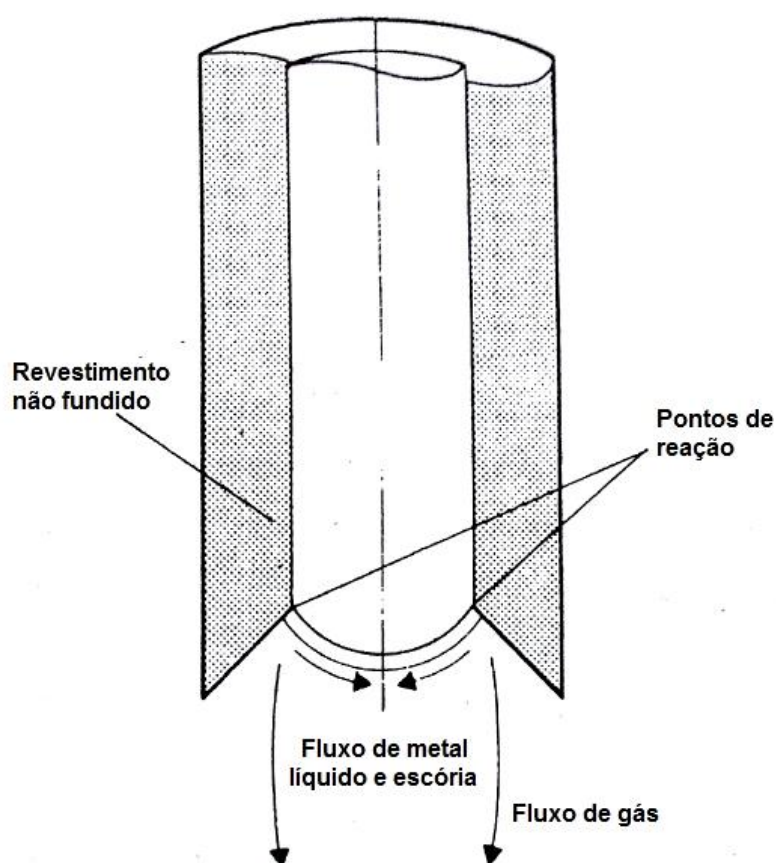
Grong and Matlock (7) relatam que as reações químicas na soldagem ao arco elétrico ocorrem de maneira singular. Segundo esses autores, em contraste a metalurgia da panela onde as reações de desoxidação ocorrem praticamente em condições isotérmicas, as interações químicas na soldagem ao arco elétrico acontecem rapidamente, em pequenos volumes e sob a influência de elevados gradientes térmicos.

De maneira genérica, pode-se dizer que as reações químicas envolvendo o metal líquido em processos de soldagem por fusão ao arco elétrico com transferência metálica ocorrem durante a formação da gota, durante sua transferência e na poça de fusão. Essas reações incluem: dissolução de gás que provocam reações gás metal ou reações com elementos dissolvidos no metal líquido, evolução de gás e reações com a escória ou fluxo (3).

Lancaster (3) propõe um modelo físico para explicar, de modo específico, onde ocorrem as reações na soldagem com eletrodos revestidos. Segundo esse modelo, que se encontra ilustrado na Figura 2.3, a interação se inicia na junção entre o cone do revestimento não fundido e a gota formada. Se elementos de liga são adicionados ao revestimento, eles se dissolvem nessa região e são homogeneizados na gota em formação que se encontra em constante agitação. Nessa situação, o metal líquido é submetido a elevadas temperaturas e há grande probabilidade de ocorrência das reações químicas mais importantes.

O emprego de modelos empíricos tem sido uma das formas encontradas para superar as dificuldades de compreensão dos fenômenos presentes na soldagem ao arco elétrico. Natalie et al (8), revisando o comportamento físico e químico de fluxos para soldagem, relatam que a falta de conhecimento das propriedades termodinâmicas de escórias promoveu o desenvolvimento do conceito de basicidade da escória. O índice de basicidade (BI) proposto por Tuliani (Equação 2.1) e adotado atualmente pelo IIW é um dos mais conhecidos e difundidos. Apesar de ser

desenvolvido para escórias geradas na soldagem ao arco submerso, também pode ser utilizado na soldagem com eletrodos revestidos. Para avaliar a extensão da perda ou transferência de cada um dos elementos químicos é utilizado o fator delta ( $\Delta$  quantity) expresso na Equação 2.2. A composição analítica é determinada pela análise química e a nominal pelas contribuições do metal de base e consumível (8).



**Figura 2.3:** Reações metal gás na soldagem com eletrodos revestidos. Fonte: Lancaster (3).

**Equação 2.1** 
$$BI = \frac{(CaO + CaF_2 + MgO + K_2O + Na_2O + Li_2O + \frac{1}{2}(MnO + FeO))}{(SiO_2 + \frac{1}{2}(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2))}$$

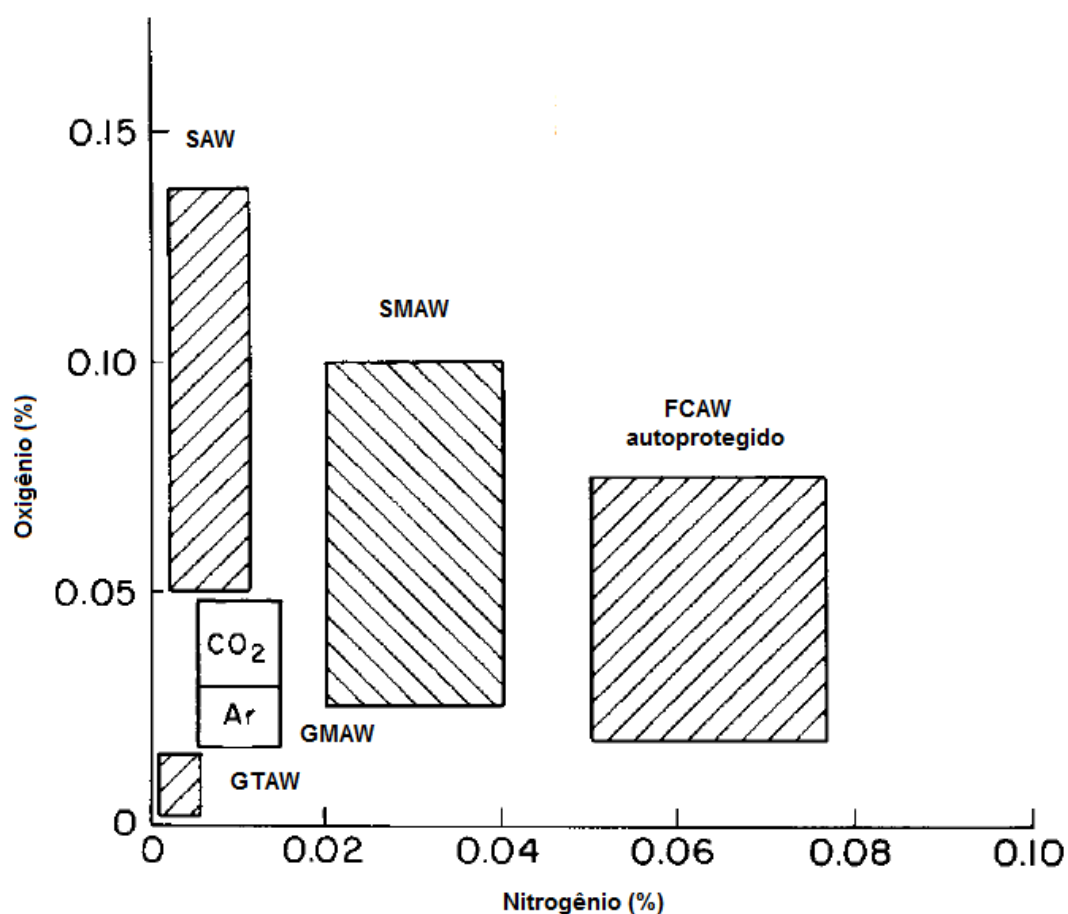
**Equação 2.2** 
$$\text{Fator delta} = \left( \begin{matrix} \text{Composicao} \\ \text{analítica} \end{matrix} \right) - \left( \begin{matrix} \text{Composicao} \\ \text{nominal} \end{matrix} \right)$$



Chai e Eagar (9) elaboram e validam um modelo capaz de prever a composição do metal de solda em processos de soldagem protegidos por fluxo. Nesse estudo, os autores assumem o equilíbrio termodinâmico e indicam que a recuperação de silício e manganês está associada a atividade desses elementos no metal de solda e na escória. O índice de basicidade (BI) é uma das variáveis utilizadas na previsão da composição. Bang et al (10), em um trabalho recente, utilizam o fator delta como índice para avaliação da transferência de carbono, silício e manganês em inúmeras combinações de fluxos e arames tubulares com fluxo metálico.

As reações metal gás envolvem dissolução de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio presentes na atmosfera que envolve o arco elétrico. Tal como os estudos sobre as interações entre o metal escória, o equilíbrio termodinâmico é o ponto de partida para compreensão destas reações. Assim, quantidades de nitrogênio e oxigênio absorvidas mantêm relação com a pressão parcial desses gases na atmosfera que envolve o arco (3).

A Figura 2.4 apresenta os valores esperados de oxigênio e nitrogênio nos metais de solda produzidos pelos principais processos de soldagem ao arco elétrico (11). Na soldagem manual com eletrodos revestidos não há emprego de proteção gasosa externa. Assim, a exclusão da atmosfera é realizada pela proteção através da escória e pelos gases gerados na decomposição do revestimento. Nesse processo, a contaminação não pode ser evitada, mas minimizada utilizando revestimentos com carbonatos e celulose que são capazes de gerar grandes quantidades de dióxido de carbono e hidrogênio na decomposição (12). Tal comportamento reflete os teores típicos de nitrogênio do metal de solda obtido por esse processo. Comparando tais valores com os esperados em metais de solda depositados por outros processos como, por exemplo, a soldagem ao arco submerso, é evidente a importância das características básicas dos processos. Nesse último, onde o arco se desenvolve em uma cavidade envolvida por escória líquida (3), o teor de nitrogênio esperado no metal de solda é significativamente inferior.



**Figura 2.4:** Teores de oxigênio e nitrogênio esperados em diferentes processos de soldagem. Fonte: Rein (11).

## 2.2. Utilização de polímeros em eletrodos revestidos

O emprego de novos materiais na formulação de eletrodos revestidos não é raro. Entretanto, a maior parte dos esforços são realizados com o objetivo de substituir matérias primas escassas ou de elevado custo. Sorokin (12) realiza uma revisão de trabalhos onde resinas orgânicas foram empregadas no revestimento de eletrodos. Nesse trabalho é discutido o efeito do emprego de resina fenol formaldeído e furânica sobre algumas propriedades do metal de solda produzido. O autor aponta a possibilidade de desenvolvimento de eletrodos empregando esse tipo de matéria prima.

Fichel et al (1) avaliam o desempenho de eletrodos revestidos aglomerados com polímero na soldagem subaquática molhada. Nesse estudo foi verificada a viabilidade técnica dos consumíveis produzidos. Vaz et al (2), em continuidade a esse trabalho, avaliam o desempenho de eletrodos com revestimento básico aglomerados com polímeros e atestam a produção de metais de solda com consideráveis frações de ferrita acicular e baixos teores de hidrogênio difusível,

### **2.3. A ferrita acicular**

Metais de solda são estruturas brutas de solidificação obtidas segundo condições singulares. Assim, é razoável imaginar que os constituintes presentes em sua microestrutura possuam morfologia característica. Com o objetivo de disciplinar as denominações empregadas o IIW propôs, em 1980, um guia para classificação dos constituintes em metais de solda ferríticos utilizando microscopia ótica (IIW Doc. IX-29-80). Esse guia foi revisado em 1985 após uma série de exercícios colaborativos e, em 1988, com o objetivo de inserir classificação para a macroestrutura do metal de solda (14). Na Tabela 2.2 estão listados os principais constituintes microestruturais indicados nesse documento.

Entre todos os constituintes listados destaque especial tem sido dispensado a ferrita acicular. Tal fato é atribuído à melhoria das propriedades mecânicas do metal de solda, em especial da tenacidade, devido à presença desse constituinte. Ao discutir os resultados de uma extensa revisão sobre os fatores que influenciam a microestrutura, resistência e tenacidade do metal de solda, Abson e Pargeter (15) apontam o tamanho de grão como sendo o fator mais importante na resistência à fratura por clivagem. Assim, uma microestrutura formada por consideráveis frações volumétricas de ferrita acicular apresenta condições desejáveis para metais de solda. Bhadeshia (16) aponta a constante mudança de direção da trinca durante sua propagação como o fator responsável pela melhoria da tenacidade em uma microestrutura constituída por ferrita acicular. Isso ocorre devido à diferente orientação cristalina das placas desse constituinte.

**Tabela 2.2:** Microconstituintes de metais de solda ferríticos conforme proposto pelo IIW(14).

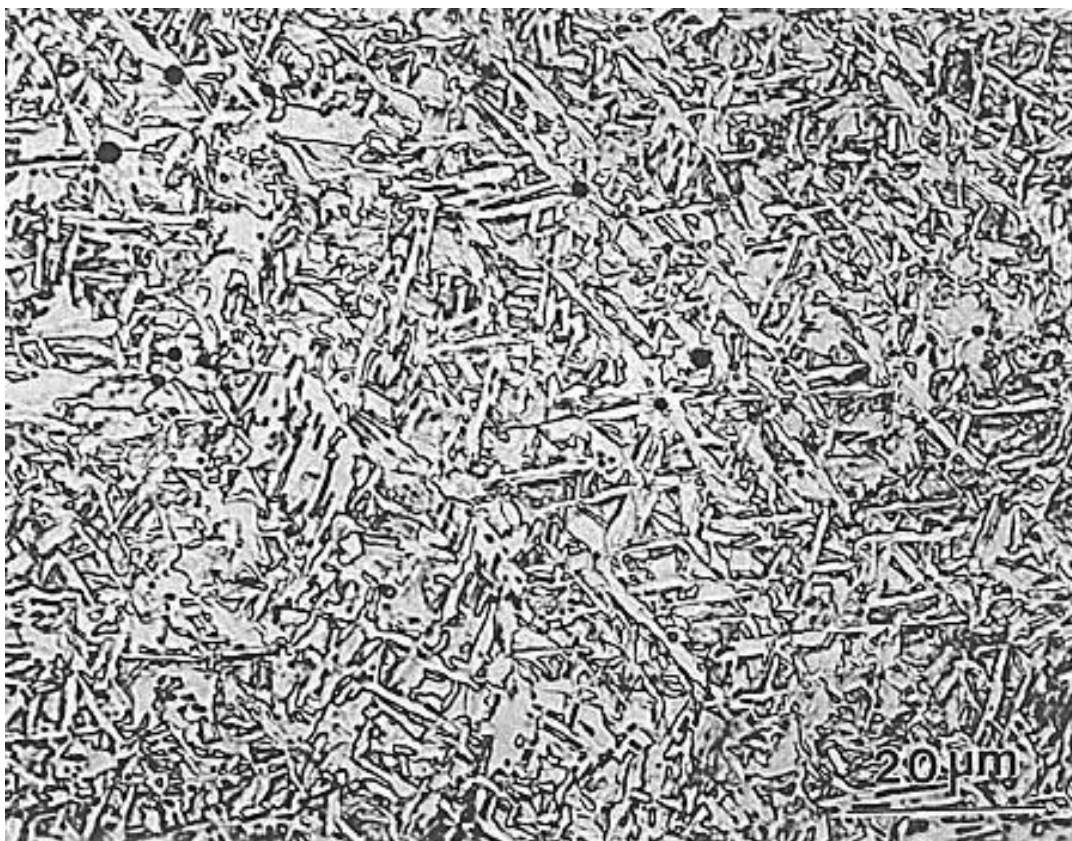
<b>Ferrita primária (Primary ferrite) – PF</b>
Ferrita de contorno de grão (Grain boundary ferrite) PF(G)
Ferrita poligonal intragranular (Intragranular polygonal ferrite) PF(I)
<b>Ferrita acicular (Acicular Ferrite) – AF</b>
<b>Ferrita com fase secundária (Ferrite with second phase) – FS</b>
Ferrita com fase secundária alinhada (Ferrite with aligned second phase) FS(A)
Ferrita com fase secundária não alinhada (Ferrite with non aligned second phase) FS(NA)
<b>Agregado de ferrita – carboneto (Ferrite Carbide Aggregate) – FC</b>
<b>Martensita (Martensite) – M</b>

### 2.3.1. Características gerais e morfologia

Segundo Bhadeshia, a descrição adequada para a ferrita acicular é “caótica”. Quando observado ao microscópio esse constituinte apresenta forma de agulhas distribuídas aleatoriamente (Figura 2.5). Contudo, sua verdadeira forma é de placas lenticulares (16). Medidas em planos aleatórios indicam que as placas de ferrita acicular apresentam largura e comprimento médios em torno de 1 $\mu$ m e 10 $\mu$ m respectivamente (16).

A formação da ferrita acicular apresenta particularidades: a nucleação ocorre de maneira heterogênea a partir de inclusões não metálicas e de maneira autocalítica a partir da interface  $\alpha$ - $\gamma$  (17); a transformação apresenta mecanismos similares aos observados na transformação bainítica (18). Essas particularidades levam Strangwood e Bhadeshia (18) a definir a ferrita acicular como “bainita” nucleada intragranularmente.

Metais de solda ferríticos reúnem as condições necessárias à formação desse constituinte, ou seja, apresentam alta densidade de inclusões (em torno de  $10^{18}$  inclusões com tamanho superior a  $0,5\mu\text{m}$  por  $\text{m}^3$ ) (19) e estão sujeitos a ciclos térmicos com taxas de resfriamento típicas das transformações bainíticas (16).



**Figura 2.5:** Ferrita acicular em um metal de solda ferrítico. Ataque: Nital 5%. Microscópio eletrônico de varredura. Fonte: Babu et al. (20).

### 2.3.2. Formação da ferrita acicular

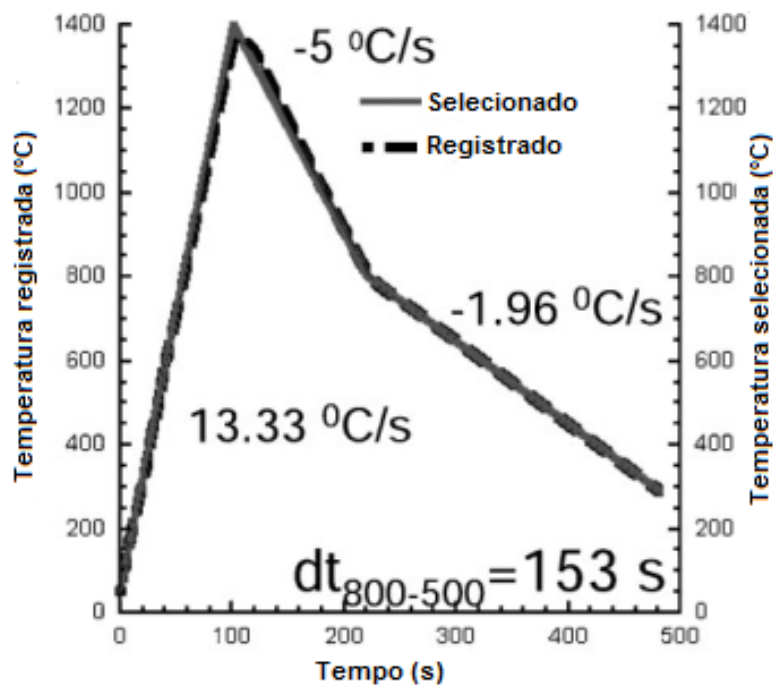
Pode-se dizer que um sistema está em equilíbrio termodinâmico quando mudanças não são mais percebidas, mesmo após longos períodos de tempo. Essa condição é atingida quando se tem menor estado de energia livre. Todavia, afirmar que um sistema se encontra nessa condição é praticamente impossível. Assim, é mais

apropriado se referir ao equilíbrio metaestável onde é observada uma condição de menor energia local sem desprezar a existência de estados de menor energia.

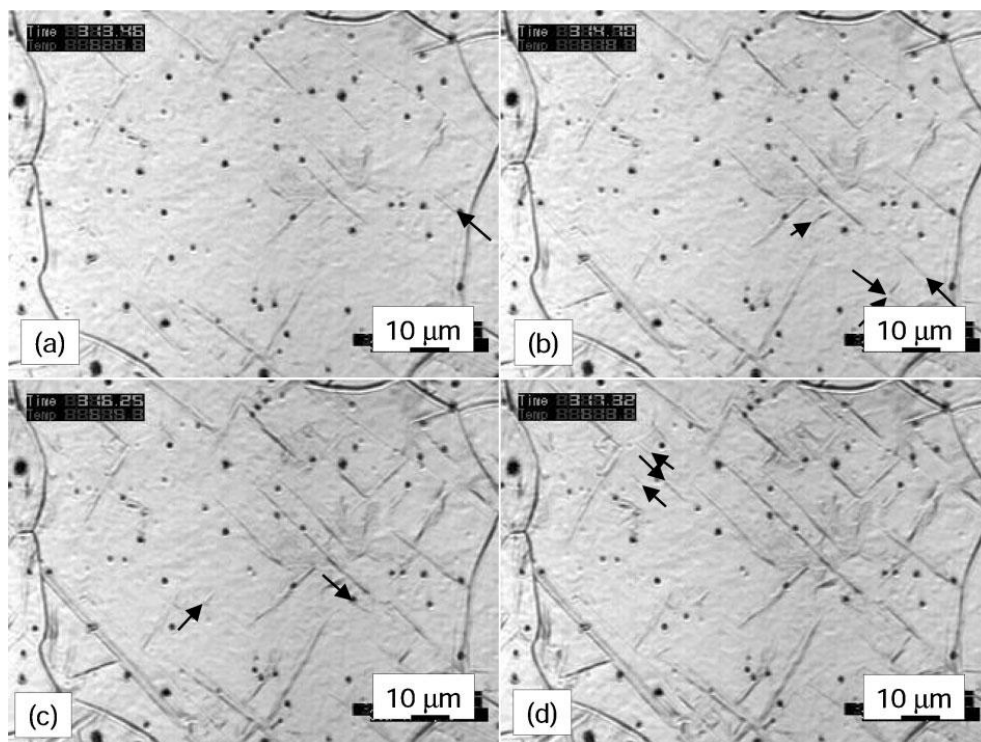
As transformações de fase no estado sólido, inclusive nos aços, ocorrem para atender aos requisitos termodinâmicos resultando em sistemas com menor energia livre. Em soluções sólidas, a energia livre é função das concentrações dos componentes nas fases e a transformação tende a envolver difusão de átomos. Assim, há situações onde não há condições para que a mesma ocorra, pois o fator cinético também deve ser considerado.

Em 1930, Davenport e Bain (21), estudando a transformação isotérmica da austenita em temperaturas acima da necessária à formação da martensita, descobriram um novo constituinte diferente da perlita e martensita observados no mesmo aço. Esse constituinte, inicialmente denominado “martensita troostita”, passou posteriormente a ser chamado de bainita. A transformação bainítica é caracterizada pela ocorrência de partição de carbono e ausência de partição de elementos de liga substitucionais. Sua transformação apresenta características do mecanismo de transformação por cisalhamento ou displaciva típico da martensita. Entretanto, ainda há controvérsias quanto a esses mecanismos (16).

A transformação para ferrita acicular apresenta os mesmos mecanismos da transformação bainítica (22). Entretanto, sua nucleação apresenta características que a tornam diferente da nucleação bainítica. Ricks et al (23) observam, através de Microscopia Eletrônica de Transmissão (*Transmission Electron Microscopy*), que essa ocorre de maneira heterogênea a partir de inclusões não metálicas. Terasaki e Komizo (17) realizam experimentos para observação “in situ” do desenvolvimento da ferrita acicular em metais de solda. Um sistema constituído por Microscópio Confocal de Varredura Laser (*Laser Scan Confocal Microscope*) e Forno de Imagem Infravermelha (*Infrared Image Furnace*) com atmosfera inerte foi empregado. As amostras foram submetidas ao ciclo térmico representado na Figura 2.6 e o desenvolvimento da ferrita acicular foi registrado (Figura 2.7).



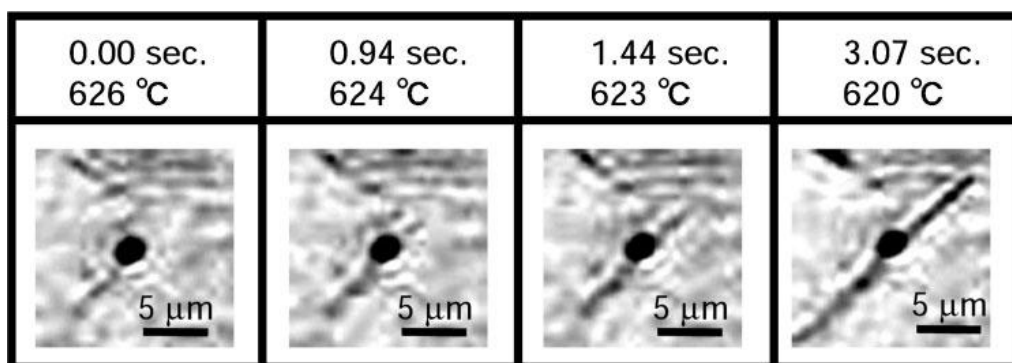
**Figura 2.6:** Diagrama Tempo x Temperatura representando o ciclo térmico selecionado e registrado no forno infravermelho. Fonte: Terasaki e Komizo (17).



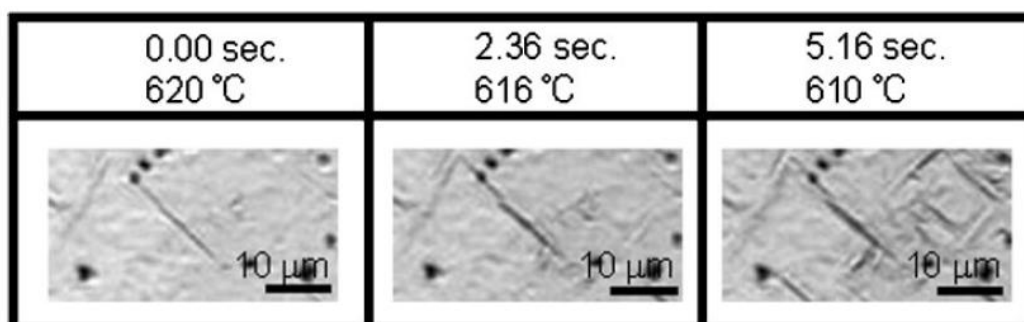
**Figura 2.7:** Desenvolvimento morfológico "in situ" da ferrita acicular. Registros realizados a 621°C(a), 618°C(b), 615°C(c) e 613°C(d).

Fonte: Terasaki e Komizo (17).

Na Figura 2.8 é mostrada, em detalhe, a nucleação da ferrita acicular a partir de inclusões. Já na Figura 2.9, onde as temperaturas são inferiores, é observada a nucleação autocatalítica, ou seja, a partir da interface  $\alpha$ - $\gamma$  (ferrita acicular – austenita).



**Figura 2.8:** Nucleação da ferrita acicular a partir de inclusões. Fonte: Terasaki e Komizo (17).

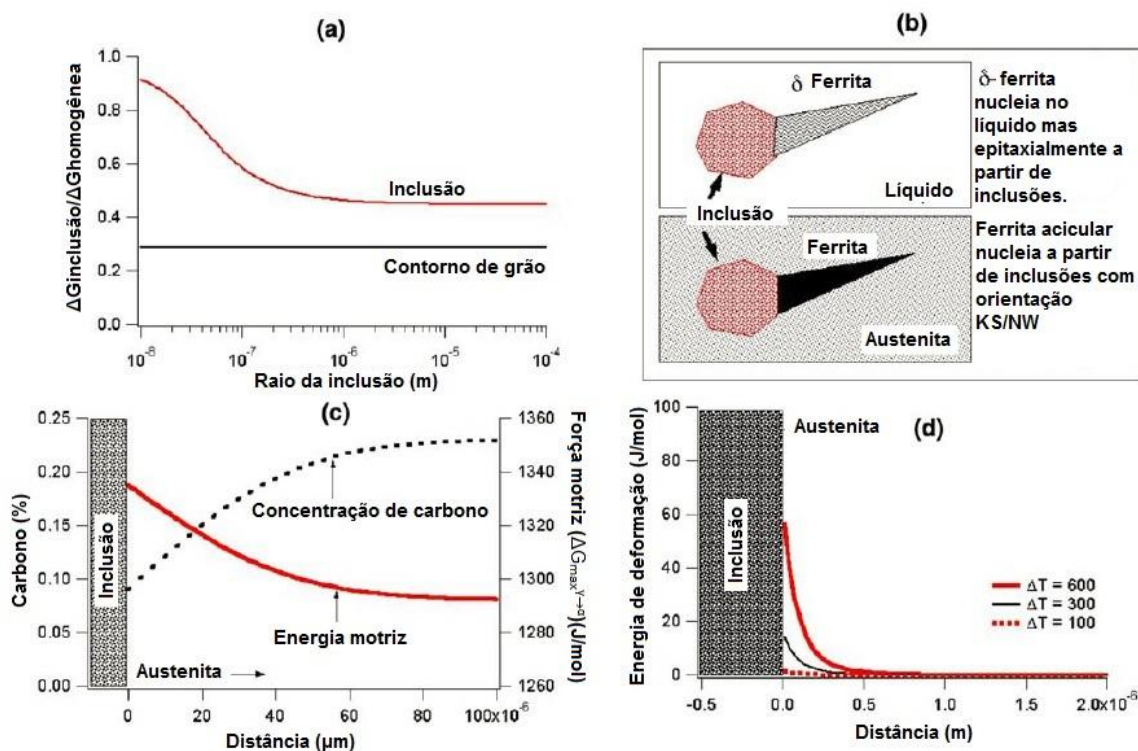


**Figura 2.9:** Nucleação da ferrita acicular a partir da interface  $\alpha$ - $\gamma$  (ferrita acicular – austenita). Fonte: Terasaki e Komizo (17).

Wan et al (24), através de imagem 3D reconstruídas, observam a nucleação da ferrita acicular a partir de inclusões e a partir da interface  $\alpha$ - $\gamma$  (ferrita acicular – austenita) de uma placa de ferrita acicular previamente formada.

Babu (25) revisa os estudos realizados sobre a nucleação e crescimento da ferrita acicular. Ele aponta que, para compreender os mecanismos responsáveis pela formação desse constituinte, é necessário saber por que sua nucleação ocorre a partir de inclusões. Na Figura 2.10 são ilustrados de modo esquemático os mecanismos propostos na literatura para explicar este fenômeno.





**Figura 2.10:** Ilustrações dos diferentes mecanismos de nucleação da ferrita acicular.

Fonte: Babu (25).

No primeiro mecanismo, proposto por Ricks et al (23) e ilustrado no item (a) da Figura 2.10, as inclusões agem como superfícies inertes levando a redução na energia de ativação necessária para nucleação a partir destas. Cálculos mostram que a razão entre a energia de ativação para nucleação na inclusão e homogênea reduz com o aumento do diâmetro da inclusão. O segundo mecanismo (item b) propõe que a existência de correspondência entre os reticulados cristalino da inclusão e da ferrita reduz a energia de ativação para nucleação (26). No terceiro mecanismo (item c) há redução nos teores de elementos de liga (C, Mn e Si) em torno das inclusões. Essa redução provoca o aumento da força motriz para nucleação a partir da austenita na superfície das inclusões (27). O quarto mecanismo (item d) sugere que a diferença nos coeficientes de expansão térmica das inclusões e da austenita promove o desenvolvimento de deformação térmica próxima à interface de ambas. Como consequência, há redução da energia de ativação para formação do núcleo de ferrita (28).

O crescimento das placas de ferrita acicular ocorre pela nucleação de subunidades através de transformação displaciva sem partição de carbono (16). Após

a formação da subunidade, o carbono difunde para a austenita. O contínuo crescimento da ferrita acicular promove aumento da concentração do carbono na austenita até que seja atingido um valor crítico a partir do qual a transformação displaciva da ferrita acicular se torna impossível. Esse fenômeno é denominado reação incompleta (18).

## **2.4. Variáveis que influenciam a formação da ferrita acicular**

Inúmeros autores investigam a influencia de propriedades do metal de solda sobre a formação da ferrita acicular. Apesar desses estudos terem sido feitos em diferentes processos, nota-se o emprego mais frequente da soldagem manual com eletrodos revestidos (SMAW) e ao arco submerso (SAW). Tal fato pode ser atribuído à facilidade de se alterar as variáveis de interesse nesses processos. Nesse contexto, há estudos correlacionando a taxa de resfriamento, composição química, densidade e composição das inclusões não metálicas, tamanho de grão austenítico, presença de ferrita alotromórfica e deformação plástica do metal de solda, com a formação de ferrita acicular.

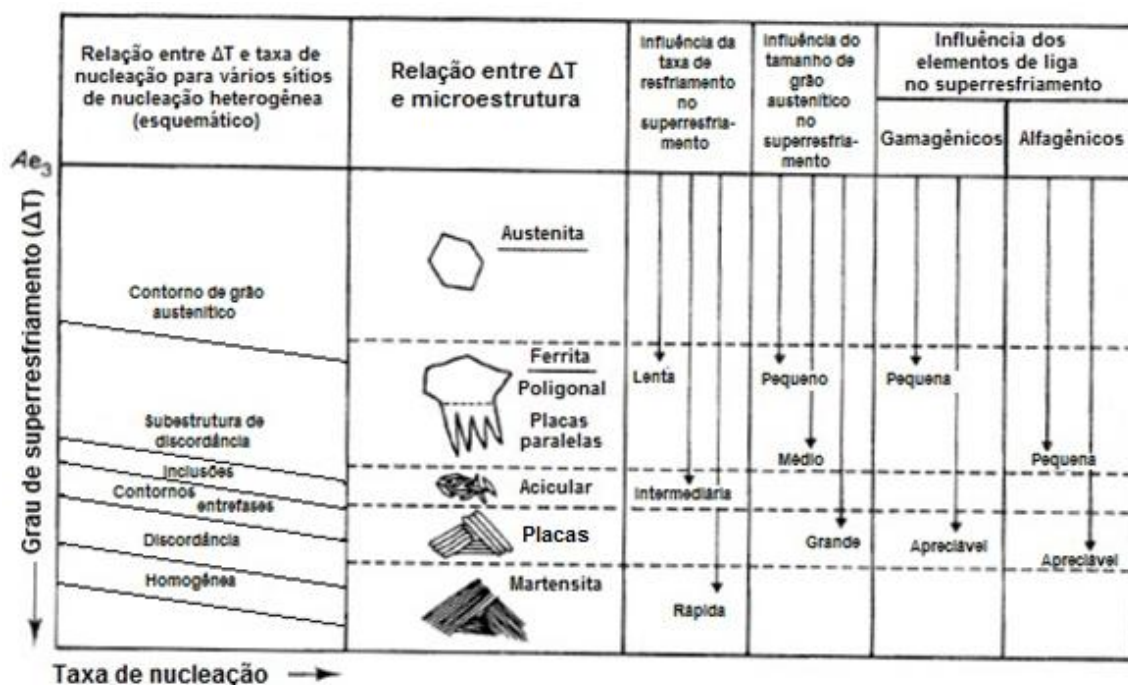
Todavia, observa-se escassa literatura correlacionando o efeito das matérias primas utilizadas nos consumíveis de soldagem com a formação de microconstituintes. Há justificativas tanto técnicas quanto comerciais para esse fato. Do ponto de vista técnico, pode-se citar a dificuldade em estabelecer relações de causa e efeito em processos complexos como a soldagem ao arco elétrico com eletrodo consumível. Do ponto de vista comercial, os fabricantes de consumíveis não tem interesse em divulgar informações tecnológicas sobre seus produtos.

### **2.4.1. Influência da taxa de resfriamento no metal de solda**

O primeiro critério necessário à formação da ferrita acicular em metais de solda é ocorrência de um ciclo térmico que ofereça condições favoráveis à sua formação. Como a transformação para esse constituinte ocorre segundo os mesmos mecanismos da transformação bainítica, para que esta ocorra, é necessário certo grau de superesfriamento ( $\Delta T$ ). Segundo Farrar e Harrison (29), a maior influência da taxa de resfriamento sobre a formação da ferrita acicular está associada ao grau de

superresfriamento anterior a transformação que, diretamente, afeta a força motriz termodinâmica da reação.

Não se pode negar que o grau de superresfriamento sofre influência de outros fatores. Farrar e Harrison (29) propõe (conforme ilustrado na Figura 2.11) um modelo esquemático demonstrando essas relações. Nesta figura é mostrada a influência da taxa de resfriamento, tamanho de grão austenítico e composição no grau de superresfriamento ( $\Delta T$ ) entre  $Ae_3$  e  $T_s$ . São mostradas também as relações entre superresfriamento, taxa de nucleação e microestrutura para vários sítios de nucleação.



**Figura 2.11:** Modelo esquemático mostrando a influência da taxa de resfriamento, tamanho de grão austenítico e elementos de liga no superresfriamento e relações propostas entre o superresfriamento, taxa de nucleação e microestruturas desenvolvidas durante o resfriamento contínuo. Fonte: Farrar e Harrison (29).

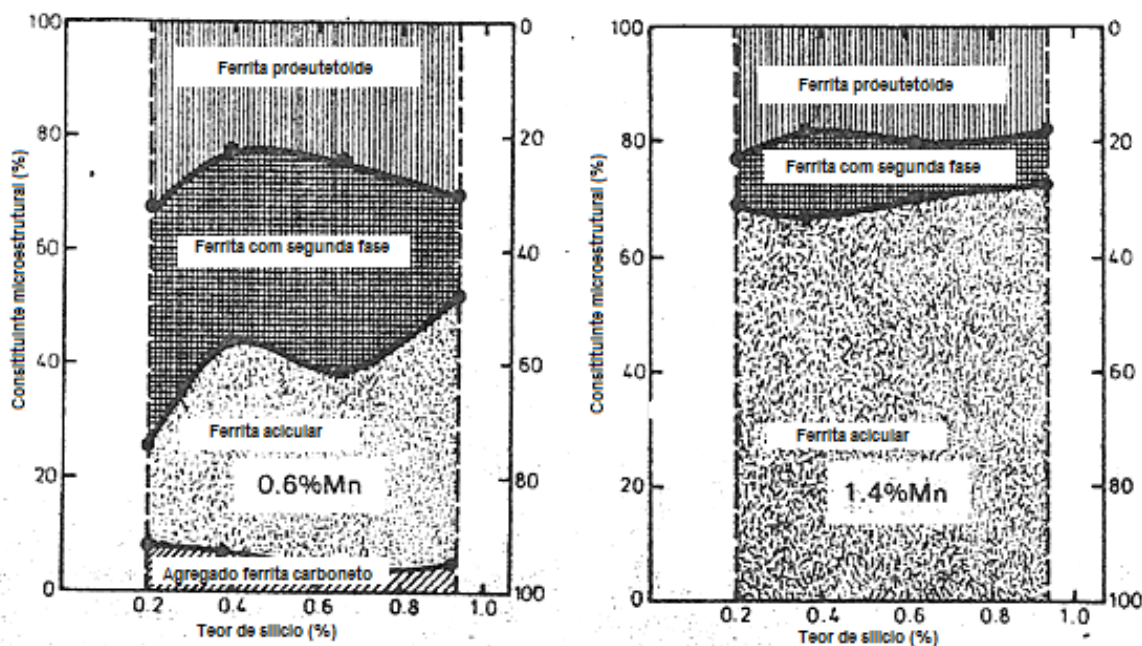
### 2.4.2. Influência da composição química

Harrison e Farrar (30) apontam o carbono como sendo o elemento químico mais importante no controle da microestrutura em aços. Experimentos realizados por Evans (35) variando o teor de carbono de 0,045 a 0,145% mostram que o aumento no teor desse elemento proporciona redução na fração volumétrica de ferrita de contorno de grão e ferrita poligonal. Essa redução é compensada pelo aumento na fração de ferrita acicular. Do ponto de vista macroscópico, o aumento no teor de carbono resulta em redução na largura dos grãos austeníticos. Tal fato é atribuído a uma mudança na subestrutura de solidificação.

