



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

YURI SOARES NEGREIROS

**ESTUDO DA ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDA A TOPO
POR CENTELHAMENTO PARA AUMENTO DE PRODUÇÃO DE
BOBINA A QUENTE DECAPADA (BQD)**

**Fortaleza
2014**

Yuri Soares Negreiros

**ESTUDO DA ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDA A TOPO
POR CENTELHAMENTO PARA AUMENTO DE PRODUÇÃO DE
BOBINA A QUENTE DECAPADA (BQD)**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

Coorientador: M. Sc. Douglas Luciano da Silva Oliveira.

**Fortaleza
2014**

Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.

Para solicitar a ficha catalográfica de seu trabalho, acesse o site: www.biblioteca.ufc.br, clique no banner Catalogação na Publicação (Solicitação de ficha catalográfica)

YURI SOARES NEGREIROS

**ESTUDO DA ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDA A TOPO
POR CENTELHAMENTO PARA AUMENTO DE PRODUÇÃO DE
BOBINA A QUENTE DECAPADA (BQD)**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.
Aos meus pais,
Luis Eduardo Negreiros e
Amélia Rilva Soares Negreiros.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a Deus, pelo dom da vida.

À minha querida e amada mãe, pois somente ela sabe o quanto esta caminhada foi difícil, e sem o apoio e amor incondicional dela, não seria possível.

Ao meu querido pai, pois mesmo não estando presente em corpo durante minha vida acadêmica, tenho certeza que estava em espírito, me ajudando e ensinando no que quer que fosse.

Aos meus irmãos, que sempre me ajudaram no que fosse preciso.

À minha querida tia Maria Lucia Negreiros, por ter me dado apoio quando mais se precisava, tanto emocionalmente como financeiramente, pois sem a sua ajuda, não estaria onde estou agora.

Ao Ph.D. Marcelo José Gomes da Silva, pela orientação do TCC e ajuda durante toda esta caminhada.

Ao M. Sc. Douglas Luciano da Silva Oliveira, pela excelente orientação durante o estágio, por todas as palavras de incentivo e pela amizade.

Aos professores e amigos participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu e Dr. Flávio Gaspar Herculano pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões, como também por toda a ajuda que me foi dada durante minha formação acadêmica e trabalhos realizados no LACAM.

Aos engenheiros Rafael Martins de Lima e Marlos Lopes de Oliveira, pelas ajudas, trabalhos e incentivos durante o estágio.

Ao Gabriel Santos Cunha, por ter trilhado durante todas as dificuldades durante o estágio.

Ao gerente da Gerência de Decapagem Ácida, Gerson Alves, pelas palavras de incentivo.

Ao gerente geral de laminados a quente, Danilo Guelli Gonçalves De Oliveira, pela oportunidade de estagiar numa área incrível como é a GDA.

Aos meus colegas e amigos, Luis Fernando (Stalone), Jardel Belo, Daniel Lucena e Nathanael Wagner, por todas as horas de risadas, estudos e amizade nesta jornada realizada.

Aos meus queridos amigos Aline, Danilo, Barbara, Victor, Erika, Cinthia, Vinicius, Israel, Thais, Alessandra, Larissa, Tom, por sempre me apoiarem e me darem forças, não importando a distância que exista entre nós.

RESUMO

Em uma linha de decapagem contínua (LDC), o tempo de parada da entrada para realização da solda é um dos fatores que mais afeta a produtividade. Estratificando-se o tempo total dessa parada, parte significativa é composta pelo tempo de centelhamento, que é um dos parâmetros fundamentais da soldagem a topo por centelhamento. Adicionalmente, a energia elétrica e o gás natural, consumidos durante o processo de soldagem, contribuem para onerar o custo de transformação da Bobina a Quente Decapada (BQD). A fim de reduzir esse tempo e os custos de transformação, utilizando-se de uma metodologia para o controle e melhoria contínua do processo, avaliou-se, através de análise metalográfica, ensaios de embutimento, tração e dureza, a qualidade de juntas soldas com tempos reduzidos e sem o uso do sistema de depleção de oxigênio, para aços de baixo carbono, de acordo com referências da literatura. Com base nos resultados obtidos, foi possível reduzir o tempo médio de solda em 5s em materiais com espessuras superiores a 2,50mm e eliminar a necessidade do uso de gás natural em todos os aços da GRADE 0, que são aços baixo carbono e boa soldabilidade, o que representa em torno de 76% das bobinas produzidas nas LDCs. Este trabalho foi desenvolvido nas linhas de decapagem contínua da Companhia Siderúrgica Nacional.

Palavras-chave: Soldagem a topo por centelhamento, Produtividade, Decapagem

ABSTRACT

In a continuous pickling line (CPL), the entry down time is one of the constraints in productivity. Stratifying the total down time, significant part consists in flashing time, which is one of the fundamental parameters of Flash Butt Welding. Furthermore, electricity and natural gas consumed during welding process, contribute to raise process costs. In order to reduce time and process costs, using a methodology for the control and continuous process improvement, was evaluated through metallographic analysis, Olsen cup, tensile test and hardness test, the quality of welds joints with diminished time and without oxygen depletion system for low-carbon steels according to the literature. Based on achieved results, it was possible to reduce the average weld time in 5s for materials with thicknesses greater than 2.50 mm and eliminate the need of natural gas use in all GRADE 0 steels, that are low carbon steels and good weldability, which represents around 76% of coils processed in the CPLs. This work was developed in continuous pickling lines of the Companhia Siderúrgica Nacional.

Keywords: Flash Butt Welding, Productivity, Pickling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - parcelas de volume de produção (%ton/ton) das grades de solda processadas nas LDCs.	16
Figura 2- Esquema mostrando as resistências dos componentes no processo de soldagem por resistência elétrica a ponto.	18
Figura 3- Sistema de soldagem a topo.....	20
Figura 4- Processo de STC, (a) Posicionamento inicial de fixação das peças, (b) após a energia elétrica ser ligada, as peças são aproximadas com uma velocidade v_1 , ocorrendo o centelhamento quando pontos das superfícies entram em contato, (c) após o aquecimento adequado das superfícies, a corrente é desligada e é aplicado a força de recalque (com uma velocidade $v_2 > v_1$) para a formação da solda, (d) Rebarbação.....	22
Figura 5- Ciclos Térmicos no centro do cordão para a soldagem de chapa grossa com diferentes temperaturas de pré aquecimento.	24
Figura 6- Diagrama esquemático de um ciclo de soldagem por centelhamento.	27
Figura 7 - Esquema de junta soldada com desalinhamento.....	30
Figura 8 - Esquema de orientação dos grãos antes e após o recalque.	36
Figura 9 - (a) Ruptura no sentido perimetral - APROVADO (b) Ruptura no sentido radial – REPROVADO.....	41
Figura 10 - Esquema de corte de amostras para realização de ensaios.....	41
Figura 11 - Confecção dos corpos de prova para realização de ensaios.	42
Figura 12 – Micrografias da interface de solda da amostra de 2,25mm. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.	48
Figura 13 - Micrografias da interface de solda da amostra de 3,00mm. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.	51
Figura 14 - Micrografias da interface de solda da amostra de 4,25mm. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.	54
Figura 15 – Linha de fluxo da amostra 2,25mm. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.	56
Figura 16 - Linha de fluxo da amostra 3,00mm. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.....	58
Figura 17 - Linha de fluxo da amostra 4,25mm. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.	59
Figura 18 - Resultados do Minitab do ensaio de dureza na interface da solda amostra 3,00mm. a) Distribuição dos resultados; b) Resultado do teste de hipóteses.	61
Figura 19 - Resultados do Minitab do ensaio de dureza na interface da solda	

amostra 4,25mm. a) Distribuição dos resultados; b) Resultado do teste de hipóteses.

.....61

Figura 20 - Resultados DOE. a)Gráfico de Pareto sobre a adoção do parâmetro proposto e o uso de gás natural; b)Análise do principal efeito na aprovação da solda.

.....62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os tempos de centelhamento da CSN com o do fabricante do equipamento, o Welding Handbook (WH) e Resistance Welding Manual (RWM), levando em consideração a espessura do material.	15
Tabela 2 - Parâmetro Tempo de Centelhamento em segundos de acordo com cada faixa de espessura.	39
Tabela 3 - Tabela de referência para alteração do Parâmetro	39
Tabela 4 - Amostragem adotada para o DOE	43
Tabela 5 - Resultados obtidos do ensaio de embutimento.....	44
Tabela 6 - Resultados de Limite de Escoamento.....	44
Tabela 7 - Resultados de Limite de Resistência.	45
Tabela 8 - Comparativo dos resultados do Parâmetro Proposto em relação ao Atual.	60
Tabela 9 - Valores de dureza das amostragens estudadas	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Apresentação.....	13
1.2 Situação-Problema	14
1.3 Objetivo.....	15
1.4 Justificativa	15
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1 Processos de Soldagem por Resistência	17
2.2 Materiais Suscetíveis ao Processo de Soldagem por Resistência Elétrica (SRE).....	19
2.3 Tipos De Soldagem Por Resistência Elétrica	20
2.3.1 Soldagem A Topo.....	20
2.3.5 Processo De Soldagem À Topo Por Centelhamento	21
2.3.5.1 Etapas Do Processo De Soldagem À Topo Por Centelhamento	23
2.3.5.1.1 Pré Aquecimento.....	23
2.3.5.1.2 Centelhamento.....	25
2.3.5.1.3 Recalque	26
2.3.5.2 Parâmetros Do Processo De Soldagem À Topo Por Centelhamento .	27
2.3.5.3 As Máquinas De Soldagem A Topo Por Centelhamento	Erro! Indicador não definido.
2.3.5.4 Operação Usual Da Máquina De Solda A Topo Por Centelhamento	Erro! Indicador não definido.
2.3.5.5 Componentes Mecânicos Das Máquinas De Solda A Topo Por Centelhamento De Uma Linha De Decapagem Contínua .	Erro! Indicador não definido.
2.4 Características Do Metal Base	28
2.4.1 Composição Química Do Metal Base.....	28
2.4.2 Descontinuidades De Juntas Soldadas A Topo Por Centelhamento	29
2.4.2.1 Descontinuidades Mecânicas De Juntas Soldadas A Topo Por Centelhamento	29
2.4.2.1.1 Desalinhamento	29
2.4.2.2 Descontinuidades Metalúrgicas De Juntas Soldadas A Topo Por Centelhamento	30
2.4.2.2.1 Trincas	30
2.4.2.2.2 Cavidades	31
2.4.2.2.3 Banda Branca	31
2.4.2.2.4 Vazios	32
2.4.2.2.5 Inclusões	32

2.5 Parâmetros Do Processo De Soldagem A Topo Por Centelhamento	33
2.5.1 Corrente	33
2.5.2 Centelhamento	34
2.5.3 Velocidade De Deslocamento Da Mesa Móvel	Erro! Indicador não definido.
2.5.4 Distância Inicial Dos Eletrodos	Erro! Indicador não definido.
2.5.5 Material Consumido Durante O Centelhamento.....	Erro! Indicador não definido.
2.5.6 Tensão De Centelhamento	34
2.5.7 Tempo De Centelhamento	34
2.5.8 Recalque	35
2.5.9 Força De Recalque	35
2.5.10 Velocidade De Recalque	36
2.5.11 Tempo De Duração Para Corrente De Recalque	37
2.5.12 Distância De Recalque	37
2.5.13 Tempo De Recalque	38
3 METODOLOGIA	38
3.1 Ensaios Laboratoriais	40
3.1.1 Ensaios Mecânicos	40
3.1.2 Ensaios Metalográficos	42
3.1.3 Planejamento do Experimento (DOE)	43
4 RESULTADOS E DISCURSSÃO.....	44
5 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Decapagem é um processo realizado após o processo de laminação a quente, onde o principal objetivo é a retirada do óxido formado na superfície da tira oriundo do processo anterior [1].

Para ter alta produtividade, são confeccionadas linhas de decapagem contínua, onde existe uma máquina de solda na entrada para a união da ponta e da calda de cada bobina, tornando o processo contínuo. Durante a parada para a realização da solda, existe acumuladores de tira, chamados de Loop Cars, fazendo com que o processo de decapagem seja intermitente [1].

Para este processo, é utilizado o método de soldagem a topo por centelhamento – STC, ou “Flash Butt Welding” – FBW. STC é um processo de soldagem por resistência elétrica no qual apresenta muitas vantagens tais como, resistência elevada da solda, preparação simplificada das superfícies a serem soldadas, altas taxas de produção, boa concentração de calor com a possibilidade de soldar materiais dissimilares. Presente em diversos segmentos da indústria tais como o setor automotivo, petroquímico e de não ferrosos.

Os parâmetros de soldagem devem ser bem especificados e assertivos, pois a eles estão atrelados a qualidade e confiabilidade da junta soldada, além de exercerem influência sobre a utilização e a produtividade das linhas de decapagem. Mediante a esta correlação há a necessidade de que os parâmetros estejam em acordo com a composição química do material a ser soldado, proporcionando uma solda coesa que venha a resistir as tensões submetidas ao longo das Linhas de Decapagem Contínua, a laminação e paralelamente a estes quesitos a otimização da produtividade.

Com base na literatura e em trabalhos científicos sobre o tema, foi proporcionado um conhecimento sobre a parametrização na STC além de direcionar a tomadas de decisão no processo, nos ensaios em ambiente laboratorial e na linha de produção [2-10].

1.2 Situação-Problema

Na literatura científica são encontrados trabalhos que preconizam a compreensão da influência dos parâmetros de processo de soldagem a topo por centelhamento na soldabilidade de aços de baixo carbono [2-10].

Mediante destes trabalhos, constatou-se uma divergência no parâmetro do tempo de centelhamento – Flash Time – entre o sugerido pela literatura e o utilizado nas LDCs da CSN.

O calor necessário para a realização da solda é criado a partir do estabelecimento de um arco elétrico entre as superfícies a serem soldadas. O parâmetro Tempo de Centelhamento é a variável que define o período de tempo pelo qual ocorre este arco elétrico [1].

Este parâmetro varia de acordo com os materiais a serem soldados e suas respectivas espessuras [10]. O controle adequado desta variável é fundamental, pois além de afetar a qualidade da junta soldada, há o impacto direto na produtividade, utilização (tempo líquido para produzir dividido pelo tempo programado para produzir) e no rendimento metálico das linhas de decapagem contínua 3 e 4 e na linha de laminação a frio 3.