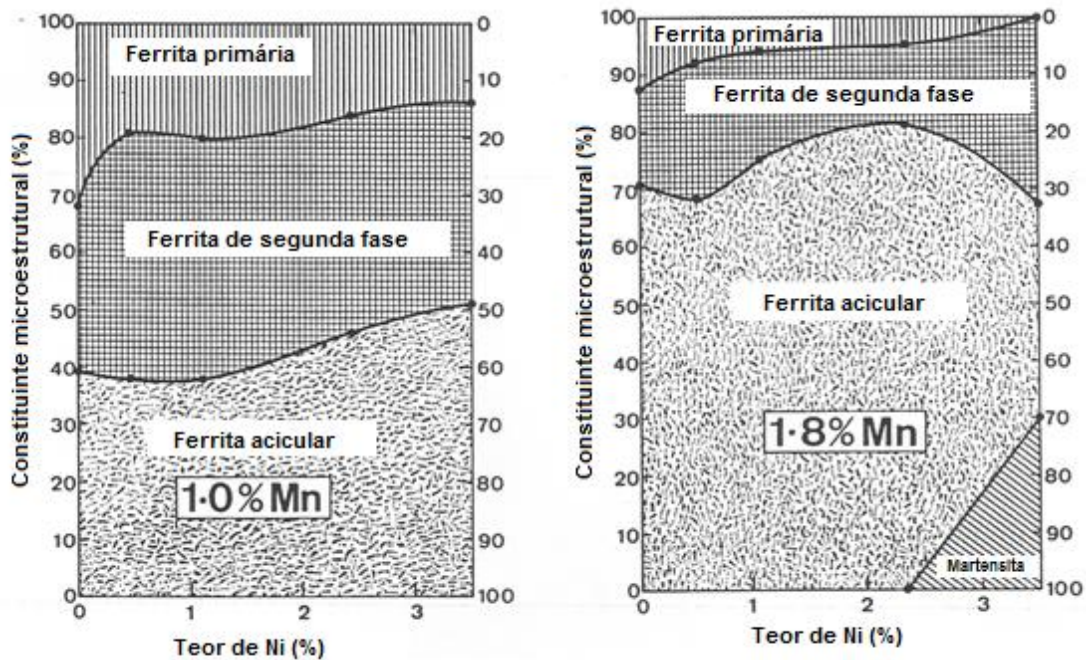
Em outro estudo Evans (36) aponta que aumento progressivo do teor de manganês no metal de solda de 0,6 para 1,8% também proporciona aumento na fração volumétrica de ferrita acicular, redução nas frações de ferrita proeutetóide e outros componentes intermediários. Observa-se também, com o aumento no teor de manganês, refinamento da ferrita acicular no metal de solda como depositado. Esse fenômeno é justificado por Harrison e Farrar (30) pela redução na temperatura de transformação da austenita para ferrita com o aumento do teor de manganês. Sendo que a redução na temperatura de início da transformação para ferrita poligonal é maior que a observada na temperatura de início da transformação para ferrita acicular.

Avaliando o efeito do silício sobre a formação da ferrita acicular Evans (37) verifica que o aumento no teor desse elemento de 0,2 para 0,9%, em metais de solda com manganês abaixo de 1%, promove a formação de ferrita acicular. Para valores acima deste, a influência do silício não é tão evidente. Na Figura 2.12 são ilustrados tais efeitos.

Entre os elementos químicos, o Níquel é aquele que desempenha, conforme apontado por Farrar e Harrison (29), o papel mais claro na formação da ferrita acicular. Evans (38) mostra que, em metais de solda com manganês em torno de 1%, o aumento no teor de níquel promove redução na fração volumétrica de ferrita primária e aumento na fração de ferrita acicular que também se torna mais refinada. A exceção a regra foi o metal de solda contendo teores de manganês e níquel em torno de 1,8% e 3,5% onde observou-se formação de martensita em detrimento a ferrita acicular. Na Figura 2.13 são apresentados esses resultados.

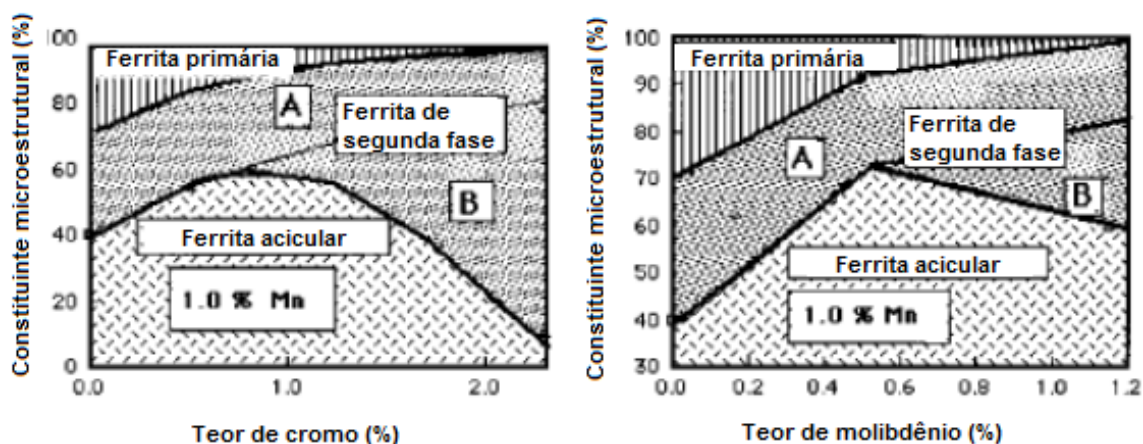


**Figura 2.12:** Efeito do silício na microestrutura do metal de solda contendo 0,6%Mn (a) e 1,4% (b) de Mn. Fonte: Evans (37).



**Figura 2.13:** Efeito do níquel na microestrutura do metal de solda contendo 1,0%(a) e 1,8% (b) de Mn. Fonte: Evans (38).

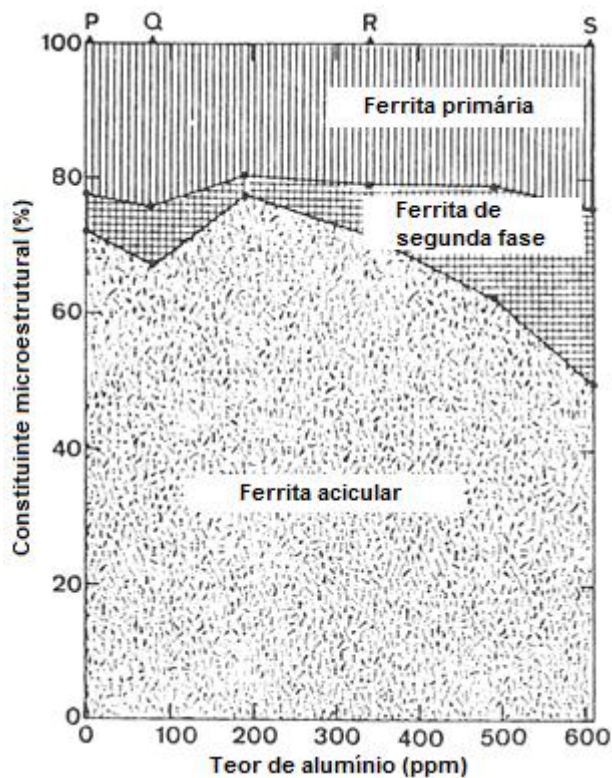
Evans (39) relata o efeito do cromo e molibdênio na microestrutura de aços baixo carbono. A Figura 2.14 apresenta as frações volumétricas dos constituintes em função dos teores desses elementos. Pode-se verificar que o aumento nos teores de cromo e molibdênio aumenta a fração volumétrica de ferrita acicular até um determinado ponto a partir do qual essa fração reduz.



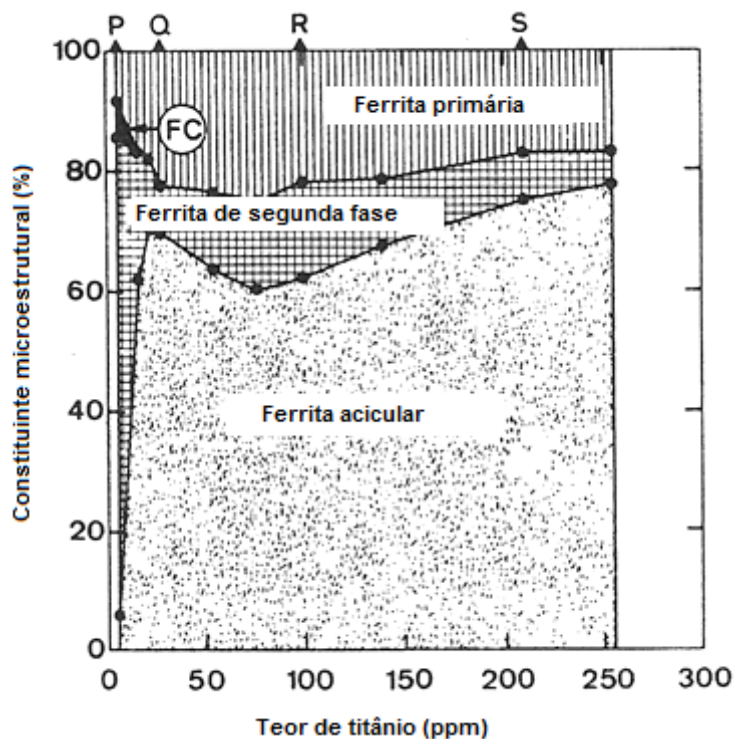
**Figura 2.14:** Mudanças na microestrutura do metal de solda em função do teor de cromo e molibdênio. Fonte: Evans (39).

O efeito do Alumínio é o mais complexo entre todos os elementos químicos (29). Terashima e Hart (40) sugerem que as alterações proporcionadas pelo alumínio podem ser explicadas por sua influência nos fenômenos de desoxidação, no teor de alumínio em solução e na densidade de inclusões. Evans (41) observa, conforme ilustrado na Figura 2.15, que o teor de ferrita acicular reduz, aumenta e, finalmente, reduz com o aumento no teor de alumínio. Tais alterações são acompanhadas por mudanças na fração de ferrita de segunda fase. Esse fenômeno é justificado pela mudança na composição e tamanho das inclusões formadas.

A adição de titânio em pequenas quantidades (em torno de 10ppm) é suficiente para mudar de maneira drástica a microestrutura do metal de solda (42). A Figura 2.16 ilustra esse fenômeno que é associado à formação de inclusões de  $TiO_2$  que podem ser potentes nucleantes de ferrita acicular,

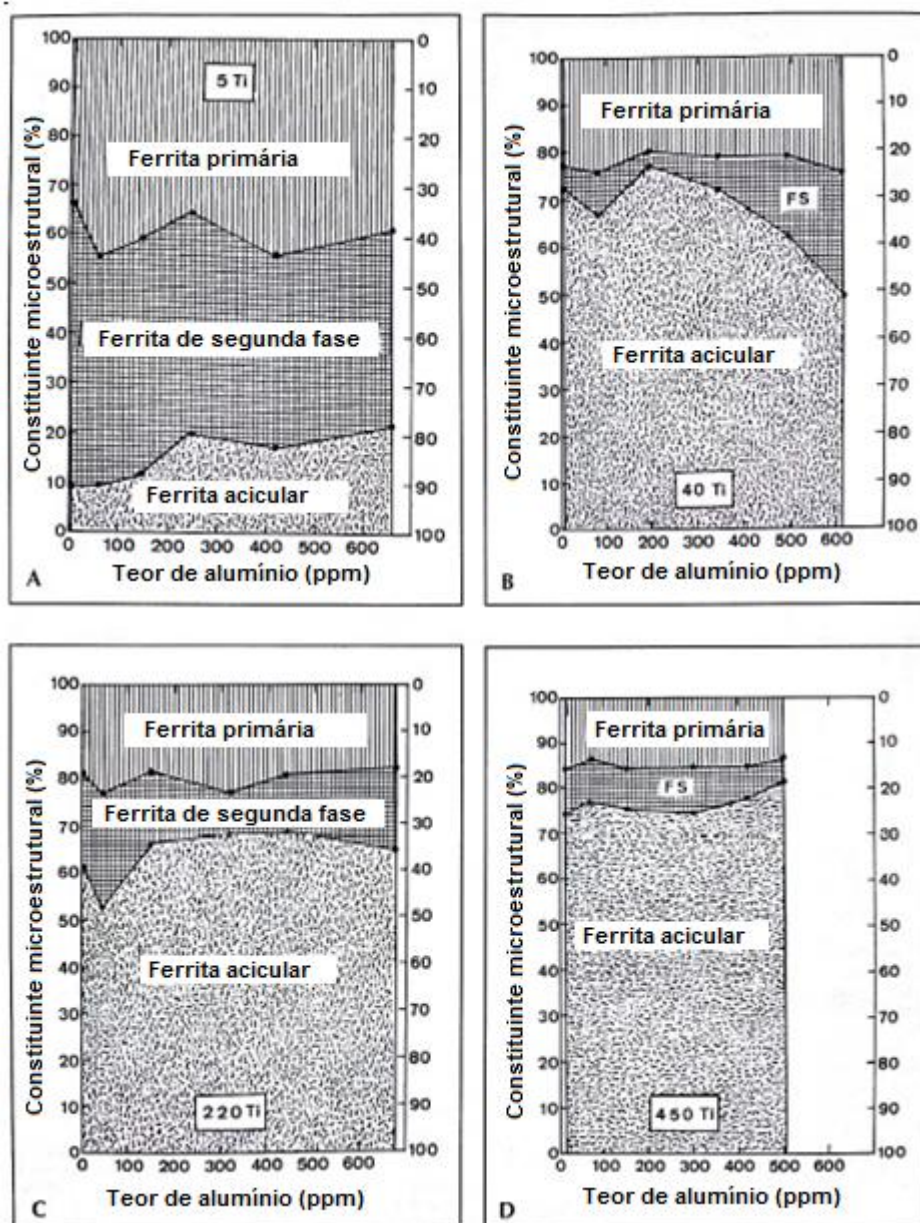


**Figura 2.15:** Efeito do teor de alumínio na microestrutura de um metal de solda com 40ppm de titânio . Fonte: Evans (41).



**Figura 2.16:** Efeito do teor de titânio na microestrutura do metal de solda. Fonte: Evans (42).

O estudo de metais de solda com 1,4% de manganês e diferentes teores de titânio e alumínio realizado por Evans (43) mostra que o titânio, ao contrário do alumínio, tem forte influência sobre a formação da ferrita acicular. Nos gráficos da Figura 2.17 é apresentado o efeito do alumínio para diferentes teores de titânio (5, 40, 220 e 4450ppm).



**Figura 2.17:** Efeito do teor de alumínio sobre a microestrutura do metal de solda com diferentes teores de titânio (A – 5ppm, B – 40ppm, C – 220ppm e D – 450ppm). Fonte: Evans (43).



O boro é utilizado em pequenas quantidades com o objetivo de controlar a transformação de fase a partir do contorno de grão austenítico. Contudo, adição desse elemento acima dos valores recomendados pode ser prejudicial, pois leva a formação de boretos no contorno de grão austenítico que promovem nucleação de ferrita. Bhadeshia e Svensson (44) realizam experimentos com o objetivo de adequar um modelo desenvolvido para prever a microestrutura. Verifica-se, para o metal de solda estudado, que o aumento no teor de boro de 1 a 65ppm proporciona aumento da fração volumétrica de ferrita acicular de 29 a 66%.

Em um estudo em metais de solda produzido por eletrodos básicos contendo diferentes teores de titânio e boro, Evans (45) discute o efeito desses elementos sobre a microestrutura formada. O efeito do boro sobre a fração volumétrica dos constituintes para diferentes teores de titânio (<5, 35, 120, 260, 400 e 600ppm) é apresentado nos gráficos da Figura 2.18. Os resultados indicam que a máxima fração de ferrita acicular é obtida para baixos teores de boro e maiores de titânio e que a presença desses elementos em excesso reduz a quantidade de ferrita acicular.

Evans (46) avalia o efeito da variação do teor de vanádio (de 0 a 800ppm) na microestrutura do metal de solda. A Figura 2.19 apresenta a fração volumétrica dos constituintes microestruturais. Observa-se que o aumento no teor de vanádio até 600ppm promove aumento na fração volumétrica de ferrita acicular e redução nas frações de ferrita primária e de segunda fase.

He e Edmonds (47) apontam que o vanádio aumenta da fração volumétrica de ferrita acicular porque, ao segregar no contorno de grão austenítico, suprime as reações a partir desse. Por outro lado, Garcia-Mateo et al (48) apontam que a presença de nitrogênio em combinação com vanádio forma precipitados que atuam como agentes ativos na nucleação da ferrita acicular.

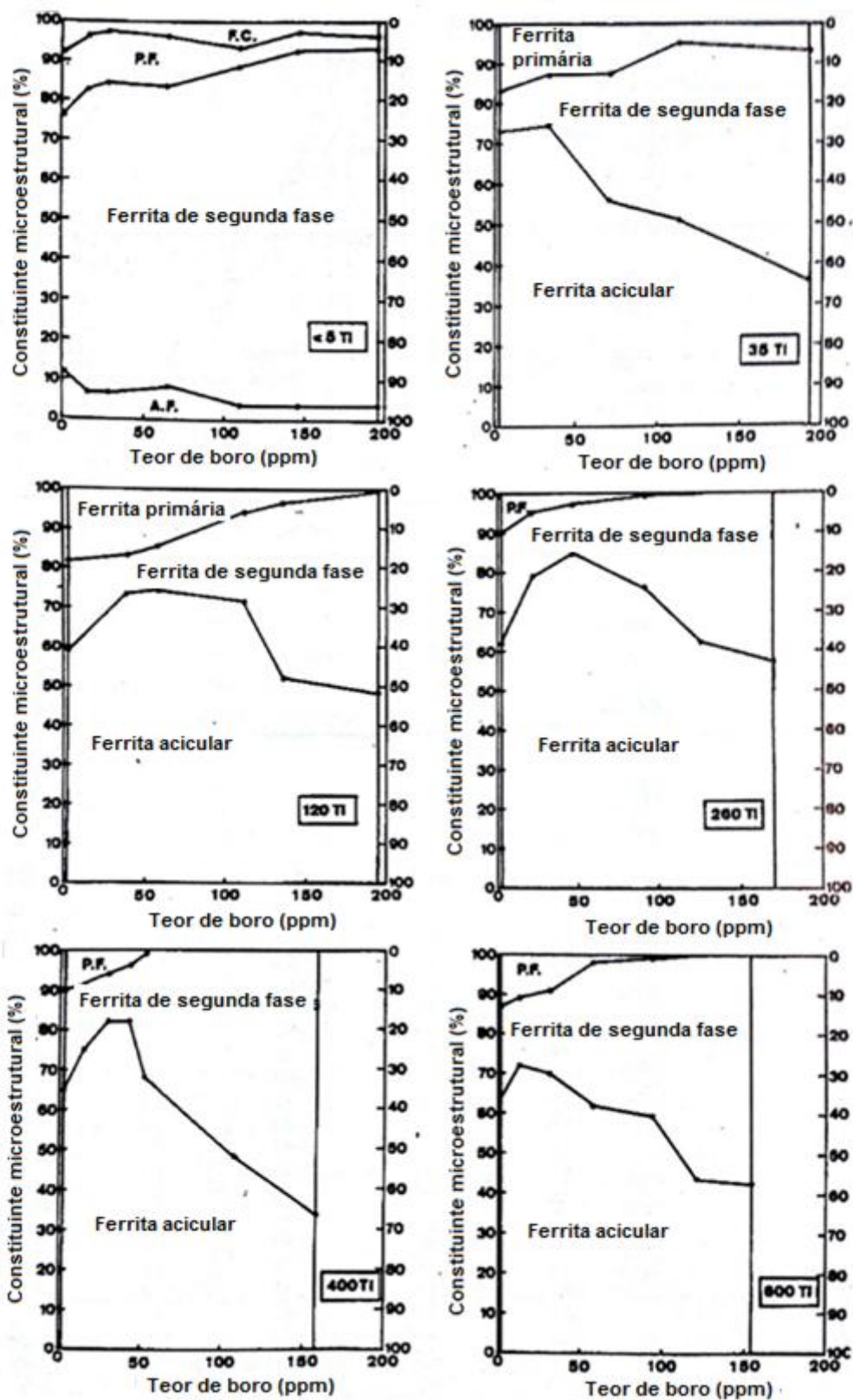
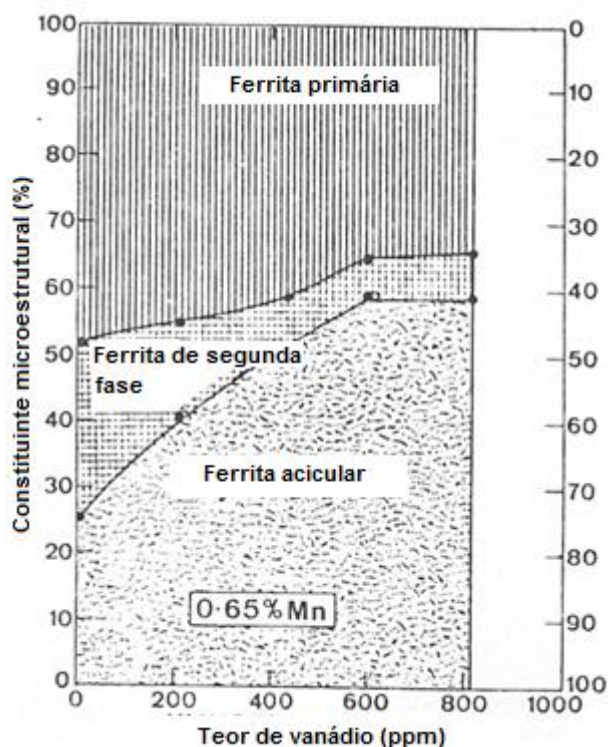


Figura 2.18: Efeito do boro sobre a microestrutura do meta de solda com diferentes quantidades de titânio (<math>< 5</math>, 35, 120, 260, 400 e 600ppm). Fonte: Evans (45).

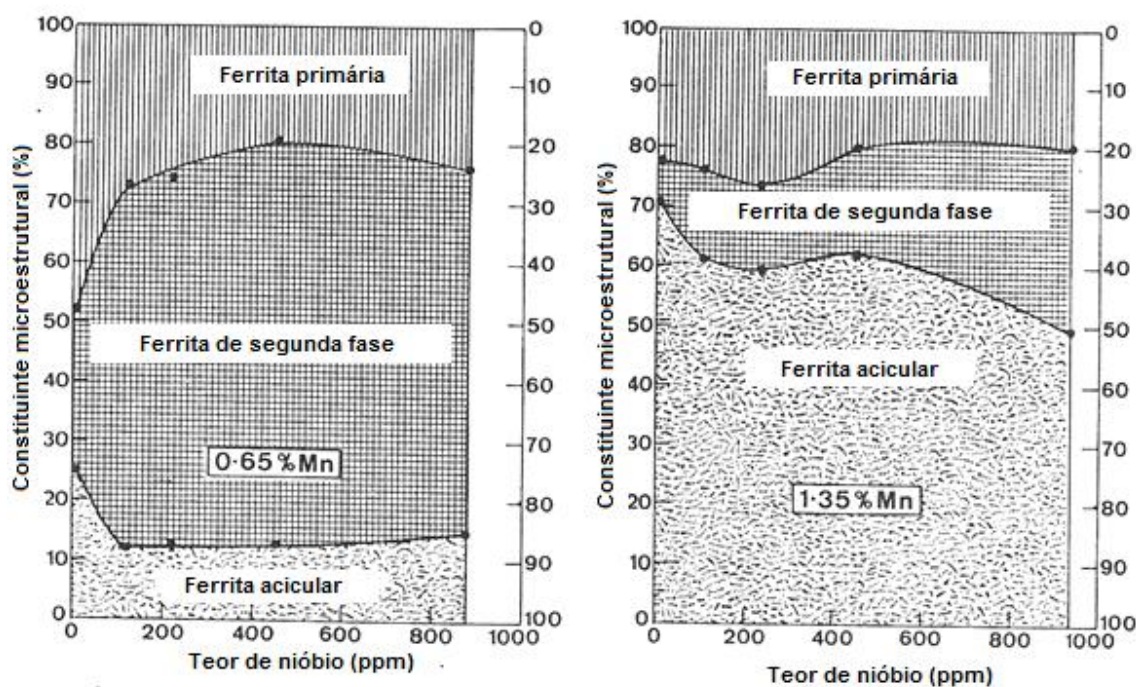


**Figura 2.19:** Efeito do teor de vanádio na microestrutura do metal de solda. Fonte: Evans (46).

O efeito da variação do teor de nióbio (de 5 a 1000ppm) no metal de solda com diferentes teores de manganês é ilustrado na Figura 2.20. Segundo Evans (49), esse elemento apresenta um complexo efeito sobre a microestrutura. De maneira geral nota-se aumento da fração volumétrica de ferrita de segunda fase em consequência do aumento de seu teor.

Bhadeshia (19) descreve a dificuldade encontrada por pesquisadores ao tentar estabelecer relação entre o teor de nitrogênio e a microestrutura em metais de solda com adições intencionais de boro e titânio. Evans (50), ao estudar o efeito do nitrogênio em metais de solda depositados pelo processo SMAW com adição de titânio e boro, indica que este elemento afeta de maneira complexa a microestrutura produzida. Oh et al (51), estudando metais de solda produzidos na soldagem com arames tubulares com fluxo não metálico, chegam a mesma conclusão. Lau (52), em um trabalho mais recente, avalia o efeito da variação no teor de nitrogênio (de 33 a 192ppm) na formação da ferrita acicular em metal de solda depositado pelo processo SAW contendo titânio e boro. Neste estudo, o autor verifica que o aumento no teor de nitrogênio (acima de 70ppm) proporciona redução na fração volumétrica de ferrita

acicular. Ele atribui as mudanças na microestrutura à sequência de reação entre titânio e boro com nitrogênio e oxigênio. Estas, por sua vez, dependem da disponibilidade de cada um dos elementos citados.



**Figura 2.20:** Efeito do teor de nióbio na microestrutura do metal de solda. Fonte: Evans (49).

### 2.4.3. Inclusões não metálicas

Composição química da alma do eletrodo e compostos presentes em seu revestimento afetam a composição química e inclusões do metal de solda. Entre os diversos fatores que influenciam a formação da ferrita acicular destaque especial é dispensado às inclusões. Conforme ilustrado na Figura 2.10, quatro diferentes mecanismos são propostos com objetivo de explicar como elas atuam na nucleação desse constituinte. Inúmeros estudos exploram o efeito da composição química, forma e distribuição de tamanho das inclusões durante esse processo.

Em metais de solda, as inclusões apresentam estrutura complexa constituída por camadas de diferentes fases. Mills (53), estudando o efeito da composição química e estrutura de inclusões em metais de solda com diferentes teores de oxigênio e elementos desoxidantes depositados pelo processo SAW, evidencia essa característica. Verifica ainda que  $TiO_2$  e  $Al_2O_3MnO$  são agentes nucleantes de ferrita e o primeiro se apresenta mais efetivo por estar presente na superfície de um número maior de partículas. Dowling (54), por sua vez, observa variação na composição química das inclusões em metais de solda depositados pelo processo SAW através da adição de elementos desoxidantes e variações na composição do fluxo. Contudo, não verifica relação entre a fração volumétrica de ferrita acicular e as fases ou composição química das inclusões.

Gregg e Bhadeshia (27), estudando a formação de bainita a partir de superfícies cerâmicas, classificam os minerais em três grupos distintos em função do efeito deles sobre a nucleação desse constituinte. O primeiro grupo é formado por aqueles que aparentemente reagem com o aço para induzir a formação da bainita. No segundo grupo estão os que influem na nucleação da ferrita, mas não apresentam indícios de reagir com o aço. O último grupo é constituído pelos que não estimulam a formação de bainita. A Tabela 2.3 lista os minerais integrantes de cada um dos grupos.

**Tabela 2.3:** Minerais classificados de acordo com sua influência sobre a formação da bainita Fonte: Gregg e Bhadeshia (27).

Grupo I (efetivos)	Grupo II (efetivos)	Grupo III (inefetivos)
$TiO_2$	$Ti_2O_3$	TiN
$PbO_2$	TiO	$MnAl_2O_4$
$MnO_2$		$\gamma-Al_2O_3$
$SNO_2$		$\alpha-Al_2O_3$
$WO_3$		NbC
$MoO_3$		$CaTiO_3$
$V_2O_5$		$SrTiO_3$
$KNO_3$		MnS

Sarma et al (33) realizam uma extensa revisão sobre a influência das inclusões não metálicas na nucleação da ferrita acicular. Eles propõem a classificação das inclusões, quanto a composição química e sua influência sobre a nucleação, conforme a Tabela 2.4.

**Tabela 2.4:** Influência da composição química das inclusões no potencial de nucleação intragranular de ferrita acicular. Fonte: Sarma et al (33).

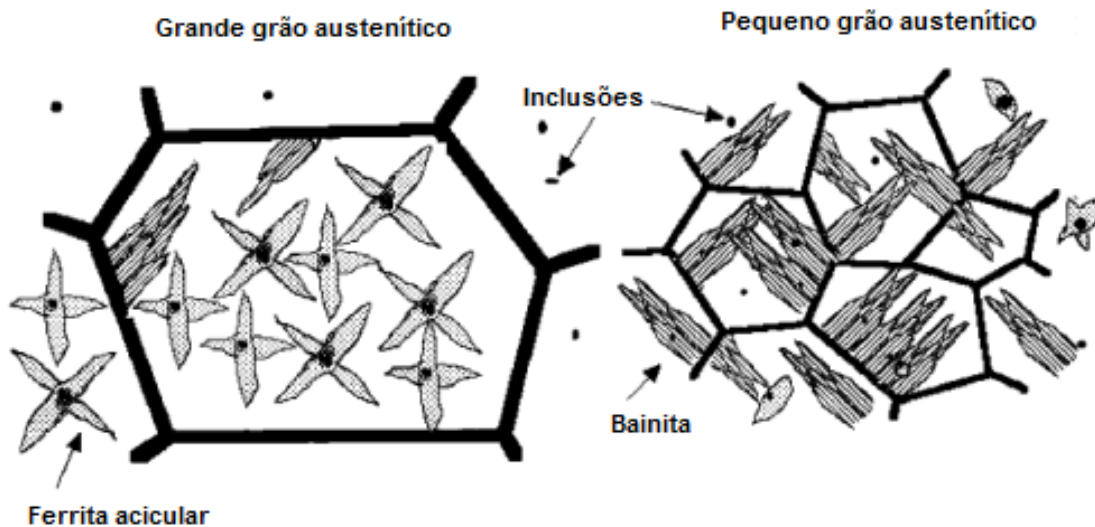
<b>Compostos adicionados</b>	<b>Inclusões ativas na formação de ferrita acicular</b>	<b>Inclusões inertes na formação de ferrita acicular</b>
<b>Óxidos simples</b>	Óxidos de Ti (Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO e TiO <sub>2</sub> )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	(Ti,Mn) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (em aços Mn para mancais) TiO <sub>2</sub> -(MnO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Galaxita (MnO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	MnO-SiO <sub>2</sub> MnO-FeO-SiO <sub>2</sub> MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Nitretos simples</b>	TiN VN	TiN
<b>Sufetos simples</b>		MnS Cus
<b>Oxisulfetos complexos e inclusões multifase</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnS Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MnS Ti e Ti-Ca oxisulfetos Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiN-MnS TiO <sub>x</sub> -TiN-MnS FeS-(Mn,Cu)S (em aços carbono sem adição de elementos de liga especiais) MnS-VC, MnS-V(C,N)	

O efeito da distribuição de tamanho das inclusões na formação da ferrita acicular também é tema de estudos. Sarma et al (33) apontam esse fator como sendo essencial para que a mesma atue como agente nucleante. Isso se deve a redução da barreira energética para nucleação heterogênea em função do aumento no tamanho das partículas. Barbaro et al (32), com o objetivo de avaliar esse efeito, quantificam a relação entre o tamanho das inclusões e a nucleação. Em seu trabalho, inclusões com dimensões superiores a 0,4-0,6 $\mu\text{m}$  promovem nucleação de ferrita acicular em uma ampla faixa de taxas de resfriamento ( $\Delta t_{8.5} > 4-40\text{s}$ ).

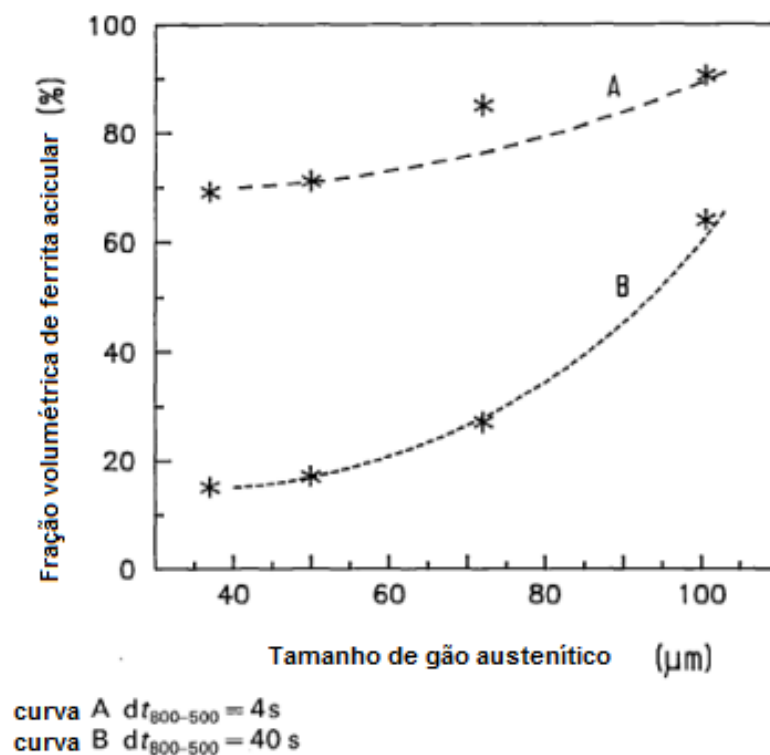
#### 2.4.4. Tamanho de grão austenítico

Microestruturas que apresentam maior tamanho de grão austenítico possuem maior chance de se transformar em ferrita acicular. A justificativa mais aceita associa esse fenômeno à redução na densidade de sítios de nucleação nos contornos de grão com aumento desses. A Figura 2.21 ilustra esquematicamente esse mecanismo.

O tamanho de grão austenítico em metais de solda é determinado pelo ciclo térmico e, quando não há formação de ferrita- $\delta$ , também pela ancoragem dos contornos de grão (*Zener pinning*) pelas inclusões. Barbaro et al (32) observam a existência de relação direta entre o tamanho de grão austenítico e a temperatura de reaustenitização do metal de solda. Maiores temperaturas promovem a formação de grãos maiores. Verifica-se ainda a existência de relação entre o tamanho de grão e a fração volumétrica de ferrita acicular formada. O mesmo fato é evidenciado por Yang e Bhadeshia (22) na avaliação de metais de solda depositados pelo processo SMAW e reaustenitizados. A Figura 2.22 ilustra essa relação para metais de solda submetidos a diferentes taxas de resfriamento. Nota-se que, para uma dada taxa de resfriamento, há aumento da fração volumétrica de ferrita acicular com o aumento do tamanho de grão austenítico.



**Figura 2.21:** Ilustração esquemática do mecanismo segundo o qual há formação de ferrita acicular e bainita em microestruturas com diferentes tamanhos de grão austeníticos. Fonte: Bhadeshia (16).

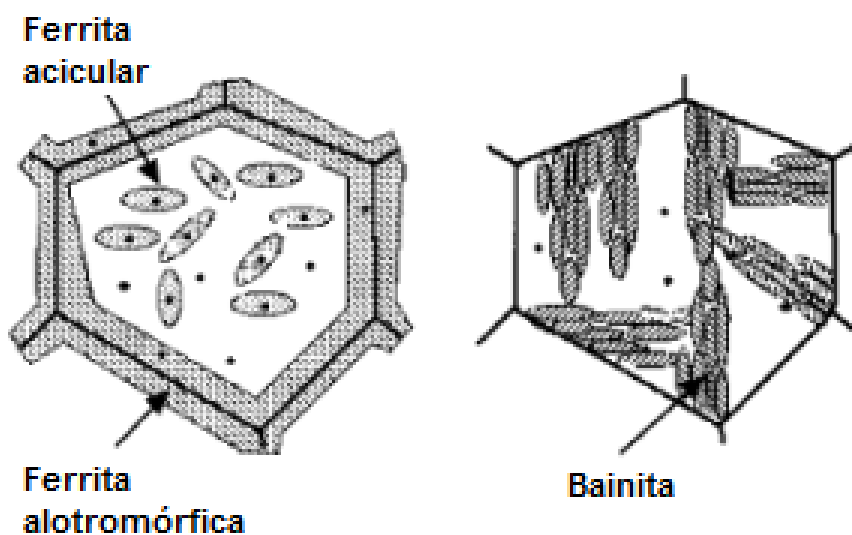


**Figura 2.22:** Efeito do tamanho de grão austenítico na fração volumétrica de ferrita acicular. Fonte: Barbaro et al (32).



### 2.4.5. Presença de ferrita alotromórfica

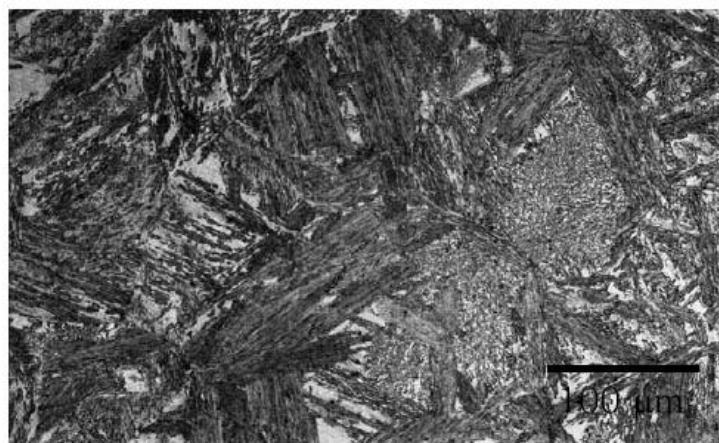
A ferrita alotromórfica é considerada benéfica à formação de ferrita acicular. A presença deste constituinte reduz a presença dos contornos de grão austeníticos e limita a nucleação de feixes de bainita. A Figura 2.23 ilustra esquematicamente este mecanismo.



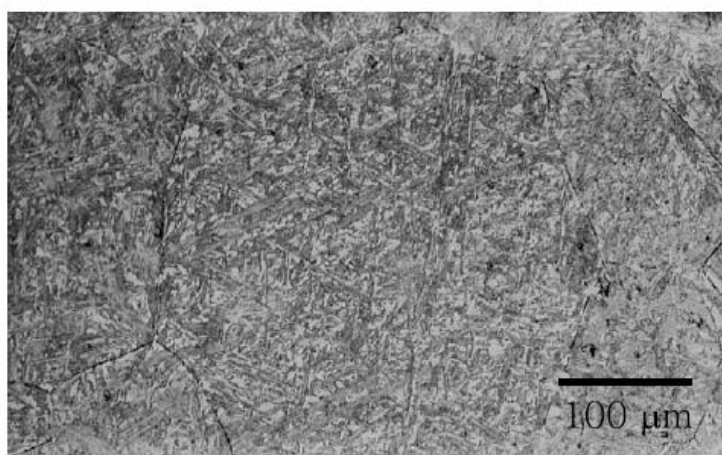
**Figura 2.23:** Ilustração esquemática do mecanismo segundo o qual a presença de ferrita alotromórfica induz a transição de bainita para ferrita acicular. Fonte: Bhadeshia (16).

Lee e Bhadeshia (34) realizam experimentos que confirmam o efeito benéfico da ferrita alotromórfica na formação de ferrita acicular. Amostras de aço austenitizadas a 1250°C por 20 minutos são submetidas a diferentes condições de resfriamento. Na primeira as amostras são resfriadas continuamente até 390°C e submetidas a transformação isotérmica. Na segunda as amostras são resfriadas continuamente até 650°, mantidas por 5 horas e novamente resfriadas a 390°C onde se transformam isotermicamente. A Figura 2.24 apresenta a microestrutura dessas amostras. Nota-se, na amostra que não foi tratada a 650°C (a), uma estrutura tipicamente bainítica. Por

outro lado, a amostra tratada a 650°C (b), apresenta pequena fração volumétrica de ferrita alotrófica e considerável presença de ferrita acicular.



(a)



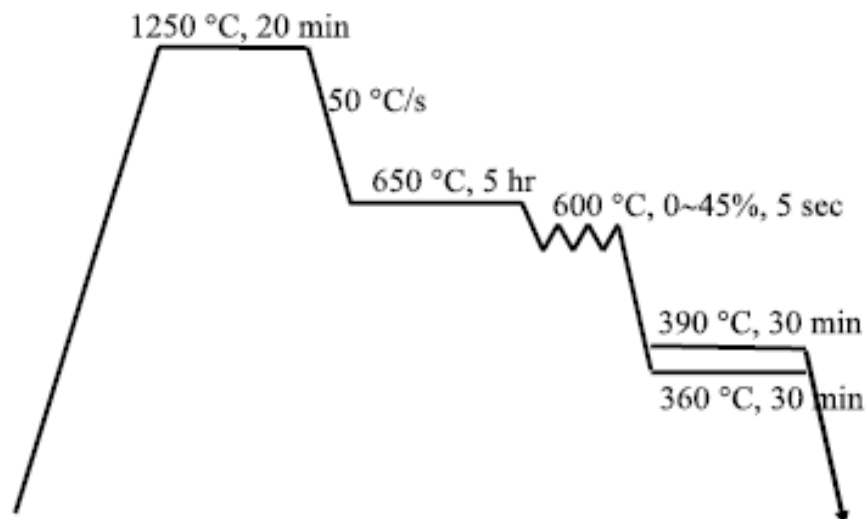
(b)

**Figura 2.24:** Microestrutura de amostras de metal de solda . Fonte: Lee e Bhadeshia (34).

#### 2.4.6. Deformação plástica

Lee e Bhadeshia (34) investigam também o efeito da deformação plástica sobre a formação da ferrita acicular. Amostras produzidas a partir de materiais de alta pureza fundidos em fornos de indução a vácuo são submetidas ao ciclo

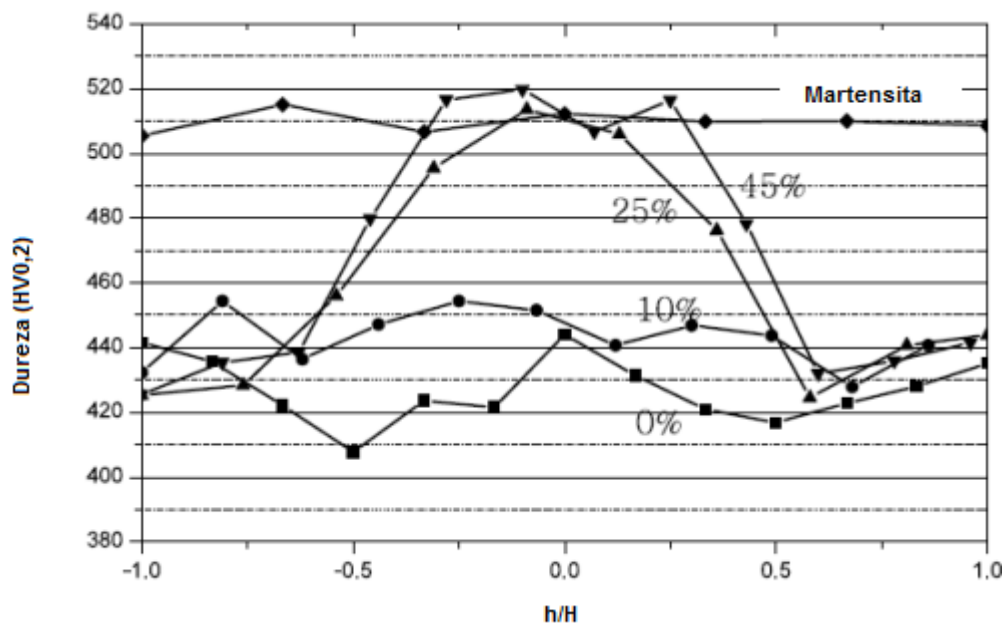
termomecânico representado na Figura 2.25. Posteriormente são processadas até a obtenção de amostras cilíndricas com diâmetro de 8mm.



**Figura 2.25:** Diagrama esquemático do processamento termomecânico utilizado no estudo de Lee e Bhadeshia. Fonte: Lee e Bhadeshia (34).

Para avaliar o efeito da deformação plástica as amostras são, conforme detalhado no diagrama, submetidas a deformações compressivas de 0 a 45% a uma temperatura de 600°C. A formação da ferrita acicular para diferentes deformações foi avaliada através de medidas de dureza, dilatometria e análise metalográfica das amostras. A Figura 2.26 apresenta os perfis de dureza de amostras deformadas e não deformadas com estrutura constituída por ferrita acicular e martensita.

Nota-se, avaliando os perfis de dureza, que o aumento da deformação promove aumento da dureza. Análises complementares através de técnicas metalográficas e por dilatometria confirmaram que o aumento da deformação retarda a formação de ferrita acicular que é substituída gradualmente por martensita. Esse fenômeno é denominado estabilização mecânica da austenita. Lee e Bhadeshia (34) avaliam ainda o efeito da temperatura de transformação e concluem que, para menores valores desta, há redução no grau de estabilização mecânica.



**Figura 2.26:** Perfil de dureza das amostras transformadas isotermicamente a 390°C após diferentes deformações. Fonte: Lee e Bhadeshia (34).

### 3. Metodologia

#### 3.1. Equipamentos

##### 3.1.1. Fonte de energia

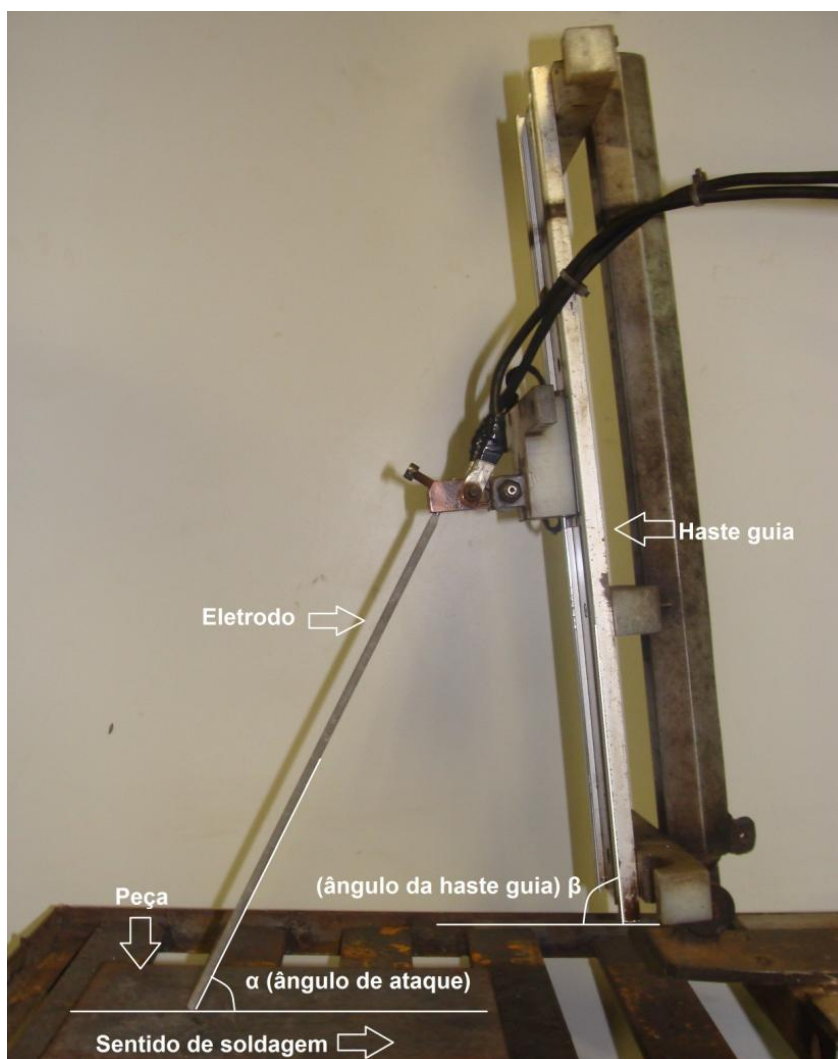
Foi empregada uma fonte de energia eletrônica do tipo inversora Marca Kemppi, modelo Mastertig AC/DC 2500W. Esta fonte possui fator de trabalho de 100% a 200A na soldagem SMAW em corrente contínua e tensão em aberto de 70V. Todas as operações de soldagem foram realizadas com uma corrente nominal de 110A.

##### 3.1.2. Dispositivo para soldagem por arraste

Para minimizar os problemas de repetibilidade e reprodutibilidade associados à soldagem manual, as operações foram realizadas empregando o dispositivo ilustrado na Figura 3.1. Este sistema permite o ajuste dos ângulos da haste guia ( $\beta$ ) e ataque do eletrodo ( $\alpha$ ). Tais parâmetros, detalhados na Tabela 3.1, foram definidos a partir da experiência adquirida no uso deste dispositivo em soldagens subaquáticas molhadas e de ensaios realizados durante o estudo de Souza e Silva et al (55).

**Tabela 3.1:** Parâmetros utilizados no dispositivo de soldagem por arraste

	<b>Ângulo</b>
Haste guia ( $\beta$ )	85°
Ataque do eletrodo ( $\alpha$ )	60°



**Figura 3.1:** Dispositivo utilizado na mecanização das operações de soldagem.

## 3.2. Materiais utilizados

### 3.2.1. Eletrodos revestidos

Este estudo foi realizado sobre o metal de solda produzido pelo eletrodo revestido aglomerado com polímero com dimensões de 3,25x350mm cuja fórmula é apresentada na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Fórmula do eletrodo aglomerado com polímero  
(porcentagem em peso no revestimento)

<b>Matéria Prima</b>	<b>Quantidade (%)</b>
Calcário	24
Pó de ferro	23
Fluorita	12
Polímero	11
Silicato	9
Ferro silício	6
Ferro manganês	5
Rutilo	4
Feldspato de potássio	3
Outros	3

Na caracterização deste consumível foram realizadas análises químicas da alma (Tabela 3.3) e do metal de solda sem diluição (Tabela 3.4). A confecção do corpo de prova para análise química do metal de solda foi realizada conforme recomendado pela especificação AWS (56). Os cordões foram depositados de modo mecanizado utilizando o dispositivo descrito anteriormente. As técnicas de análise empregadas são detalhadas na Tabela 3.5.

No estudo das características operacionais, além do eletrodo aglomerado com polímero, também foram utilizados consumíveis classe AWS A5.1 E7018 nas dimensões de 3,25x350mm. Ambos foram submetidos à análise dimensional. Medidas dos diâmetros da alma e do revestimento realizadas com micrômetro são apresentadas na Tabela 3.6.

**Tabela 3.3:** Análise química da alma do eletrodo revestido aglomerado com polímero  
(Intervalo de confiança: 95%).

<b>Elemento</b>	<b>Composição (%)</b>
<b>C</b>	0,05±0,003
<b>Si</b>	0,02±0,008
<b>Mn</b>	0,46±0,011
<b>P</b>	0,008±0,001
<b>S</b>	0,015±0,002
<b>Cr</b>	0,026±0,004
<b>Ni</b>	0,022±0,005
<b>Mo</b>	0,006±0,002
<b>V</b>	0,001±0,001
<b>Cu</b>	0,034±0,010
<b>O(*)</b>	233±50
<b>N(*)</b>	45±2

(\*) ppm

**Tabela 3.4:** Composição química do metal de solda sem diluição produzido pelo  
eletrodo revestido aglomerado com polímero (Intervalo de confiança: 95%)

<b>Elemento</b>	<b>Composição (%)</b>
<b>C</b>	0,16±0,01
<b>Si</b>	0,45±0,05
<b>Mn</b>	0,77±0,08
<b>P</b>	0,033±0,002
<b>S</b>	0,018±0,002
<b>Cr</b>	0,107±0,004
<b>Ni</b>	0,016±0,001
<b>Mo</b>	0,010±0,001
<b>V</b>	0,008±0,001
<b>Al(*)</b>	164±40
<b>Ti(*)</b>	133±22
<b>B(*)</b>	38±5
<b>O(*)</b>	423±108
<b>N(*)</b>	70±2

(\*) ppm



**Tabela 3.5:** Técnicas analíticas empregadas na determinação da composição química da alma e metal de solda.

Alma do eletrodo	
Si, Mn, P, Cr, Ni, Mo, V, Ti, B	Espectrometria de emissão atômica por plasma*
C, S, N e O	Extração à quente** ***
Metal de solda sem diluição	
C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo, V, Ti e B	Espectrofotometria de emissão ótica****
O e N	Extração à quente***
(*) Perkin Elmer OPTIMA 700DV	(**) Eltra CS-800
(***) Bruker G8 GALILEO ON/H	(****) Espectro ESPECTROMAXx

**Tabela 3.6:** Dimensões dos eletrodos empregados no estudo das características operacionais (Intervalo de confiança: 95%).

	Diâmetro (mm)	
	Alma	Revestimento
Eletrodo aglomerado com polímero	3,23±0,02	5,63±0,08
E7018	3,20±0,01	5,61±0,06

### 3.2.2. Metal de base

A deposição de cordões de solda foi realizada sobre chapas de aço ASTM A36 com espessura de 12,7mm e comprimento de 250mm. Em função da disponibilidade de material foram utilizadas chapas com larguras de 60,0 e 72,5mm. A composição química do metal de base sobre o qual foram depositados cordões de solda destinados à caracterização metalográfica é apresentada na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7:** Composição química do metal de base sobre o qual foram depositados os cordões destinados à análise metalográfica (Intervalo de confiança: 95%).

<b>Elemento</b>	<b>Composição (%)</b>
<b>C</b>	0,13±0,01
<b>Si</b>	0,13±0,01
<b>Mn</b>	0,34±0,01
<b>P</b>	0,023±0,008
<b>S</b>	0,006±0,002
<b>Cr</b>	0,012±0,001
<b>Ni</b>	0,002±0,001
<b>Mo</b>	0,004±0,001
<b>V</b>	0,001±0,001
<b>Al(*)</b>	455±32
<b>Ti(*)</b>	15±5
<b>B(*)</b>	-
<b>O(*)</b>	113±80
<b>N(*)</b>	22±8

(\*) ppm

### 3.3. Estudo das características operacionais dos eletrodos

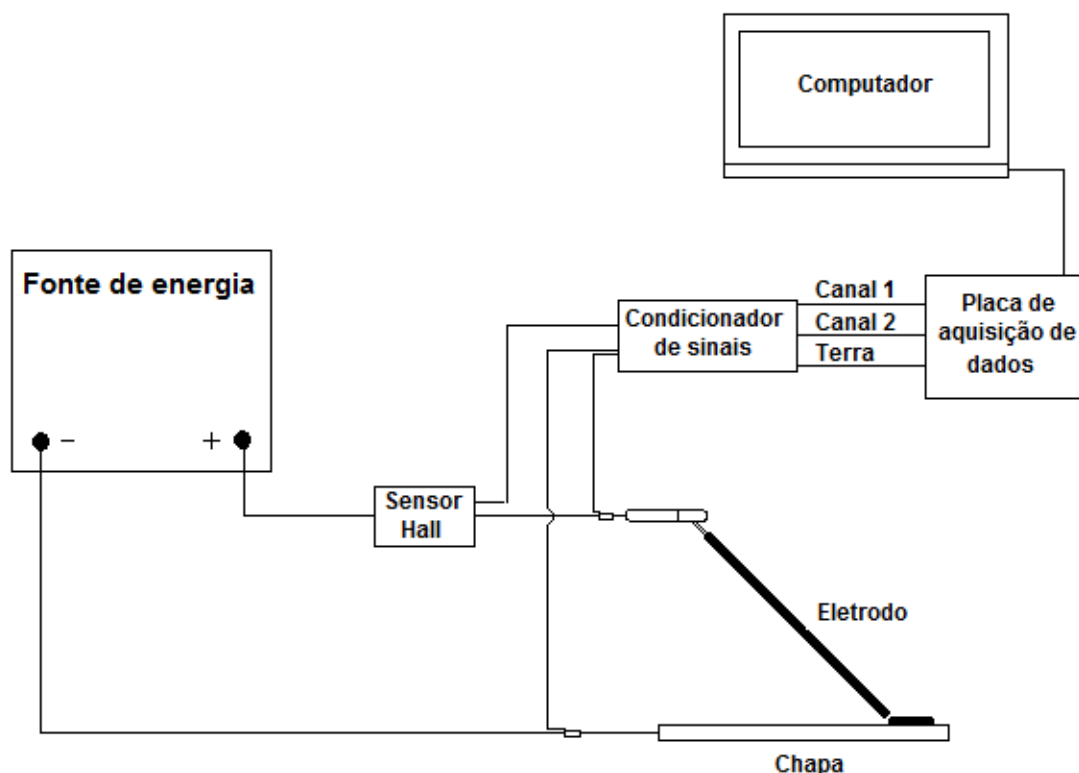
#### 3.3.1. Monitoramento dos parâmetros de soldagem e medição do perfil dos cordões de solda

Nesta etapa foram depositados cordões sobre chapas com largura de 72,5mm. Os eletrodos revestidos e metais de base foram identificados e pesados antes do experimento. Na pesagem dos eletrodos foi utilizada uma balança com capacidade de carga de 320g e precisão de 0,002g. As chapas foram pesadas utilizando um balança com capacidade de carga de 10kg e precisão de 0,1g. Sobre cada chapa foi depositado um cordão de solda. No total foram produzidas doze chapas sendo seis para cada um dos eletrodos avaliados.

Durante a deposição dos cordões de solda foi realizado o monitoramento de tensão e corrente a uma taxa de 1000 pontos/segundo. A Figura 3.2 apresenta o esquema do sistema de aquisição de dados utilizado. A corrente de soldagem foi

medida por meio de um sensor Hall modelo HTR 500-SB e a tensão do arco pela diferença de potencial entre os polos positivo e negativo da fonte de energia. O condicionador de sinais foi empregado para minimizar o ruído, reduzir a tensão medida entre os polos da fonte e amplificar o sinal proveniente do sensor Hall. A conversão do sinal analógico para digital foi realizada pela placa de aquisição de dados marca Data Translation, modelo DT9816. Os sinais foram então captados por um programa e armazenados na forma de arquivo de dados. Os dados coletados foram tratados utilizando o programa Sinal Versão 1.4.1 desenvolvido pelo LABSEnd/LRSS. Valores de tensão e corrente média calculados com auxílio desse programa foram utilizados no cálculo da energia de soldagem (HI) de acordo com a Equação 3.1

Após a soldagem, sobras de eletrodos e chapas com cordões foram pesadas. O tempo total de soldagem para cada um dos cordões foi medido. Utilizando as Equação 3.2 e Equação 3.3 foram calculadas as taxas de fusão ( $T_f$ ) e deposição ( $T_d$ ).



**Figura 3.2:** Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado no monitoramento de tensão e corrente de soldagem.

**Equação 3.1**

$$HI = \frac{V \times I}{V_s}$$

**Equação 3.2**

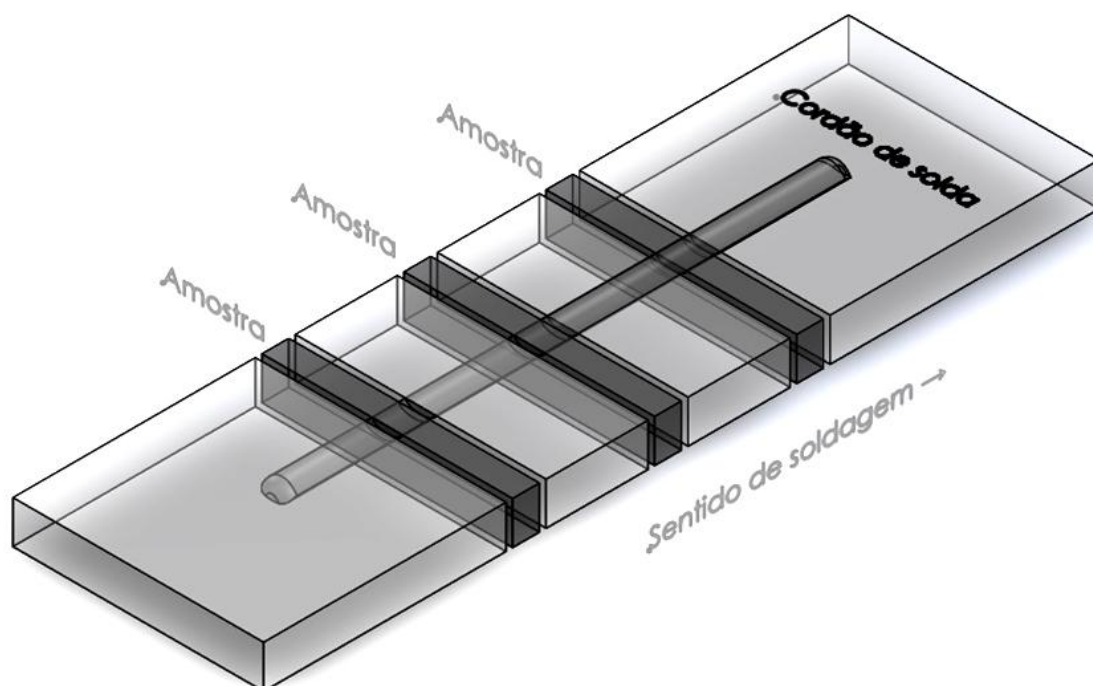
$$T_f = \frac{(Pe_{inicial} - Pe_{final})}{t_{soldagem}}$$

**Equação 3.3**

$$T_d = \frac{(Pc_{final} - Pc_{inicial})}{t_{soldagem}}$$

As chapas foram cortadas em três diferentes posições, conforme ilustrado na Figura 3.3, para retirada de amostras da seção transversal dos cordões de solda. Os planos de corte corresponderam as distâncias de 15, 30 e 45s a partir do início da operação de soldagem.

Essas amostras foram cortadas, embutidas, lixadas (lixas 80, 180, 320, 400, 600, 1200), polidas com alumina 1 $\mu$ m e atacadas com Nital 5%. Fotografias foram tiradas com auxílio de uma lupa estereoscópica marca Olympus, modelo SZ-ST, acoplada a uma câmera CCD Sony Hyper-HAD. Medidas da penetração, largura, reforço e áreas do cordão correspondentes ao metal de base e metal de adição foram realizadas utilizando o programa Image J<sup>®</sup>. No cálculo da diluição ( $\delta$ ) foi utilizada a Equação 3.4.



**Figura 3.3:** Posição de retirada das amostras para medição do perfil dos cordões de solda.

**Equação 3.4** 
$$\delta = \frac{A_{mb}}{(A_r + A_{mb})} \times 100$$

### 3.3.2. Análise da escória produzida

A escória de cada um dos seis cordões de solda depositados anteriormente para cada eletrodo foi coletada e moída por 10 segundos utilizando moinho de pulverizador de panela Figura 3.4. Posteriormente foram submetidas a análise semi quantitativa por Difratomia de Raios-X em um equipamento marca Philips PAN-Analytical, modelo Empryean. utilizando radiação  $\text{CuK}\alpha$  e cristal monocromador de grafita. O método de análise se baseia na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD.



**Figura 3.4:** Moinho pulverizador de panela.

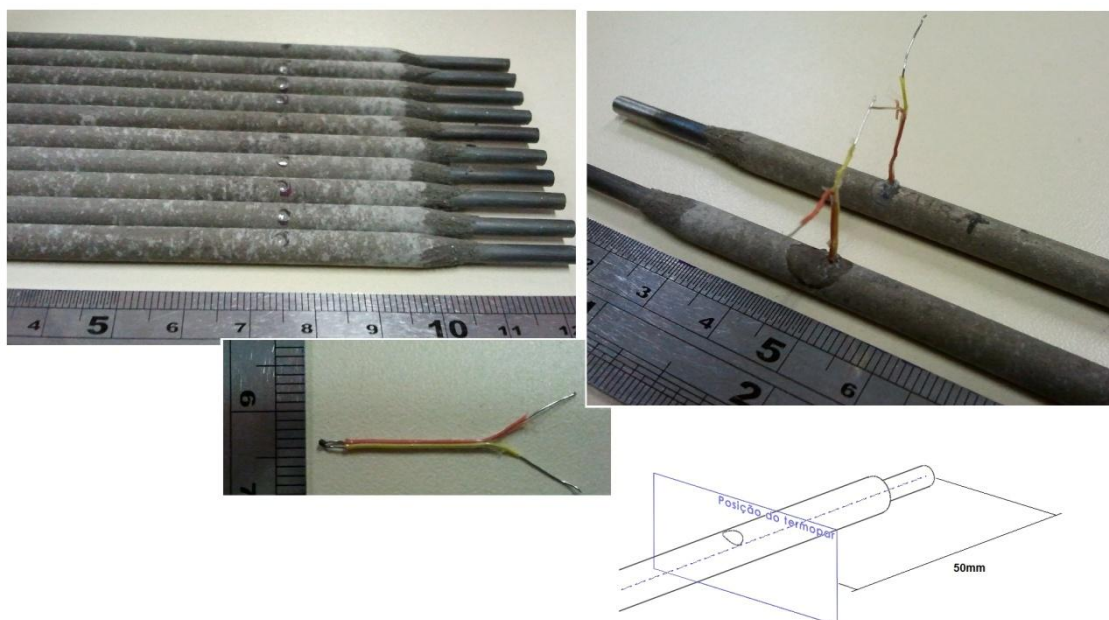
### **3.3.3. Avaliação da formação das gotas metálicas na ponta do eletrodo**

Cinco amostras da ponta de cada um dos eletrodos foram coletadas com o objetivo de investigar a formação das gotas durante a fusão. Para produzir essas amostras os eletrodos foram “fundidos” utilizando o dispositivo de soldagem por araste até 30s após a abertura do arco. Ao atingir esse tempo, o processo foi interrompido de maneira abrupta desconectando um dos cabos de energia. O revestimento dos eletrodos foi removido e a alma cortada a uma distância de 25mm a partir da ponta fundida. As amostras foram então embutidas à frio com resina epóxi, lixadas (lixas 80, 180, 320, 400, 600, 1200), polidas com alumina de 1 $\mu$ m e atacadas com Nital 5%. As análises foram realizadas utilizando um microscópio ótico marca Olympus, modelo BX60M acoplado a uma câmera CCD marca Sony, modelo Hyper-HAD.

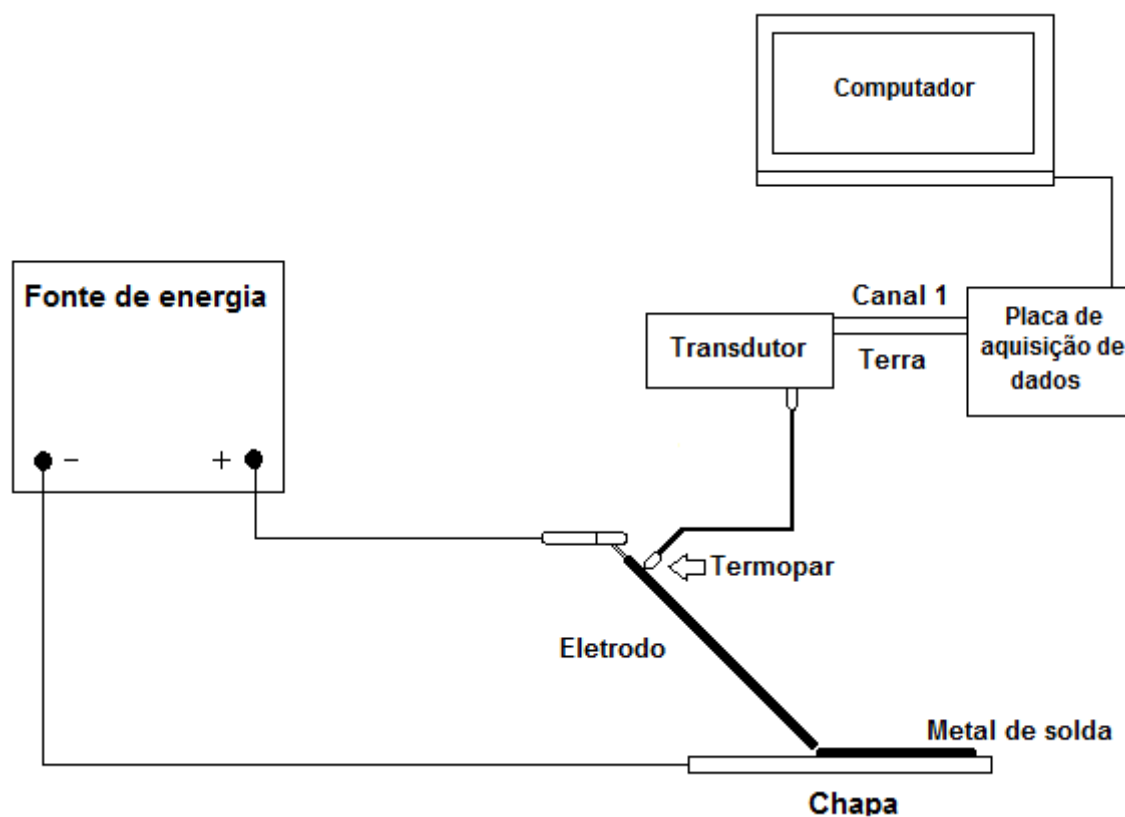
### 3.3.4. Monitoramento da temperatura do eletrodo durante a soldagem

Para monitorar a temperatura no eletrodo revestido foram utilizados termopares Tipo K (cobre/constantan) com diâmetro de 0,5mm. Os fios do termopar foram soldados utilizando a técnica ilustrada na Figura 3.5. Após essa etapa, os termopares foram soldados com descarga capacitiva na alma do eletrodo a 50mm da extremidade da ponta de pega, conforme ilustrado na Figura 3.6.

A operação de soldagem foi realizada de modo mecanizado. Os eletrodos foram pesados antes e após a operação e o tempo de soldagem medido. A Figura 3.6 ilustra o sistema empregado na captura e armazenagem dos dados gerados durante esse experimento. A calibração do sistema foi efetuada conforme descrito no Anexo 8.1. Os dados coletados foram tratados utilizando o programa Sinal. O experimento foi repetido de modo a se obter cinco registros para cada um dos eletrodos.



**Figura 3.5:** Posicionamento do termopar para medição da temperatura no eletrodo.

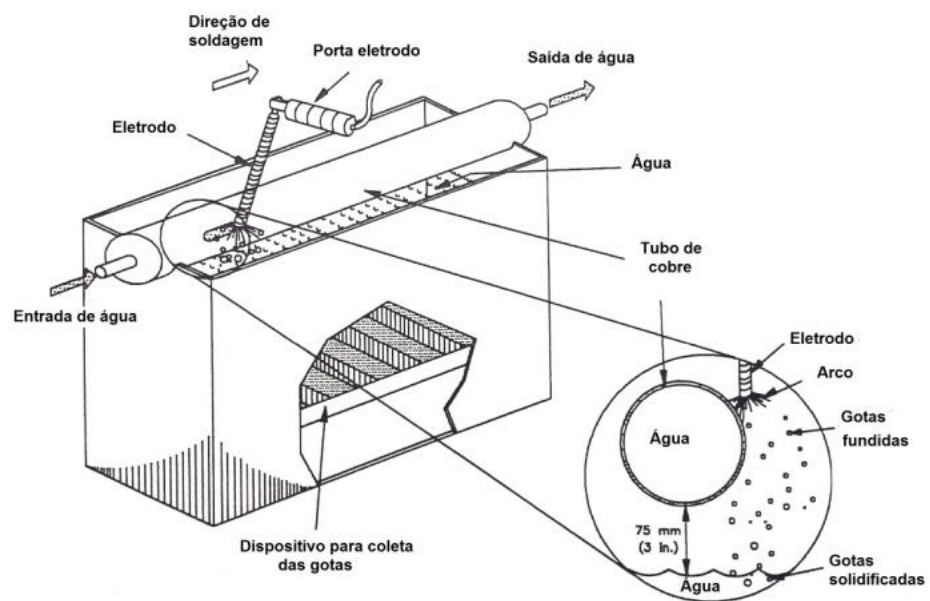


**Figura 3.6:** Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado no monitoramento da temperatura do eletrodo.

### 3.3.5. Coleta e análise das gotas transferidas

Para avaliação da transferência metálica foi realizada a coleta das gotas transferidas pelos eletrodos. O processo foi executado utilizando um sistema composto por tubo de cobre refrigerado e recipiente para coleta das gotas (Figura 3.7) desenvolvido por Bracarense (57). Para evitar a adesão do metal transferido no tubo de cobre a soldagem teve que ser realizada manualmente. Na obtenção de amostras representativas foram coletadas as gotas produzidas pela deposição de cinco eletrodos de cada um dos tipos avaliados.





**Figura 3.7:**Dispositivo empregado na coleta das gotas transferidas desenvolvido por Bracarense (56).

Após a coleta, as gotas foram processadas para remover escória presente em sua superfície. Peneiras com malha Tyler #6, #8, #10, #14, #24 e #28 foram utilizadas na classificação granulométrica. A pesagem do material retido em cada uma das malhas e passante na malha #28 foi realizada utilizando uma balança com capacidade de 320g e precisão de 0,002g. As gotas classificadas nas malhas #6, #8 e #10 foram fotografadas utilizando a técnica do sombreamento. O programa Image J<sup>®</sup> foi utilizado no processamento das imagens geradas, determinação da quantidade e medição do diâmetro médio destas. Os resultados obtidos foram utilizados no cálculo da densidade média de gotas retidas nas três malhas. Para validar esse resultado, algumas gotas foram embutidas à frio com resina epóxi e lixadas (lixa 180) de tal modo que fosse possível verificar a presença de vazios em seu interior.

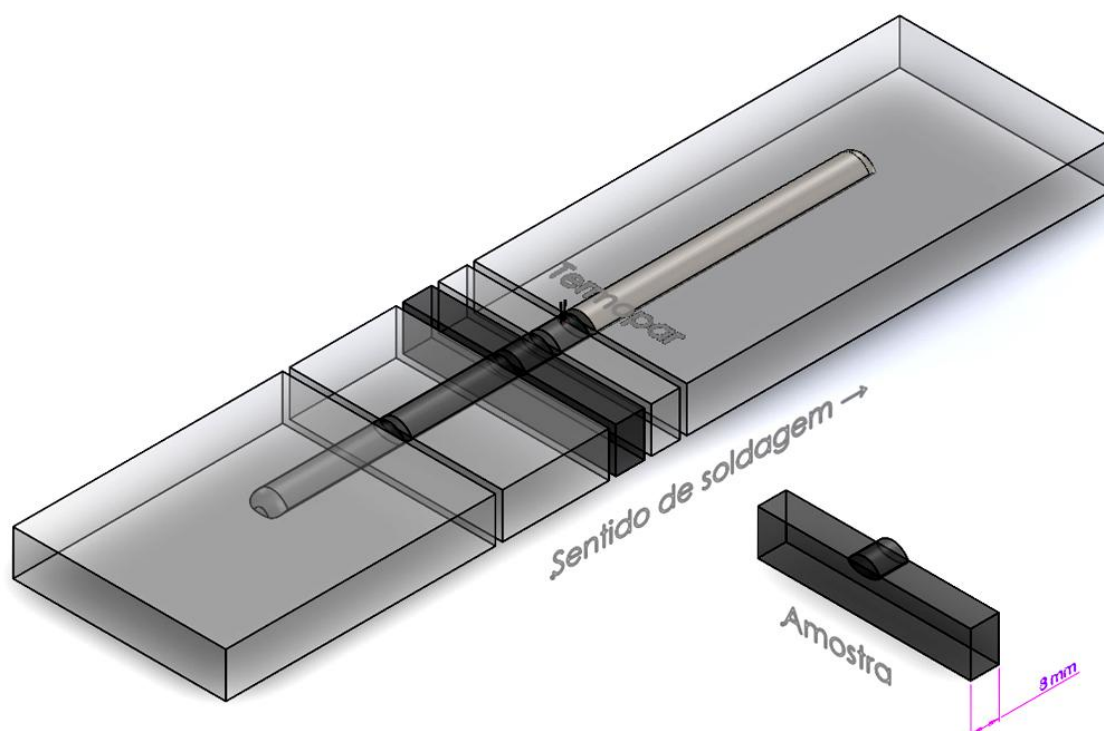
As gotas retidas nessas malhas também foram submetidas à análise química. Para evitar a interferência dos vazios nos resultados, as amostras foram esmagadas antes da análise. Os teores de carbono e nitrogênio foram determinados por extração à quente utilizando os analisadores marca Eltra, modelo CS-800 e marca Bruker, modelo G8 Galileo ON/H.

### **3.4. Estudo do metal de solda produzido pelo eletrodo com polímero**

#### **3.4.1. Análise microestrutural**

Amostras retiradas a partir de seis cordões depositados de modo mecanizado sobre a chapa com largura de 60,0mm foram destinadas à análise microestrutural. A Figura 3.8 indica a posição de retirada destas.

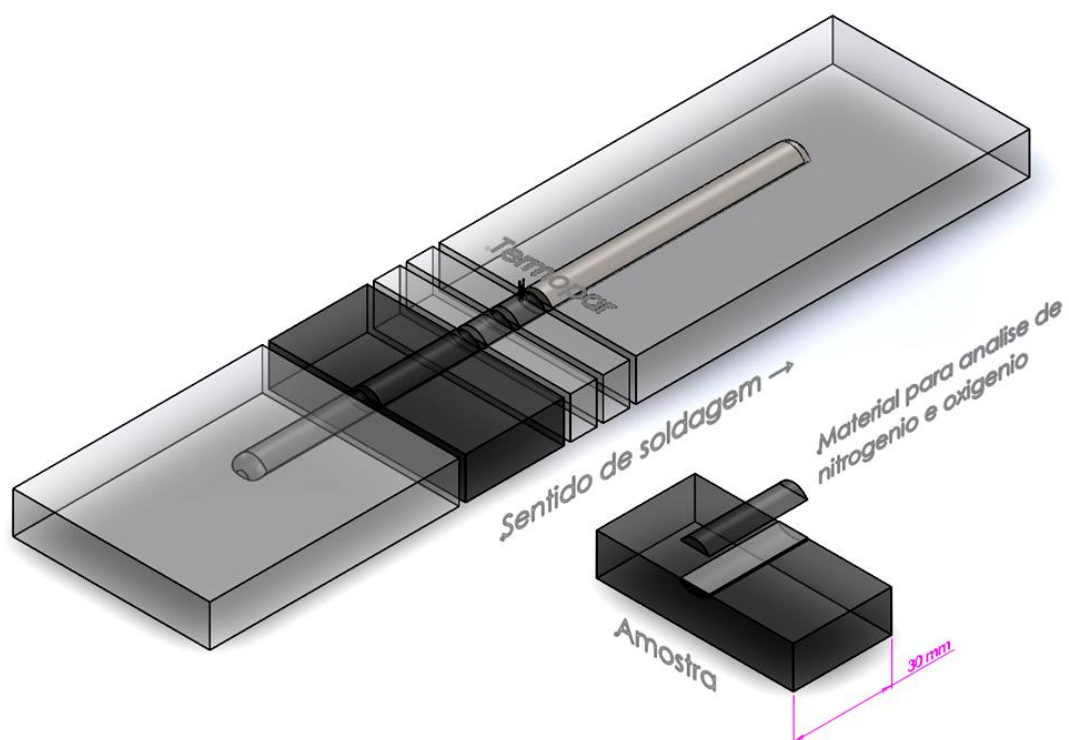
Antes de serem submetidas às análises qualitativa e quantitativa, as amostras foram cortadas, embutidas, lixadas (lixas 80, 180, 320, 400, 600, 1200), polidas com alumina de 1 $\mu$ m e atacadas com Nital 5%. As análises foram realizadas em um microscópio ótico marca Olympus, modelo BX60M acoplado a uma câmera CCD marca Sony, modelo Hyper-HAD. Na determinação da fração volumétrica de ferrita acicular foi utilizada a metodologia proposta pelo IIW (14).