As soldas realizadas nas LDCs 3 e 4 da Companhia Siderúrgica Nacional estão sendo realizadas com o parâmetro tempo de centelhamento superior ao tempo proposto de projeto e ao que a literatura sugere de acordo com as espessuras das chapas conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre os tempos de centelhamento da CSN com o do fabricante do equipamento, o Welding Handbook (WH) e Resistance Welding Manual (RWM), levando em consideração a espessura do material.

ESPESSURA(mm)	ATUAL	FABRICANTE	WH	RWM
1,38	7	6	3,25	7,5
1,64	8	6	4	8
1,89	9	7	5	8,5
2,25	10	8	6	9
2,40	11	8	7	9
2,78	12	8	9	9,5
3,29	14	9	11	10
3,80	16	10	13	10
4,31	18	11	15	11
4,81	20	12	17	12
5,32	22	14	19	14
5,83	24	15	15	16
6,22	24	16	24	18

Fonte: CSN e [1 e 10].

1.3 Objetivo

Promover a redução do custo de transformação da BQD pela diminuição do tempo de centelhamento e inibição do gás de proteção, mantendo as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas adequadas à confiabilidade e segurança da solda.

1.4 Justificativa

A produtividade nas empresas vem se tornando cada vez mais crucial em um ambiente de crescente abertura externa e globalização dos negócios. Sua gestão está se tornando um dos quesitos essenciais na formulação das estratégias de competitividade no mercado [1].

Com a redução do tempo de centelhamento em soldas a topo por centelhamento em aços baixo carbono, processados nas linhas de decapagem continua 3 e 4 da CSN, se objetiva um aumento na produtividade e paralelamente na redução do custo de transformação da bobina a quente visto que não foi utilizado o gás de processo.

Os materiais estudados são os da "Grade 0" – classificação interna da CSN

correspondente a um grupo de aços com baixo carbono, apresentando características químicas, mecânicas e metalúrgicas semelhantes e considerados de fácil soldabilidade.

A opção pela escolha deste conjunto de aços decorre do fato deste ter um alto volume de produção representado no ano de 2012 (ver Figura 1), 76% de todos os materiais processados pela gerência de decapagem ácida.

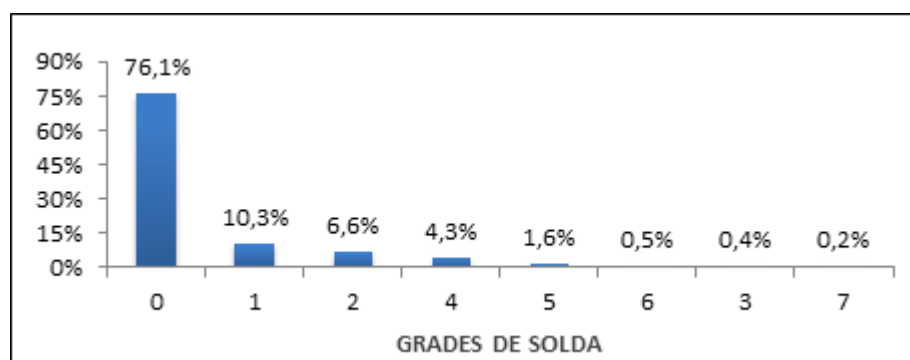


Figura 1 - parcelas de volume de produção (%ton/ton) das grades de solda processadas nas LDCs.

Fonte: Autoria própria.

As escolhas das espessuras as quais seriam analisadas seguiram o mesmo propósito: visar uma maior representatividade do volume de produção. A concepção adotada foi à escolha dentre as faixas de espessura consideradas alta (4,25mm), média (3,00mm) e baixa(2,25mm) onde foi selecionada a espessura mais processada em cada uma delas.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Processos de Soldagem por Resistência

Segundo Modenesi P. J. et. Al (2006):

A soldagem por resistência elétrica – SRE, ou “Resistance Welding - RW”, compreende um grupo de processos de soldagem nos quais o calor necessário à formação da junta soldada é obtido pela resistência à passagem da corrente elétrica através das peças que estão sendo soldadas. O aquecimento da região da junta pela passagem da corrente elétrica abaixa a resistência mecânica do material permitindo, através da aplicação de pressão, a deformação localizada e, assim, a soldagem por deformação da junta. Em alguns casos, ocorre uma fusão localizada na região da junta. Assim, neste processo de soldagem pode ocorrer a formação da solda tanto por fusão como por deformação [3].

Durante o processo as peças são aquecidas pelo efeito Joule e ocorre a fusão localizada na região de contato entre ambas [4].

A quantidade de calor gerado para promover esta fusão depende de três fatores: da quantidade de corrente elétrica, da resistência dos metais que compõe a junta e do tempo no qual a corrente leva para percorrer a junta em questão. A quantidade de calor pode ser calculada usando estes três fatores através da equação 1 [4].

$$Q = I^2Rt \quad (1)$$

onde:

Q = calor gerado, Joules

I = corrente elétrica, ampères

R = resistência da junta, ohms

t = tempo, segundos

A corrente ao quadrado, o tempo e a resistência são diretamente proporcionais. Uma parte do calor gerado é usado para promover a fusão do metal, isto é, da solda, e a outra parte é conduzida ao redor da junta e do eletrodo [4].

A resistência total do conjunto, ou resistência entre eletrodos, é a somatória de todas as resistências à circulação de corrente elétrica entre os eletrodos conectados ao secundário de um transformador, ou seja, é um conjunto de cinco resistências

elétricas, conforme ilustrado na Figura 3 [3,5].

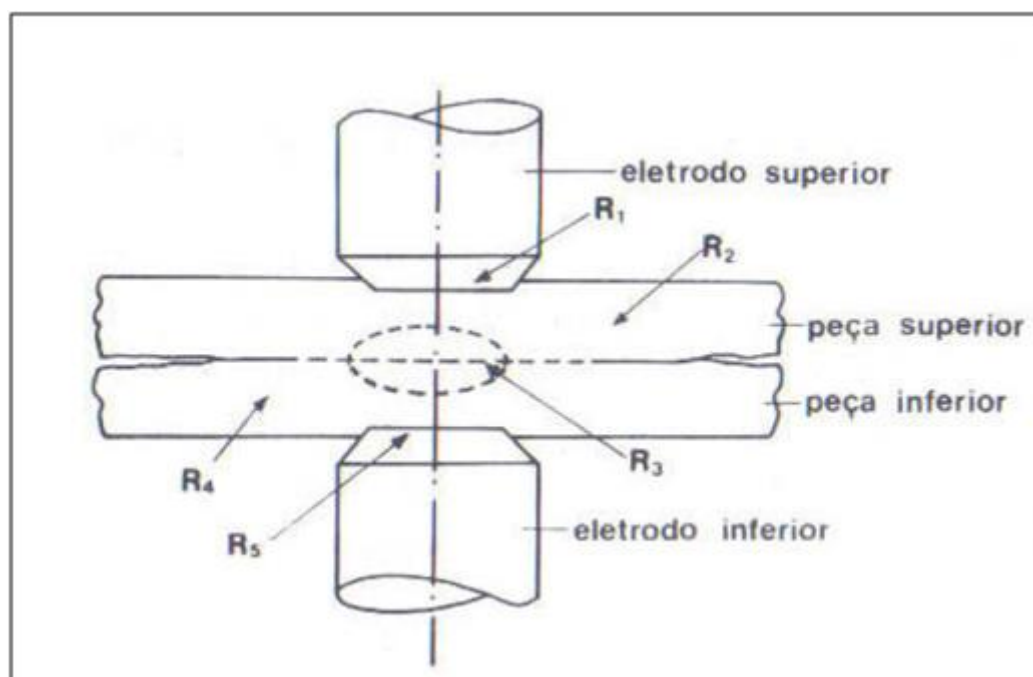


Figura 2- Esquema mostrando as resistências dos componentes no processo de soldagem por resistência elétrica a ponto.

Fonte: [4].

A resistência realiza oposição ao movimento do fluxo de corrente elétrica. Quanto maior for o módulo da resistência do metal, menor será o calor gerado pela passagem do fluxo de corrente através do mesmo em contrapartida quanto menor for este módulo de resistência do metal, mais calor é gerado pelo mesmo fluxo de corrente [4].

A resistência total do conjunto é dada pela somatória das resistências parciais, de acordo com a equação 2 [4]:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (2)$$

Onde

R_T = Resistência elétrica total do conjunto ou resistência entre eletrodos (Ω)

R_1 = Resistência de contato entre eletrodo superior e peça superior (Ω)

R_2 = Resistência da peça superior (Ω).

R_3 = Resistência de contato entre as peças superior e inferior (Ω).

R4 = Resistência da peça inferior (Ω).

R5 = Resistência de contato entre eletrodo inferior e peça inferior (Ω).

Dentre as resistências envolvidas no processo, R3 é a mais importante, porque é nesse local que se formará a geração de calor para ocorrer a fusão localizada. As resistências R1 e R5 tornam-se também importantes no caso de metais com baixa resistividade elétrica. As resistências R2 e R4 não têm praticamente influência nos estágios iniciais de soldagem; são importantes, porém, nos estágios finais, pois os materiais já estarão aquecidos, e quanto maior a temperatura do material a ser soldado, maior será sua resistência elétrica [4-6].

Portanto pode-se concluir que as resistências de contato têm papel muito mais importante na geração de calor, durante o processo de soldagem por resistência, do que as resistências das peças a serem soldadas [4].

2.2 Materiais Suscetíveis ao Processo de Soldagem por Resistência Elétrica (SRE)

Pelo processo SRE pode-se soldar uma grande gama de materiais – quase todos os tipos de aço, fundidos de diversas composições químicas, metais leves, ligas não ferrosas – para este último deve-se executar regulagens convenientes em equipamentos compatíveis e utilizar eletrodos de ligas especiais para se suceder a soldagem [7].

Dentre esta multiplicidade de materiais os quais podem ser soldados estão também a maior parte das chapas zincadas e galvanizadas, desde que o material de revestimento tenha ponto de fusão inferior ao material de base, onde a solda é realizada, assim o material de recobrimento em fusão se desloca para a periferia de ponto de solda.

Metais de naturezas diferentes podem ser soldados entre si quando suscetíveis de formar liga, ou quando se introduz entre eles material que pode ligar-se com os metais de base (Brasagem) [4,7,9].

2.3 Tipos De Soldagem Por Resistência Elétrica

2.3.1 Soldagem A Topo

Neste caso, conforme Figura abaixo, as duas superfícies de contato devem ter a mesma área, para tornar possível, em toda a seção, a mesma densidade de corrente e o mesmo aquecimento[5 - 7].

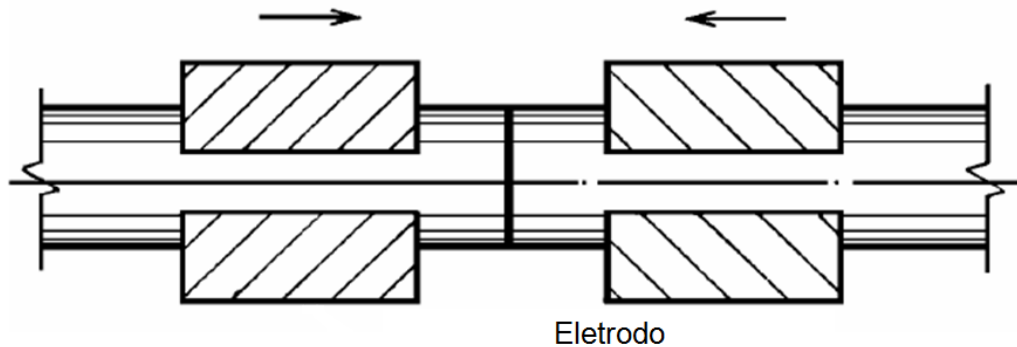


Figura 3- Sistema de soldagem a topo.

Fonte: [3].

Os eletrodos têm formas diferentes, são mordentes e envolvem total ou parcialmente as peças a serem soldadas.

Neste tipo de solda, faz-se distinção entre dois gêneros de execução: Topo a topo por resistência e por centelhamento.

- Soldagem Por resistência: Este processo é utilizado para materiais com seção de forma geométrica: quadrados, redondos, sextavados, etc. As peças são prensadas uma contra a outra, por meio de um dispositivo de compressão, depois é ligado a corrente de solda [4-5].

- Soldagem à topo por centelhamento: Ao contrário da solda topo a topo por resistência, este processo não requer nenhuma preparação das superfícies de contato. Neste sistema, Liga-se a corrente e depois as superfícies de contato, que

podem apresentar qualquer forma, são postas lentamente em contato, sob uma pressão de compressão reduzida. Como o início do contato é provocado por uma irregularidade na superfície dos materiais, o processo de fusão inicia-se no ponto de solda, pelos arcos elétricos formados pelas irregularidade da superfície entre as peças, este sistema acelera-se e estende-se, progressivamente [4-6].

Dentre os processos acima, o enfoque deste TCC será dado ao Processo de Soldagem à Topo por Centelhamento, que é empregado nas Linhas de Decapagem Contínuas da Companhia Siderúrgica Nacional.

2.3.5 Processo De Soldagem À Topo Por Centelhamento

Na soldagem à topo por centelhamento (Flash Butt Welding, FBW), as peças a serem soldadas são aproximadas sem as suas superfícies entrarem em contato. A energia elétrica é acionada e, então, as peças são colocadas em movimento relativo de modo a se aproximarem com uma velocidade constante. Este movimento causa o contato elétrico e estabelece-se um fluxo de corrente promovendo um aquecimento resistivo das superfícies das peças até que o ponto de fusão, inicialmente em poucos pontos de contato, do material seja alcançado. O volume de material fundido, que se aproxima de uma forma esférica, devido aos efeitos da tensão superficial, é então expelido violentamente para fora da região da solda através de forças magnéticas superficiais criadas pelo fluxo de corrente, com a conseqüente formação de pequenas partes incandescentes de material sob formas de faíscas e centelhas.[6-7]

Por ação do centelhamento, ocorre a vaporização dos pontos em contato, permitindo, desta forma, que novos pontos entrem em contato e o centelhamento se espalhe por toda a superfície da junta. Após certo tempo de centelhamento, quando todas as superfícies a serem unidas estiverem suficientemente aquecidas, a corrente de soldagem é desligada e inicia-se a força de recalque, onde as peças são fortemente pressionadas uma contra a outra sofrendo considerável deformação plástica nas superfícies da junta o que leva à formação da solda [8,10].

Durante o recalque, ligações interatômicas se estabelecem através da área interfacial total, a natureza destas ligações é tal que, ocorre o coalescimento das

duas superfícies e a resistência mecânica da junta fica comparável com a aquela do metal base [10 - 11].