**Figura 3.8:** Posição de retirada das amostras destinadas à análise microestrutural.

### 3.4.2. Análise química

A técnica empregada na determinação da composição química dos metais de solda produzidos pelo eletrodo revestido com polímero variou em função dos elementos químicos em análise. Para determinar os teores de oxigênio e nitrogênio amostras do metal de solda foram coletadas conforme indicado na Figura 3.9. Análise destes elementos foi realizada por extração à quente através de um analisador marca Bruker, modelo G8 Galileo. ON/H. A determinação do teor dos demais elementos químicos foi realizada de maneira indireta através da composição química do metal de base, do metal de solda e diluição dos cordões de solda.

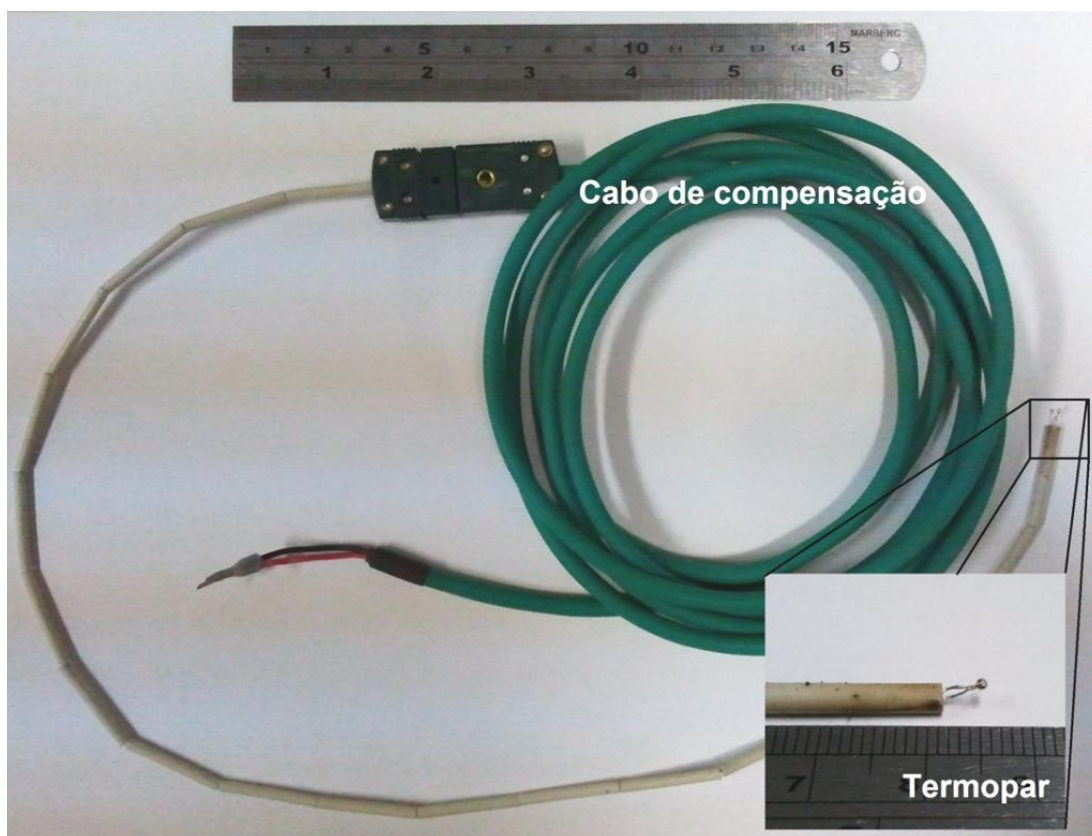


**Figura 3.9:** Posição de retirada das amostras para determinação dos teores de oxigênio e nitrogênio no metal de solda.

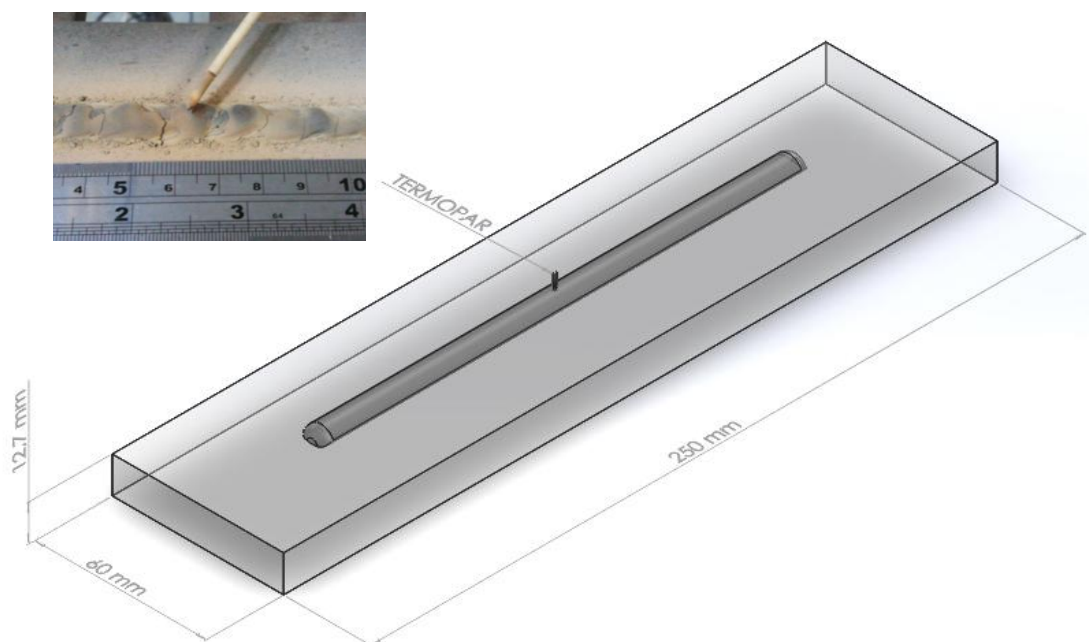
### 3.4.3. Taxa de resfriamento

A taxa de resfriamento foi obtida através do monitoramento da temperatura no metal de solda. Para tal, termopares foram inseridos na poça de fusão durante a deposição dos cordões destinados à análise microestrutural. Neste experimento foi empregado o termopar Tipo S (Platina/Rhódio) com diâmetro de 0,30mm ilustrado na Figura 3.10.

Este foi inserido manualmente na poça de fusão a 30 segundos do início da soldagem conforme indicado na Figura 3.11. Após cada experimento os fios do termopar eram cortados e novamente soldados para realização de uma nova medição. Esta operação de soldagem foi realizada pelo processo GTAW em um arco aberto sobre placa de cobre refrigerado (Figura 3.12).



**Figura 3.10:** Termopar Tipo S empregado no monitoramento da temperatura do metal de solda.



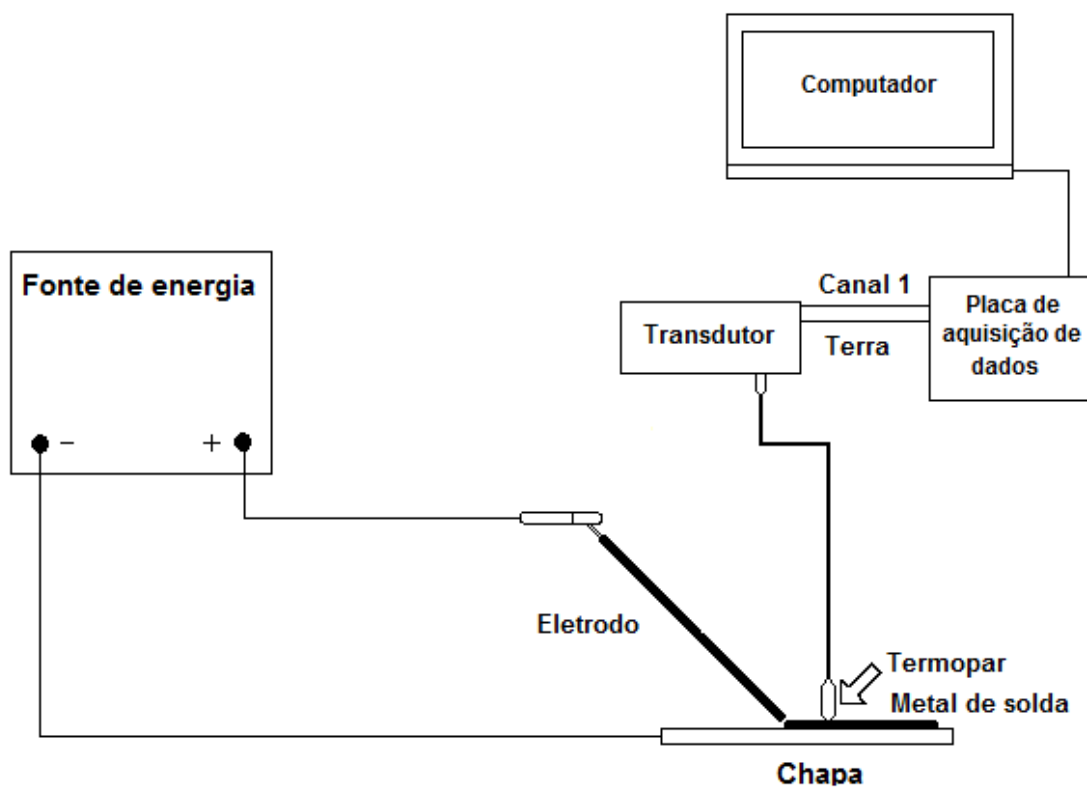
**Figura 3.11:** Posição de inserção do termopar no metal de solda.



**Figura 3.12:** Sistema empregado na soldagem dos termopares.

Para a validação do experimento amostras do cordão de solda foram cortadas, embutidas, lixadas (lixas 80, 180, 320, 400, 600, 1200), polidas com alumina de  $1\mu\text{m}$  e atacadas com Nital 5% de tal maneira que fosse possível a visualização do termopar no interior do cordão de solda.

Para capturar e armazenar os dados gerados durante o experimento foi empregado o sistema de aquisição de dados representado esquematicamente na Figura 3.13. Nesse sistema, o sinal gerado pelo termopar foi amplificado em transdutores marca Thermitrans, modelo TH30-1G e transformado em digital na placa de aquisição de dados marca Data Translation, modelo DT9816. As medidas foram realizadas a uma taxa de 100 pontos/segundo. Os dados obtidos foram tratados utilizando o programa Sinal. A calibração do sistema foi realizada conforme procedimento descrito no Anexo 8.1.



**Figura 3.13:** Representação esquemática do sistema de aquisição de dados utilizado na medição da temperatura do metal de solda.

## **4. Resultados e discussão**

### **4.1. Avaliação do metal de solda produzido pelo eletrodo aglomerado com polímero**

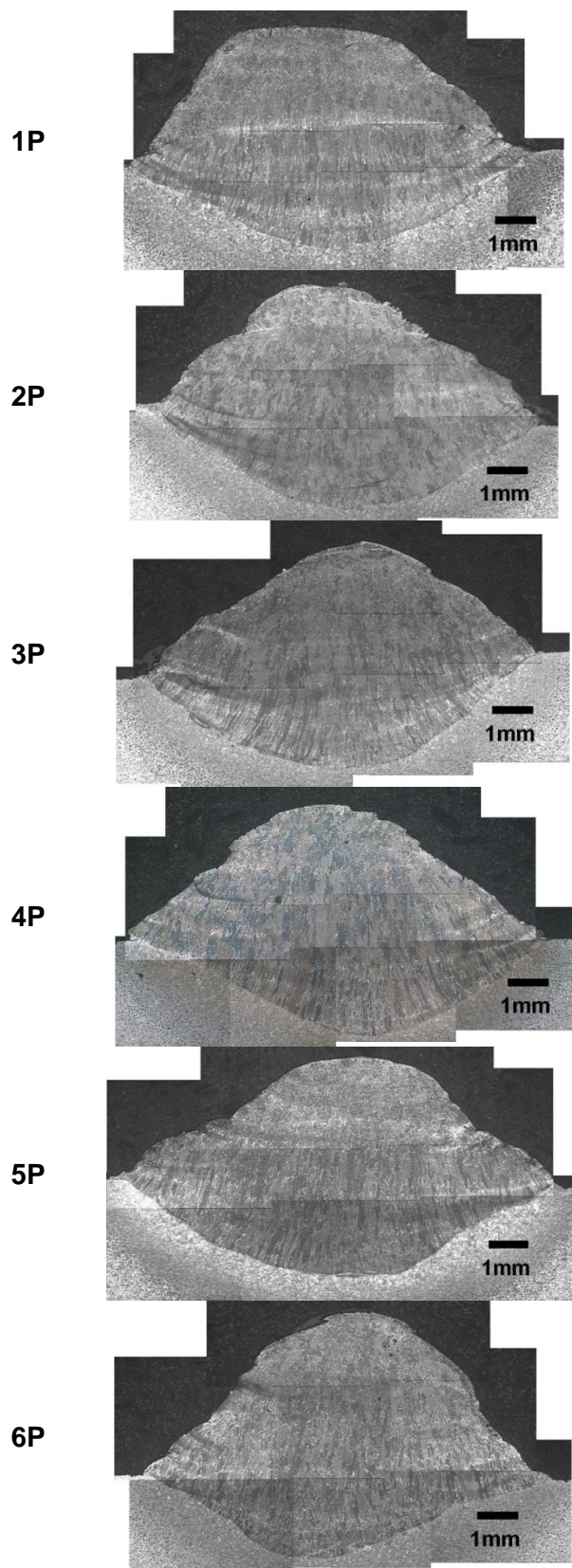
#### **4.1.1. Análise microestrutural**

Amostras retiradas dos cordões de solda foram submetidas à análise metalográfica. Na Figura 4.1 são apresentados os mosaicos montados a partir das macrografias com ampliação de 25 vezes. A análise dessas imagens mostra que os cordões apresentam perfil semelhante e indicações de crescimento epitaxial na região próxima a linha de fusão.

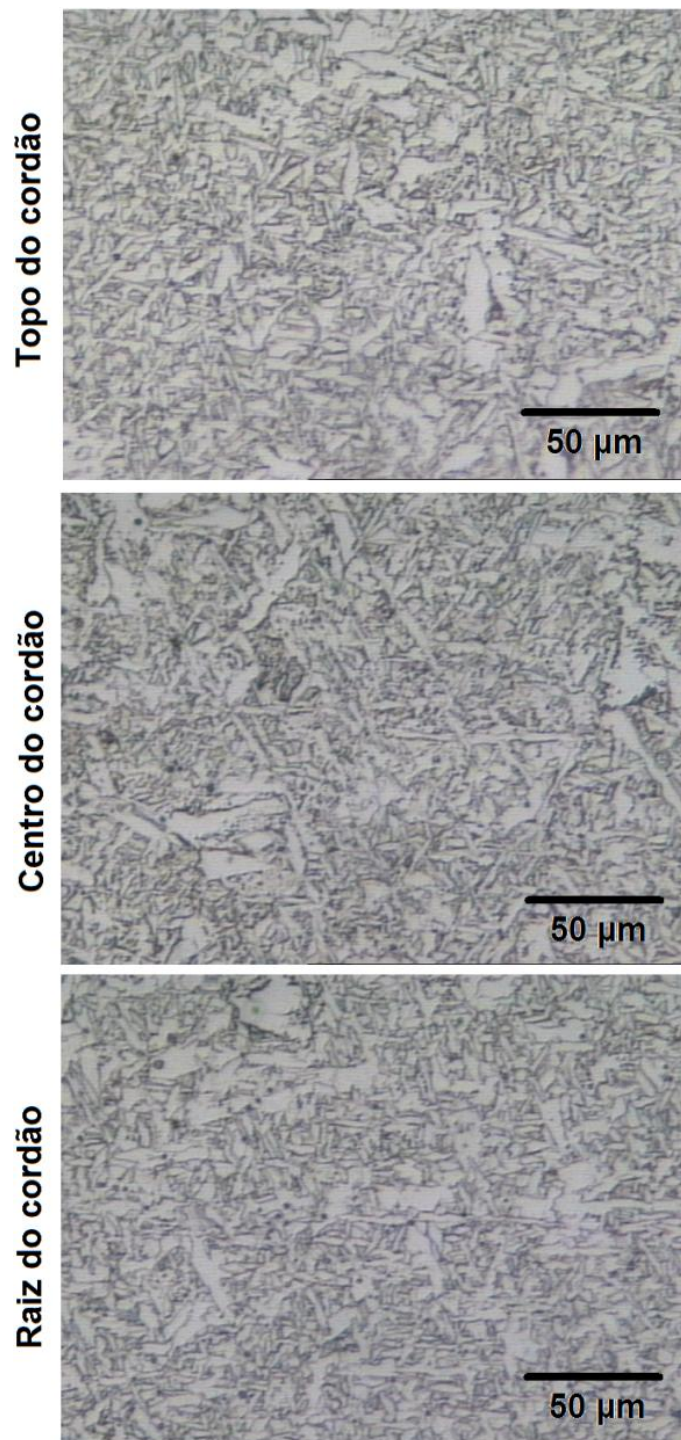
A Figura 4.2 ilustra micrografias com ampliação de 1000 vezes de três distintas regiões do cordão de uma das amostras. Imagens das demais amostras são apresentadas no Anexo 8.2. A análise qualitativa não evidencia a existência de diferenças entre as amostras e indica a predominância do constituinte ferrita acicular (AF). Observa-se também a presença de ferrita primária (PF), de segunda fase (FS) e agregado ferrita carboneto (FC) em menores quantidades.

O procedimento proposto pelo IIW (14), cujo fluxograma é apresentado no Anexo 8.3, foi utilizado para identificar e quantificar a fração volumétrica dos principais constituintes nas amostras. Oito diferentes regiões do metal de solda foram fotografadas com ampliação de 1000 vezes. Sobre cada uma das imagens foi posicionada uma malha com 100 pontos. Através da contagem dos pontos foi determinada a fração volumétrica dos constituintes AF, PF(G), PF(I), FS e FC. Na Figura 4.3 são apresentados os resultados das medidas realizadas em cada uma das amostras e as respectivas médias. Os valores encontrados confirmam as considerações realizadas na análise qualitativa, ou seja, predominância do constituinte AF nos metais de solda seguido por menores frações de PF(G) e PF(I), FS e FC. Verifica-se ainda que não há variações significativas nas quantidades dos constituintes presentes nas amostras analisadas.





**Figura 4.1:** Macrografia dos cordões de solda depositados pelo eletrodo aglomerado com polímero. Ampliação: 25 vezes.



**Figura 4.2:** Microestrutura típica do metal de solda depositado pelo eletrodo aglomerado com polímero (Amostra 3P).

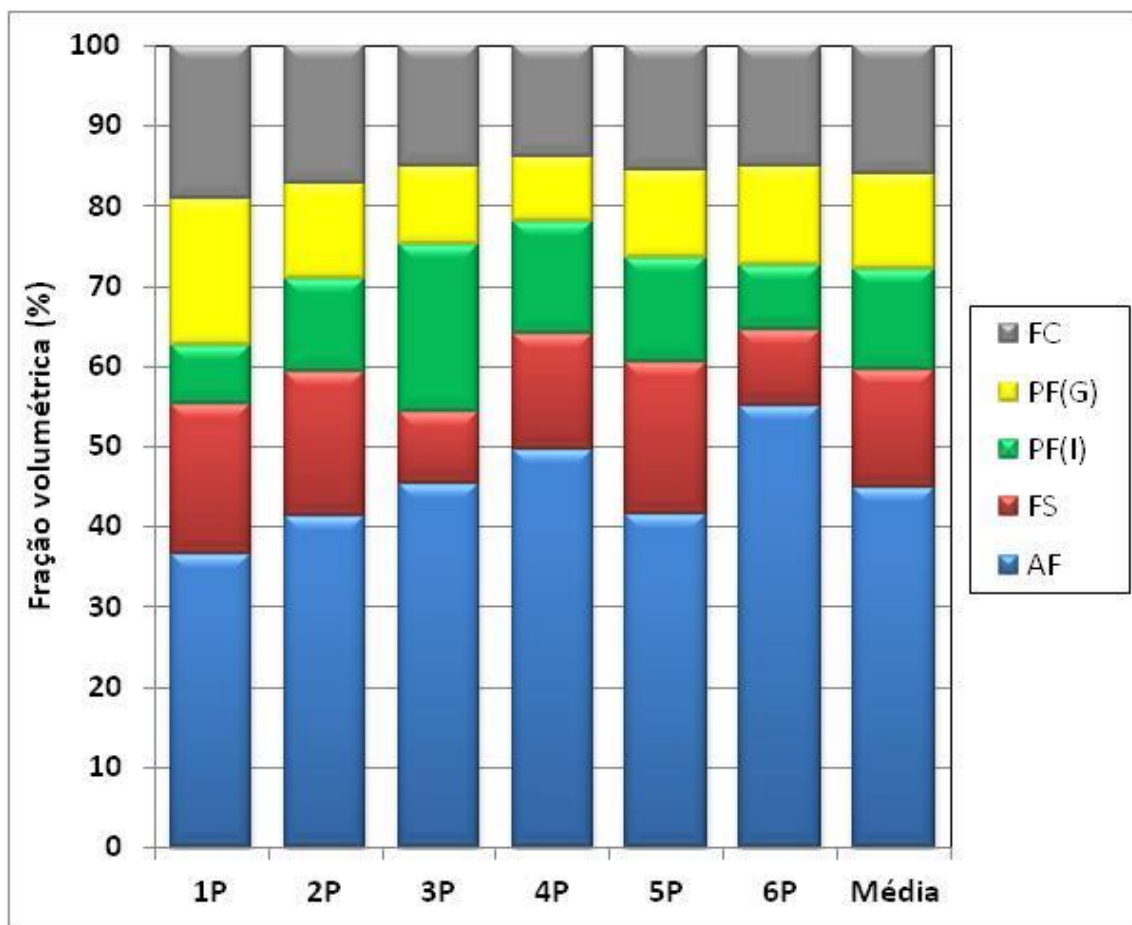


Figura 4.3: Fração volumétrica dos constituintes presentes no metal de solda.

#### 4.1.2. Composição química

Os metais de solda foram produzidos através da deposição de cordões de solda sobre chapa. A determinação de parte da composição química foi realizada partir das análises do metal de base e de solda (Tabela 3.7 e Tabela 3.4) e diluição média (Tabela 4.1). Para garantir a confiabilidade destes resultados todas as operações de soldagem foram realizadas de maneira mecanizada empregando os mesmos parâmetros. Todavia, há elementos químicos cujos teores não podem ser estimados de maneira confiável utilizando tal técnica. Eagar (12) aponta que a extensão da contaminação do metal de solda por oxigênio e nitrogênio depende do jato de plasma, composição do gás de proteção, fenômenos de absorção superficial, adição de elementos de liga, estabilidade do arco e composição do fluxo. Deste modo, os teores

de N e O foram determinados a partir de amostras retiradas de todos os cordões de solda. Na Tabela 4.2 é apresentada a composição química.

**Tabela 4.1:** Diluição ( $\delta$ ) dos cordões depositados sobre chapa (Intervalo de confiança: 95%)

Diluição (%)
44,3±2,6

**Tabela 4.2:** Composição química do metal de solda (Intervalo de confiança: 95%)

Elemento	Composição (%)
<b>C</b>	0,14±0,03
<b>Si</b>	0,32±0,03
<b>Mn</b>	0,59±0,04
<b>P</b>	0,029±0,010
<b>S</b>	0,013±0,003
<b>Cr</b>	0,068±0,006
<b>Ni</b>	0,010±0,007
<b>Mo</b>	0,007±0,007
<b>V</b>	0,005±0,002
<b>Al(*)</b>	285±49
<b>Ti(*)</b>	84±69
<b>B(*)</b>	22+3
<b>O(*)</b>	397±59
<b>N(*)</b>	57±13

(\*) ppm

#### 4.1.3. Condições de soldagem

As condições empregadas na produção dos metais de solda foram monitoradas. Dados de tensão e corrente coletados durante a deposição de cordões de solda foram utilizados para determinar a energia de soldagem (Tabela 4.3). No

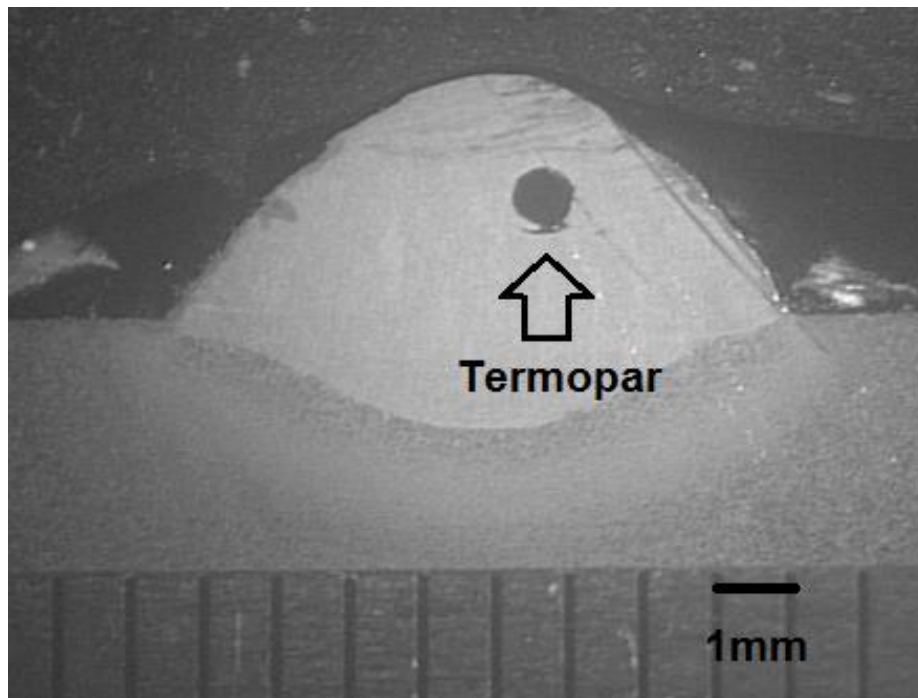
cálculo desta variável foi utilizada a média do produto entre a tensão e corrente instantâneas.

**Tabela 4.3:** Energia de soldagem (HI) empregada na obtenção dos metais de solda (Intervalo de confiança: 95%).

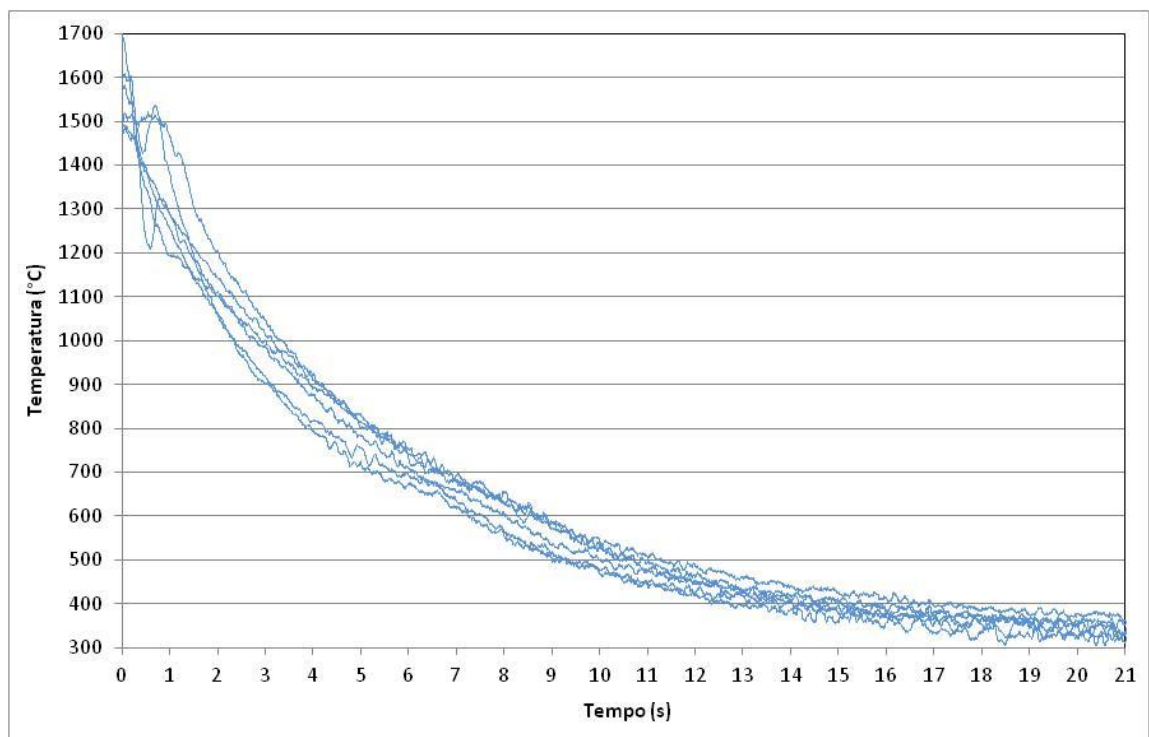
Energia de soldagem (kJ/mm)
0,85±0,13

A avaliação da taxa de resfriamento foi realizada através do monitoramento da temperatura no metal de solda. Os valores de tensão gerados pelo termopar inserido na poça de fusão durante o experimento foram convertidos em temperatura. O ruído foi eliminado utilizando um filtro matemático do tipo passa baixa onde o ponto do sinal foi substituído pela média simples dos 20 valores vizinhos. Na validação deste experimento foram retiradas amostras da seção transversal dos cordões. Após embutidas, essas foram lixadas, polidas e atacadas para permitir a localização do termopar no interior do cordão de solda conforme ilustrado na Figura 4.4.

O gráfico de temperatura em função do tempo resultante do procedimento descrito acima é apresentado na Figura 4.5. A avaliação das curvas indica que as amostras apresentam comportamento similar. A presença de distúrbios para valores elevados de temperatura elevados pode ser justificada pela inserção manual do termopar. A ocorrência de ligeira redução na taxa de resfriamento entre as temperaturas de 700 e 600°C pode ser associada à transformação de fase. Contudo, esta hipótese só pode ser confirmada pela realização de ensaio dilatométrico em corpos de prova do metal de solda simulando o ciclo térmico de soldagem.



**Figura 4.4:** Macrografia do metal de solda indicando a posição do termopar.



**Figura 4.5:** Temperatura no metal de solda.

O tempo necessário para resfriamento entre 800° e 500°C ( $\Delta t_{8-5}$ ), calculado a partir dos dados coletados, foi utilizado como índice para quantificar a taxa de resfriamento dos metais de solda. Na Tabela 4.4 são apresentados o valor médio e a incerteza para as amostras desse estudo.

**Tabela 4.4:**  $\Delta t_{8-5}$  dos metais de solda produzidos (Intervalo de confiança: 95%)

$\Delta t_{8-5}$ (s)
5,5±1,1

## 4.2. Comparação entre a microestrutura obtida e a prevista pela literatura

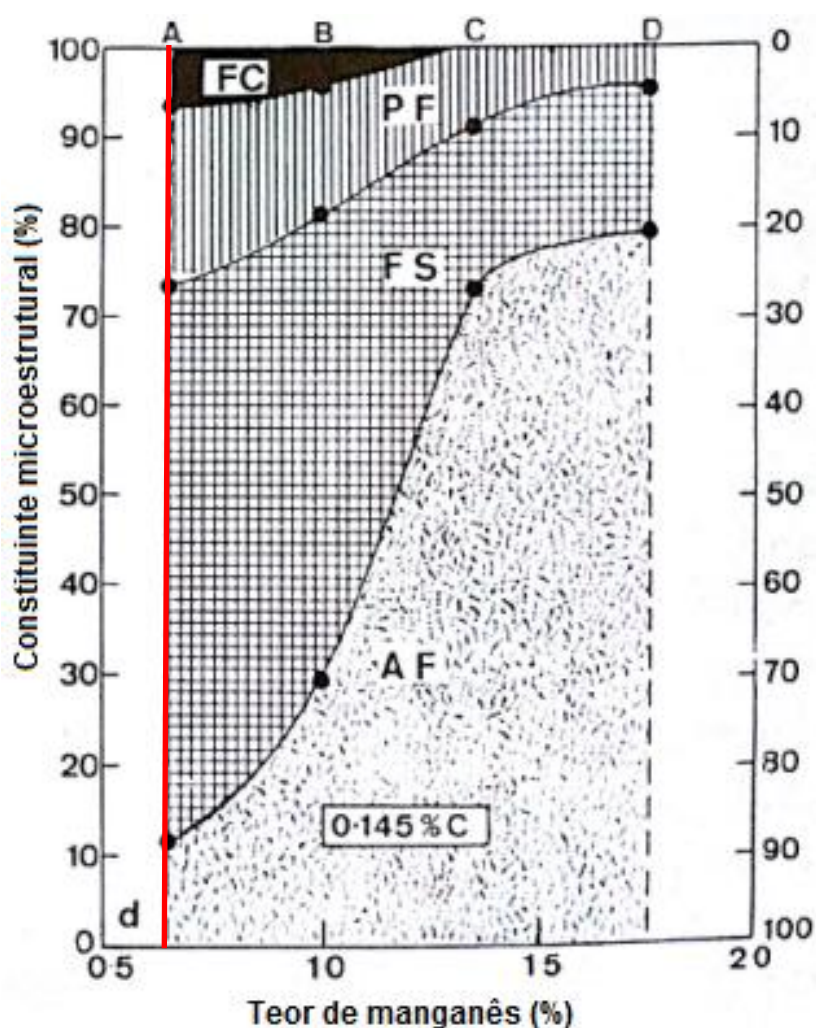
O eletrodo investigado nesse estudo apresenta características singulares que o torna diferente dos demais existentes no mercado. Como sua fórmula base (Tabela 3.2) é a mesma de um eletrodo classe E7018, o ponto de partida para verificar a influência do polímero sobre a microestrutura é a realização de um estudo comparativo com o metal de solda produzido por este consumível.

Evans, em conjunto com Bailey, documenta a consolidação de seu sistemático estudo sobre as propriedades mecânicas e microestrutura de metais de solda ferríticos obtidos pela soldagem com eletrodos revestidos básicos (58). Nesta publicação os autores apresentam as características de metais de solda com diferentes teores de manganês (A:0,60%; B:1,0%; C:1,3% e D:1,7%) e carbono (de 0,4% a 0,15%). Na Tabela 4.5 são listados os teores de carbono, silício e manganês do metal de solda produzido pelo eletrodo aglomerado com polímero e de um dos avaliados por Evans e Bailey que possui composição similar (eletrodo A com 0,145% de carbono).

**Tabela 4.5:** Teores de carbono, silício e manganês presentes nos metais de solda.

Elemento	Composição (%)	
	Eletrodo com polímero	Eletrodo A com 0,145%C
C	0,14±0,03	0,145
Si	0,32±0,03	0,40
Mn	0,59±0,04	0,63

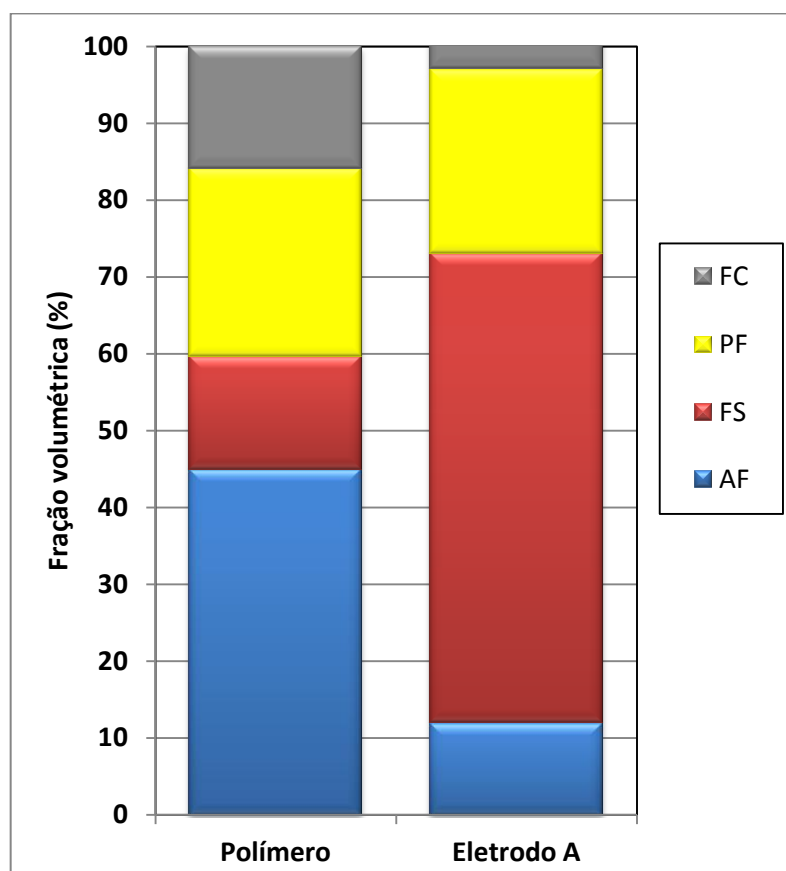
Na Figura 4.6 é apresentado o efeito do teor de manganês sobre a fração volumétrica dos constituintes em metais de solda com 0,145%. Neste gráfico pode-se visualizar (linha vertical vermelha) a fração volumétrica dos constituintes presentes no metal de solda A com 0,145%. Nota-se, neste, a predominância de ferrita de segunda fase (FS) seguido por ferrita primária (PF), acicular (AF) e agregado ferrita carboneto (FC).



**Figura 4.6:** Efeito do teor de manganês sobre a fração volumétrica dos constituintes em metais de solda produzidos por eletrodos revestidos básicos com 0,145% de carbono. Fonte: Evans e Bailey (58).



No gráfico apresentado na Figura 4.7 são apresentadas as frações volumétricas dos constituintes presentes nos metais de solda produzidos pelo eletrodo aglomerado com polímero e pelo eletrodo revestido básico com composição semelhante produzido por Evans e Bailey (58). É possível verificar substancial diferença nas quantidades de ferrita acicular e de segunda fase sendo que, no eletrodo com polímero, há predominância do primeiro constituinte.



**Figura 4.7:** Comparação entre as frações volumétricas dos constituintes presentes no metal de solda produzido pelo eletrodo aglomerado com polímero e pelo Eletrodo A com 0,145% de carbono do estudo de Evans e Bailey (58).

As diferenças microestruturais relatadas podem ser influenciadas por condições de soldagem que modificam o ciclo térmico. Na Tabela 4.6 são apresentados os diâmetros dos consumíveis, energia de soldagem e tempo de resfriamento entre 800 e 500°C utilizados na produção dos metais de solda

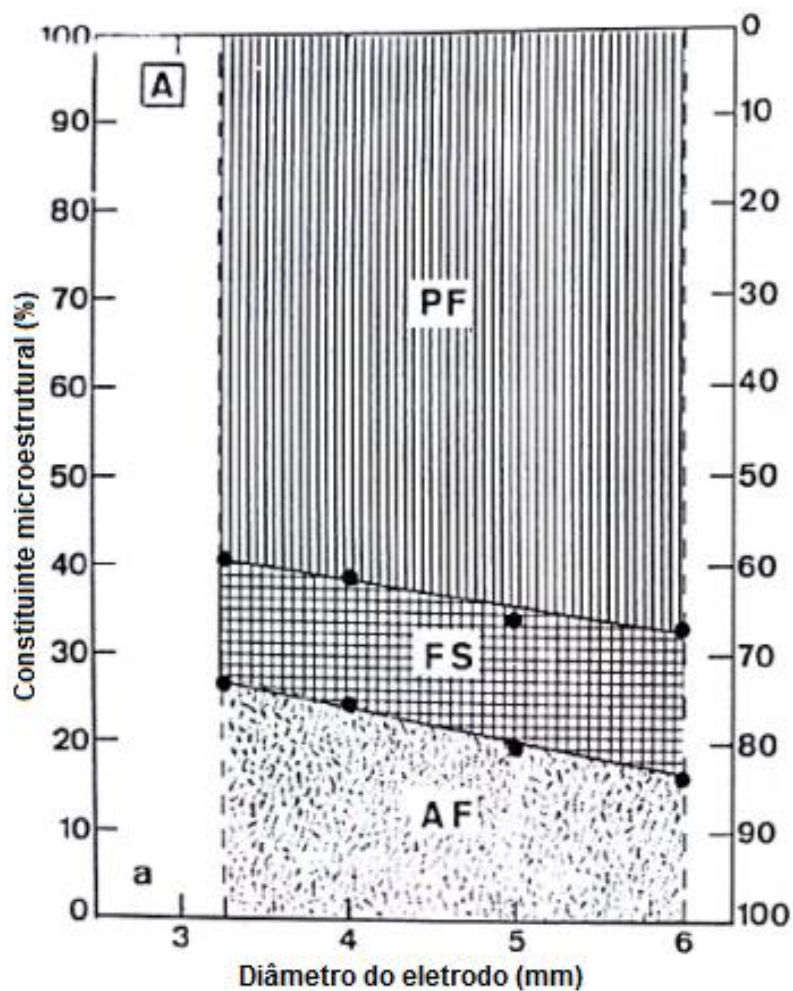
comparados. Como há diferenças entre estas variáveis é necessário avaliar o impacto de cada uma sobre a microestrutura resultante.

**Tabela 4.6:** Condições de soldagem utilizadas na obtenção dos metais de solda depositados pelo eletrodo com polímero e pelo Eletrodo A com 0,145% de carbono do trabalho de Evans e Bailey (58).

	<b>Eletrodo com polímero</b>	<b>Eletrodo A com 0,145%C</b>
<b>Revestimento</b>	Básico com 25% de pó de ferro	
<b>Diâmetro</b>	3,25	4,0
<b>HI (kJ/mm)</b>	0,85±0,13	1,1
<b><math>\Delta T_{8-5}</math> (s)</b>	5,5±1,23	7,0

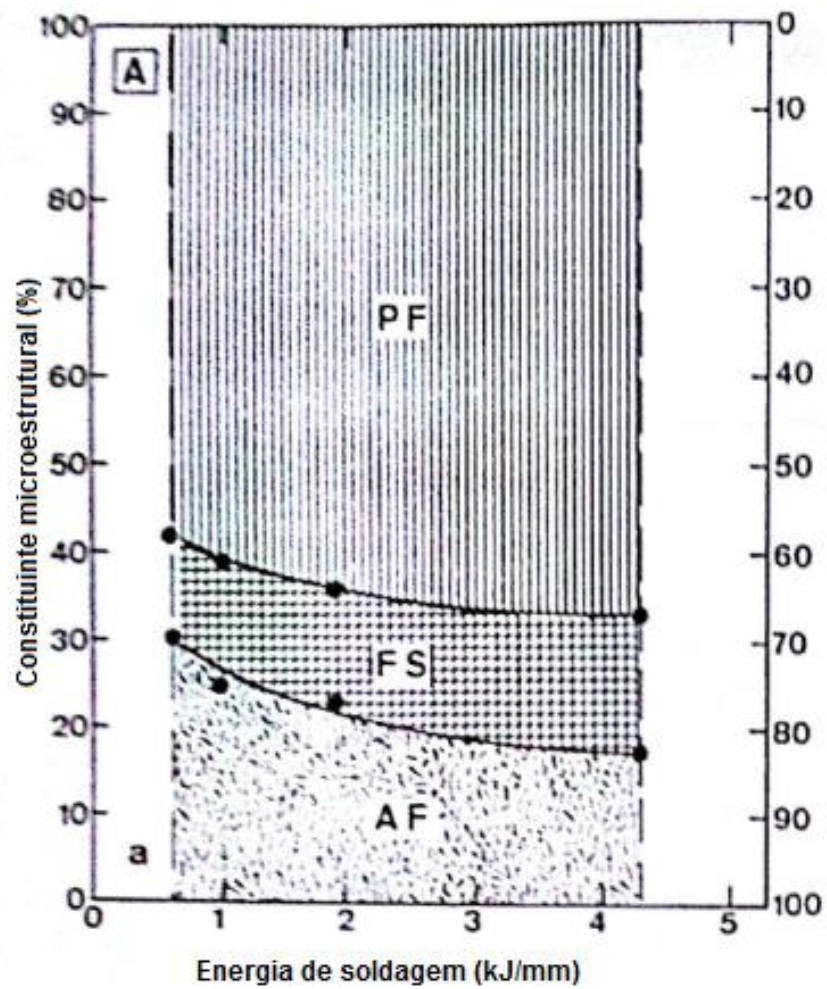
Evans e Bailey (58) discutem o efeito das condições de soldagem mencionadas sobre a microestrutura do metal de solda. Entretanto, este estudo é realizado para metais de solda com baixos teores de carbono (0,045%) e diferentes quantidades de manganês (A, B, C e D). Os resultados dessa análise sobre a microestrutura do produzida pelo eletrodo A com baixo teor de carbono é mostrado nas Figura 4.8, Figura 4.9 e Figura 4.10. Por se tratar de um metal com diferente teor de carbono estes gráficos somente podem ser utilizados na avaliação de tendências resultantes das alterações nas condições de soldagem.

A redução no diâmetro do eletrodo de 4,0 para 3,25mm proporciona, segundo Evans e Bailey (58), um ligeiro aumento na fração de ferrita acicular acompanhado pela redução na quantidade de ferrita primária. Não é observada variação na quantidade de ferrita de segunda fase. O mesmo comportamento é observado em decorrência da redução na energia de soldagem (HI) e aumento no tempo de resfriamento entre 800 e 500°C ( $\Delta T_{8-5}$ ). Segundo os autores, metais de solda com diferentes teores de manganês apresentam comportamento semelhante com a modificação dessas variáveis. Mesmo favorecendo a formação de ferrita acicular no metal de solda as diferenças nas condições de soldagem não justificam o aumento de 33% na quantidade deste constituinte e, principalmente, a redução de 66% na fração volumétrica de ferrita de segunda fase.



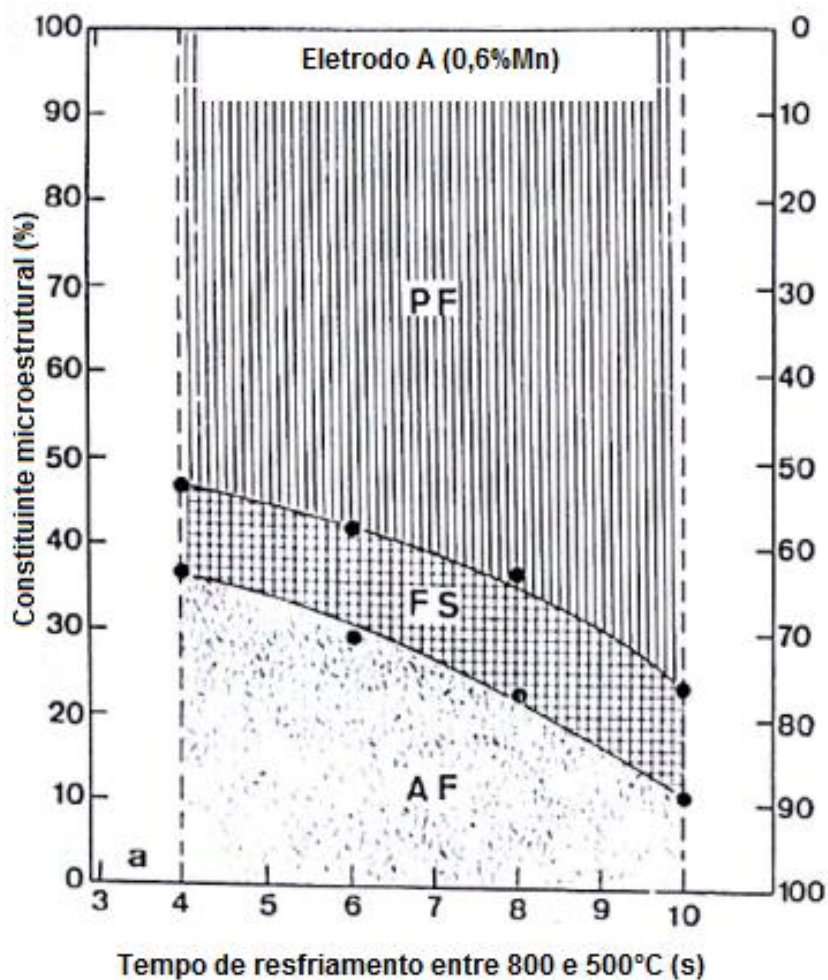
**Figura 4.8:** Influência do diâmetro do eletrodo sobre a fração volumétrica dos constituintes no metal de solda produzido pelo Eletrodo A com 0,045% de carbono.

Fonte: Evans e Bailey (58).



**Figura 4.9:** Influência da energia de soldagem sobre a fração volumétrica dos constituintes no metal de solda produzido pelo Eletrodo A com 0,045% de carbono.

Fonte: Evans e Bailey (58)



**Figura 4.10:** Influência da taxa de resfriamento sobre a fração volumétrica dos constituintes no metal de solda produzido pelo Eletrodo A com 0,045% de carbono.

Fonte: Evans e Bailey (58).

### 4.3. Investigação das variáveis responsáveis pelas diferenças microestruturais

As diferenças microestruturais observadas não podem ser justificadas pela variação nos parâmetros utilizados na obtenção dos metais de solda. Como estes apresentam teores semelhantes de carbono, silício e manganês, é necessário investigar a influência dos elementos químicos residuais. Na Tabela 4.7 são

apresentadas as quantidades de alumínio, titânio, boro, oxigênio e nitrogênio presentes.

**Tabela 4.7:** Teores de elementos químicos residuais presentes nos metais de solda produzidos pelo eletrodo aglomerado com polímero (Intervalo de confiança: 95%) e básico convencional do estudo de Evans e Bailey (58).

Elemento	Composição (ppm)	
	Eletrodo com polímero	Eletrodo A com 0,145%C
Al	285±49	5
Ti	84±69	55
B	22±3	2
O	397±59	490
N	57±13	83*

(\*)Menor teor encontrado entre os metais de solda “padrão” estudados por Evans e Bailey

Os elementos químicos alumínio, titânio, boro e nitrogênio apresentam forte relação de dependência entre si (43) (45) (50). Ao estudar, de modo isolado, a influência do alumínio sobre a microestrutura e propriedades de metais de solda com 40ppm de titânio Evans (41) não observa variações significativas na microestrutura para teores de 5 e 285ppm (Figura 2.17). O mesmo comportamento é observado para metais de solda com 220ppm de titânio.

Evans (58) relata que o oxigênio atua de modo indireto sobre a microestrutura de metais de solda como formador de inclusões de escória. Contudo, os teores observados nos metais de solda comparados (397 e 490ppm) são suficientes para garantir a densidade de inclusões adequada à nucleação da ferrita acicular.

Apesar da variação observada nos teores de alumínio e oxigênio dos metais de solda não apresentarem, com base em informações da literatura, relação direta com as diferenças microestruturais, não há como desprezar sua influência. Isso ocorre porque a presença e quantidade destes elementos no metal de solda afetam as inclusões de escória formadas.

O titânio é apontado na literatura como um forte agente na formação de ferrita acicular. Evans (42) verifica um aumento significativo na fração volumétrica desse constituinte em metais de solda com adição de até 10ppm de titânio (Figura 2.16). Para valores entre 10 e 100ppm o autor observa redução na quantidade do constituinte que, para concentrações superiores, aumenta novamente. Assim, na faixa em que se encontram os teores de titânio das amostras comparadas (85 e 55ppm), um aumento na quantidade desse elemento resulta em redução na fração volumétrica de ferrita acicular.

Evans (45) mostra que, na presença de diferentes teores de titânio, o aumento no teor de boro a partir de quantidades residuais proporciona aumento na fração volumétrica de ferrita acicular. Comportamento semelhante é relatado por Bhadeshia e Svensson (44) ao estudar metais de solda variando somente o teor desse elemento químico de 1 a 65ppm. Diferente do que se podia imaginar, o metal de solda do eletrodo aglomerado com polímero apresenta pequenas quantidades de boro. Assim, é razoável apontar esse elemento como um dos responsáveis pelas diferenças microestruturais observadas.

O nitrogênio, na presença de titânio e boro, é apontado na literatura como responsável por alterações microestruturais (44). Conforme relatado por Lau et al (52), em metais de solda contendo Ti e B, é observada uma redução na fração volumétrica de ferrita acicular para teores de nitrogênio acima de 70ppm. Assim, o teor médio de nitrogênio dos metais de solda produzidos pelo eletrodo com polímero durante os experimentos (57ppm) pode justificar as microestruturas obtidas.

Bhadeshia e Svensson (44) relatam que os teores de nitrogênio normalmente encontrados em metais de solda ferríticos não tem efeito sobre a termodinâmica da transformação austenita ( $\delta$ )  $\rightarrow$  ferrita ( $\alpha$ ), mas sobre a cinética através da interação com inclusões. O principal mecanismo proposto para explicar o efeito conjunto do nitrogênio, boro e titânio sobre a microestrutura aponta a sequência de reações entre o titânio e boro com nitrogênio e oxigênio. Uma condição para a formação da ferrita acicular é a permanência do boro em solução sólida. Esse elemento torna os sítios de nucleação nos contornos de grão austeníticos ineficientes e permite a formação da ferrita acicular.

#### 4.4. Influência do polímero sobre os teores de nitrogênio e boro

Conforme relatado há evidências de que o boro e, principalmente, o nitrogênio são os responsáveis pelas diferenças entre a microestrutura observada e prevista. A partir dessa constatação é necessário investigar o papel desempenhado pelo polímero sobre os teores desses elementos.

##### 4.4.1. O boro

Revisando a fórmula do eletrodo aglomerado com polímero é possível verificar a presença de silicatos com adição de óxido de boro ( $B_2O_3$ ). Essa matéria prima é acionada com a finalidade de suprir algumas das funções do silicato aglomerante. A presença do boro nos resultados das análises químicas indica que houve transferência para o metal de solda. Como consequência, não há como estabelecer uma relação direta entre a presença desse elemento químico no metal de solda e o polímero utilizado.

##### 4.4.2. O nitrogênio

Eagar (12) aponta duas fontes principais de nitrogênio em metais de solda: absorção da atmosfera ou reação com fluxos presentes no processo. O eletrodo revestido utilizado nesse estudo não apresenta matérias primas com adição desse elemento em seu revestimento. Outra possível fonte de nitrogênio seria a alma do eletrodo. Durante a caracterização do consumível aglomerado com polímero foi realizada a análise química da alma. O valor de nitrogênio medido (Tabela 4.8) confirma o aumento na concentração deste elemento durante a soldagem.

**Tabela 4.8:** Teor de nitrogênio na alma do eletrodo com polímero (Intervalo de confiança; 95%)

Teor de nitrogênio (ppm)
45±2



Para compreender como o polímero proporciona a obtenção de um metal de solda com baixos teores de nitrogênio é necessário investigar a influencia deste sobre as características operacionais do eletrodo.

#### **4.5. Influência do polímero sobre as características operacionais do eletrodo**

Nesta etapa do estudo foram utilizados eletrodos classe E7018 comerciais e aglomerados com polímero. Experimentos foram realizados com o objetivo de avaliar o perfil dos cordões de solda, monitorar a tensão e corrente de soldagem, avaliar a fusão do eletrodo, coletar e avaliar gotas formadas com a fusão dos eletrodos e investigar as escórias produzidas. A partir dos resultados obtidos foi proposto um modelo para explicar como o polímero interfere nessas condições e reduz a absorção de nitrogênio pelo metal de solda.

##### **4.5.1. Avaliação do perfil dos cordões de solda**

Seis cordões de solda foram depositados de maneira mecanizada sobre chapa empregando cada um dos eletrodos. Na Tabela 4.9 são apresentados os valores médios de penetração (P), reforço (R) e largura (L) medidos. A diluição ( $\delta$ ) média calculada pela Equação 3.4 também é apresentada.

Os dados apresentados mostram que a largura e o reforço dos cordões de solda produzidos pelos eletrodos não sofrem variação. Por outro lado, os cordões de solda depositados pelo eletrodo com polímero apresentam maior penetração. Tal fato resulta no aumento da diluição e pode ser justificado por diferentes energias de soldagem. Na Tabela 4.10 são apresentados os valores médios das taxas de fusão ( $T_f$ ), deposição ( $T_d$ ), velocidade de soldagem ( $V_s$ ), energia de soldagem (HI) e densidade de corrente ( $d_c$ ) calculados durante o experimento.

**Tabela 4.9:** Largura (L), reforço (R), penetração (P) e diluição( $\delta$ ) dos cordões depositados com os eletrodos (Intervalo de confiança: 95%).

	<b>E7018</b>	<b>Polímero</b>
<b>L (mm)</b>	8,8±1,3	8,9±0,8
<b>R (mm)</b>	2,9±0,6	2,9±0,5
<b>P (mm)</b>	1,4±0,2	2,2±0,1
<b><math>\delta</math> (%)</b>	29,9±5,1	44,3±2,6

**Tabela 4.10:** Taxas de fusão ( $T_f$ ), deposição( $T_d$ ), energia de soldagem (HI) e densidade de corrente ( $d_c$ ) médias dos cordões de solda (Intervalo de confiança: 95%).

	<b>E7018</b>	<b>Polímero</b>
<b><math>T_f</math> (kg/h)</b>	1,6±0,1	1,9±0,1
<b><math>T_d</math> (kg/h)</b>	1,1±0,1	1,3±0,1
<b><math>V_s</math> (mm/s)</b>	2,5±0,1	2,9±0,1
<b>HI (kJ/mm)</b>	0,85±0,14	0,85±0,13
<b><math>d_c</math> (A/mm<sup>2</sup>)</b>	3,4±0,4	3,3±0,1

As medições realizadas não mostram diferenças entre os valores de energia de soldagem para os cordões depositados com os eletrodos. Assim, tal fenômeno pode ser associado ao polímero utilizado como aglomerante, o PTFE, cuja molécula é constituída por átomos de carbono e flúor.

Uma das hipóteses envolve a extrapolação de fenômenos observados em outro processo de soldagem ao arco elétrico. Estudos realizados na soldagem GTAW (TIG) com adição de fluxos ativos, conhecida como A-TIG, relatam aumento significativo na penetração do cordão de solda em comparação a situações onde esses compostos não utilizados (59). Modenesi (60), em uma revisão sobre o tema, relata os diferentes mecanismos apontados na literatura como sendo responsáveis por esse fenômeno. O autor relata, em suas considerações, que nenhum mecanismo parece ser aplicável de maneira isolada em todas as situações. Contudo, merece destaque o modelo proposto por Howse e Lucas (61) que aponta a contração do arco elétrico pela presença de elementos eletronegativos como responsável pelo aumento de penetração.

Outra hipótese envolve a comparação com características observadas na soldagem com eletrodos celulósicos. Os gases resultantes da decomposição do polímero podem estar aumentando a força do jato de plasma e proporcionando maior penetração. Tal possibilidade deve ser avaliada com cautela pois, segundo Bonizewski (62), a força do jato de plasma se deve ao hidrogênio presente na celulose.

É importante observar também que a taxa de fusão na soldagem com o eletrodo com polímero foi superior. Os valores de densidade de corrente medidos (Tabela 4.10) não justificam tal observação. Na formulação dos eletrodos utilizados na comparação a quantidade de compostos com ferro metálico no revestimento não varia. A razão entre as áreas da seção transversal do revestimento e alma ( $R_{\emptyset}$ ) calculada pela Equação 4.1 também não sofre variação (Tabela 4.11). Tais observações indicam que o aumento na taxa de fusão também pode estar associada a alterações no arco elétrico promovidas pelo polímero.

**Equação 4.1** 
$$R_{\emptyset} = \frac{(D^2 - d^2)}{d^2} \times 100$$

**Tabela 4.11** : Razão entre as áreas do revestimento e alma do eletrodo (Intervalo de confiança: 95%)

<b>E7018</b>	<b>Polímero</b>
207,2±6,2	204,4±8,6

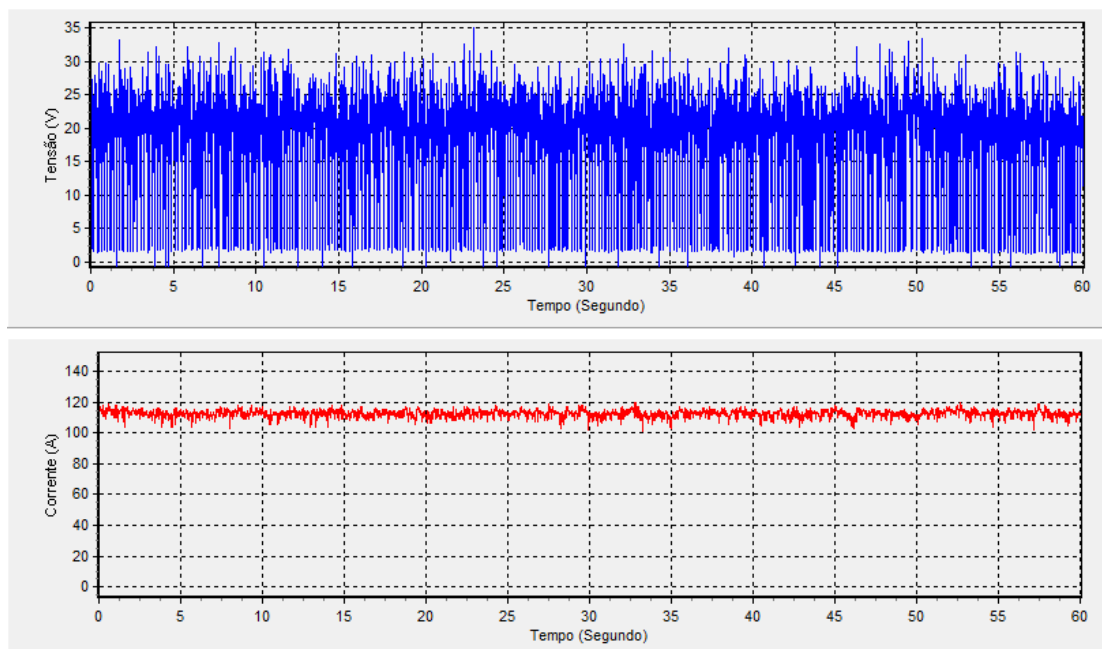
Nos experimentos realizados, o aumento da taxa de fusão não resultou em aumento da largura e reforço dos cordões. No sistema de soldagem por arraste, mantendo os ângulos da haste e de ataque do eletrodo constantes, o aumento na taxa de fusão é compensado pelo aumento na velocidade de soldagem conforme indicado na Tabela 4.10.

#### 4.5.2. Monitoramento da tensão e corrente de soldagem

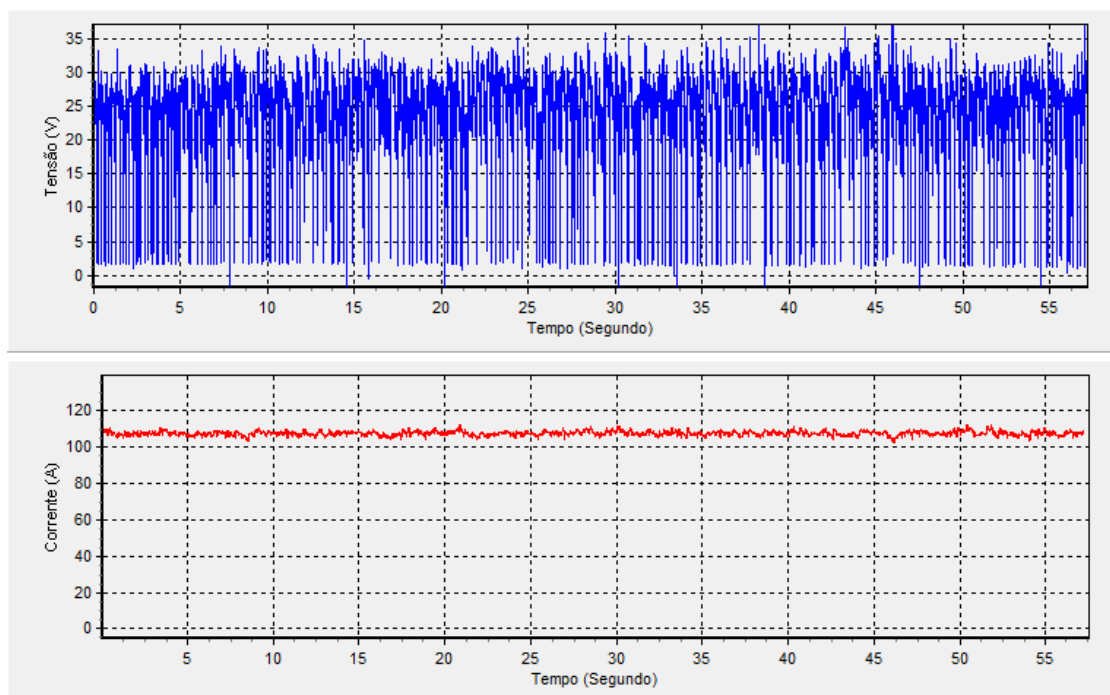
Tensão e corrente de soldagem foram monitoradas durante a deposição dos cordões de solda sobre chapa conforme descrito na metodologia. Nas Figura 4.11 e Figura 4.12 são apresentados exemplos dos oscilogramas gerados a partir do sinal coletado na soldagem com os eletrodos E7018 e aglomerado com polímero.

É possível observar a ocorrência de curtos circuitos na soldagem com ambos os eletrodos. Tal comportamento é relatado por Brandi et al (4) como sendo comum na soldagem com eletrodos revestidos básicos onde há predomínio da transferência por curto circuito explosiva.

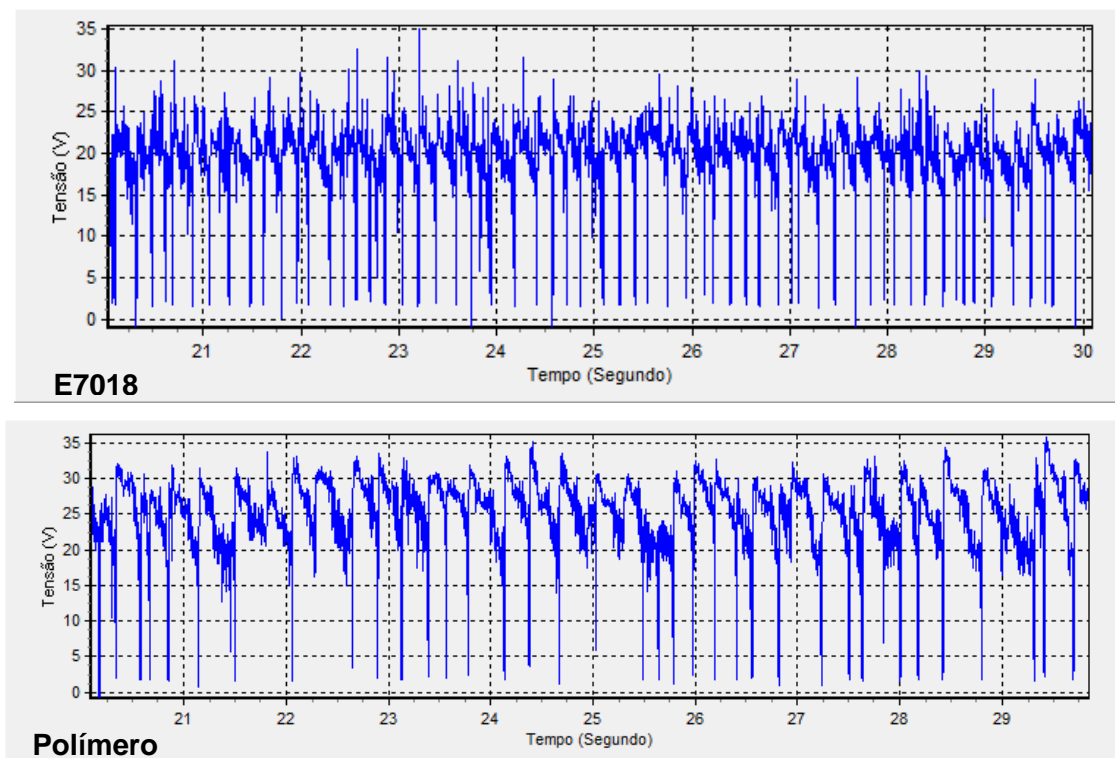
Para permitir uma melhor visualização dos sinais de tensão coletados, são apresentados na Figura 4.13 os oscilogramas de tensão correspondentes ao intervalo entre 20 e 30s de coleta. A análise desses gráficos indica uma aparente diferença na frequência de curtos entre os eletrodos.



**Figura 4.11:** Oscilogramas de tensão e corrente típicos obtidos durante a soldagem do eletrodo E7018.

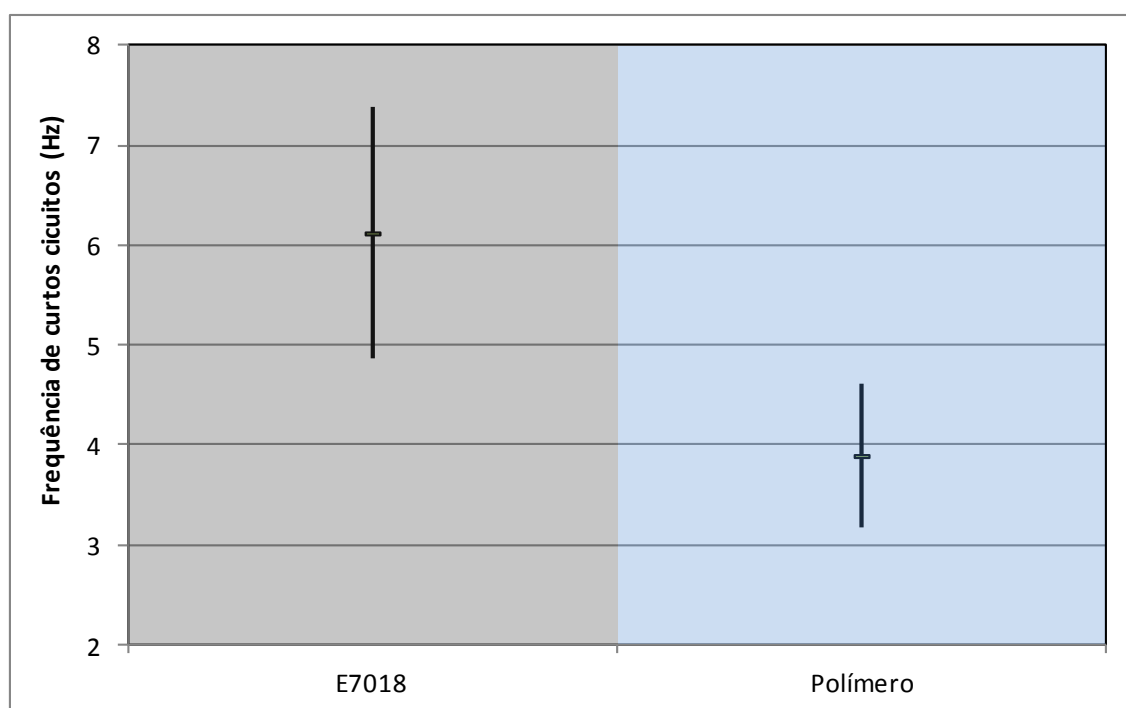


**Figura 4.12:** Oscilogramas de tensão e corrente típicos obtidos durante a soldagem do eletrodo com polímero.



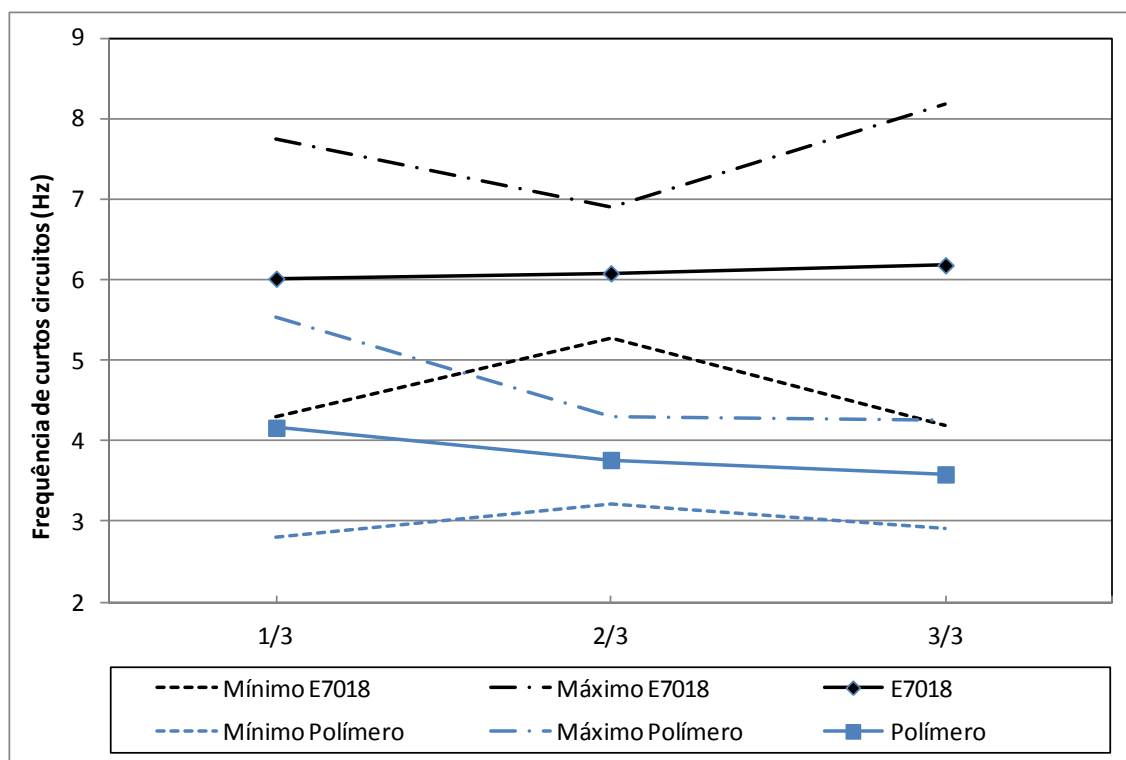
**Figura 4.13:** Sinais de tensão coletados no intervalo entre 20 e 30s de coleta.

Com o objetivo de confirmar esta observação foi calculada a frequência média de curtos circuitos na soldagem com cada um dos eletrodos. A tensão de 5V foi utilizada como critério para definição do curto circuito. Os resultados são apresentados na Figura 4.14 e mostram que na soldagem do eletrodo aglomerado com polímero há, em média, um menor número de curtos circuitos por unidade de tempo.



**Figura 4.14:** Frequência de curtos circuitos na soldagem com os eletrodos (Intervalo de confiança: 95%).

Na Figura 4.15 são apresentados valores médios da frequência de curtos circuitos para três diferentes intervalos de tempo. Os resultados mostram que as variações não são significativas e se encontram dentro do intervalo de confiança de 95% para a média da amostra. Assim, não é possível estabelecer relação direta entre a frequência de curtos circuitos e o aquecimento do eletrodo ou justificar a diferença na frequência média global como consequência de uma mudança no comportamento do eletrodo ao longo da soldagem.



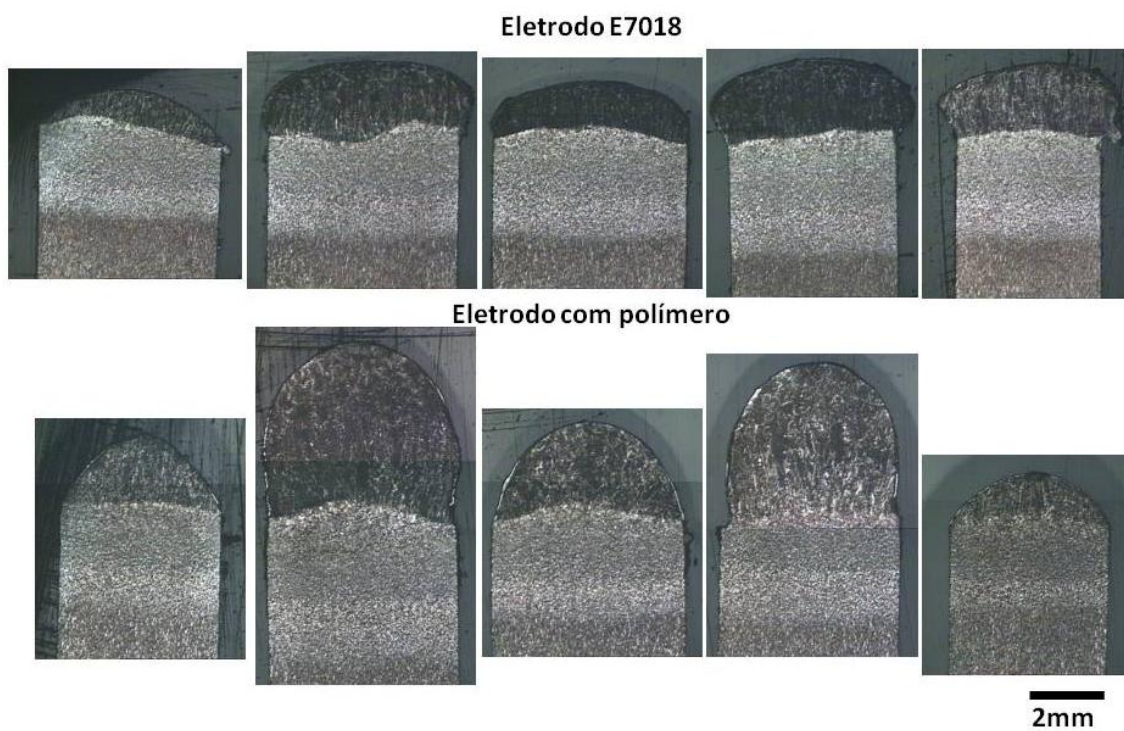
**Figura 4.15:** Frequência de curtos circuitos para 1/3, 2/3 e 3/3 do tempo total de soldagem (Intervalo de confiança: 95%).