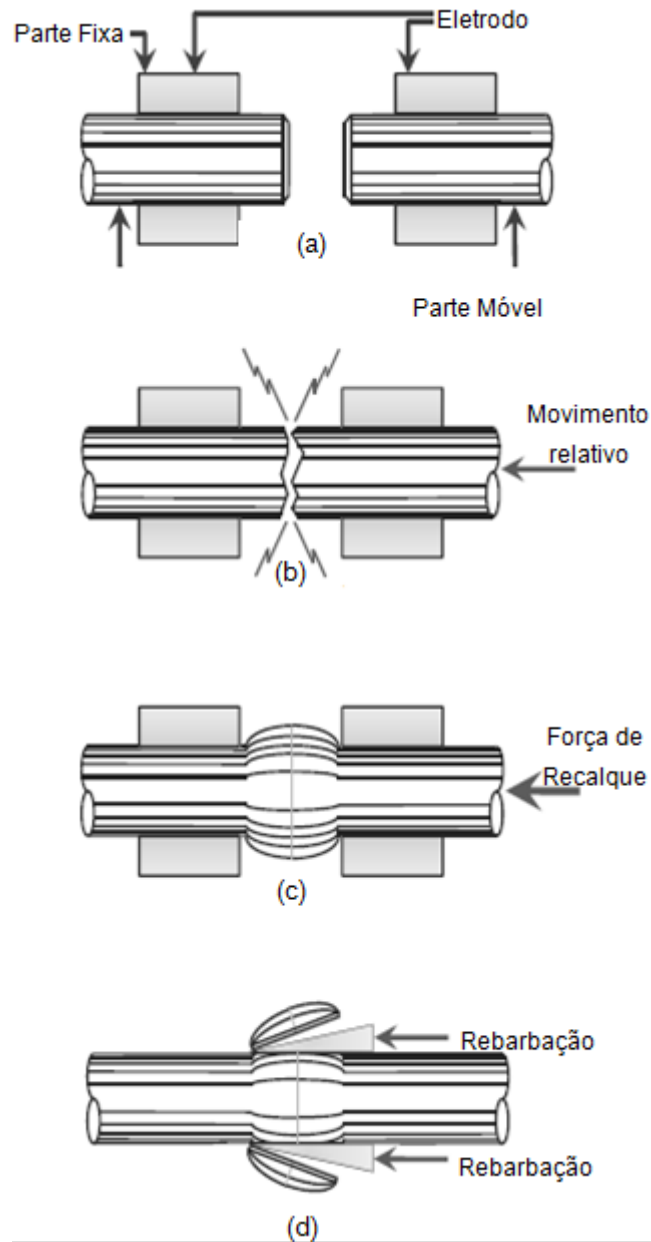


Figura 4- Processo de STC, (a) Posicionamento inicial de fixação das peças, (b) após a energia elétrica ser ligada, as peças são aproximadas com uma velocidade v_1 , ocorrendo o centelhamento quando pontos das superfícies entram em contato, (c) após o aquecimento adequado das superfícies, a corrente é desligada e é aplicada a força de recalque (com uma velocidade $v_2 > v_1$) para a formação da solda, (d) Rebarbação.

Fonte: [3].

O Processo de Soldagem a Topo por Centelhamento (STC) é extremamente eficiente, realizando soldas em seções de grande extensão em períodos curtos de tempo sem a necessidade de uma preparação elaborada das interfaces a serem soldadas [9], sendo amplamente aplicado na produção de rodas de aço automotivas, tubulações, trilhos ferroviários, correntes, estruturas marítimas e para união de bobinas a quente na indústria metalúrgica em processos de decapagem contínuas [10].

2.3.5.1 Etapas Do Processo De Soldagem À Topo Por Centelhamento

O processo de soldagem a topo por centelhamento pode ser dividido em 3 etapas distintas: pré aquecimento, centelhamento e recalque.

2.3.5.1.1 Pré Aquecimento

Segundo Modenesi P. J. et. al(2006) Define-se, como temperatura de pré-aquecimento, a temperatura inicial em que toda a peça ou a parte desta onde a solda será realizada é colocada antes do início da operação. Como a energia de soldagem, a utilização de pré-aquecimento causa uma diminuição na velocidade de resfriamento (principalmente nas temperaturas mais baixas) Figura abaixo nos gradientes térmicos [9].

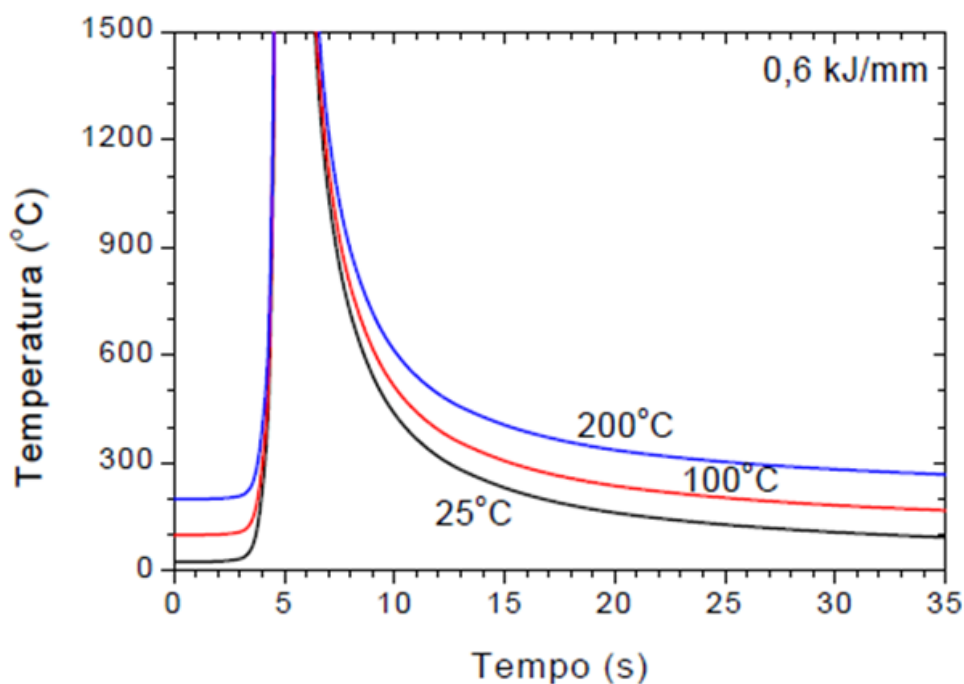


Figura 5- Ciclos Térmicos no centro do cordão para a soldagem de chapa grossa com diferentes temperaturas de pré-aquecimento.

Fonte:[4].

Segundo Omweg, fazendo-se alterações no pré-aquecimento e nos parâmetros de soldagem, obtém-se uma mudança na taxa de resfriamento da solda e ainda influência a microestrutura na junta soldada e ZTA [12].

O pré-aquecimento é um processo resistivo (Efeito Joule), onde o calor é gerado pela resistência elétrica das chapas. Deve haver pressão mínima para que haja contato das juntas e, assim, a criação de um curto circuito, mas também deve limitar-se a uma pressão máxima que evite o centelhamento prematuro e não ocorra a soldagem das chapas [5,6].

O contato das juntas deve ser mantido por um curto período de tempo para evitar um sobreaquecimento localizado, podendo gerar até mesmo a queima das matrizes de fixação. Assim, teoricamente, a melhor forma de realizar esse pré-aquecimento é em ciclos, onde as juntas são unidas por um breve período de tempo e separadas, permitindo que o calor se difunda para o interior das chapas [13].

A operação de pré aquecimento é usada em soldagem principalmente com o intuito de reduzir a velocidade de resfriamento da ZTA pelo calor, e com isto, se obter microestruturas mais dúcteis, conseqüentemente, menos suscetíveis ao surgimento de trincas [13].

Em resumo, o pré-aquecimento reduz:

- O risco de surgimento de trincas;
- As tensões residuais;
- A dureza na zona termicamente afetada (ZTA).

O pré aquecimento se faz ou não necessário ser aplicado dependendo do teor de carbono e de outros elementos de liga no metal a ser soldado. Se corpos de prova soldados sem tratamento térmico apresentarem baixa ductilidade ou dureza muito alta, é indicativo da necessidade de pré-aquecimento ou pós-aquecimento. Além da composição química, a rigidez da junta a ser soldada e o processo de soldagem também influenciam a necessidade de se realizar um pré aquecimento.

A necessidade do pré-aquecimento aumenta com os seguintes fatores [12]:

- Teor de carbono do material de base;
- Teor de ligas do material de base;
- Tamanho da peça;
- temperatura inicial;
- velocidade de soldagem;

2.3.5.1.2 Centelhamento

Acontece nesta etapa o maior aquecimento das chapas. O nome centelhamento deriva da projeção de centelhas, partículas incandescentes de metal fundido, que surgem nos minúsculos pontos de contato entre as juntas a serem soldadas [9, 13].

As juntas são aproximadas e unidas sob uma baixa pressão e os pontos de contato são quase que instantaneamente fundidos devido à alta densidade de corrente que atravessa a região quando o circuito é fechado. Os pontos de contato aquecidos explodem provocando o centelhamento e conseqüentemente a formação de crateras nas faces das juntas. De acordo com que a parte móvel da máquina de solda avança em direção a parte fixa sob uma baixa pressão, há formação de novos pontos de contato e a etapa de centelhamento continua, a fim de aquecer a região adjacente [10, 14].

Observa-se que se a velocidade de aproximação das juntas é fator importante nesta etapa; caso ela seja alta, o centelhamento cessa e ocorre o colamento das

chapas, caso ela seja baixa, o centelhamento se torna inconstante e o aquecimento das chapas insuficiente.

2.3.5.1.3 Recalque

Após o centelhamento, a solda é formada pela aplicação de uma força de compressão, denominada recalque, que faz com que as superfícies adjacentes fundidas tenham um amplo contato, expulsando-se o metal fundido para fora da interface e forjando as peças simultaneamente. A tensão que promove o centelhamento é desligada no início da aplicação da força de recalque [10, 14].

A etapa de recalque proporciona ainda a redução e/ou eliminação das porosidades geradas durante a ação do centelhamento e também a remoção dos óxidos gerados através do processo de aquecimento durante a fase do centelhamento [10, 14].

Quando o pré aquecimento não é utilizado, o processo de soldagem se resume a somente dois estágios, conforme mostra a Figura a seguir. O revenimento não é considerado como parte do processo de soldagem a topo por centelhamento.

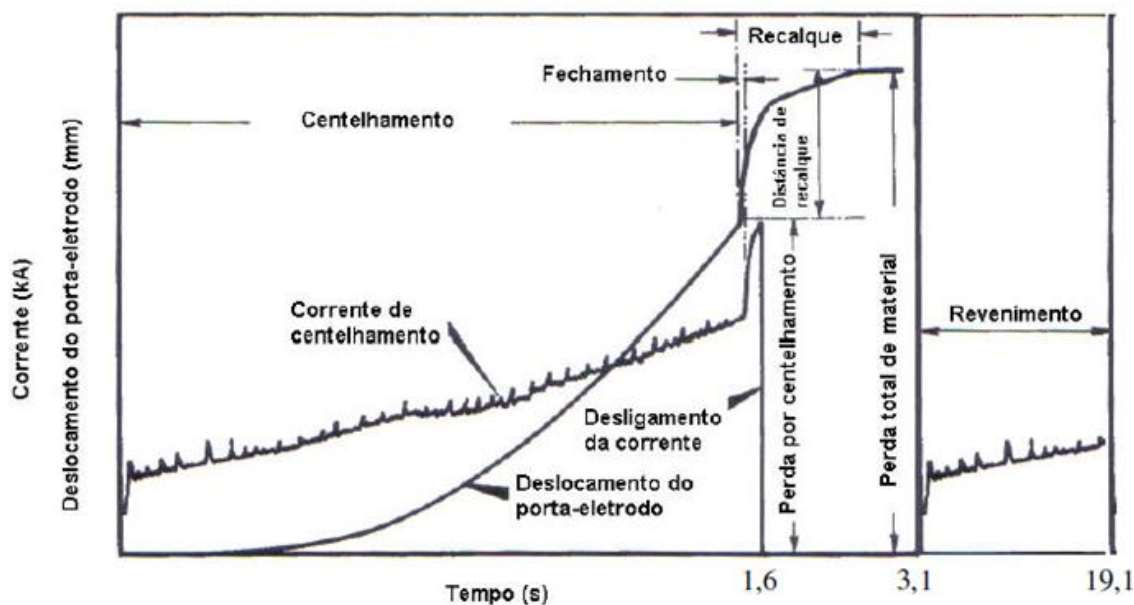


Figura 6- Diagrama esquemático de um ciclo de soldagem por centelhamento.

Fonte:[14].

2.3.5.2 Parâmetros Do Processo De Soldagem À Topo Por Centelhamento

A qualidade da junta soldada é diretamente influenciada pelos parâmetros de soldagem. O processo STC possui uma complexa gama de variáveis a serem controladas de acordo com as especificações requeridas pela junta como a redução de eventuais distorções, tensões residuais e porosidade, ou o aumento da resistência mecânica e a tenacidade. Este controle é complicado devido às sucessivas alterações metalúrgicas que ocorrem durante e após o centelhamento ocasionado pelos diferentes níveis de calor entre a interface de solda, a ZTA – Zona termicamente afetada e o material base. Adicionalmente, a composição química do material base também exerce influência sobre os parâmetros impactando na qualidade da junta [10, 13].

2.4 Características Do Metal Base

As propriedades físicas e metalúrgicas do metal base dependem exclusivamente da microestrutura do material.

Como as soldas a topo por centelhamento são realizadas sem nenhum metal de adição e devem possuir as mesmas características do metal base. No recalque, a orientação dos grãos é modificada o que pode gerar algum efeito na sua resistência mecânica.

Segundo Madeira, pode-se afirmar que [14]:

- - em ensaios de tração, o escoamento muitas vezes ocorre em ambos os lados da solda antes da fratura. A fratura ocorre no metal de base se ele é a estrutura menos resistente, ou uma região amolecida pelo calor da soldagem, se o metal de base é mais resistente [14];
- - materiais com boa resistência mecânica em altas temperaturas exigem maior força de recalque;
- - materiais que tendem a formar óxidos refratários e nitretos, por reação com a atmosfera, exigem maior quantidade de recalque e maior velocidade de início de acionamento do recalque [14];
- - para materiais com segregação, quando soldado com recalque excessivo, pode haver reorientação de sua estrutura (transversalmente à direção de laminação) e ocorre perda de ductibilidade [14].

2.4.1 Composição Química Do Metal Base

A composição química do aço está diretamente ligada à sua soldabilidade. Ela é determinada para aços de alta resistência baixa liga considerando valores para resistência mecânica, tenacidade de materiais por processos de deformação a quente controlados que podem dispensar tratamentos térmicos, ductibilidade e outros.

Segundo Yamauchi, as fraturas frequentemente são originadas por baixa ductibilidade que ocorrem em aços com alto carbono, devido à retenção de óxidos de silício, manganês e alumínio na zona soldada [15].

O carbono equivalente é empregado como indicador de temperabilidade e soldabilidade. Segundo Yurioka, o carbono equivalente é determinado por uma equação em que cada elemento de liga recebe um valor determinado que corresponde a um percentual de carbono, que é o elemento mais importante na determinação da microestrutura de um aço baixo carbono. Existem algumas diferentes equações para se calcular o carbono equivalente. A Equação (3) é a adotada pelo International Institute of Welding, para soldagem a arco [16]:

$$C_{eq} = \%C + \frac{(\%Mn)}{6} + \frac{(\%Cr+\%Mo+\%V)}{5} + \frac{(\%Ni+\%Cu)}{15} \quad (3)$$

2.4.2 Descontinuidades De Juntas Soldadas A Topo Por Centelhamento

Segundo Brandi, descontinuidade é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características mecânicas ou metalúrgicas. Não sendo necessariamente um defeito, podendo ou não tornar a peça inaceitável por não satisfazer aos requisitos mínimos da norma técnica aplicável [5].

As descontinuidades se dividem em dois grupos: descontinuidades mecânicas e descontinuidades metalúrgicas [4].

2.4.2.1 Descontinuidades Mecânicas De Juntas Soldadas A Topo Por Centelhamento

2.4.2.1.1 Desalinhamento

Após a fixação das juntas na máquina de solda, o alinhamento delas também se faz importante. Caso as juntas fiquem curvadas e não se encaixarem, elas ficarão sobrepostas ou executarão uma solda oblíqua, gerando uma fusão insatisfatória, pois metal insuficiente é expelido da região de solda durante o recalque.

O desalinhamento é proveniente de um posicionamento deficiente entre as peças

– causado por desajustes nos dies; recalque não uniforme – por força insuficiente dos dies; grande abertura no início do recalque ou ainda por corte inclinado da junta. A Figura 7 mostra uma solda com desalinhamento incorreto [4].

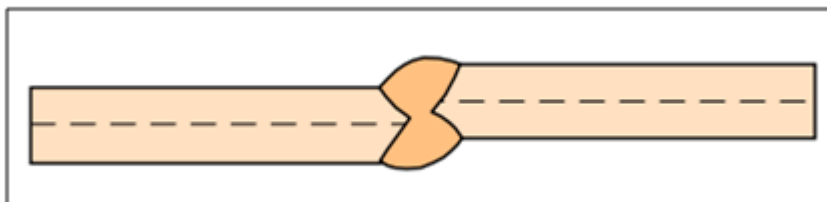


Figura 7 - Esquema de junta soldada com desalinhamento.

Fonte: [4].

2.4.2.2 Descontinuidades Metalúrgicas De Juntas Soldadas A Topo Por Centelhamento

2.4.2.2.1 Trincas

Esta descontinuidade pode ocorrer interna ou externamente nas juntas.

Segundo Peçanha, trincas são divisões finitas bidimensionais que podem ocorrer na zona de fusão, ZTA ou metal base. As trincas situadas na zona de fusão são trincas de solidificação visíveis microscopicamente e trincas intergranulares [17].

Existem algumas subdivisões quanto à origem e localização das trincas. São elas:

- Penetradores: trincas na linha central da solda. Geralmente estão associadas à soldas frias ou recalque insuficiente, sendo caracterizadas por inclusões em altas quantidades na linha central da solda [17].

- Trincas em gancho: são pequenas trincas que ocorrem em paralelo à linha central da solda causadas por segregações e/ou inclusões de aluminatos, sulfetos e silicatos. Como propiciam a mudança de direção na estrutura do metal, são o primeiro passo para a trinca a quente. Quando alinhadas no metal base, desenvolvem-se em função do recalque, progredindo na direção das linhas de fluxo [17].

- Trincas a quente: Em sua maioria, ocorrem próximas à superfície, ao longo do contorno de grão primário. São causadas ou por um filme líquido ou por uma diminuição de ductilidade a quente oriunda de constituintes com baixo ponto de fusão no contorno de grão que propiciam a perda de sua ligação intercrystalina abaixo da linha solidus [17].
- Trincas de solidificação: ocorrem em altas temperaturas devido à fragilidade a quente em ligas susceptíveis. Geralmente inicia-se na zona descarbonetada e na continuação de crateras da zona de fusão [17].

2.4.2.2.2 Cavidades

Segundo Natal, cavidades são pequenas aberturas que ocorrem na linha central da solda, junto à periferia, decorrentes da concentração de inclusões. Estas inclusões são geralmente provenientes da oxidação das superfícies durante a soldagem, mas também podem ter sido geradas a partir de segregações do metal base na linha central da solda [18].

É sabido que é formado durante o centelhamento na superfície das juntas a serem soldadas um certo volume de metal fundido que deve ser expulso durante o recalque para homogeneização metálica. Porém, a existência de cavidades fazem com que seja retido metal fundido, sendo provável que haja trincas de contração e também ductilidade mais baixa do que a do metal base.

Segundo Peçanha, as inclusões que mais contribuem para a ocorrência de cavidades são os óxidos de alumínio. Embora este defeito seja recuperável, quando ele ocorre com grande frequência, há perda de produtividade [17].

2.4.2.2.3 Banda Branca

Durante o centelhamento, há uma redistribuição das impurezas e carbono entre as fases líquida e sólida na superfície das juntas a serem soldadas. Há distribuição de carbono da fase sólida para a fase líquida, logo, há diminuição de sua

concentração no metal sólido vizinho ao metal fundido. Já durante o recalque, quando o metal fundido é expulso, a região vizinha fica com menor concentração de carbono, formando assim a banda branca ou zona descarbonetada, com um valor de dureza mais baixo. A descarbonetação diretamente ligada ao aumento da temperatura, a um maior tempo de aquecimento e à uma quantidade de carbono no metal base acima de 0,2% [18].

Essa descontinuidade aparece em uma estreita faixa ao longo da interface de solda em aços carbono. Segundo Natal, essa descontinuidade só irá influenciar a solda se existir em excesso. Essa banda branca é susceptível ao ataque químico apresentando coloração mais clara, já que possui diferente coloração química do metal base [18].

2.4.2.2.4 Vazios

São gerados quando as juntas a serem soldadas são muito grandes para a máquina de solda e a pressão é insuficiente para eliminar todas as crateras formadas durante o centelhamento [4].

2.4.2.2.5 Inclusões

Segundo Cunha, na fase final do centelhamento, as faces da junta ficam cobertas com uma fina camada de metal fundido, que no caso dos aços, esta entre 0,1 a 0,2 mm de espessura [19]. Segundo Yamauchi, também existe a formação de um filme de óxidos de alumínio, silício e manganês líquidos nesta camada. Para que essa camada de óxido se forme, podem ocorrer três situações. São elas [15]:

- Se durante a fase final do centelhamento, haver a formação de uma camada de óxido de baixo ponto de fusão como, por exemplo, óxido de ferro [15];
- Se em aços que contém teores mais elevados de silício, alumínio ou alumínio, houver a presença de óxidos refratários [15];
- Ou se houver um rápido resfriamento das faces no final do centelhamento e a

camada não pôde ser totalmente retirada no recalque [15].

Segundo Natal, a presença de inclusões e seu tamanho médio tem influência direta na tenacidade dos aços. Quanto maior o número e tamanho de inclusões, menor o valor de tenacidade [8].

2.5 Parâmetros Do Processo De Soldagem A Topo Por Centelhamento

As variáveis da soldagem a topo por centelhamento e suas combinações determinam uma distribuição de temperatura na qual a junta se encontra no momento de aproximação com a outra interface. Para cada tipo de material, dimensão e processo, existe um ciclo diferente de soldagem [7].

A melhor combinação delas é a que funciona com o menor tempo e menor consumo de material [7].

2.5.1 Corrente

Deve ser considerado um parâmetro a parte já que é ajustada através de um transformador. Tem por função provocar o centelhamento, ou seja, tem papel direto no aquecimento da junta a ser soldada. Aumentando-se a corrente aumenta-se a geração de calor na junta; assim como, ao diminuir a corrente no transformador, diminui-se a geração de calor na junta [7].

Corrente excessiva durante o centelhamento provoca um centelhamento ruim que formam crateras profundas que retêm o metal fundido e óxidos que não serão completamente removidos no recalque; já a corrente insuficiente durante o centelhamento não proporciona uma elevação de temperatura do material para que ele se torne dúctil o suficiente na região da solda, logo a solda também não terá boa qualidade [7].

Excessiva corrente de recalque gera um superaquecimento da junta e, assim, oxidação ou queima do material, e ainda excessiva deformação e/ou expulsão de material. Ao passo que corrente insuficiente de recalque provoca trincas longitudinais, inclusões de escória, óxidos e vazios na interface de solda por não

terem sido expulsos totalmente [7].

2.5.2 Centelhamento

Um controle perfeito do centelhamento também é muito importante, pois determina a distribuição da temperatura na junta a ser soldada.

Segundo Natal, o tempo de centelhamento em aços Alta Resistencia Baixa Liga (aços ARBL) deve ser 10% a 30% maior que para um aço baixo carbono, para uma eliminação eficiente de óxidos de alumínio [8].

O centelhamento tem como variáveis importantes: a velocidade de deslocamento da mesa móvel, a distância inicial entre os eletrodos, o material consumido durante o centelhamento e a tensão de centelhamento [8].

2.5.6 Tensão De Centelhamento

A ação do centelhamento pode ser iniciada mais facilmente e de maneira mais eficaz pelo uso do sistema duplo de voltagem. Assim, uma alta voltagem secundária é aplicada por um curto período de tempo para iniciar o centelhamento, passando a geração de calor então ser reduzida para assegurar condições corretas.

Tensões mais baixas podem ser empregadas no centelhamento sem que a distribuição uniforme de temperatura seja afetada [7].

2.5.7 Tempo De Centelhamento

Segundo Min, se o tempo de centelhamento for excessivo, aquece-se a região da solda excessivamente e conseqüentemente afeta a posterior pressão de recalque [20].

Caso o tempo de centelhamento for alto o material pode dobrar e ainda ocorre

crescimento exagerado de grãos. Caso o tempo de centelhamento for baixo o metal fundido não tem plasticidade o suficiente para gerar o recalque correto, além disto, irá formar crateras após o recalque [20].

Aços de baixo carbono, carbono menor que 0,25%, acalmado ao alumínio, requerem um maior tempo de centelhamento para a eliminação dos óxidos de alumínio, o que diminui também a produtividade do processo [20].

2.5.8 Recalque

O recalque pode exercer influência segundo os seus parâmetros de força, velocidade, tempo de duração para a corrente de recalque, distância e o tempo total de recalque [16].

2.5.9 Força De Recalque

Segundo Natal, nos aços ARBL a força de recalque deve ser alta para vencer a sua resistência a quente. A força de recalque é responsável por extrudar o material fundido, de modo que a solda seja feita na região plástica do metal imediatamente adjacente [8].

Essa força é maior no centro da seção e decresce de acordo com que se caminha para as bordas, já que a escória no centro da seção deve percorrer um maior caminho. Assim, evita-se a formação de pequenas inclusões e pequenas porosidades, para que não se atrapalhe a plasticidade da mesma [8].

Essa força de recalque não pode ser excessiva para que não se expulse material demais e fazendo assim com que a solda possua características ruins. Segundo a AWS – American Welding Society (2012), com uma expulsão exagerada de material, as linhas de fluxo inclinam-se na direção de 90° e partir do material adjacente não soldado e apresentam baixa resistência à fadiga, ou seja, maior risco de ocorrerem trincas na região da solda [2].

Segundo Peçanha, quando as linhas de fluxo são suaves, significa ter ocorrido na

interface da solda um bom aquecimento e recalque apropriado. Já se as linhas de fluxo forem grosseiras e escuras no sentido do escoamento, resulta de inclusões de enxofre, fósforo, sulfeto de manganês e estas inclusões podem romper o material soldado [17].

A Figura abaixo mostra a modificação da orientação dos grãos produzida durante a ação do recalque:

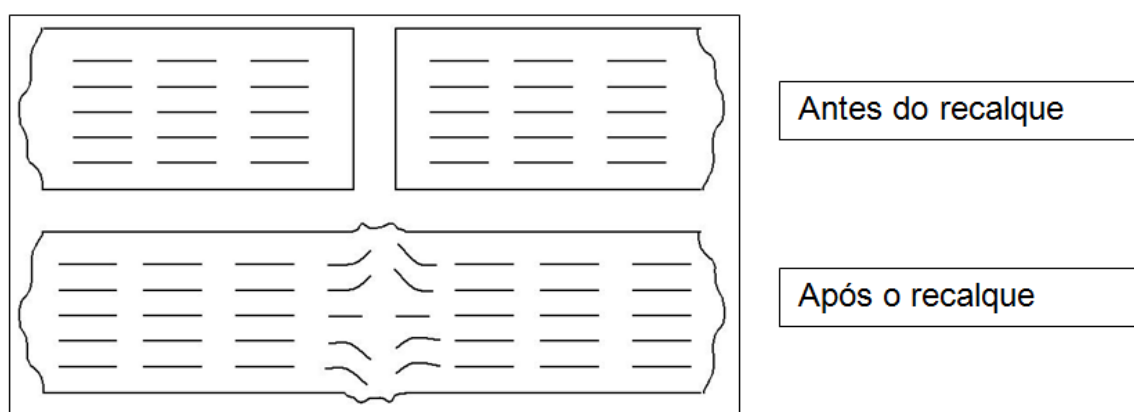


Figura 8 - Esquema de orientação dos grãos antes e após o recalque.

Fonte: [7].

2.5.10 Velocidade De Recalque

Segundo Natal, a velocidade do recalque é dividida em dois estágios; durante o primeiro estágio, a parte inicial ocorre com uma velocidade alta, por volta de 40% a 80% do deslocamento total [8].