#### 4.5.3. Formação das gotas na ponta do eletrodo

Amostras das pontas dos eletrodos obtidas pela interrupção abrupta da soldagem são apresentadas na Figura 4.16. Nota-se a presença de gotas em diferentes estágios de formação. Apesar disso, há uma característica comum às amostras de cada um dos eletrodos estudados: a forma dessas gotas. As macrografias da seção longitudinal mostradas na Figura 4.17 permitem a melhor visualização dessa característica. Gotas formadas na fusão do eletrodo E7018 apresentam um perfil achatado quando comparadas às do eletrodo aglomerado com polímero.



**Figura 4.16:** Gotas formadas na ponta dos eletrodos obtidas através da interrupção abrupta da soldagem a 30s do início.



**Figura 4.17:** Macrografia das pontas dos eletrodos revestidos (Ampliação: 25x)

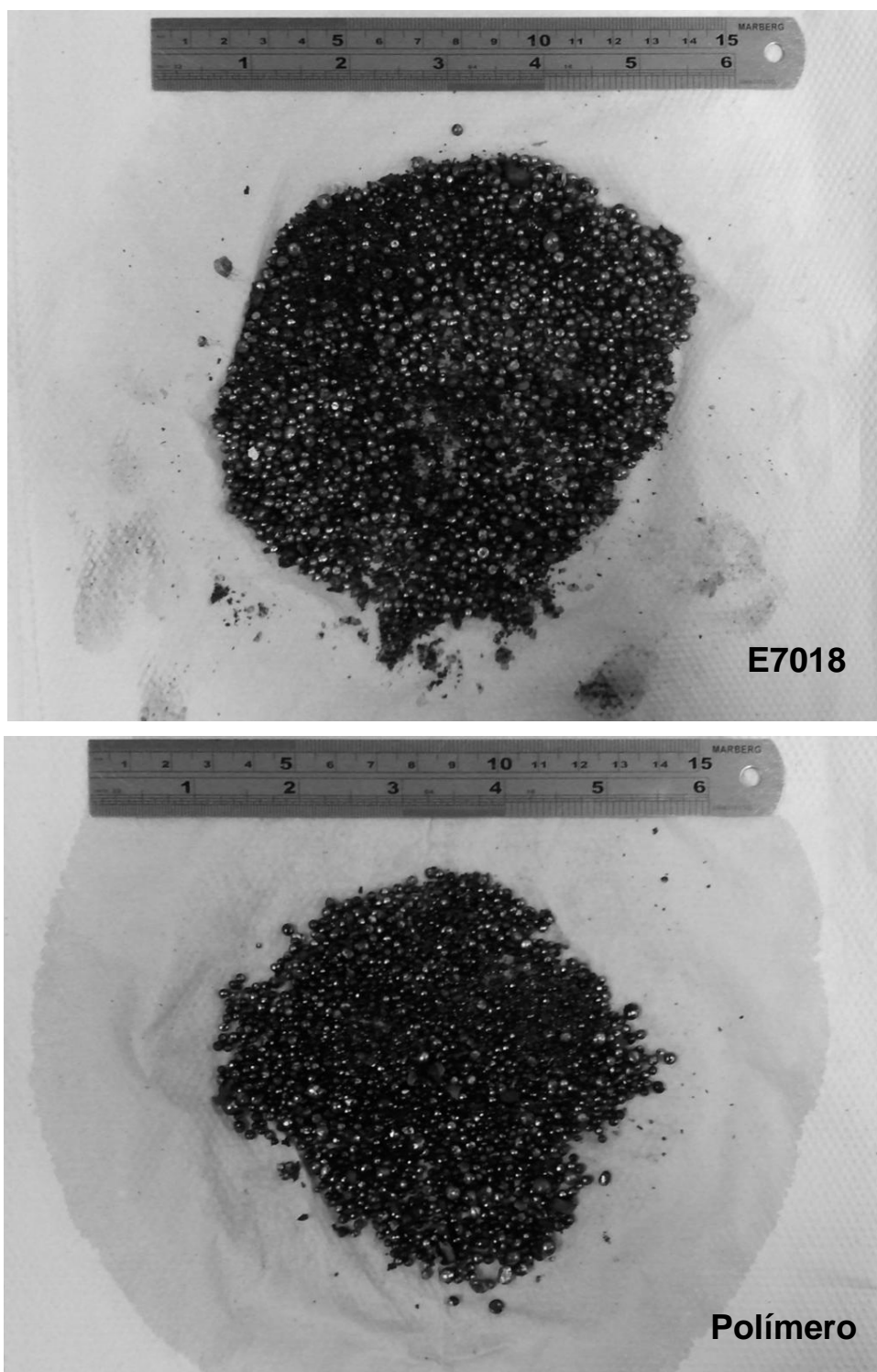


Brandi et al (4) registraram a presença de bolhas de gás na gotas formadas na ponta do eletrodo, com isso, confirmaram ao modelo proposto por Larson que aponta a expansão dessas como principal fator na transferência metálica. Tal fenômeno não foi observado nas macrografias das amostras coletadas e uma das possíveis explicações para esse fato é o tamanho limitado da amostragem realizada.

#### **4.5.4. Coleta e análise das gotas transferidas**

Gotas foram coletadas durante a fusão dos eletrodos E7018 e aglomerado com polímero seguindo o procedimento descrito na metodologia. As amostras obtidas na fusão de cinco eletrodos foram submetidas inicialmente à análise granulométrica. O material retido em cada uma das malhas durante o peneiramento (Figura 4.19) foi pesado e os resultados obtidos expressos na forma de gráficos com a porcentagem retida simples (Figura 4.20) e acumulada (Figura 4.21).

A análise da porcentagem retida simples das amostras indica que há um maior percentual de material retido na malha #8 para o eletrodo E7018 e na malha #10 para o eletrodo com polímero. Um critério utilizado na determinação do tamanho médio de partículas é abertura da malha correspondente a 50% em peso da porcentagem retida acumulada ( $d_{50}$ ). Segundo esse critério, que também foi utilizado por Chen et al (5), as gotas transferidas pelo eletrodo com polímero possuem tamanho médio inferior às transferidas pelo eletrodo E7018. Tal comportamento está coerente com os oscilogramas de tensão obtidos, pois, na soldagem com eletrodos revestidos, curtos circuitos são consequência do crescimento da gota que se transfere após tocar a poça de fusão.

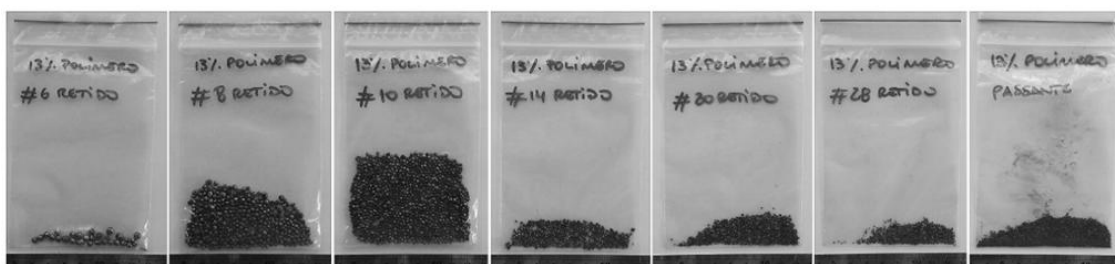


**Figura 4.18:** Gotas transferidas pelos eletrodos E7018 e com polímero.

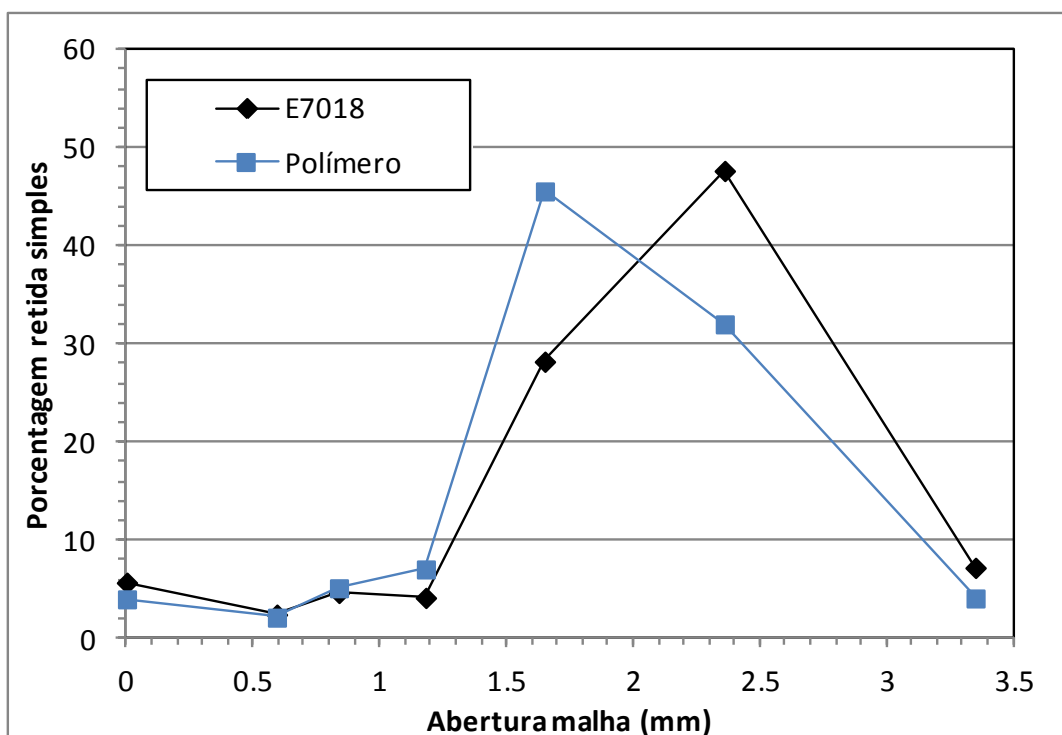
## E7018



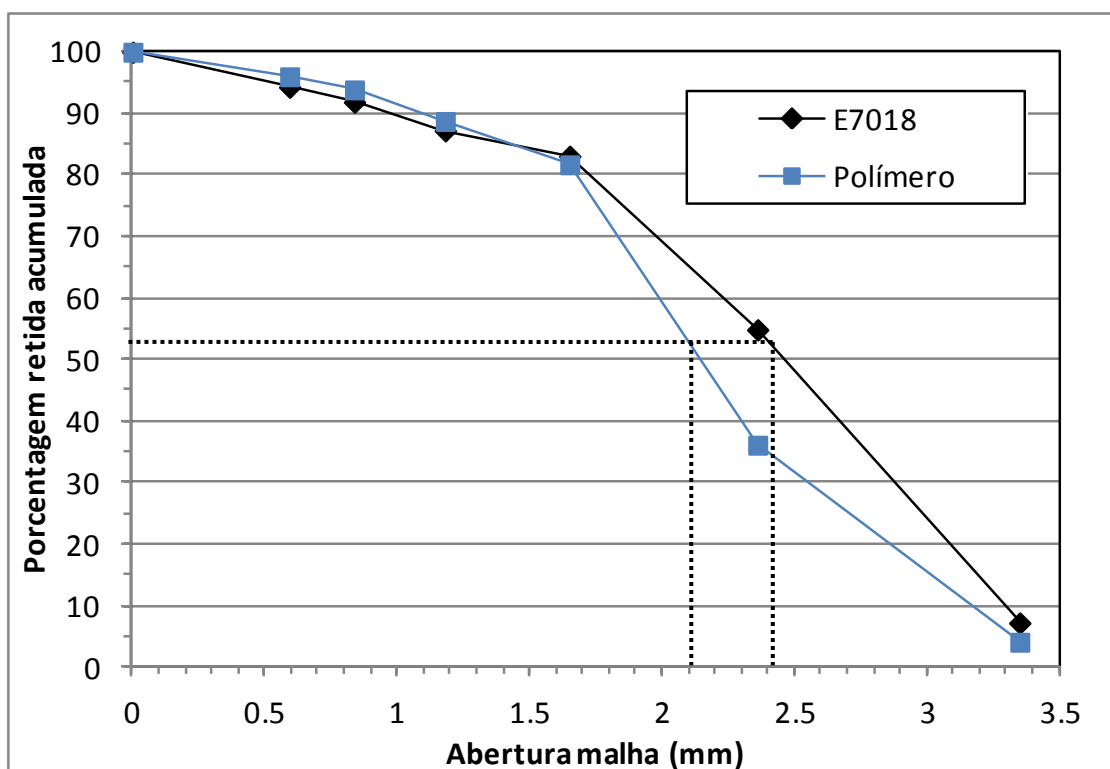
## Polímero



**Figura 4.19:** Gotas retidas em cada uma das malhas após classificação granulométrica.



**Figura 4.20:** Análise granulométrica das gotas coletadas (porcentagem retida simples).



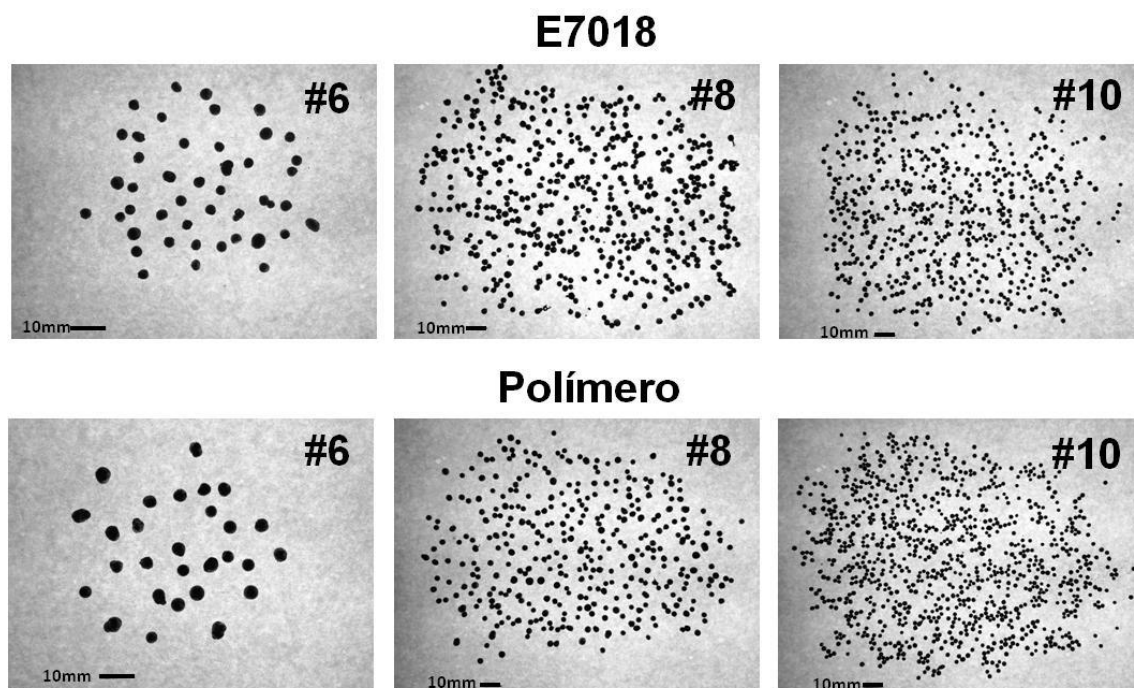
**Figura 4.21:** Análise granulométrica das gotas coletadas (porcentagem retida acumulada). As linhas tracejadas indicam os valores de  $d_{50}$  para os eletrodos.

Considerando a possibilidade dos eletrodos desse estudo apresentarem comportamento semelhante ao observado no estudo de Chen et al (5), as diferenças observadas quanto ao tamanho das gotas podem ser associadas a variação na tensão superficial ou na força do arco.

A análise granulométrica indicou também que as diferenças observadas ocorrem para gotas com tamanho superior a malha #10. Assim, as análises complementares foram direcionadas ao material que possui dimensões iguais ou superiores a essa.

Estudos realizados por Brandi et al (4) indicam que gotas maiores apresentam maior fração de vazios. Para avaliar se as amostras obtidas apresentam comportamento semelhante, foi proposta uma metodologia que permitisse a determinação da densidade das gotas com diferentes tamanhos. Inicialmente, o material retido nas malhas #6, #8 e #10 foi espalhado sobre uma superfície com

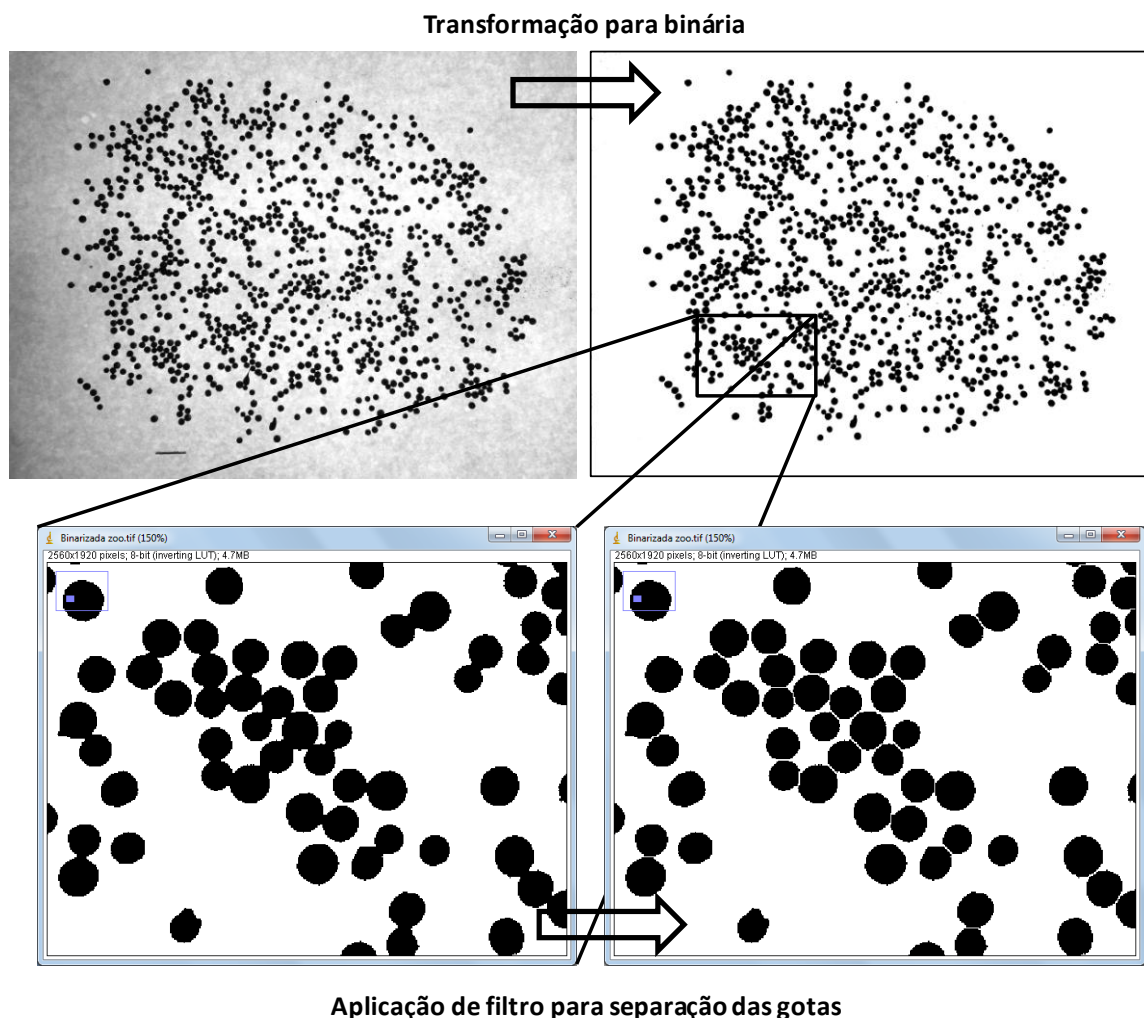
iluminação de fundo. Esse recurso possibilitou o registro fotográfico das imagens “sombreadadas” conforme ilustrado na Figura 4.22.



**Figura 4.22:** Imagem das sombras das gotas produzidas pelos eletrodos E7018 e com polímero retidas nas malhas #6, #8 e #10.

Para evitar que a forma das gotas influenciasse as medidas realizadas as amostras foram reposicionadas antes do registro da imagem. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada uma das amostras. As imagens obtidas foram processadas no programa Image J<sup>®</sup> conforme descrito na Figura 4.23.

O programa foi utilizado para quantificar o número de unidades, as áreas unitárias e total das projeções. Considerando que nas imagens as gotas apresentam forma circular, foi calculado o raio médio. A partir desse valor, dado o peso total, foi determinada a densidade média das gotas retidas em cada uma das malhas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.12.

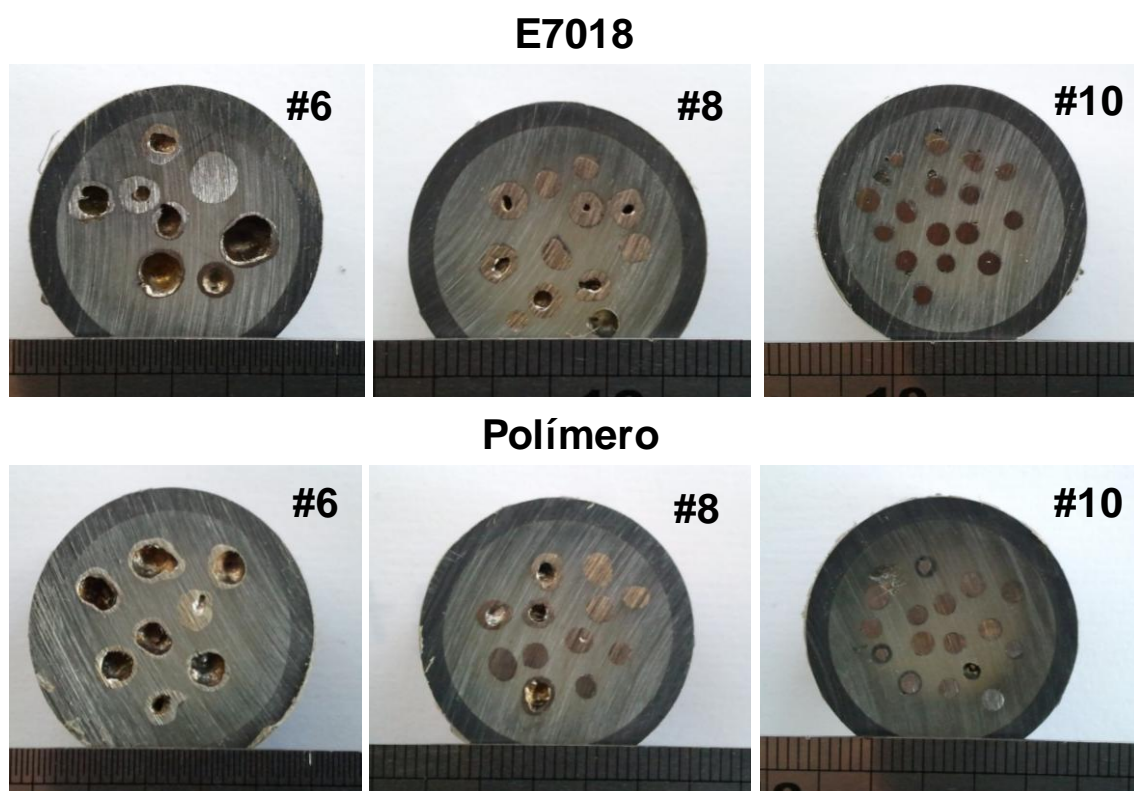


**Figura 4.23:** Etapas de processamento da imagem realizadas no programa Image J<sup>®</sup>.

**Tabela 4.12:** Densidade média das gotas transferidas pelos eletrodos.

	<b>Malha #6</b>	<b>Malha #8</b>	<b>Malha #10</b>
<b>E7018</b>	4,37±0,96	6,42±0,25	7,89±0,65
<b>Polímero</b>	3,22±0,28	6,61±0,28	8,21±1,59

Para confirmar se a diferença de densidade pode ser atribuída à presença de bolhas de gás (vazios) no interior das gotas, amostras de material retido nessas malhas foram embutidas e lixadas. Na Figura 4.24 são apresentadas as macrografias obtidas. Analisando essas imagens é possível observar que gotas com maior diâmetro apresentam maior quantidade de vazios, ou seja, são na grande maioria ocas. Tal característica foi observada nas gotas transferidas por ambos os eletrodos. Esse resultado é coerente com as medidas de densidade e com as observações de Brandi et al (4).

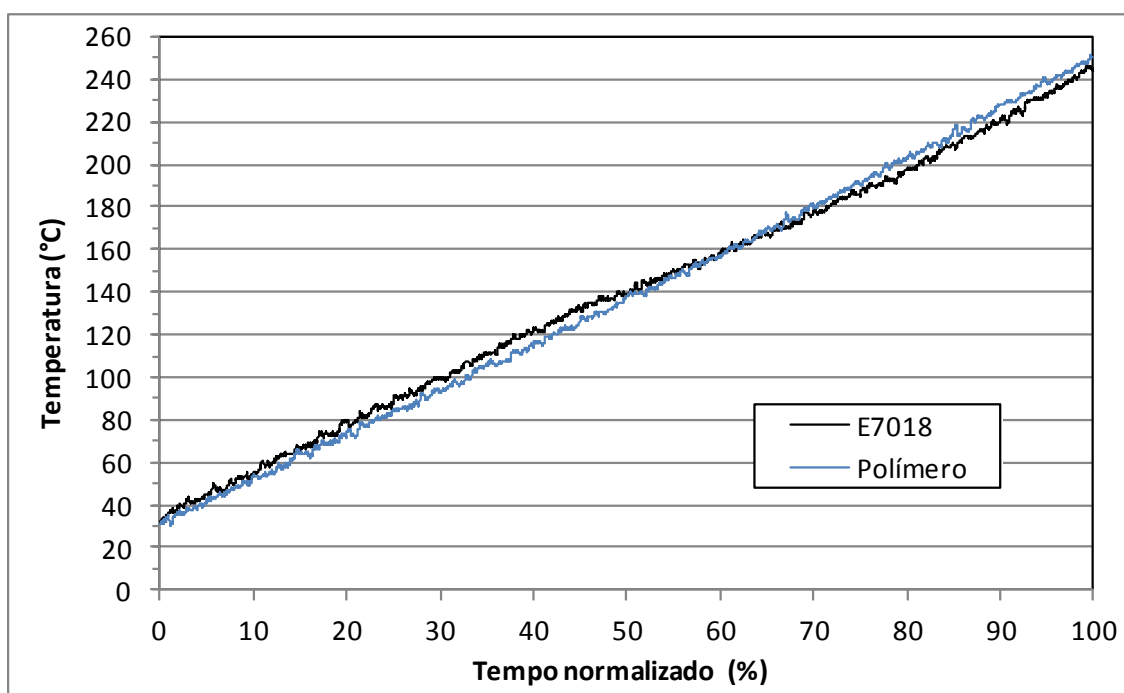


**Figura 4.24:** Macrografias das gotas produzidas pelos eletrodos que ficaram retidas nas malhas #6, #8 #10.

Bracarense e Liu (63), ao estudar a variação da composição química em soldas produzidas com eletrodos revestidos, observaram um aumento no tamanho médio das gotas à medida que o eletrodo se consome. Tal fenômeno foi atribuído ao aquecimento do eletrodo. Com o objetivo de avaliar se as diferenças observadas no tamanho médio das gotas transferidas podem ser associadas a este, foi realizado o

monitoramento da temperatura dos eletrodos durante a soldagem. Este experimento foi repetido cinco vezes para cada um dos eletrodos. Como os valores das taxas de fusão dos eletrodos são diferentes, a temperatura é apresentada em função do tempo normalizado definido pela Equação 4.2. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 4.25. A análise desses não indica diferenças no perfil térmico dos eletrodos que justifiquem a variação no tamanho médio das gotas transferidas.

**Equação 4.2** 
$$t_n = \left( \frac{t_i}{t_{250mm}} \right) \times 100 \text{ onde } t_{250mm} = \frac{250 \times t}{l_c}$$

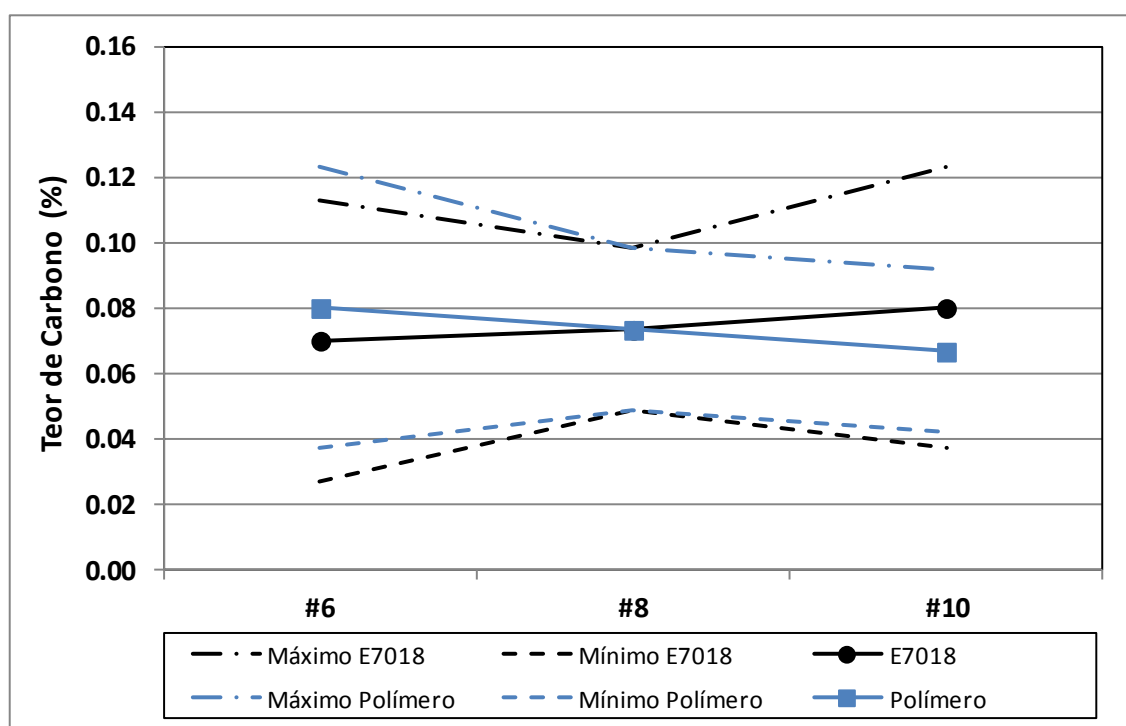


**Figura 4.25:** Temperatura do eletrodo medida à 50mm da extremidade da ponta de pega em função do tempo normalizado.



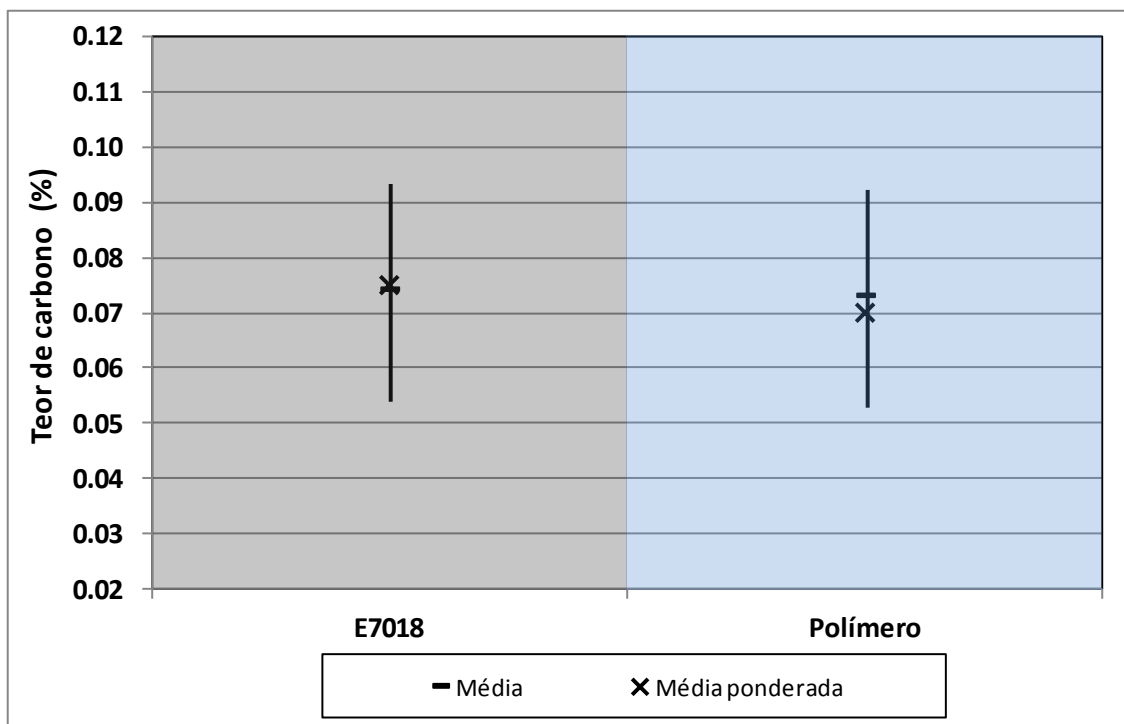
#### 4.5.5. Análise química das gotas coletadas

As gotas coletadas e classificadas foram submetidas à análise química para determinação dos teores de nitrogênio e carbono dissolvidos. Os resultados das análises de carbono são apresentados na Figura 4.26 e não indicam variações significativas nos teores desse elemento em função do tamanho das gotas. Tal comportamento foi observado independente do eletrodo.



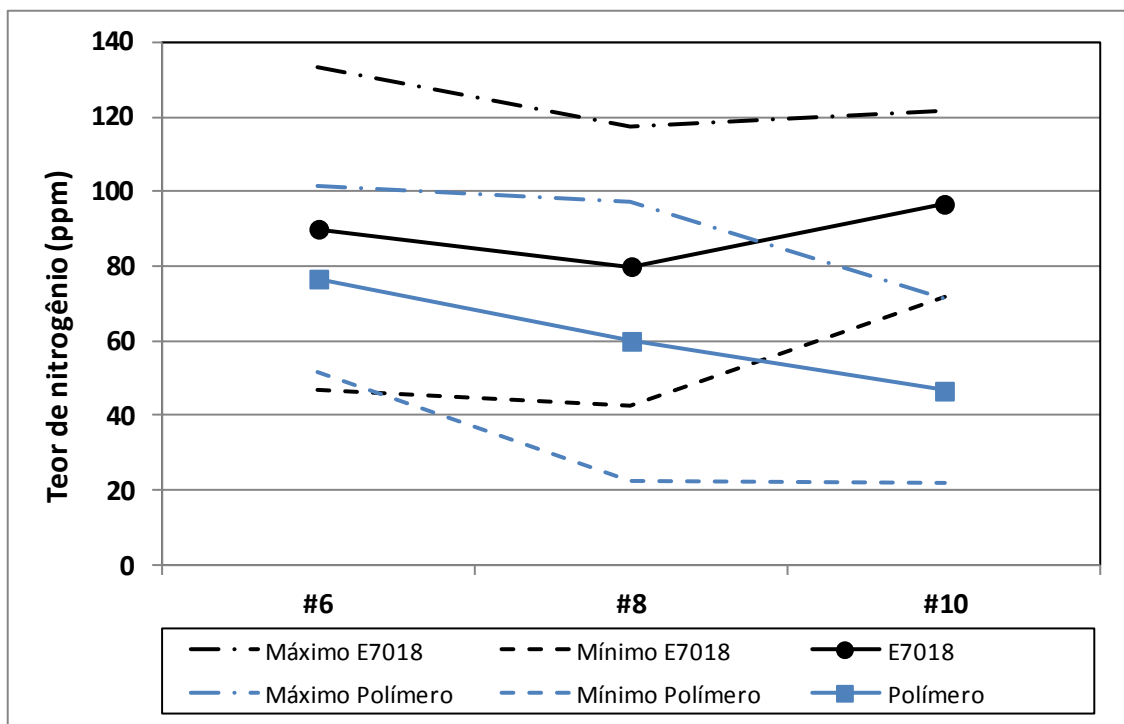
**Figura 4.26:** Teor de carbono das gotas retidas nas malhas #6, #8 e #10 (Intervalo de confiança: 95%).

Na Figura 4.27 são apresentados os valores das médias simples e ponderada de carbono para os diferentes eletrodos. Apesar de terem sido observadas pequenas diferenças entre os resultados dependendo da fórmula utilizada para o cálculo da média, as variações se encontram dentro do intervalo de confiança e não apresentam tendências que mereçam destaque.

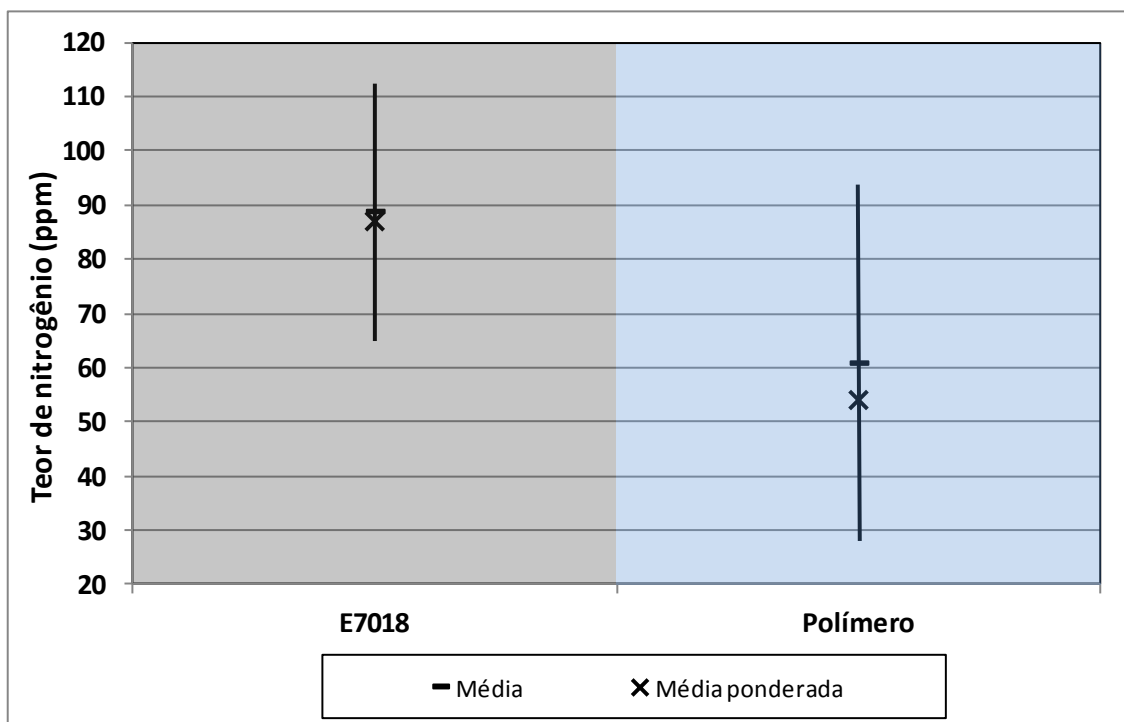


**Figura 4.27:** Teor médio de carbono das gotas (Intervalo de confiança; 95%).

Os valores de nitrogênio para diferentes tamanhos de gotas são apresentados na Figura 4.28. Pode-se observar que os teores das amostras coletadas na soldagem com o eletrodo E7018 variaram entre 80 e 97ppm sem demonstrar tendência em função do tamanho da gota. Os resultados obtidos nas amostras do eletrodo aglomerado com polímero variaram entre 70ppm para as gotas maiores e 47ppm para as gotas menores. A presença de teores mais baixos de nitrogênio nas gotas produzidas pelo eletrodo com polímero, independente do tamanho, indica presença de uma atmosfera protetora mais eficiente na soldagem com este consumível. Mesmo estando dentro do intervalo de confiança, o teor mais baixo de nitrogênio das gotas menores tem influência sobre o cálculo da média ponderada apresentado no gráfico da Figura 4.29.