Nessa fase inicial essa velocidade de recalque mais alta deve-se ao fato do material estar fundido e apresentar maior fluidez. Já no segundo estágio, a velocidade apresenta-se menor por se tratar da região plástica do metal e devido ao aumento de sua resistência mecânica, é dependente da distribuição de temperatura e força de recalque. Sendo assim, a velocidade de recalque ideal é determinada pela massa das partes em movimento, pela força de recalque e pela distribuição de temperatura [8].

Conforme o Metals Handbook (1983), um recalque com inclinação entre 45° e

80°, geralmente, indica que a quantidade correta de calor tem sido usada e que o recalque foi adequado. Caso haja inclinação do recalque, sendo essa muito íngreme, e havendo existência de trincas longitudinais, é porque uma força de recalque muito alta fora aplicada a um metal com uma temperatura muito baixa. As trincas longitudinais são similares a trincas de forjamento e resultam da aplicação de força de recalque antes que o metal de trabalho tenha entrado na região plástica. Havendo uma inclinação muito menor que 45°, é porque o calor e a força de recalque foram muito baixas [22].

Quando a velocidade de recalque é excessiva a junta a ser soldada se solidifica antes do término do recalque; já no caso da velocidade ser muito baixa, a interface de solda pode continuar a conter defeitos já que não expulsará completamente os óxidos e inclusões [22].

2.5.11 Tempo De Duração Para Corrente De Recalque

A duração da corrente também depende do tipo de material, da geometria e da seção transversal, sendo o melhor valor, normalmente selecionado de forma empírica [8].

2.5.12 Distância De Recalque

Segundo Natal, a distância de recalque deve ser suficiente para que: os óxidos e o metal fundido sejam totalmente extrudados do centro da espessura e de toda a seção das superfícies em contato e, ainda, para que as duas interfaces sejam forçadas ao contato metal-metal em toda a superfície da seção [8].

Aços com alta resistência mecânica, que apresentam uma maior quantidade de silício e manganês, apresentam uma maior resistência elétrica e um maior efeito Joule, possuindo uma região com maior amolecimento e necessitando de uma maior distância de recalque [21].

Com uma maior distância de recalque é formada ferrita poligonal mais refinada,

umentando assim a dureza. Isso se deve ao fato de que grãos austeníticos são refinados sob grande deformação e alta temperatura segundo um tratamento termomecânico. Com uma pequena distância de recalque, há uma pequena quantidade de deformação aplicada a uma alta temperatura, logo se aumentam os grãos austeníticos e há um amolecimento da microestrutura.

2.5.13 Tempo De Recalque

Segundo Natal, se a corrente de recalque é usada somente para reduzir a força de recalque, é fator importante o tempo requerido para alcançar a determinada quantidade de recalque [8].

Em aços com alto silício, o tempo de solda tem influência sobre a dureza da solda. Essa maior concentração de silício causa um maior grau de amolecimento e apesar de o silício ser usado para desoxidar o aço, quando possui altos valores, pode resultar em descontinuidades tipo penetrador [21].

3 METODOLOGIA

À luz de trabalhos como Resistance Welding Manual (RWMA), Welding Handbook (WH) e informações de desenhos do fabricante para uma máquina similar às utilizadas nas LDCs 3 e 4, foi possível estabelecer um comparativo entre o cenário atual que se encontram as linhas de decapagem da CSN em relação aos tempos de centelhamento sugeridos por estes trabalhos conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetro Tempo de Centelhamento em segundos de acordo com cada faixa de espessura.

Faixas de Espessura	Parâmetro Atual	Fabricante	WH	RWMA
1,27 - 1,50	8	6	4	8
1,51 - 1,75	9	6	4	8
1,78 - 2,01	10	7	5	8,5
2,02 - 2,26	12	8	6	9
2,27 - 2,51	13	8	7	9
2,52 - 3,02	14	8	9	9,5
3,03 - 3,53	16	9	11	10
3,54 - 4,04	18	10	13	10
4,05 - 4,55	21	11	15	11
4,56 - 5,05	23	12	17	12

Fonte: Autoria própria.

Adotando uma postura mais conservadora em relação ao tempo de centelhamento, decidiu-se modificar o parâmetro atual conforme a Tabela 3, incluindo a retirada do gás de proteção para se realizar os testes nas linhas de produção.

Tabela 3 - Tabela de referência para alteração do Parâmetro

Faixas de Espessura (mm)	1,27 - 1,50	1,51 - 1,75	1,78 - 2,01	2,02 - 2,26	2,27 - 2,51	2,52 - 3,02	3,03 - 3,53	3,54 - 4,04	4,05 - 4,55	4,56 - 5,05
Parâmetro Atual (Com Gás Natural)	8	9	10	12	13	14	16	18	21	23
Parâmetro Proposto (Sem Gás Natural)	6	6	7	8	8	9	11	13	15	18

Fonte: Autoria própria.

A justificativa pela decisão em não se utilizar o gás de proteção decorreu de que conceitualmente, o sistema de depleção de oxigênio com queima de gás natural foi desenvolvido para aprimorar solda em aços microligados e aços com teor de silício elevado. Além disso, antes da modernização da máquina de solda em 2001, este insumo não era utilizado no processo de soldagem e bons resultados em aços baixo carbono já eram alcançados. Desta forma optou-se em analisar o impacto deste fator na qualidade da solda.

3.1 Ensaios Laboratoriais

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios das Linhas de Zincagem da CSN.

Para a realização dos ensaios, foram retiradas 4 amostras por espessura, sendo 2 com o parâmetro atual e 2 com o parâmetro proposto. Em cada par de amostras foi realizado ensaio de embutimento em uma e na outra foram realizado os demais testes.

Para o efeito comparativo entre os parâmetros Flash Time utilizado atualmente nas linhas de decapagem da CSN e o novo parâmetro proposto foram retiradas três amostras com espessuras distintas – 2,25; 3,00 e 4,25mm para cada um deles.

3.1.1 Ensaios Mecânicos

Para a realização da aquisição de dados entre estes parâmetros, preliminarmente, foram realizados os ensaios de embutimento erichsen, logo após o processo de soldagem nas LDCs, conforme a norma ABNT NBR 5902:1980 - Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. Para avaliação, adotou-se o seguinte critério (ver Figura 9) [14]:

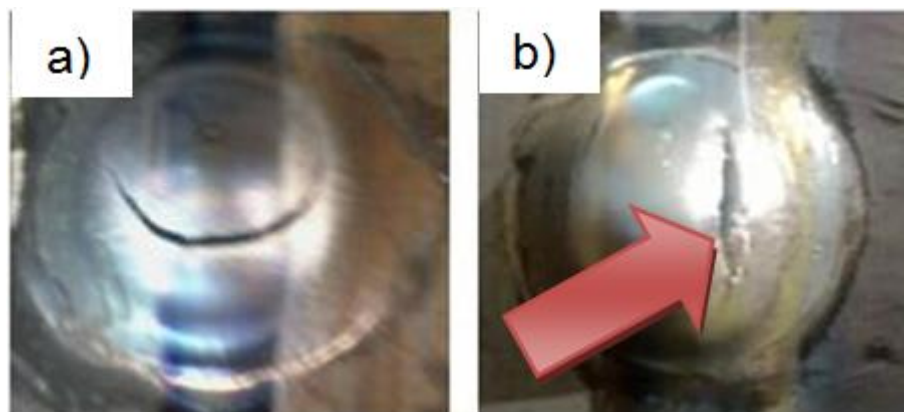


Figura 9 - (a) Ruptura no sentido perimetral - APROVADO (b) Ruptura no sentido radial – REPROVADO.

Fonte: Autoria própria.

Uma outra amostra é retirada em cada condição para realização de ensaio de tração, metalografia e linha de fluxo. Na Figura abaixo, pode-se ver como foi cortado às amostras para realização dos ensaios.

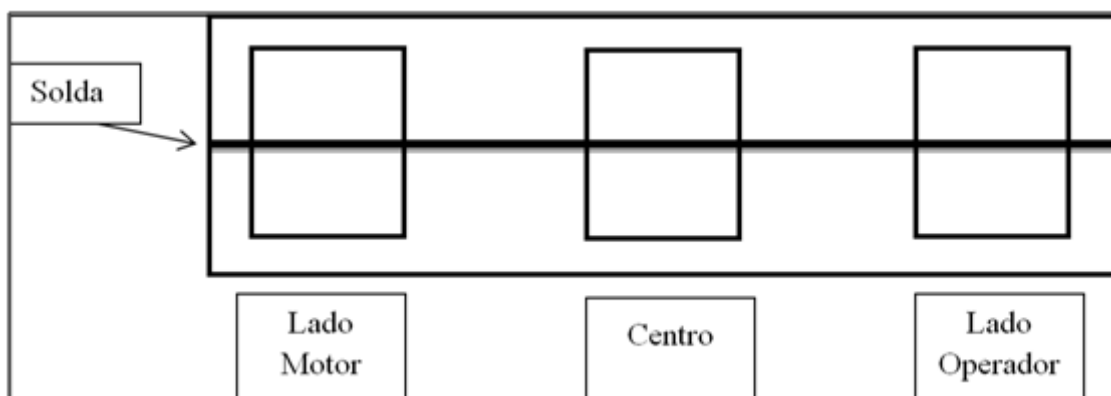


Figura 10 - Esquema de corte de amostras para realização de ensaios.

Fonte: Autoria própria.

Para cada corte realizado, o esquema de confecção de corpos de prova está descrito na figura abaixo.

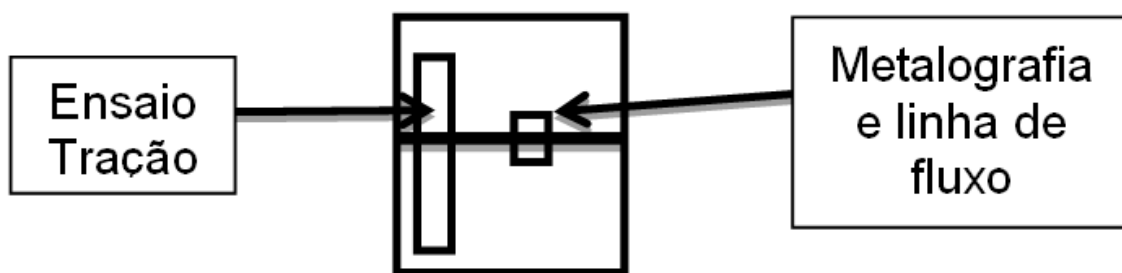


Figura 11 - Confecção dos corpos de prova para realização de ensaios.

Fonte: Autoria própria.

Para o ensaio de tração foi utilizado uma EMIC 30t na escala de 5000 kgf e velocidade constante de 5 mm/min. Foi utilizado os parâmetros de usinagem e de ensaio conforme a norma NBR6152: Materiais Metálicos - ensaio de tração a temperatura ambiente.

3.1.2 Ensaios Metalográficos

Para a análise metalográfica, as amostras foram preparadas lixando-as em lixadeiras automáticas com lixas na sequencia de 100, 200, 400, 600 e 1200 mesh, sendo depois polidas com pasta de diamante de 6, 3 e 1 micron. Foi utilizado o reagente nital 3% (mistura de álcool etílico com ácido nítrico, sendo na proporção de 3% de ácido nítrico) e analisado em microscópio ótico com aumentos variando de 12,5x até 500x.

Para a análise das linhas de fluxo, foi utilizado um reagente com a seguinte composição: 200 ml de água destilada, 1g de cloreto férrico, 2,9g de ácido pícrico e 20 ml de detergente neutro Limpol. Este reagente se prepara através da mistura de todos os reagentes manualmente. Para a realização do ataque, o reagente é aquecido até uma temperatura de 80°C e depois resfriado até uma temperatura de 50°C onde então a amostra é mergulhada na solução por aproximadamente 30 segundos, onde se começa a ter formação de uma camada escura sobre a amostra. Após o ataque, é feito uma limpeza imediata em água corrente, depois com álcool e secar com compressor de ar.

3.1.3 Planejamento do Experimento (DOE)

No decorrer do projeto, em posse de alguns resultados prévios não satisfatórios apresentados pelas alterações propostas à amostra de 2,25mm, optou-se por uma nova bateria de testes para a realização de um DOE, a fim de identificar a significância das variáveis e suas interações.

A espessura selecionada para representar a faixa <2,52mm foi a de 2,00mm, na qual foram realizados experimentos multivariados em sequência aleatória nos fatores “utilização do gás” e “tempo de centelhamento”, de acordo com o Tabela 4.

Tabela 4 - Amostragem adotada para o DOE

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8
Gás	Sem	Sem	Com	Com	Com	Sem	Sem	Com
Tempo de Centelhamento	7	7	10	10	7	10	10	7

Fonte: Autoria própria.

Para tal, foi utilizado um software estatístico computacional MINITAB 16, por onde os dados foram imputados e processados, dando uma análise confiável para tomadas de decisões.

As variáveis resposta da análise por Design Of Experiment (DOE, em português, Planejamento do Experimento) foram obtidas a partir da realização de ensaios de embutimento controlados nas soldas, onde foi mensurada a profundidade de penetração, a carga máxima e o percentual de aprovação de cada combinação testada.

4 RESULTADOS E DISCURSSÃO

Os resultados obtidos com os ensaios de Embutimento em campo estão demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados obtidos do ensaio de embutimento.

Espessura (mm)	Lado Operador (Atual)	Lado Operador (Proposto)	Centro (Atual)	Centro (Proposto)	Lado Motor (Atual)	Lado Motor (Proposto)
2,25	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
3,00	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
4,25	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Aprovado

Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Tabela acima que, nas amostras de 4,25mm, amostras soldadas no parâmetro atual foram reprovadas de acordo com os parâmetros estabelecidos para análise. Esse fato pode ser explicado por uma combinação entre parâmetros não ideais e eletrodo em fim de vida útil pois, quando o eletrodo está em fim de vida útil, ele perde certas propriedades necessárias para a realização de uma solda com qualidade. Com a alteração do parâmetro de solda, mesmo com o eletrodo em fim de vida útil, a solda mostrou ter mais qualidade.

Os ensaios de tração, cujos resultados para limite de escoamento e limite de resistência podem ser vistos na Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6 - Resultados de Limite de Escoamento.

Espessura (mm)	LIMITE DE ESCOAMENTO (Mpa)					
	Lado Operador		Centro		Lado Motor	
	Atual	Proposto	Atual	Proposto	Atual	Proposto
2,25	254	226	266	227	261	244
3,00	219	230	220	221	222	238
4,25	228	201	220	223	243	225

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 - Resultados de Limite de Resistência.

Espessura (mm)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (Mpa)					
	Lado Operador		Centro		Lado Motor	
	Atual	Proposto	Atual	Proposto	Atual	Proposto
2,25	327	326	341	330	339	321
3,00	324	315	326	332	328	333
4,25	331	323	323	329	328	331

Fonte: Autoria Própria

Todos os testes romperam fora da região de solda, mostrando que a solda apresenta boa resistência mecânica, superior ao do metal base.

Porem, ao verificar os valores, foi visto que na amostra de 2,25mm, os valores do parâmetro proposto foram abaixo do parâmetro atual, significando perda de resistência mecânica na região afetada pelo calor, sendo mais crítico o seu processamento. Nas demais espessuras, ocorre o inverso, se há um acréscimo de resistência mecânica, melhorando seu processamento.

As Figuras 13, 14 e 15 mostram as micrografias da interface de solda das amostras 2,25, 3,00 e 4,25 mm no aumento de 50x, respectivamente.

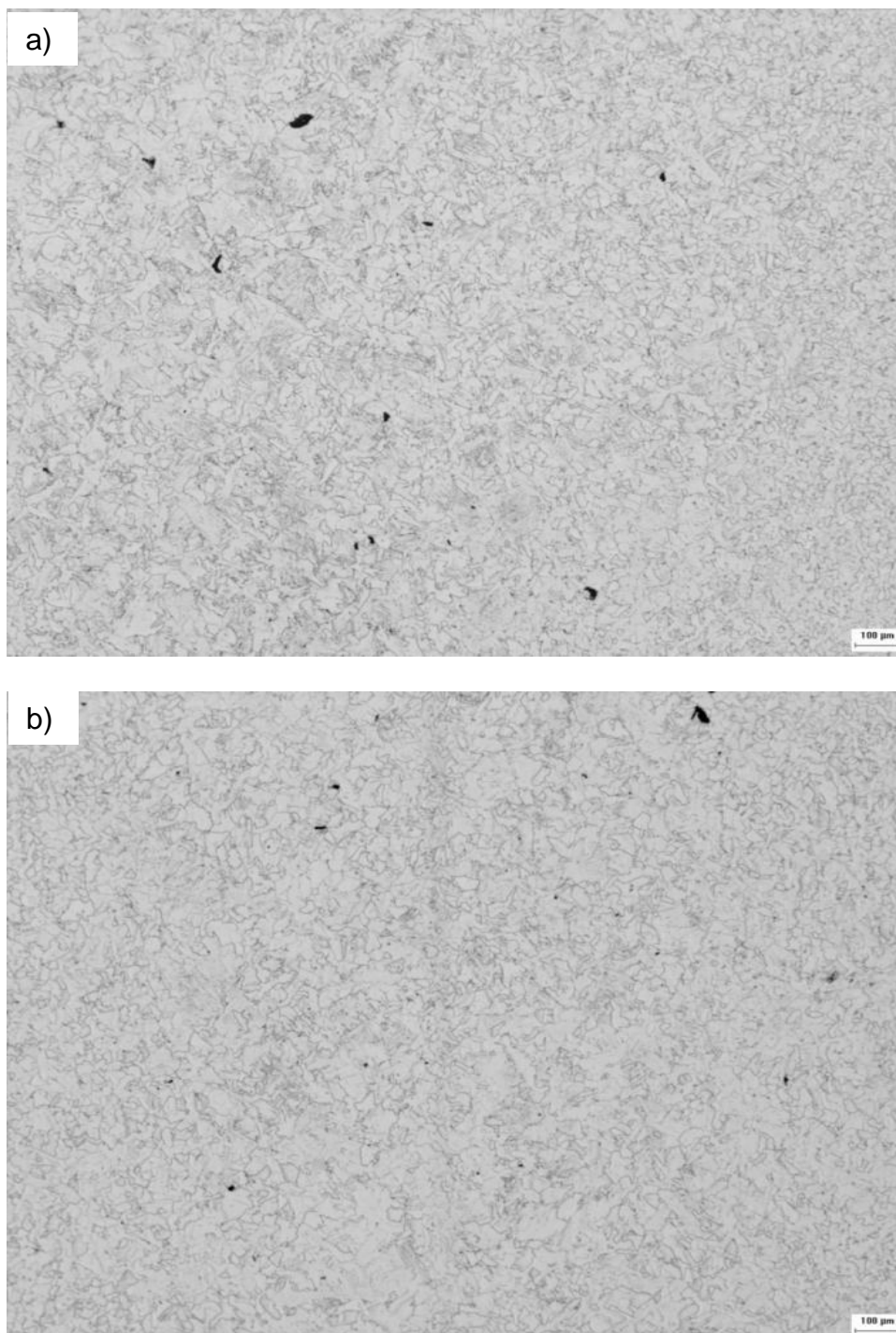


Figura 12 – Micrografias da interface de solda da amostra de 2,25mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Aatoria Própria

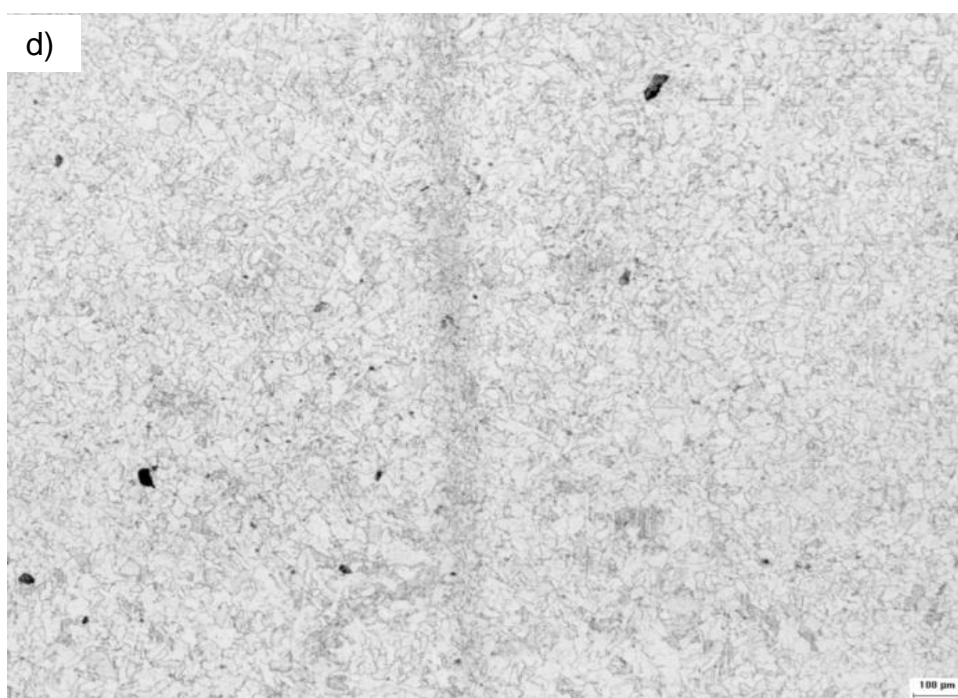
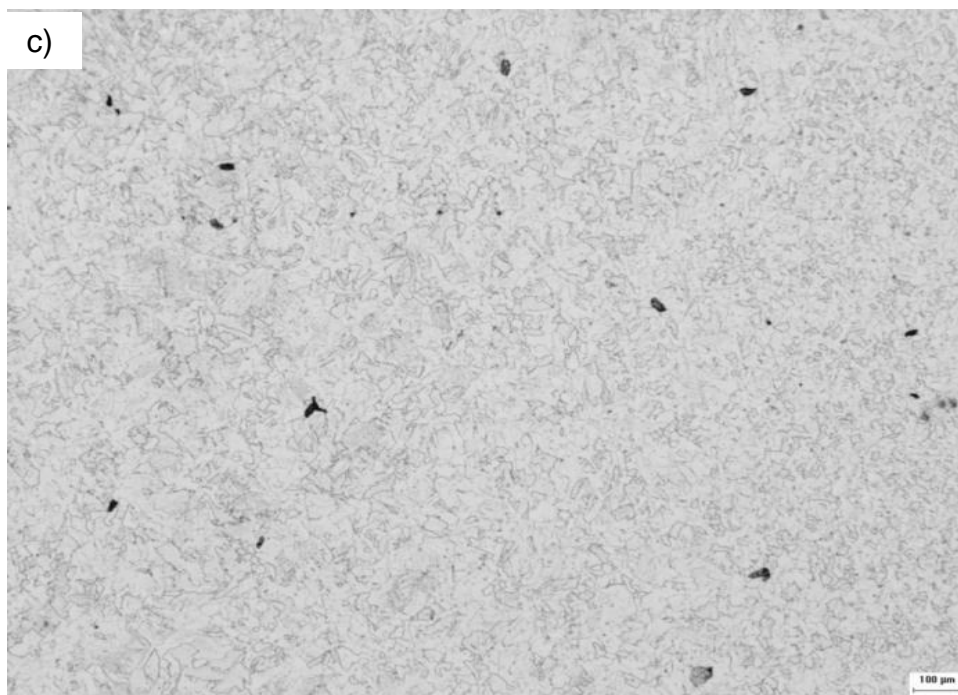


Figura 13 – (continuação) Micrografias da interface de solda da amostra de 2,25mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.
Fonte: Autoria Própria

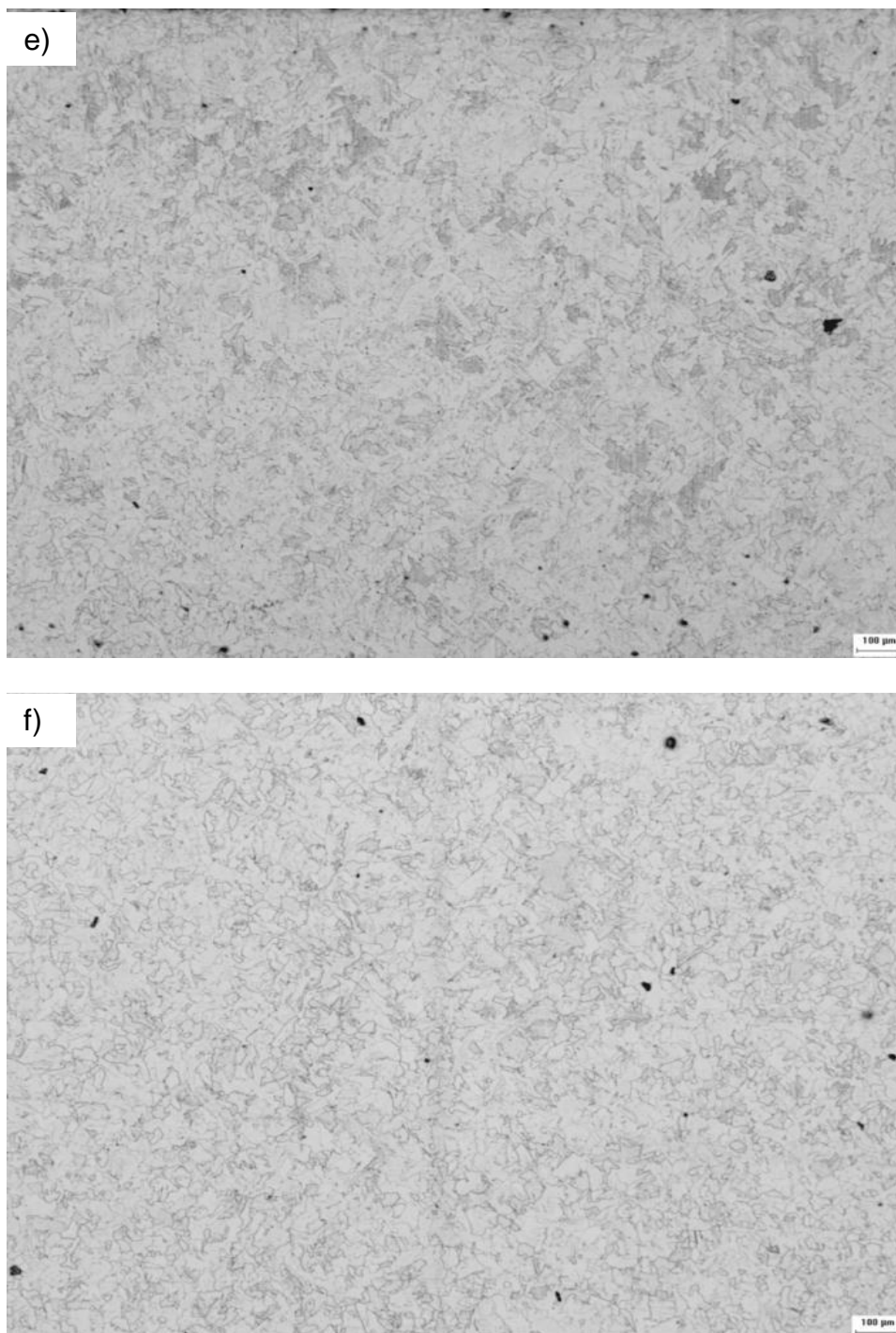


Figura 14 – (continuação) Micrografias da interface de solda da amostra de 2,25mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria

Na amostra de 2,25mm, tanto o parâmetro proposto quanto o parâmetro atual mostraram uma fase ferrítica em toda a sua área. Nota-se uma interface de solda mais pronunciada no parâmetro proposto que no parâmetro atual, que é ocasionado por se ter mais energia retida nesta região. Se verifica também um pequeno aprisionamento de óxidos na região da solda, porém, é normal para este processo ter esta formação de óxidos, não prejudicando a junta soldada. Por causa destes

detalhes, a solda com o parametro proposto foi reprovada.