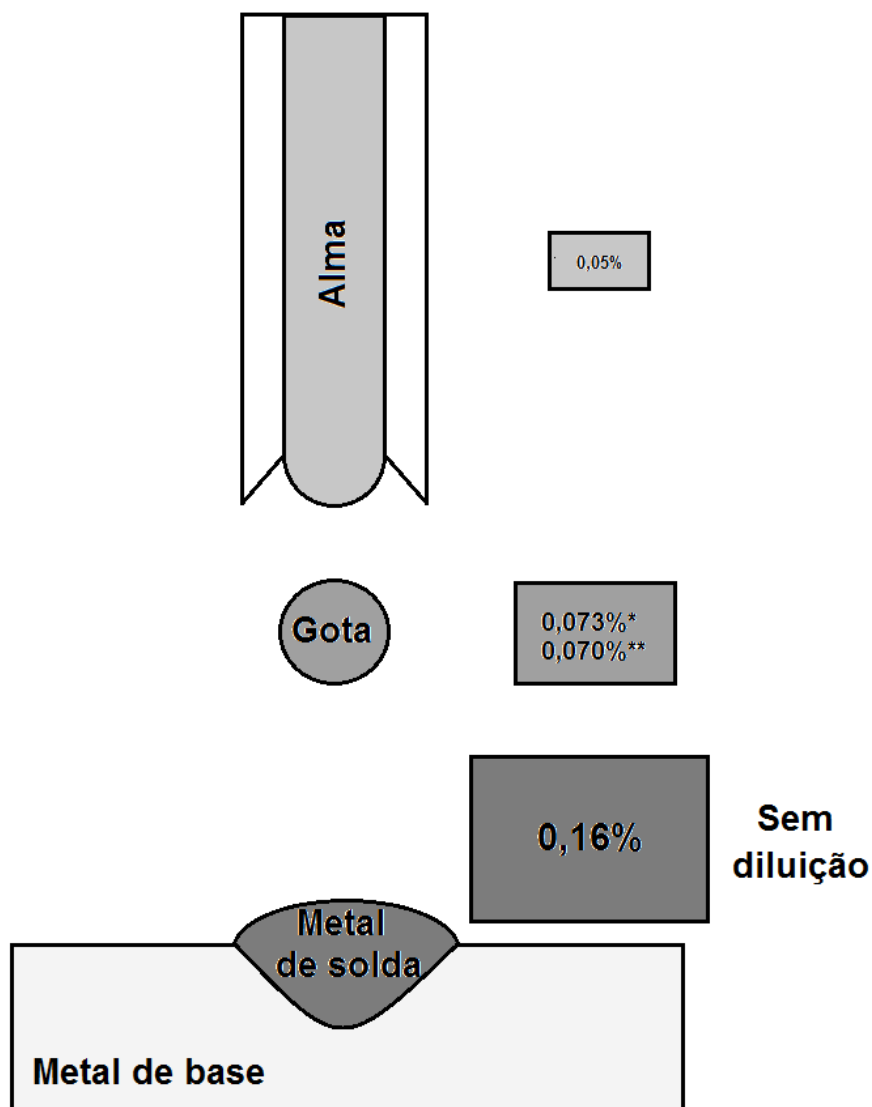


**Figura 4.28:** Teor de nitrogênio das gotas retidas nas malhas #6, #8 e #10 (Intervalo de confiança: 95%).



**Figura 4.29:** Teor médio de nitrogênio das gotas (Intervalo de confiança: 95%).

Para permitir a análise detalhada dos teores de carbono e nitrogênio são apresentados nas Figura 4.30 e Figura 4.31 modelos esquemáticos contendo os resultados das medidas realizadas no metal de base, alma do eletrodo, gotas e metal de solda do eletrodo aglomerado com polímero.

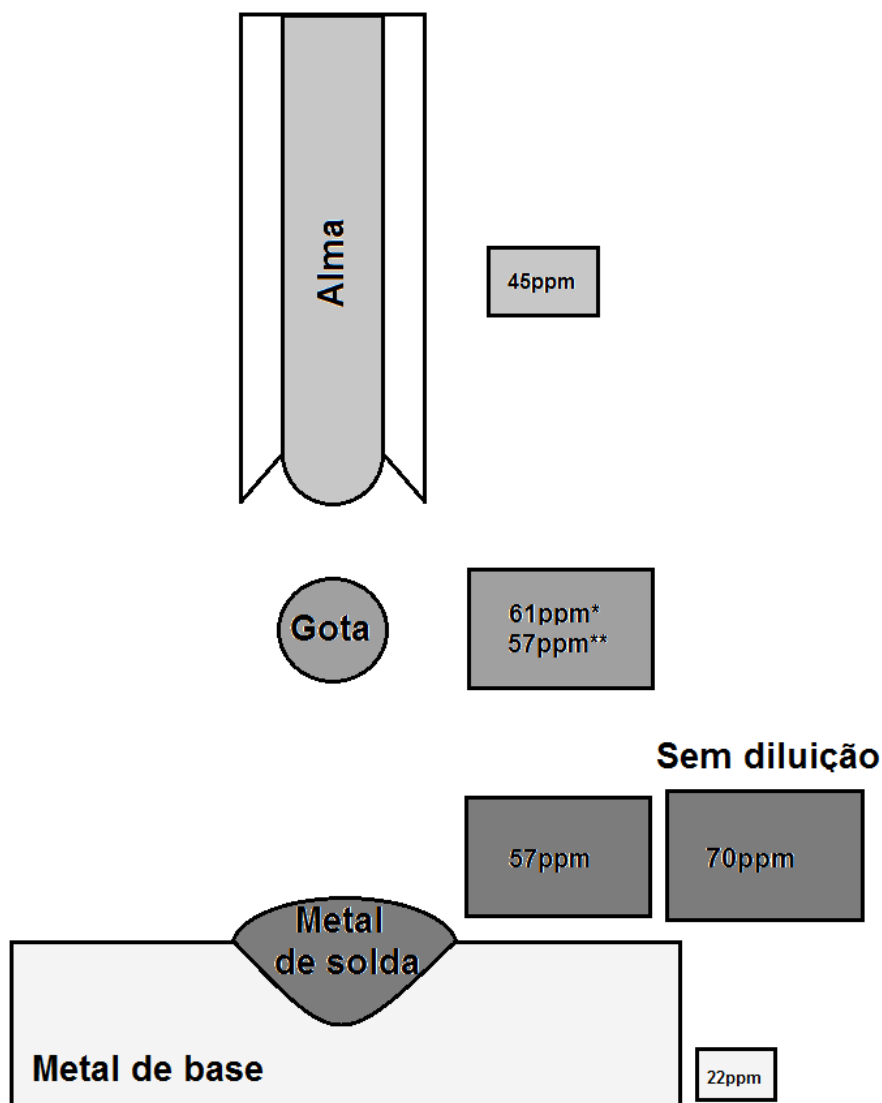


**Legenda:**

**(\*) Média simples**

**(\*\*) Média ponderada**

**Figura 4.30:** Modelo esquemático com os teores de carbono medidos.



**Legenda:**

**(\*) Média simples**

**(\*\*) Média ponderada**

**Figura 4.31:** Modelo esquemático com os teores de nitrogênio medidos.

O modelo da Figura 4.30 indica um ligeiro aumento nos teores de carbono da alma para as gotas. Tal acréscimo pode ser atribuído à incorporação do carbono proveniente das ferroligas presentes no revestimento. Esse comportamento é coerente com o modelo físico proposto por Lancaster (3) que relata a dissolução dos elementos de liga adicionados ao revestimento na junção entre o cone e o líquido.

A comparação entre os teores das gotas e do metal de solda sem diluição mostra um aumento significativo no teor de carbono. Tal acréscimo indica considerável absorção desse elemento na poça de fusão. A presença de uma atmosfera rica em carbono proveniente da decomposição do polímero é uma das possíveis explicações para este fenômeno.

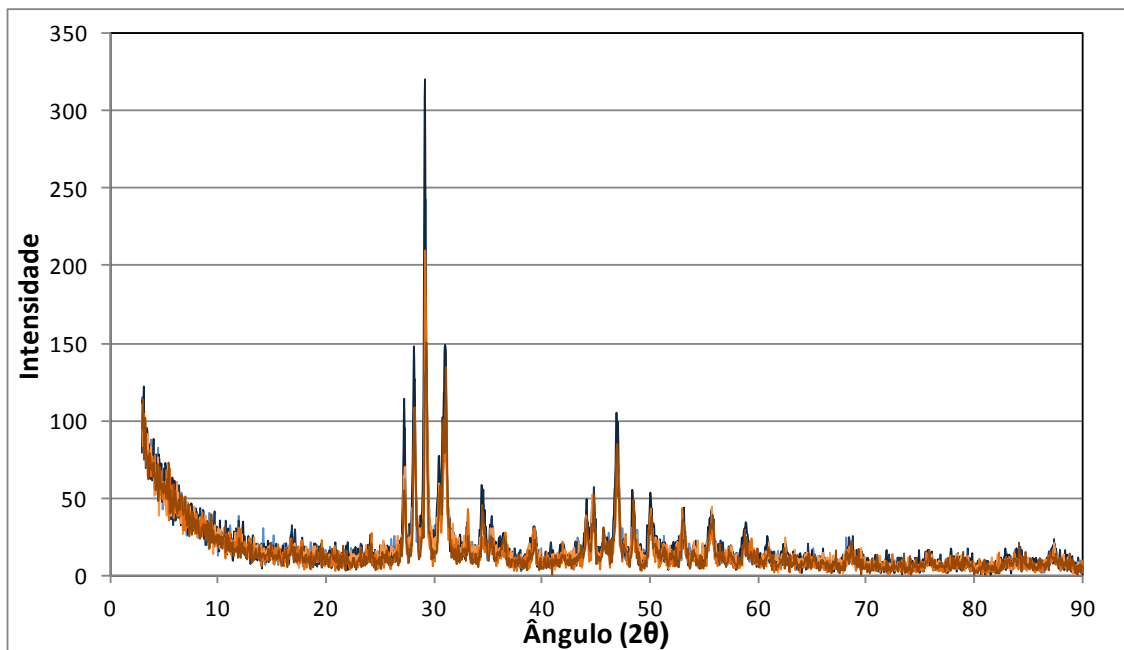
Analisando a Figura 4.31 nota-se um aumento na concentração de nitrogênio da alma para as gotas. Como as matérias primas presentes no revestimento não contém nitrogênio tal diferença pode ser atribuída à contaminação atmosférica. Os resultados das análises de carbono em diferentes estágios sinalizam, mesmo que de maneira indireta, que a atmosfera protetora mais eficiente pode estar associada ao volume de gases gerados na decomposição do polímero. Boniszewski (62), em uma extensa revisão sobre os eletrodos revestidos, relata esse comportamento em eletrodos com revestimento celulósico onde há grande quantidade de combustível orgânico.

A comparação entre os teores de nitrogênio das gotas e do metal de solda sem diluição indica um aumento imperceptível na concentração desse elemento. Esse resultado confirma que não há absorção significativa de nitrogênio na poça de fusão.

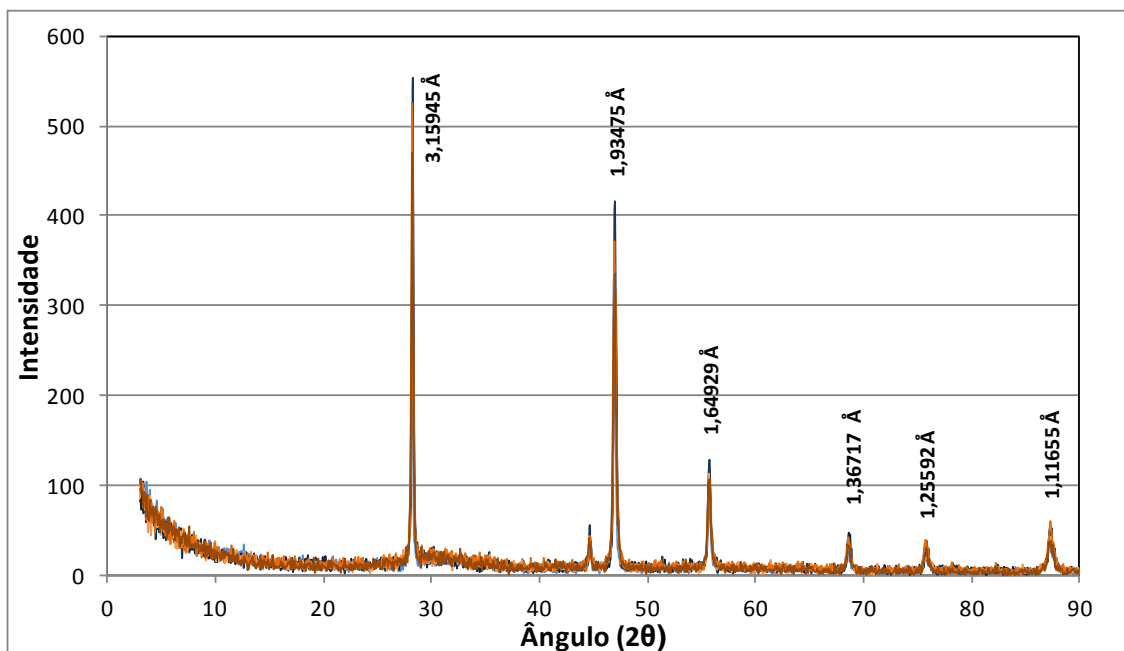
#### **4.5.6. Análise da escória gerada por Difração de Raios-X**

A Difração de Raios-X é empregada por Bracarense (56) na análise da composição de revestimentos. Entretanto, o seu emprego na análise de escórias de soldagem não é usual. Como principais justificativas para isso pode-se apontar a quantidade e complexidade dos compostos presentes e o elevado grau de dificuldade para sua identificação. Contudo, a necessidade crescente de estabelecer uma destinação adequada às escórias resultantes de processos de fabricação de aço, tem forçado o emprego de tal técnica para auxiliar na caracterização desse tipo de composto (64) (65).

Seguindo essa tendência, a Difração de Raios-X foi empregada no estudo comparativo entre as escórias produzidas pelos eletrodos E7018 e aglomerado com polímero. Os resultados obtidos são apresentados nos difratogramas das Figura 4.32 e Figura 4.33.



**Figura 4.32:** Difratogramas de seis amostras de escórias produzidas na soldagem com eletrodo E7018.



**Figura 4.33:** Difratogramas de seis amostras de escória produzidas na soldagem com eletrodo aglomerado com o polímero.

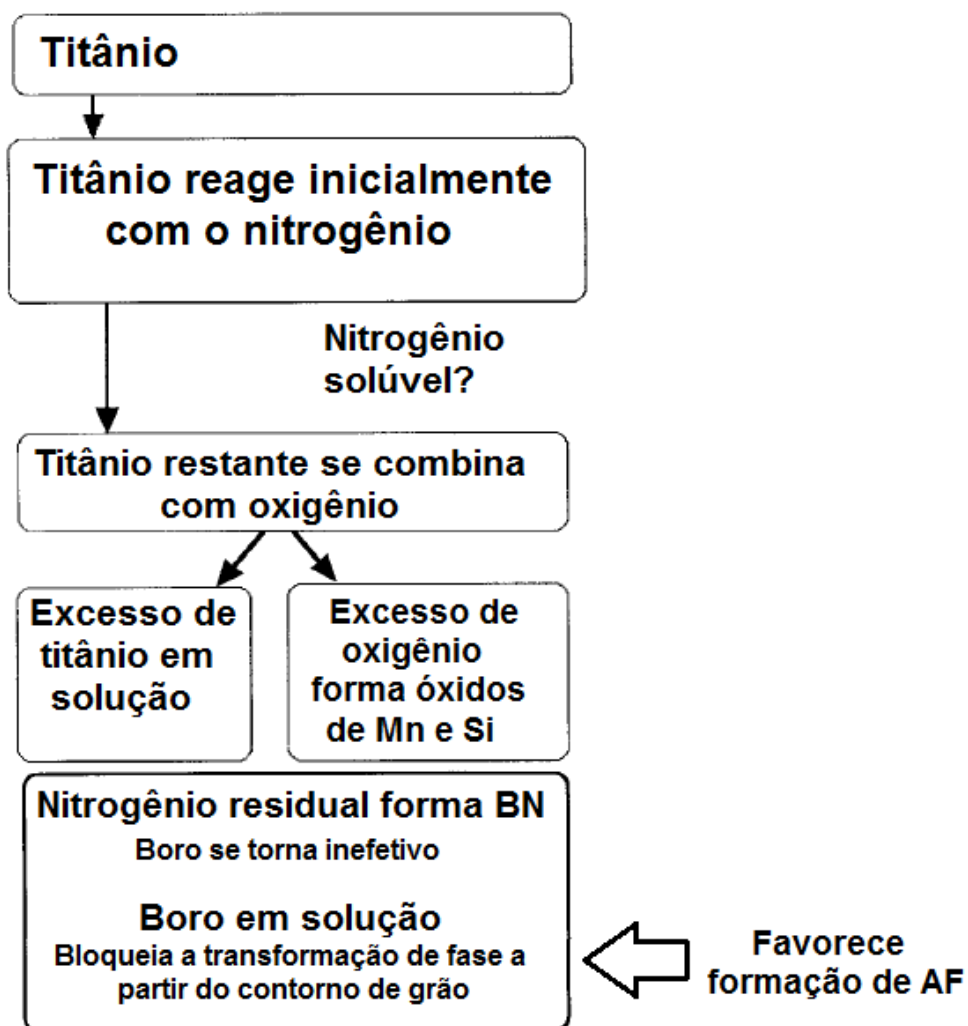
Nota-se, pela coincidência entre os picos, que não há variações significativas entre as seis amostras de escória produzidas pelo mesmo eletrodo. Os difratogramas das escórias produzidas por eletrodos E7018 apresentam elevada quantidade de picos. Tal comportamento é usual em escórias onde é comum a presença de vários compostos cristalinos. Por outro lado, os difratogramas das escórias produzidas por eletrodos aglomerados com polímero, apresentam um número reduzido de picos. Isso não indica, entretanto, a ausência de outros compostos que podem estar em quantidades inferiores ao limite de detecção da técnica ou serem amorfos. A comparação com informações do banco de dados do ICDD indica que os picos de maior intensidade visualizados nesse difratograma podem ser associados a fluoreto de cálcio. A carta desse composto se encontra no Anexo 8.4.

Os resultados obtidos nessa análise indicam que o polímero utilizado na aglomeração tem influencia sobre as interações entre metal, gás e escória que ocorrem durante a soldagem.

#### **4.6. Modelo proposto para explicar o efeito do polímero sobre a formação da ferrita acicular no metal de solda**

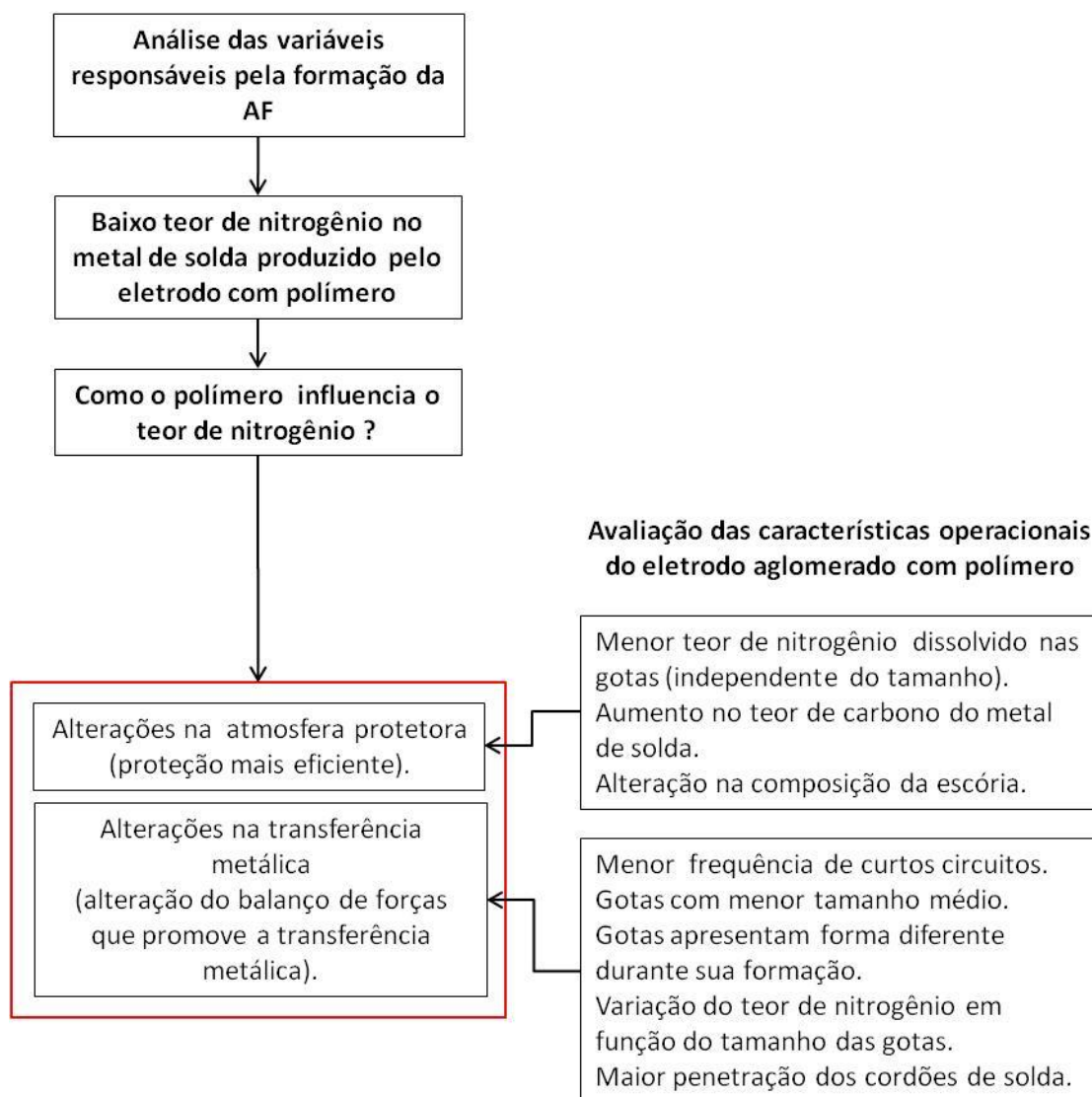
A comparação entre as variáveis que influenciam a formação da ferrita acicular indica, por supressão, o nitrogênio como sendo o fator mais importante pelas diferenças observadas entre a microestrutura produzida pelo eletrodo com polímero e a prevista por Evans e Bailey (58) com teores de carbono, silício e manganês similares. Na Figura 4.34 é apresentado, adaptado de Bhadeshia e Svensson (19), o mecanismo que explica o efeito do nitrogênio sobre a formação da ferrita acicular em metais de solda com titânio e boro.





**Figura 4.34:** Efeito do nitrogênio sobre a formação da ferrita acicular em metais de solda contendo Ti e B. Adaptado de Bhadeshia e Svensson (19).

O estudo das características operacionais, realizado de modo comparativo entre eletrodos E7018 e aglomerados com polímero, esclarece como o polímero altera a absorção deste elemento. Na Figura 4.35 é apresentado o fluxograma com o modelo proposto.



**Figura 4.35:** Fluxograma do modelo proposto para explicar o efeito do polímero sobre o teor de nitrogênio do metal de solda.

Os teores de nitrogênio da alma, gotas e metal de solda no eletrodo com polímero indica a absorção deste elemento durante a transferência metálica. O modelo proposto está fundamentado neste princípio e indica que o polímero promove uma proteção gasosa mais eficiente e altera modo de transferência metálica através de possíveis alterações na relação entre a tensão superficial do metal líquido e força do arco.

Os menores teores de nitrogênio dissolvido nas gotas produzidas pelo eletrodo com polímero, independente da faixa de tamanho, mostram que há menor absorção desse elemento em comparação ao eletrodo E7018. Tal resultado confirma a existência de uma atmosfera protetora mais eficiente. O aumento na quantidade de carbono observado no metal de solda sem diluição do eletrodo com polímero revela uma atmosfera protetora rica nesse elemento e está coerente com a hipótese levantada. Os resultados das análises das escórias por difração de raios-x também são um forte indício de alterações na atmosfera que envolve o arco.

Medidas do teor de nitrogênio dissolvido nas gotas com diferentes dimensões indicaram comportamento diferenciado entre os consumíveis. No eletrodo com polímero há redução na concentração desse elemento à medida que o tamanho das gotas é reduzido. Por outro lado, as medições realizadas nas amostras do eletrodo E7018 não indicam tal variação. Vale lembrar que os teores medidos se encontram abaixo da solubilidade de equilíbrio do nitrogênio no aço líquido a uma temperatura de 1600°C que, segundo Lancaster (3), é de 0,045% (450ppm).

A relação entre o teor de nitrogênio e o tamanho das gotas observada no eletrodo com polímero pode ser explicada considerando que as gotas menores são transferidas, a priori, em um intervalo de tempo menor. Como principal consequência, há menor absorção de nitrogênio. Por outro lado, o teor de nitrogênio dissolvido mais elevado observado nas gotas menores coletadas na soldagem com o eletrodo E7018 pode ser explicado tomando-se em conta a transferência metálica por curto circuito explosiva relatada por Brandi et al (4). Nesse modo, parte das gotas menores é gerada a partir da explosão de gotas grandes que possuem teores mais elevados de nitrogênio.

Resultados obtidos em outros experimentos reforçam a hipótese de alterações na transferência metálica. Maior penetração dos cordões de solda, variação na frequência de curtos circuitos durante a soldagem e diferenças nos tamanhos médios das gotas coletadas são indicações desse comportamento diferenciado.

Chen et al (5) relatam que a tensão superficial é a principal força que impede o desprendimento da gota. Por outro lado, a força do arco é apontada como sendo a principal força responsável pela transferência. Assim, o balanço entre essas define quando se dá a transferência metálica. Não há subsídios para afirmar que o polímero promove modificações na tensão superficial da gota. Todavia, a análise das gotas

formadas indica diferenças na forma dessas e aponta para tal direção. O maior volume de gases gerados durante a soldagem do eletrodo com polímero, além de estar promovendo uma proteção gasosa mais efetiva, também se apresenta como um dos responsáveis pelo aumento na força do arco. Os autores relatam ainda a redução no tamanho médio das gotas em função do aumento na força do arco.

## 5. Conclusões

O trabalho científico conduzido com o objetivo de explicar a influência do polímero utilizado como aglomerante sobre a formação de ferrita acicular em metais de solda depositados por eletrodos com revestimento básico permite concluir que:

- A microestrutura do metal de solda produzido pelo eletrodo com polímero é significativamente diferente da prevista por Evans e Bailey (58) para um metal de solda com teores semelhantes de carbono, silício e manganês;
- As diferenças entre os parâmetros de teste (diâmetro do eletrodo, energia de soldagem e tempo de resfriamento entre 800 e 500°C) utilizados na produção dos metais de solda não justificam as diferenças microestruturais observadas;
- Os teores de elementos químicos residuais do metal de solda produzido pelo eletrodo com polímero e do estudo de Evans e Bailey (58) justificam as diferenças observadas nas microestruturas dos metais de solda produzidos. O elemento químico nitrogênio é o agente mais importante nesse processo;
- A avaliação dos teores de nitrogênio na alma, gotas e metal de solda indica que grande parte a absorção desse elemento ocorre durante a transferência metálica;
- A comparação dos teores de carbono da alma, gotas e metal de solda indica que grande parte da absorção de carbono se dá na poça de fusão;
- Foram observadas mudanças no perfil de solda dos cordões depositados de um eletrodo para outro. O emprego do polímero proporcionou a formação de cordões de solda com maior penetração. Não foram observadas variações nas demais dimensões;

- A utilização do polímero como aglomerante proporcionou a formação de uma atmosfera protetora mais eficiente. A principal consequência foi a obtenção de um metal de solda com menores teores de nitrogênio;
- A análise por Difração de Raios-x das escórias produzidas pelos eletrodos indica diferenças significativas quanto aos compostos presentes. Esse resultado pode ser associado a alterações na atmosfera que envolve o arco. Os experimentos realizados não permitem explicar as diferenças observadas;
- O polímero proporciona alterações no modo de transferência metálica do eletrodo. Esse fato foi evidenciado pelas diferenças nos teores de nitrogênio medidos nas gotas coletadas com diferentes diâmetros. Frequência de curtos circuitos, diferenças na morfologia das gotas durante sua formação e variação no tamanho médio das gotas coletadas reforçam essa observação.

## 6. Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesse trabalho estabelecem novas perspectivas de estudo. Sendo assim, pode-se sugerir como trabalhos futuros:

- Analisar os gases gerados durante a soldagem com o objetivo de investigar as características da atmosfera protetora formada na soldagem com eletrodos aglomerados com polímero;
- Realizar filmagens da soldagem em alta velocidade durante a soldagem com o objetivo de complementar a análise da transferência metálica;
- Estudar a estrutura e propriedades de metais de solda produzidos com eletrodos rútilicos, celulósicos e oxidantes aglomerados com polímero;
- Estudar a estrutura e propriedades de metais de solda produzidos por eletrodos revestidos básicos aglomerados com polímero na soldagem subaquática molhada;
- Avaliar o metal de solda produzido empregando arames tubulares produzidos com adição de polímeros em seu fluxo;
- Avaliar o metal de solda produzido pelo processo SAW utilizando fluxos aglomerados com polímero em sua composição;

## 7. Bibliografia

- (1) FICHEL, I.; DALLA, A.; ROS, D.; FELIZARDO, I.; Vaz, C. T.; GONZÁLEZ, L. P.; PÉREZ, M. R.; PUCHOL, R.Q.; PESSOA, E. C. P.; BRACARENSE, A. Q.; *Desenvolvimento de eletrodos revestidos impermeáveis*, Anais XXXV CONSOLDA, Piracicaba, 2009.
- (2) VAZ, C.T.; BRACARENSE, A.Q.; FELIZARDO, I.; PESSOA, E.C.P.; *Impermeable low hydrogen covered electrodes: weld metal, slag and fume evaluation*. Journal of Materials Research and Technology. Vol. 1(2), 2012, p.64-70.
- (3) LANCASTER, J. F.; *Metallurgy of welding*, Fifth edition, London: Chapman & Hall, 1983, 389p.
- (4) BRANDI, S.; TANIGUCHI, C.; LIU, S.; *Analysis of metal transfer in shielded metal arc welding*, Welding Journal, 70, 1991, p. 261s-270s.
- (5) CHEN, J. H.; FAN, D.; HE, Z.Q.; YE, J.; LUO, Y. C.; *A study of the mechanism for globular metal transfer from covered electrodes*, Welding Journal, Vol. 68 (4), 1989, p. 145s-150s.
- (6) GASKELL, D. R.; *Introduction to metallurgical thermodynamics*, New York: MacGrawhill, 1973, 520p.
- (7) GRONG, O.; MATLOCK, D. K.; *Microstructural development in mild steel and low alloy steel weld metals*, International Metals Reviews, Vol. 31(1), 1986, p.27-48.
- (8) NATALIE, C. A.; OLSON, D. L.; BLANDER, M.; *Physical and chemical behaviour of welding fluxes*, Annual review of materials science, Vol. 16, 1986, p.389-413.
- (9) CHAI, C. S.; EAGAR, T. W.; *Prediction of weld-metal composition during flux-shielded welding*, Journal of materials for energy systems, Vol. 5(3), 1983, p. 160-164.
- (10) BANG, K.; PARK, C.; JUNG, H.; LEE, J.; *Effects of flux composition on the element transfer and mechanical properties of weld metal in submerged arc welding*, Metals and Materials International, Vol.15 (3), 2009, p. 471-477.



- (11) REIN, R. H.; AD-A028395, Proceedings of a workshop on welding research opportunities, Ed. B. A. McDonalds, p.94, 1974 apud EAGAR, T. W.; *Oxygen and nitrogen contamination during arc welding*, Proceedings of welding physical metallurgy and failure phenomena, Ed. R. J. Cristoffil, 1979.
- (12) EAGAR, T. W.; *Oxygen and Nitrogen Contamination, Proceedings of welding – physical metallurgy and failure phenomena*, R.J.Cristoffel ed., General Electric, NY, 31, 1979.
- (13) SOROKIN, L; *Electrodes with plastic coatings for welding low carbon steels*, Welding International, Vol. 18(3), 2004, p. 232-241.
- (14) IIW - INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING, *IIW Doc. No. IX-1533-88: Guide to light microscope examination of ferritic weld metals*. IXJ-123-87. Revision 2. June: 1988.
- (15) ABSON, D. J.; PARGETER, R. J.; *Factors influencing as-deposited strength, microstructure, and toughness of manual metal arc welds suitable for C-Mn steel fabrications*. International Metals Reviews, Vol. 31(4), 1986, p.141-196.
- (16) BHADSHIA, H. K. D. H.; *Bainite in Steels*, Second Edition, London: IOM Communications Ltd, 2001, 454p.
- (17) TERASAKI, H.; KOMISO, Y.; *In situ observation of morphological development for acicular ferrite in weld metal*, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 11, 2006, p. 561-566.
- (18) STRANGWOOD, M.; BHADSHIA, H. K. D. H.; *The mechanism of acicular ferrite formation in steel weld deposits*, Advances in Welding Technology and science, , 1987, p. 209-213.
- (19) BHADSHIA, H. K. D. H.; SVENSSON, L. E.; *Modelling the evolution of microstructure in steel weld metals*, London: Institute of Materials, 1993, p. 109-182.
- (20) BABU, S. S.; REIDENBACH, F.; DAVID, S.; BÖLLINGHAUS, T.; HOFFMEISTER, H.; *Effect of high energy density welding processes on inclusion and microstructure formation in steel welds*, Science and Technology of Welding & Joining, Vol. 4, 1999, p. 63-73.

- (21) DAVENPORT, D. E.; BAIN, E. C.; *Transformation of austenite at constant subcritical temperatures*, Metallurgical Transactions, Vol. 1, 1970, p. 3503-3530.
- (22) YANG, J.; BHADSHIA, H. K. D. H. ; *Acicular Ferrite Transformation in alloy-steel weld metals*, Journal of Materials Science, Vol. 26, 1991, p. 839-845.
- (23) RICKS, R.; HOWELL, P. R.; BARRITE, G. S.; *The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals*, Journal of Materials Science, Vol. 17, 1982, p. 732-740.
- (24) WAN, X. L.; WANG, H. H.; CHENG, L.; WU, K. M.; *The formation mechanisms of interlocked microstructures in low-carbon high-strength steel weld metals*, Materials Characterization, Vol.67, 2012, p.41-51.
- (25) S. S. BABU, *The mechanism of acicular ferrite in weld deposits*, Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. 8, 2004, p. 267-278.
- (26) KLUKEN, A. O.; GRONG, O.; HJELEN, J.; *The origin of transformation textures in steel weld metals containing acicular ferrite*, Metallurgical Transactions, Vol. 22, 1991, p. 657-663.
- (27) GREGG, J. M.; BHADSHIA, H. K. D. H.; *Bainite Nucleation From Mineral Surfaces*, Acta Metallurgica et Materialia, Vol. 42, 1994, p. 3321-3330.
- (28) PAN, T.; YANG, Z. G.; BAI, B. Z.; FANG, H. S.; *Study of thermal stress and strain energy in  $\gamma$ -Fe matrix around inclusion caused by thermal coefficient difference*, Acta Metallurgica Sinica, Vol. 39, 2003, p. 1037-1042 apud S. S. BABU, *The mechanism of acicular ferrite in weld deposits*, Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. 8, 2004, p. 267-278.
- (29) FARRAR, R. A.; HARRISON, P. L.; *Acicular ferrite in carbon-manganese weld metals: an overview*, Journal of Materials Science, Vol. 22, 1987, p. 3812-3820.
- (30) HARRISON, P.; FARRAR, R.; *Microstructure and toughness of C-Mn and C-Mn-Ni weld metal - part I*, Metal Construction, Vol. 19, 1987, p. 392r.
- (31) GREGG, J. M.; BHADSHIA, H. K. D. H.; *Bainite nucleation from mineral surfaces*, Acta Metallurgica et Materialia, Vol. 42, 1994, p. 3321-3330.

- (32) BARBARO, F. J. ; KRAUKLIS, P.; EASTERLING, K. E.; *Formation of acicular ferrite at oxide particles in steels*, Materials Science and Technology, Vol. 5, 1989, p. 1057-1068.
- (33) SARMA, D. R.; KARASEV, A. V.; JÖNSSON, P. G.; *On the role of non-metallic inclusions in the nucleation of acicular ferrite in steels*, ISIJ International, Vol. 49, 2009, p. 1063-1074.
- (34) LEE, C. H.; BHADESHIA, H. K. D. H.; LEE, H. C.; *Effect of plastic deformation on the formation of acicular ferrite*, Materials Science and Engineering, Vol. A 360, 2003, p. 249-257.
- (35) EVANS, G. M.; *The effect of carbon on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits*, Welding Journal, Vol. 62, 1983, p. 313s-320s.
- (36) EVANS, G. M.; *Effect of manganese on the microstructure and properties of all-weld-metal deposits*, Welding Journal, Vol. 59, 1980, p. 67s-75-s.
- (37) EVANS, G. M.; *Effect of silicon on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits*, Metal Construction, 1986, p. 438r-444r.
- (38) EVANS, G. M.; *The effect of nickel on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits*, Welding Research Abroad, Vol. XXXVII, 1991, p. 70-83.
- (39) EVANS, G. M.; *International Institute of Welding Document II-A-666-86*, 1986.
- (40) TERASHIMA, H.; HART, P. H. M.; *Effect of aluminum on C-Mn-Cb steel submerged arc weld metal properties*, Welding Journal, Vol. 63, 1984, p. 173s-183s.
- (41) EVANS, G. M.; *The effect of aluminum on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits*, Welding Research Abroad, Vol. 28, 1992, p. 2-12.
- (42) EVANS, G. M.; *The effect of titanium on the microstructure and properties of C-Mn all-weld-metal deposits*, Welding Reserch Abroad, Vol. 28, 1992, p. 13-21.
- (43) EVANS, G. M. *Microstructure and properties of ferritic steel welds containing Al and Ti*, Welding Journal, Vol. 74, 1995, p. 249s-261s.

- (44) BHADESHIA, H. K. D. H.; SVENSSON, L. E.; *Model for boron effects in steel welds*, Orlando: International Conference on Modelling and Control Joining Processes, 1993, p. 1-7.
- (45) EVANS, G.M.; *Microstructure and properties of ferritic steel welds containing Ti and B*, Welding Journal, Vol. 75, 1996, p. 251s-260s.
- (46) EVANS, G. M.; *The effect of vanadium in manganese containing MMA weld deposits*, Welding Research Abroad, Vol. 28, 1992, p. 22-32.
- (47) HE, K.; EDMONDS, D. V.; *Formation of acicular ferrite and influence of vanadium alloying*, Materials Science and Technology, Vol. 18, 2002, p. 289-296.
- (48) GARCIA-MATEO, C.; CAPDEVILLA, C.; CABALLERO, F. G.; DE ANDRÉS, C. G.; *Influence of V precipitates on acicular ferrite transformation. Part 1: The role of nitrogen*, ISIJ International, Vol. 48, 2008, p. 1270-1275.
- (49) EVANS, G. M.; *The effect of niobium in manganese containing MMA weld deposits*, Welding Research Abroad, Vol. 28, 1992, p. 33-44.
- (50) EVANS, G. M.; *Effect of Nitrogen on C-Mn steel welds containing titanium and boron*. Welding Journal, Vol. 59, 1998, p. 239s-248s.
- (51) OH, D. W.; OLSON, D. L.; FROST, R. H.; *The influence of boron and titanium on low-carbon steel weld metal*, Welding Journal, Vol. 69(4), 1990, p. 151s-158s.
- (52) LAU, T. W.; SADOWSKI, M. M.; NORTH, T. H.; WEATHERLY, G. C.; *Effect of nitrogen on properties of submerged arc weld metal*, Materials Science and Technology, Vol. 4, 1988, p. 52-61.
- (53) MILLS, A. R.; THEWLIS, G.; WHITEMAN, J. A.; *Nature of inclusions in steel weld metals and their influence on the formation of acicular ferrite*, Materials Science and Technology, Vol. 3, 1987, p. 1051-1061.
- (54) DOWLING, J. M.; CORBETT, J. M.; KERR, H. W.; *Inclusion phases and the nucleation of acicular ferrite in submerged arc welds in high strength low alloy steels*, Metallurgical Transactions, Vol. 17A, 1986, p. 1611-1623.