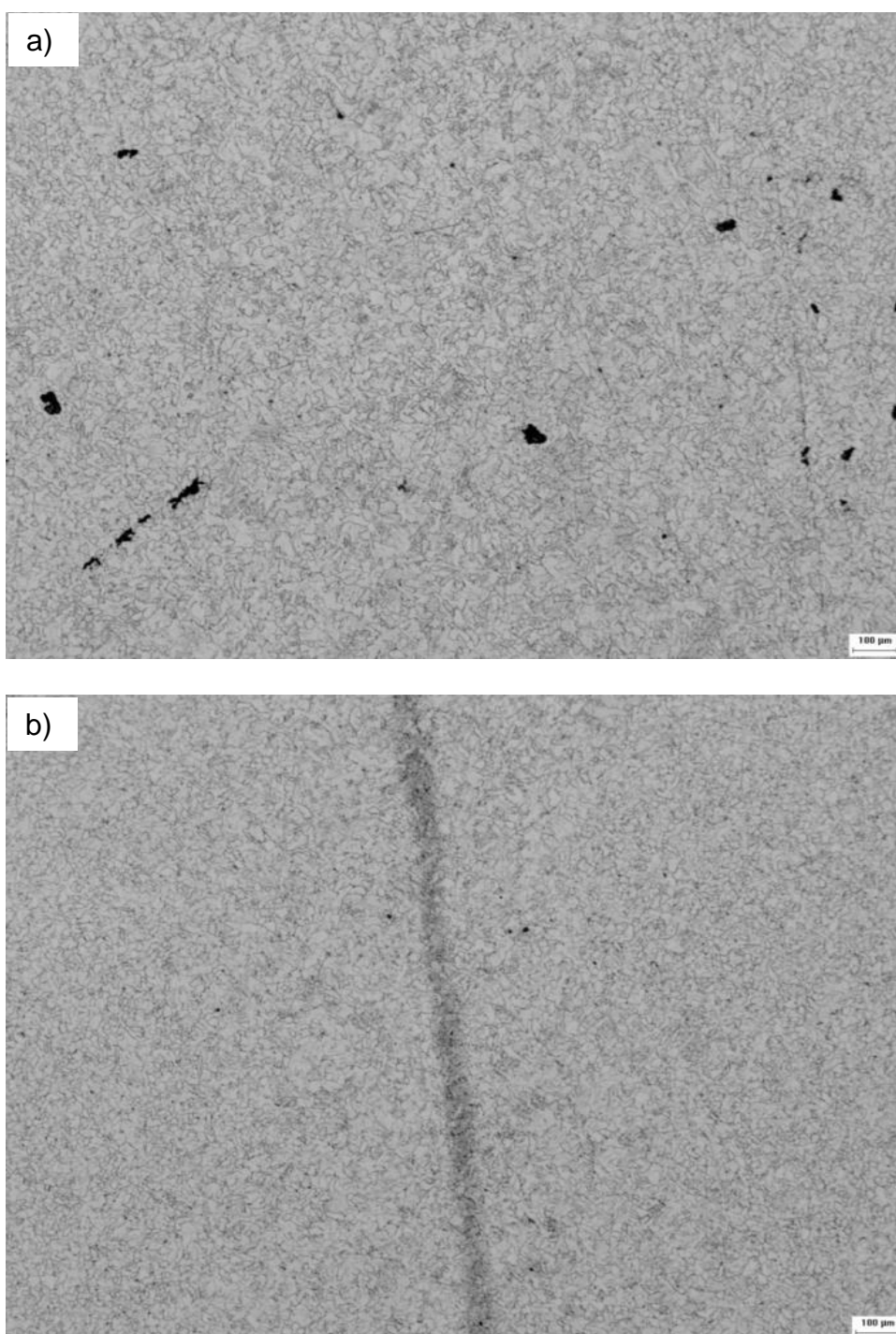


Figura 15 - Micrografias da interface de solda da amostra de 3,00mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Aatoria Própria

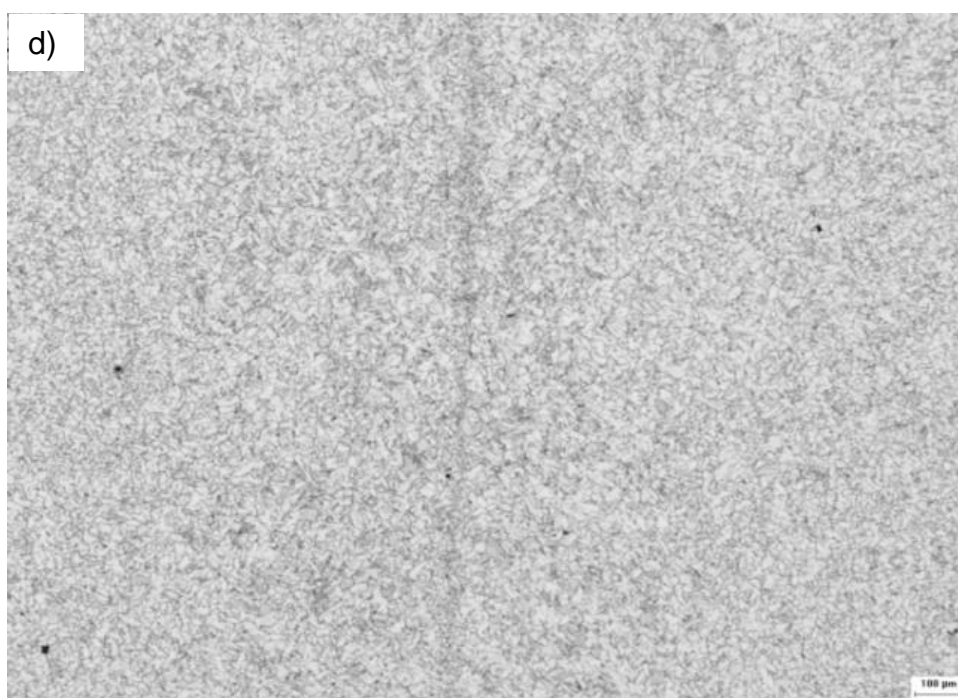
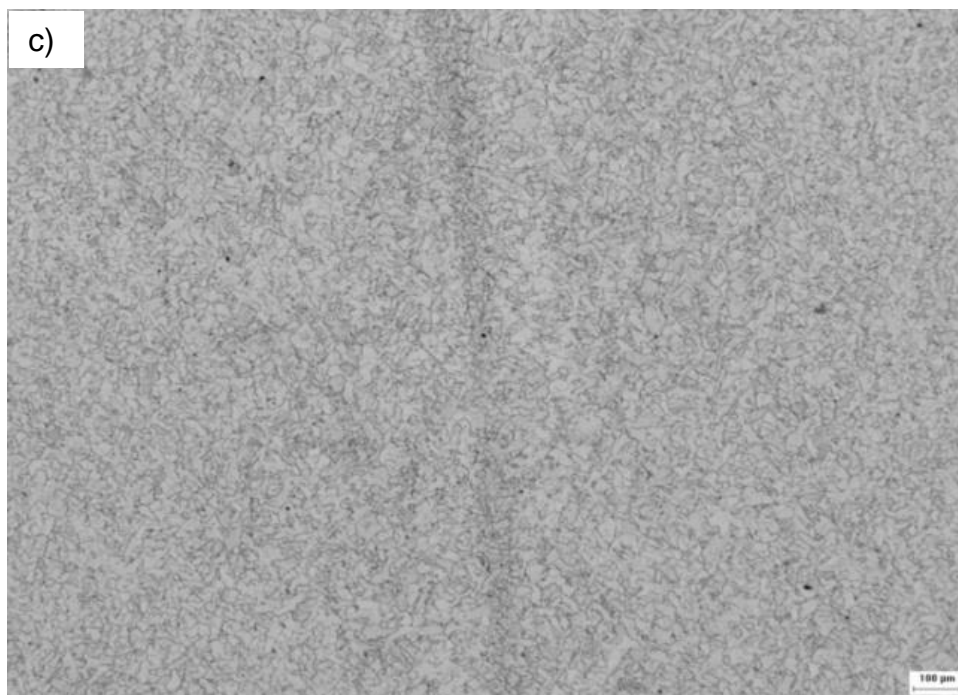


Figura 16 – (continuação) Micrografias da interface de solda da amostra de 3,00mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria

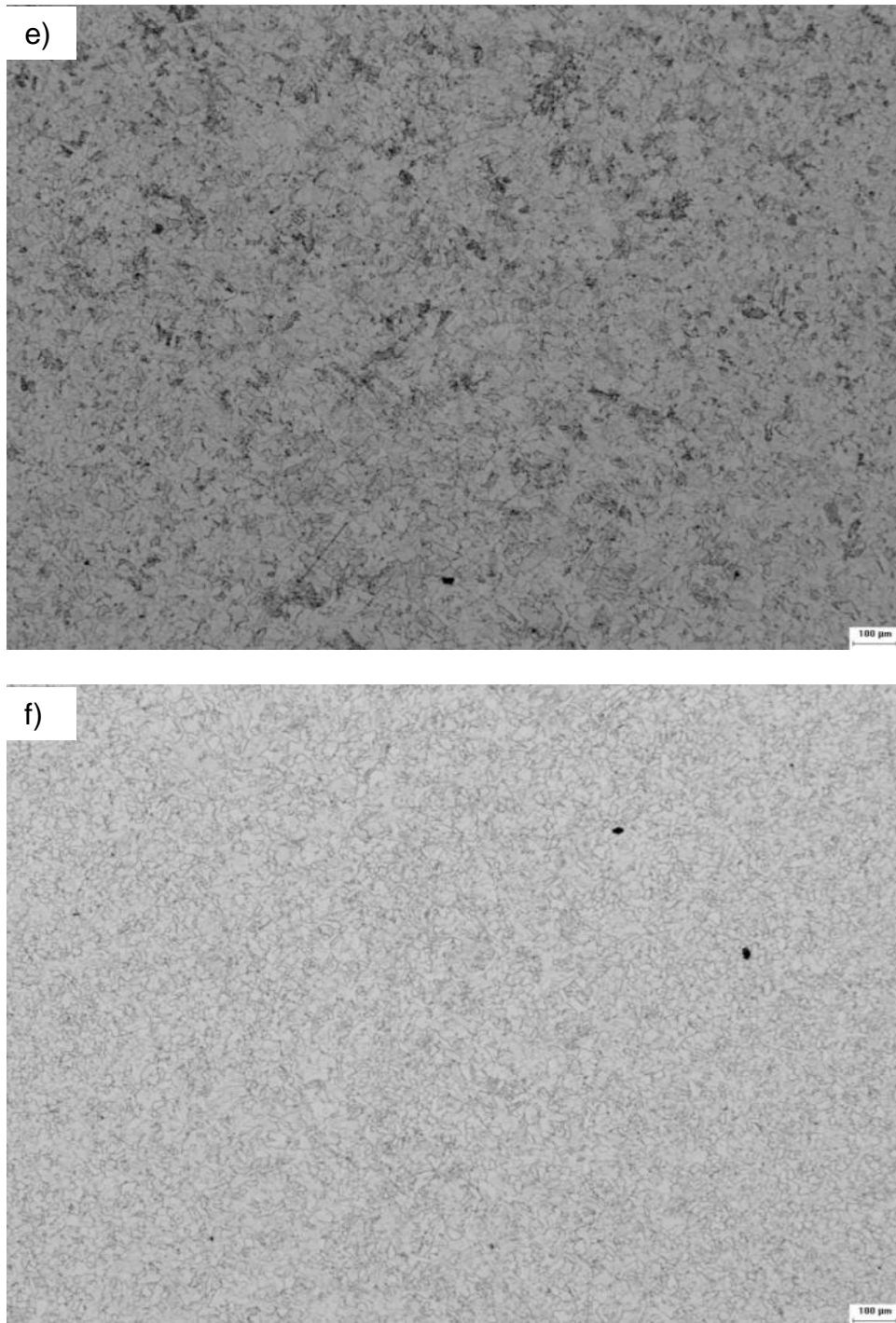


Figura 17 – (continuação) Micrografias da interface de solda da amostra de 3,00mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria

Na amostra de 3,00mm também se tem uma fase ferrítica por toda a solda independente do seu parâmetro. Nota-se que houve um maior refino de grão na interface da solda do parâmetro proposto, indicando uma melhora de suas propriedades mecânicas. É visto também que houve um menor aprisionamento de

óxidos na solda no parâmetro proposto, possivelmente pelo tempo ter sido menor, não teve tempo suficiente para formar uma quantidade significativa de oxido e, com isso, ter sido totalmente expulso no recalque.

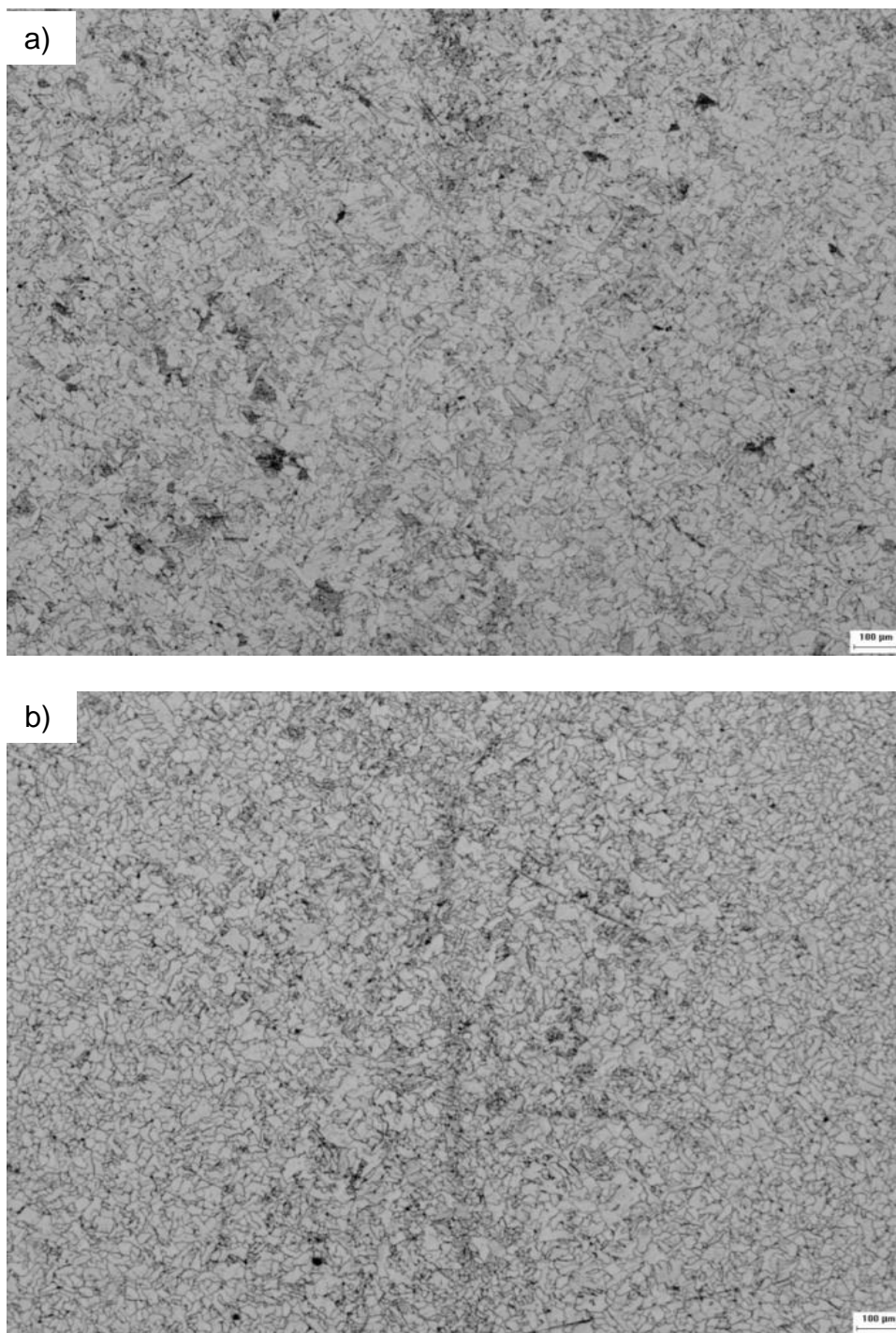


Figura 18 - Micrografias da interface de solda da amostra de 4,25mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria.