- (55) SOUZA E SILVA, K. R.; VAZ, C.T.; BRACARENSE, A. Q.; *Influência da corrente de soldagem e ângulo de ataque sobre a transferência metálica e perfil dos cordões durante a soldagem por arraste com eletrodos revestidos impermeáveis*, Anais XXXVIII CONSOLDA, Ouro Preto, 2012.
- (56) AMERICAN WELDING SOCIETY; AWS A5.1: Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, 1991.
- (57) BRACARENSE, A. Q.; *Shielded metal arc welding electrode heating control by flux ingredients*, PhD Thesis, Colorado School of Mines, 1994, 262 p.
- (58) EVANS, G.M.; BAILEY, N.; Metallurgy of basic weld metal, First edition, Cambridge: Abington Publishing, 1997, 432p.
- (59) JARVIS, B. L., *Chapter 3: Gas tungsten arc welding, New developments in advanced welding*, Editado por Nasir Ahmed, Woodhead Publishing, 2005, 308 p.
- (60) MODENESI, P. J.; *A química da formação do cordão na soldagem TIG*, Soldagem e Inspeção, Vol. 18, n. 3, 2013, p. 287-300.
- (61) HOWSE, D. S.; LUCAS, W.; *Investigation into arc constriction by active fluxes ifor tungsten inert gas welding*, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 5, n. 3, 2000, p. 189-193.
- (62) BONIZEWSKI, T.; *Manual metal arc welding – old process, new developments. Part II: Understanding MMA electrodes*. The Metallurgist and Materials Technologist, Vol,11, n°11, 1979, p. 640-643.
- (63) BRACARENSE, A. Q.; LIU, S.; *Chemical composition variations in shielded metal arc welds*, Welding Journal, Vol. 72, 1993, p. 529s-536s.
- (64) SETIÉN, J.; HERNÁNDEZ, D.; GONZÁLEZ, J. J.; *Characterization of ladle furnace basic slag for use as construction material*, Construction and building materials, Vol. 23, 2009, p. 1788-1794.
- (65) TSAKIRIDIS, P. E.; PAPADIMITRIOU, G. D.; TSIVILLIS, S.; KORONEOS, C.; *Utilization of steel slag for Portland cement clinker production*, Journal of hazardous materials, Vol. 152, 2008, p.805-811.

(66) NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY;  
[http://srdata.nist.gov/its90/download/type\\_k.tab](http://srdata.nist.gov/its90/download/type_k.tab),

(67) NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY;  
[http://srdata.nist.gov/its90/download/type\\_s.tab](http://srdata.nist.gov/its90/download/type_s.tab),

## 8. Anexos

### 8.1. Calibração do sistema de medição de temperatura do metal de solda e eletrodo revestido

A diferença de potencial ou tensão ( $E$ ) em  $\mu V$  gerada por um termopar pode ser relacionada com a temperatura ( $t$ ) em  $^{\circ}C$  através do polinômio indicado na Equação 8.1. O valor dos coeficientes desse polinômio, para os termopares tipo K e S, é indicado na Tabela 8.1.

**Equação 8.1** 
$$T = c_0 + c_1E + c_2E^2 + c_3E^3 + \dots + c_iE^i$$

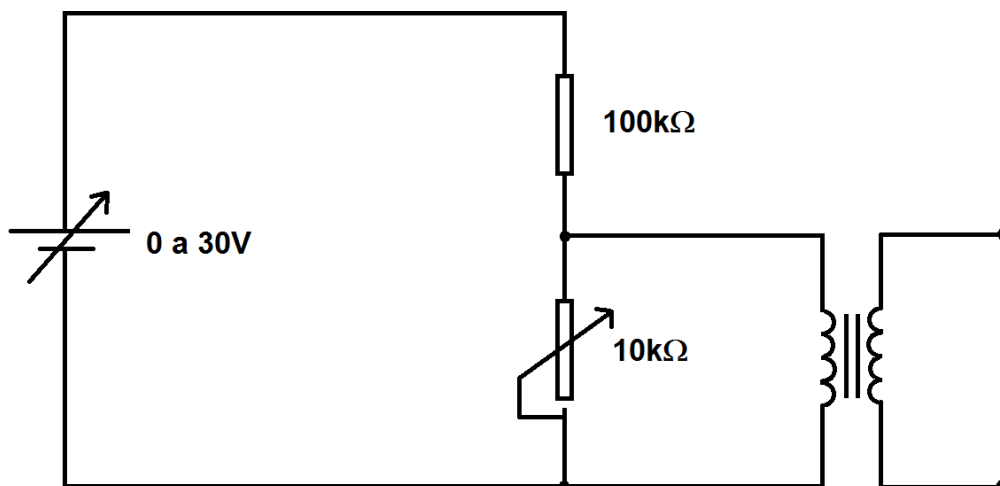
**Tabela 8.1:** Coeficientes do polinômio para os termopares Tipo K (66) e Tipo S (67).

Coeficiente ( $c_i$ )	Termopar Tipo K (0 a 500°C)	Termopar Tipo S (250° a 1250°C)
0	0,0	$1,291507177 \times 10^1$
1	$2,508355 \times 10^{-2}$	$1,466298863 \times 10^{-1}$
2	$7,860106 \times 10^{-8}$	$-1,534713402 \times 10^{-5}$
3	$-2,503131 \times 10^{-10}$	$3,145945973 \times 10^{-9}$
4	$8,315270 \times 10^{-14}$	$-4,163257839 \times 10^{-13}$
5	$-1,228034 \times 10^{-17}$	$3,187963771 \times 10^{-17}$
6	$9,804036 \times 10^{-22}$	$-1,291637500 \times 10^{-21}$
7	$-4,413030 \times 10^{-26}$	$2,183475087 \times 10^{-26}$
8	$1,057734 \times 10^{-30}$	$-1,447379511 \times 10^{-31}$
9	$-1,052755 \times 10^{-35}$	$8,211272125 \times 10^{-36}$

Como no sistema de aquisição de dados utilizado a tensão de entrada é amplificada, há necessidade de conhecer o fator de multiplicação. A partir daí é possível estabelecer uma relação entre a tensão informada pelo termopar e a registrada pelo computador. Posteriormente, através do emprego dos polinômios que relacionam diferença de potencial (tensão) com temperatura, é possível realizar a conversão.

Com o objetivo de conhecer relação entre as tensões de entrada e saída nos transdutores utilizados no sistema de aquisição de dados, foi empregada uma fonte de alimentação variável marca Polimed modelo PMI-3005D com saída de 0 a 30V. Para obter-se sinais de tensão na faixa de valores desejada, ou seja, compatíveis com a tensão gerada pelos termopares (0 a 50mV), foi empregado o arranjo ilustrado na Figura 8.1. As tensões entrada e saída foram lidas utilizando um multímetro marca Fluke modelo 289. A Tabela 8.2 apresenta os valores de tensão de entrada e saída nos transdutores utilizados nos experimentos. A partir desses dados, utilizando regressão linear, foram obtidas as equações que descrevem o comportamento dos transdutores. Os coeficientes das equações de primeira ordem ( $y = ax + b$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) são apresentados na Tabela 8.3.

Para calibrar esse sistema foi montado o arranjo da Figura 8.2. Termopares foram soldados a uma chapa. Essa chapa foi aquecida e, durante seu resfriamento, o sistema de aquisição de dados e um multímetro (Fluke modelo 289) realizaram o registro dos dados de modo simultâneo. Esse procedimento foi realizado com o sistema configurado para medições utilizando tanto o termopar Tipo S quanto o Tipo K. A temperatura foi calculada empregando as equações dos transdutores e os polinômios.



**Figura 8.1:** Arranjo utilizado para ajuste da tensão de alimentação.



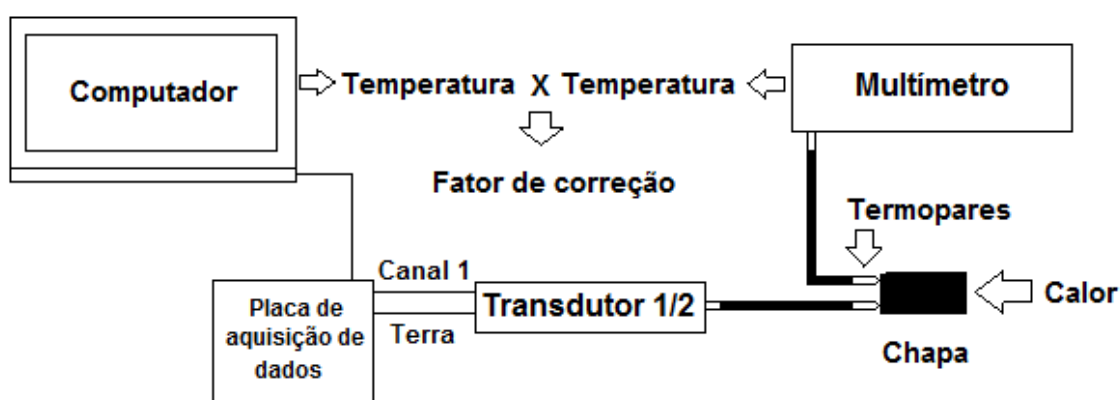
**Tabela 8.2:** Tensões de entrada e saída nos transdutores.

Transdutor 1		Transdutor 2	
Entrada (V)	Saída (V)	Entrada (V)	Saída (V)
$0,49 \times 10^{-3}$	0.366	$0,48 \times 10^{-3}$	0.424
$1,00 \times 10^{-3}$	0.480	$1,04 \times 10^{-3}$	0.535
$1,48 \times 10^{-3}$	0.576	$1,47 \times 10^{-3}$	0.620
$1,80 \times 10^{-3}$	0.620	$2,00 \times 10^{-3}$	0.720
$2,01 \times 10^{-3}$	0.680	$2,40 \times 10^{-3}$	0.802
$2,55 \times 10^{-3}$	0.790	$3,55 \times 10^{-3}$	1.050
$3,50 \times 10^{-3}$	0.986	$4,00 \times 10^{-3}$	1.135
$4,25 \times 10^{-3}$	1.090	$5,00 \times 10^{-3}$	1.340
$4,30 \times 10^{-3}$	1.140	$6,90 \times 10^{-3}$	1.720
$5,00 \times 10^{-3}$	1.290	$9,00 \times 10^{-3}$	2.150
$6,50 \times 10^{-3}$	1.640	$12,00 \times 10^{-3}$	2.730
$7,50 \times 10^{-3}$	1.790	$14,80 \times 10^{-3}$	3.280
$9,22 \times 10^{-3}$	2.145	$17,20 \times 10^{-3}$	3.760
$12,10 \times 10^{-3}$	2.700	$22,22 \times 10^{-3}$	4.740
$14,80 \times 10^{-3}$	3.260	$27,20 \times 10^{-3}$	5.710
$17,20 \times 10^{-3}$	3.960	$30,00 \times 10^{-3}$	6.260
$21,60 \times 10^{-3}$	4.170	$34,90 \times 10^{-3}$	7.280
$27,7 \times 10^{-3}$	5.700	$37,20 \times 10^{-3}$	7.760
$30,3 \times 10^{-3}$	6.280	$40,00 \times 10^{-3}$	8.360
$36,4 \times 10^{-3}$	7.470	$44,00 \times 10^{-3}$	9.240
$44,5 \times 10^{-3}$	9.220	$47,20 \times 10^{-3}$	9.930

**Tabela 8.3:** Coeficientes das equações que relacionam a tensão de entrada e saída dos transdutores.

Transdutor	Coeficientes		R <sup>2</sup>
	a	b	
Transdutor 1 (Termopar Tipo K)	$5,04 \times 10^{-3}$	$-1,42 \times 10^{-3}$	0,998
Transdutor 2 (Termopar Tipo S)	$4,97 \times 10^{-3}$	$-1,56 \times 10^{-3}$	0,999

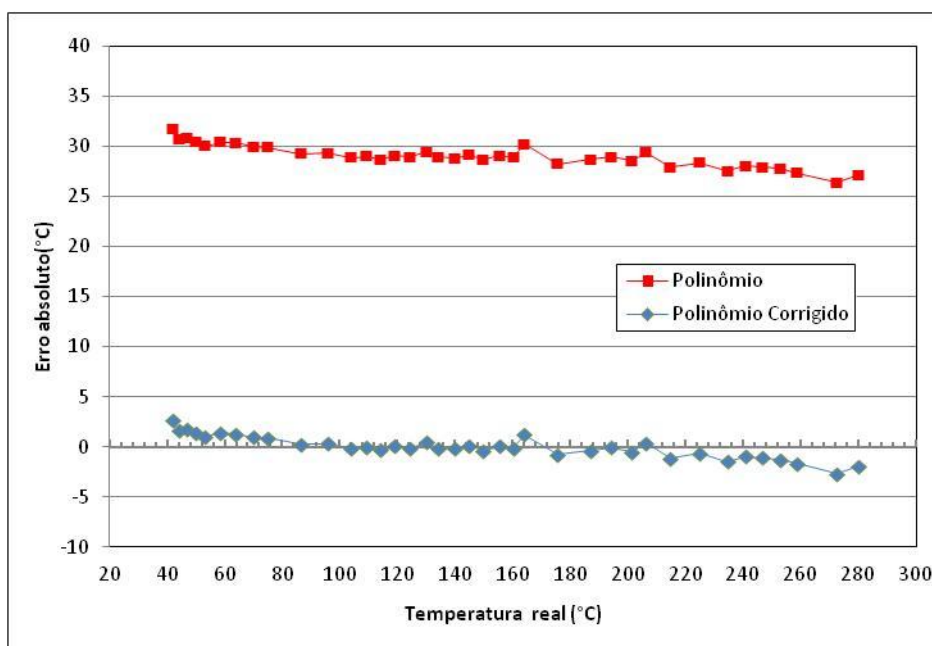
Os resultados obtidos a partir do sistema de aquisição de dados foram comparados com os valores de temperatura registrados pelo multímetro. Os fatores de correção listados na Tabela 8.4 foram adicionados aos polinômios utilizados na conversão da tensão em temperatura de tal modo a minimizar o erro. Nas Figura 8.3 e Figura 8.4 são apresentados os gráficos com o erro absoluto antes e após a correção para os sistemas com os termopares Tipo K e Tipo S.



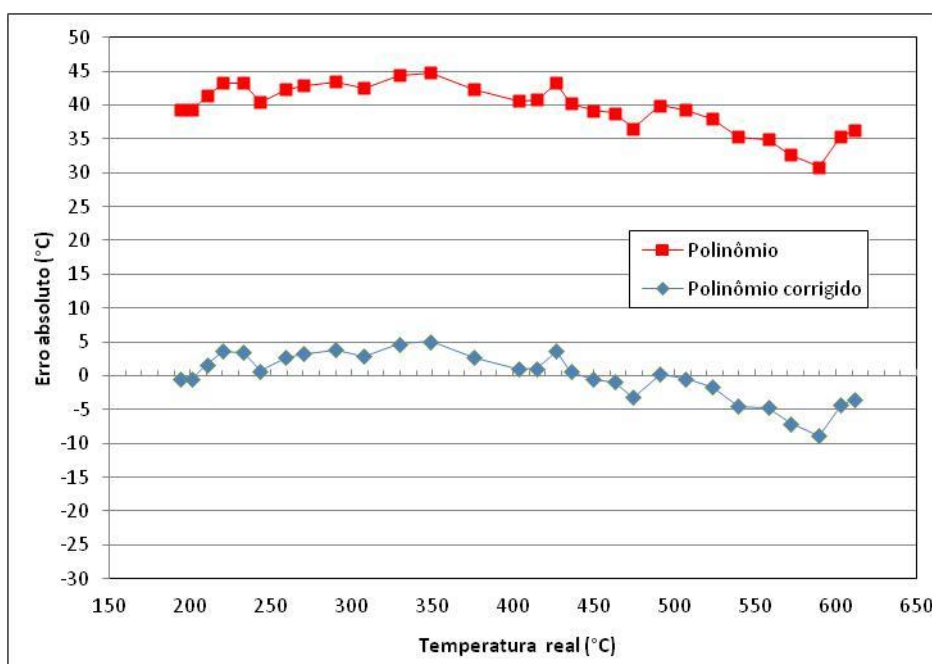
**Figura 8.2:** Arranjo utilizado na calibração do sistema de aquisição de dados.

**Tabela 8.4:** Fatores de correção adicionados aos polinômios.

Transdutor 1 (Termopar Tipo K)	Transdutor 2 (Termopar Tipo S)
29,02	39,69

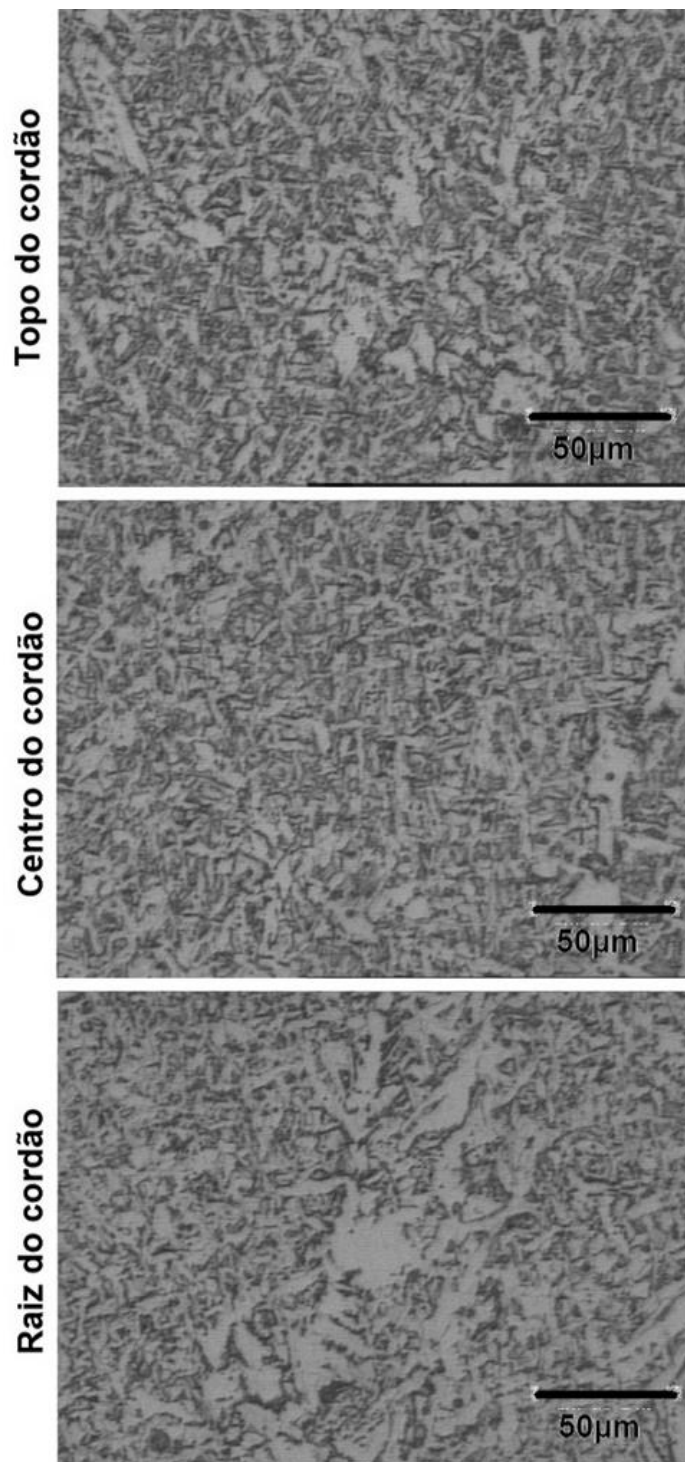


**Figura 8.3:** Gráficos de erro absoluto antes e após a correção em função da temperatura. Transdutor 1 (Termopar tipo K)

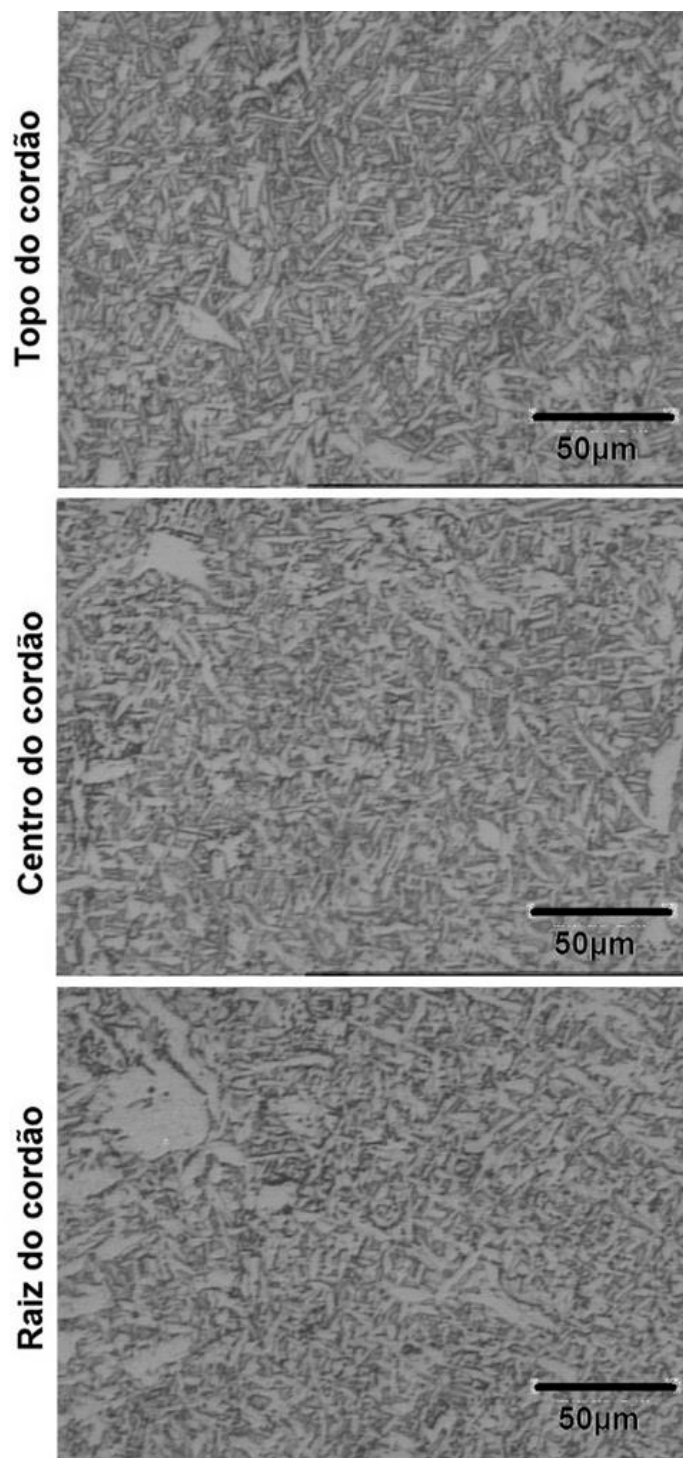


**Figura 8.4:** Gráficos de erro absoluto antes e após a correção em função da temperatura. Transdutor 2 (Termopar tipo S)

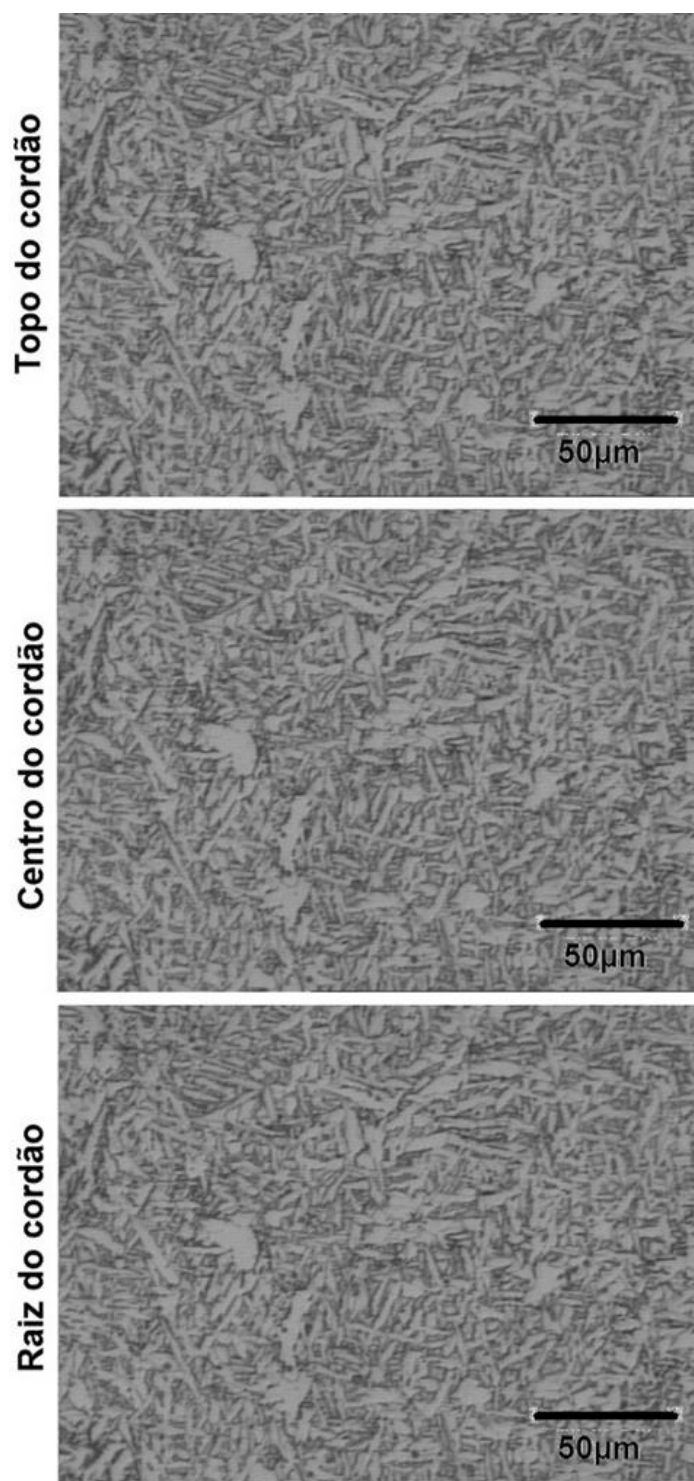
## 8.2. Microestrutura dos metais de solda



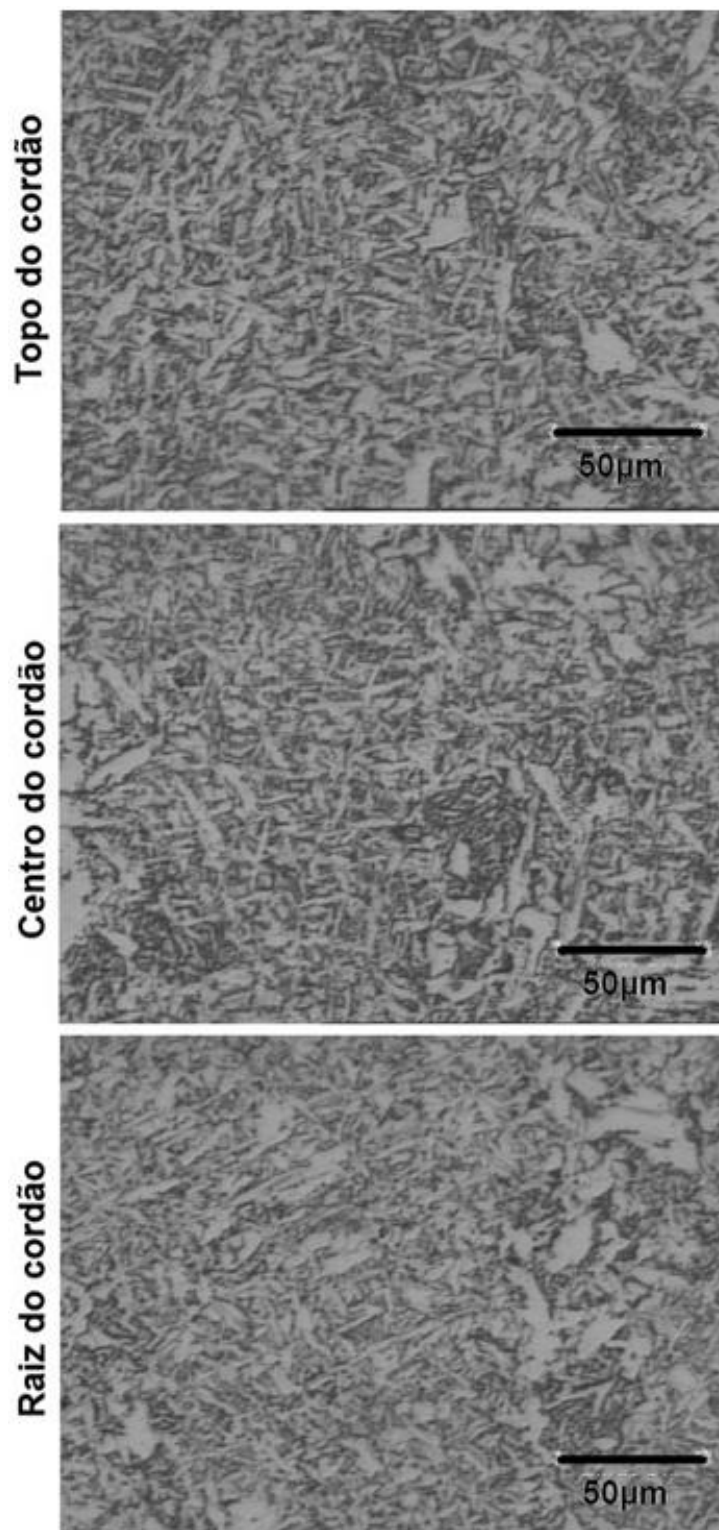
**Figura 8.5:** Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 1P).



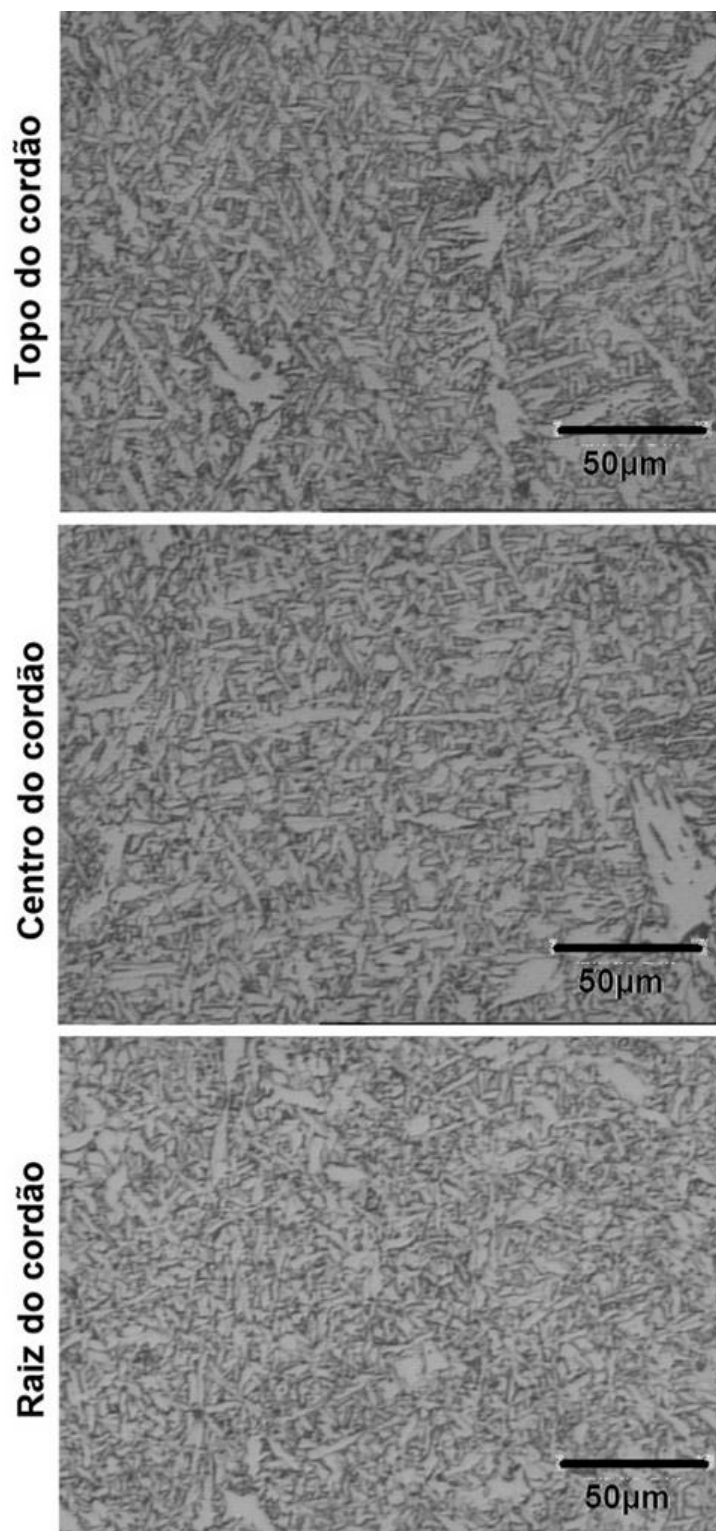
**Figura 8.6:** Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 2P).



**Figura 8.7:** Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 4P).



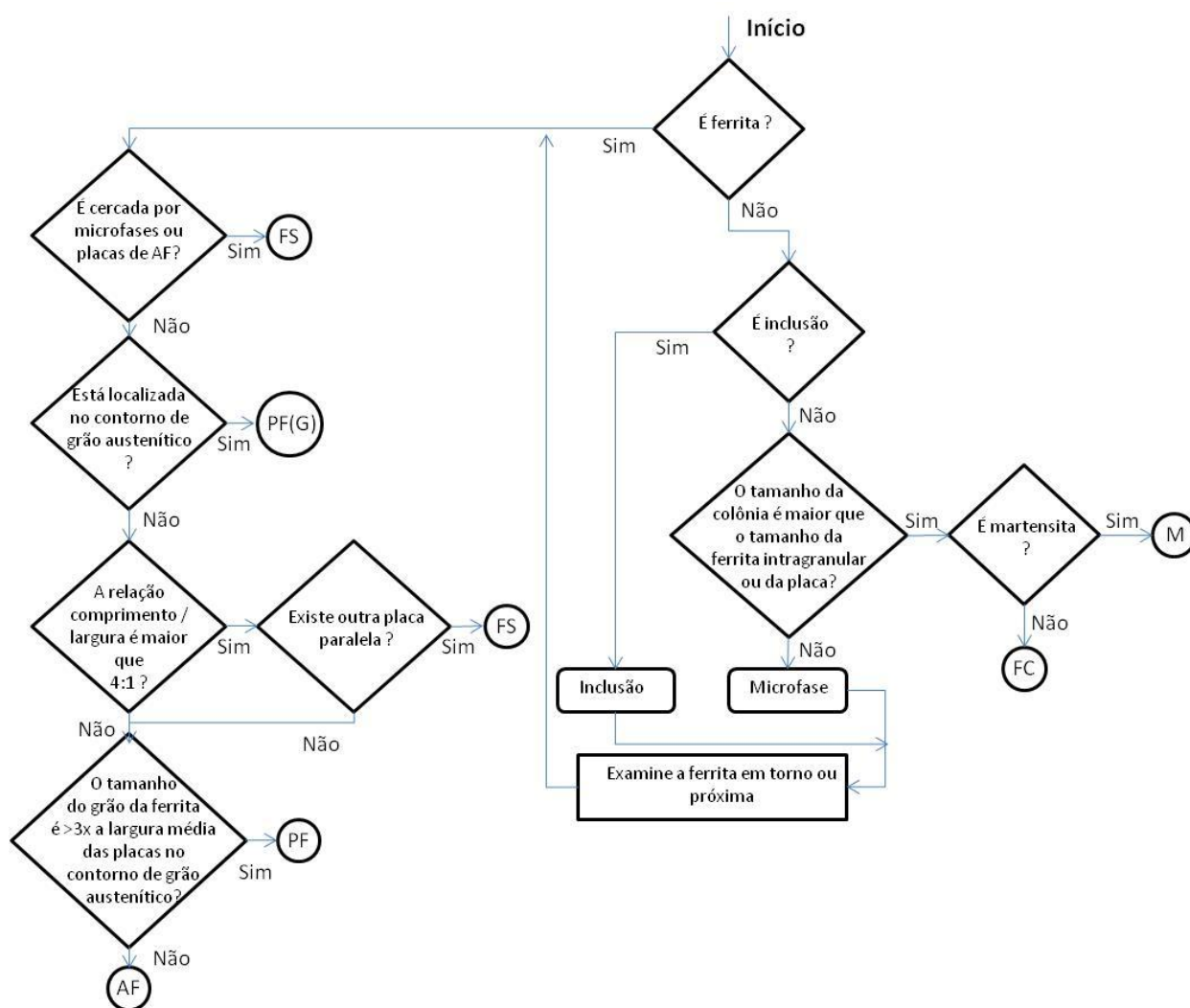
**Figura 8.8:** Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 5P).



**Figura 8.9:** Microestrutura do metal de solda depositado pelo eletrodo com polímero (Amostra 6P).



### 8.3. Fluxograma para quantificação dos constituintes em metais de solda ferríticos proposto pelo IIW



**Figura 8.10:** Fluxograma para identificação de constituintes em metais de solda ferríticos. Traduzido a partir do IIW Doc. No. IX-1533-88 (14).

## 8.4. Carta do ICDD para o Fluoreto de Cálcio

77-2094		Wavelength= 1.54060				C
CaF <sub>2</sub>		d(A)	Int	h	k	l
Calcium Fluoride		3.1481	999*	1	1	1
		2.7263	5	2	0	0
		1.9278	967	2	2	0
Fluorite		1.6440	284	3	1	1
		1.5740	3	2	2	2
Rad.: CuKα1	λ: 1.54060	Filter:	d-sp: Calculated			
			1.3631	96	4	0
Cut off: 17.7	Int.: Calculated	1/ICor.: 3.83	1.2509	81	3	3
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)			1.2192	5	4	2
Ref: Batchelder, D.N., Simmons, R.O., J. Chem. Phys., 41, 2324 (1964)			1.1130	142	4	2
Sys.: Cubic	S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)					
a: 5.45275(8)	b:	c:	A:	C:		
α:	β:	γ:	Z: 4	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 3.199	Dm:	ICSD #: 060369				
Peak height intensity. PSC: cF12. No R value given. At least one TF missing. Structural reference: Batchelder, D.N., Simmons, R.O., J. Chem. Phys., 41, 2324 (1964). Mwt: 78.08. Volume[CD]: 162.12.						


 © 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
 PCPDFWIN v. 2.2

Figura 8.11: Carta do ICDD para o composto Fluoreto de Cálcio