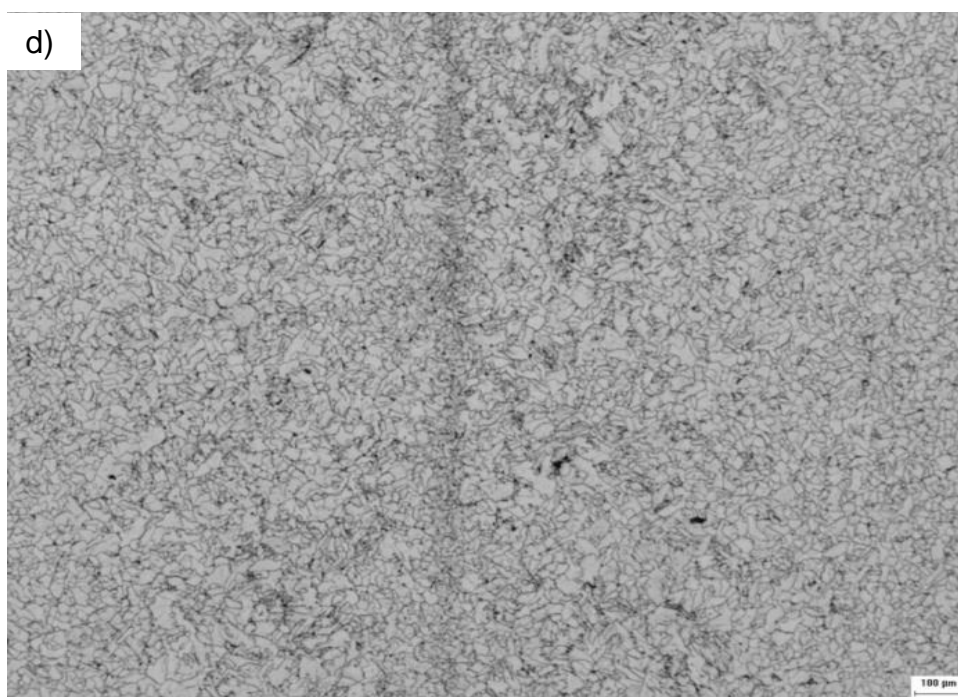
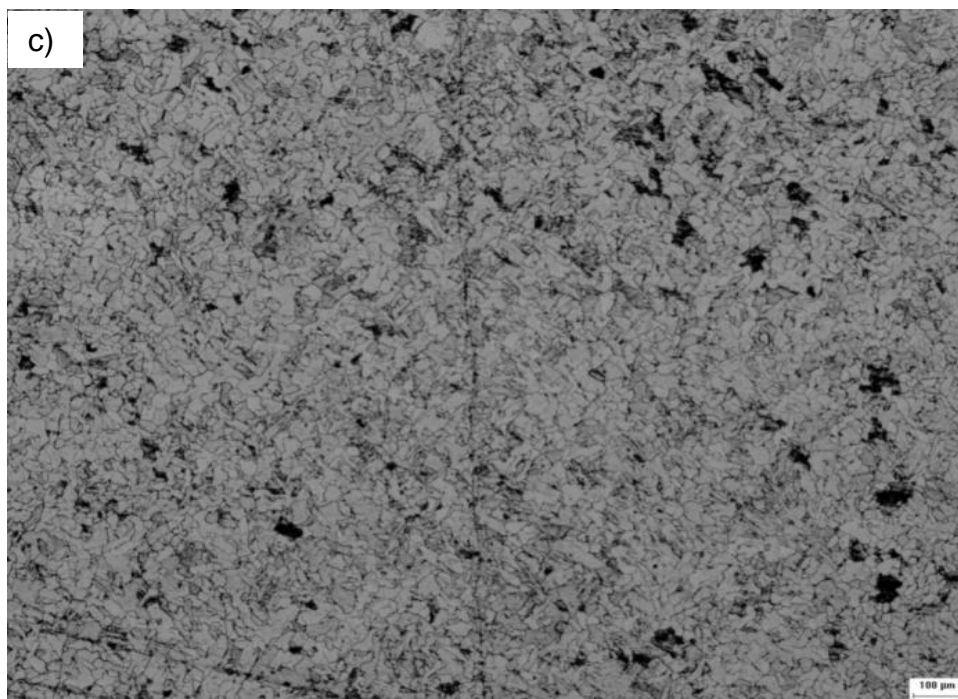


Figura 19 – (continuação) Micrografias da interface de solda da amostra de 4,25mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria.

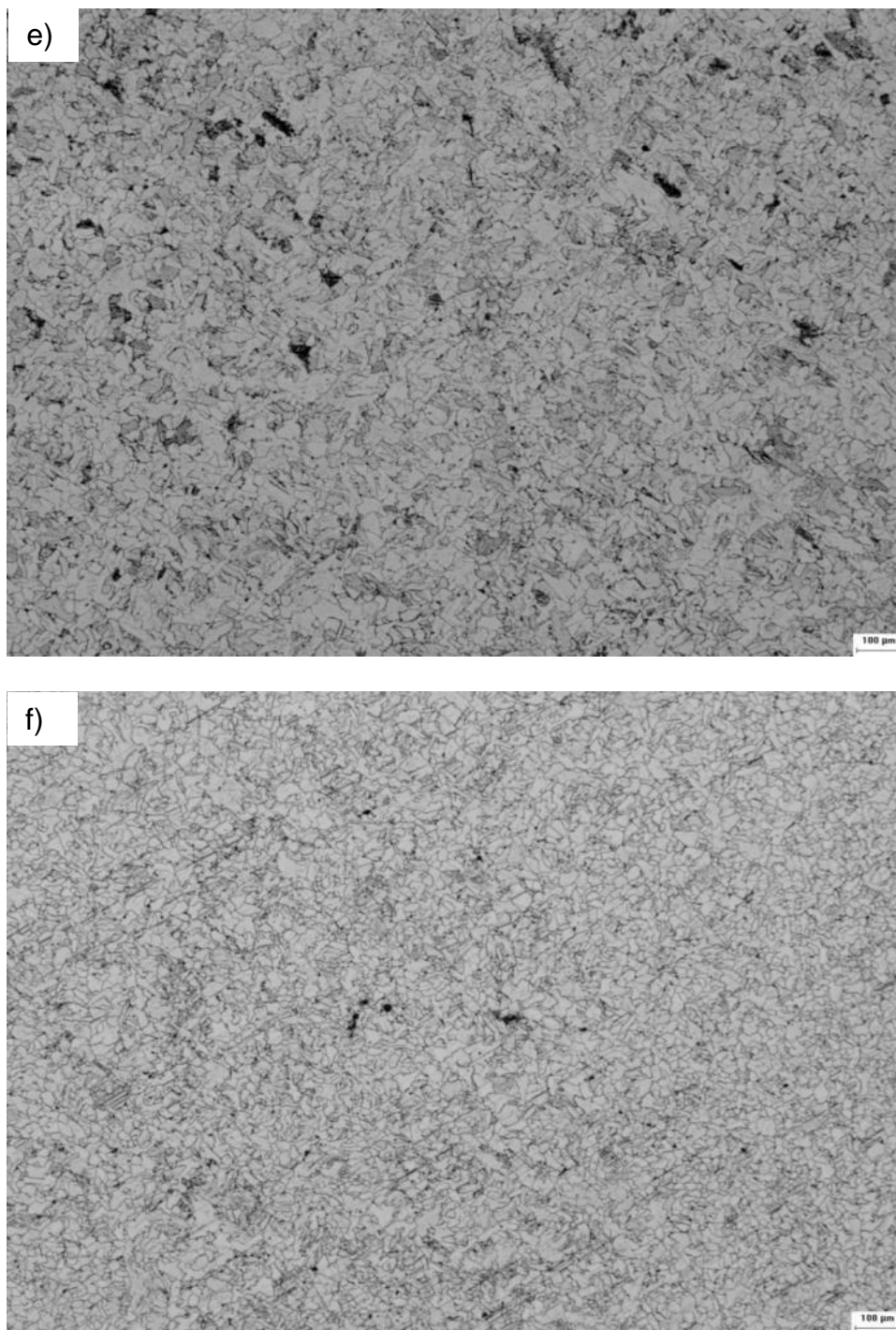


Figura 20 – (continuação) Micrografias da interface de solda da amostra de 4,25mm com aumento de 50x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria.

Como nas demais amostras, também apresenta uma fase predominantemente ferrítica, porém, com uma interface de solda mais destacada no parametro atual. Nas amostras do parâmetro atual podem ser visualizadas algumas inclusões de oxidos alinhadas à interface. Estas, atuam como concentradores de tensão na solda, fragilizando-as. Comparando-se com os resultados da Tabela 5, podem justificar a

reprovação das amostras no ensaio de embutimento para o parâmetro atual. Além disso, foi possível observar um maior refino de grão com o parâmetro proposto, que é benéfico para a solda, aumentando a sua resistência mecânica. Com estes dados, no ensaio metalográfico foi estabelecido que o parâmetro proposto foi aprovado.

As análises de linha de fluxo podem ser vistas nas Figuras 15, 16 e 17 das amostras 2,25, 3,00 e 4,25mm com um aumento de 12,5x, respectivamente.

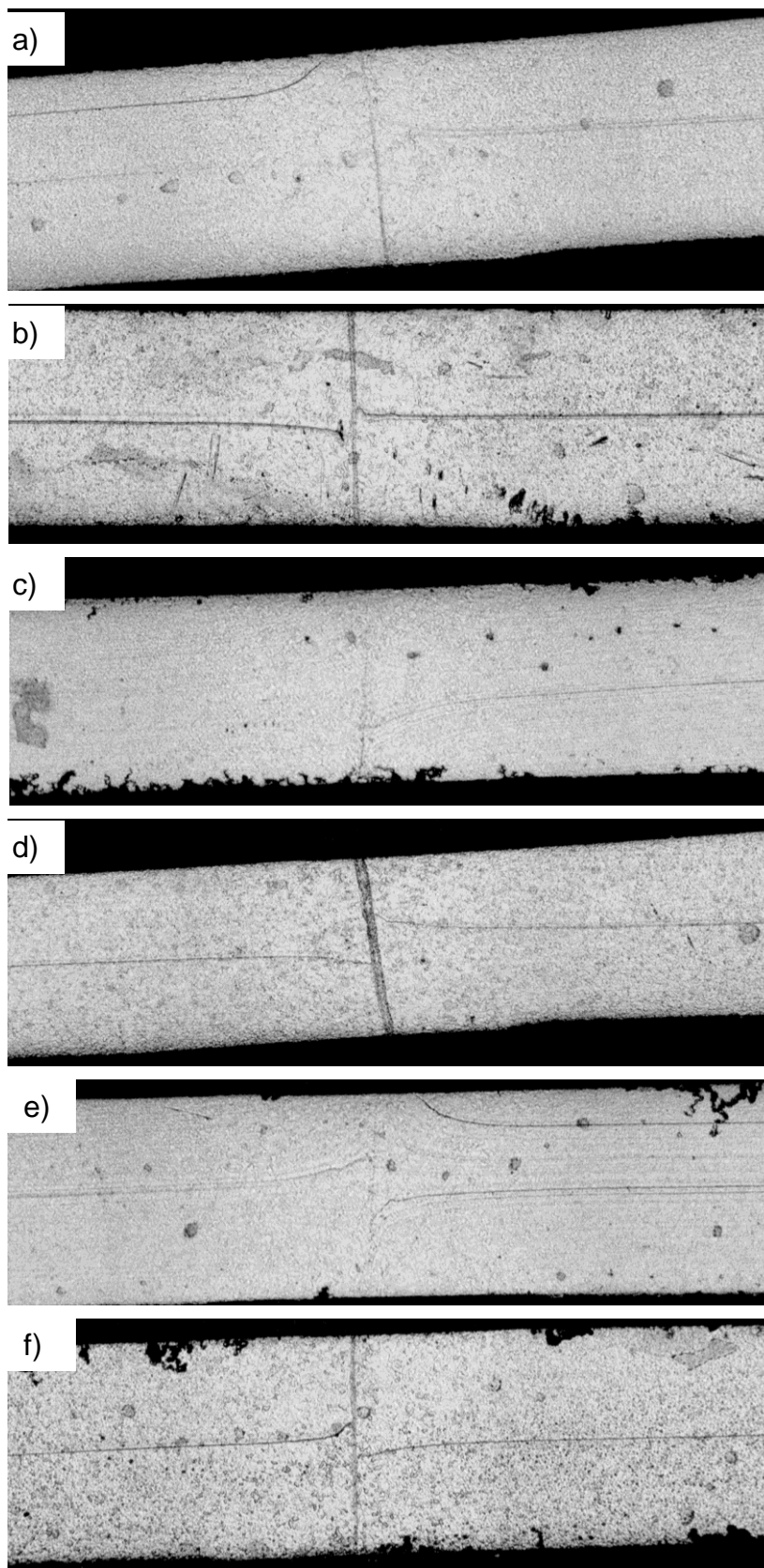


Figura 21 – Linha de fluxo da amostra 2,25mm com aumento de 12,5x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria

Na amostra de 2,25mm, na análise de linhas de fluxo, nota-se que no parâmetro atual a interface esta mais pronunciada. Isto pode significar uma maior concentração de energia neste ponto, conseqüentemente, uma maior concentração de defeitos. Não se verifica uma maior diferença nas linhas de fluxo do material, tendo em si angulos muito iguais para ambos os parametros. Porem, por ter tido uma interfase mais pronunciada, foi decidido que o parametro proposto foi reprovado.

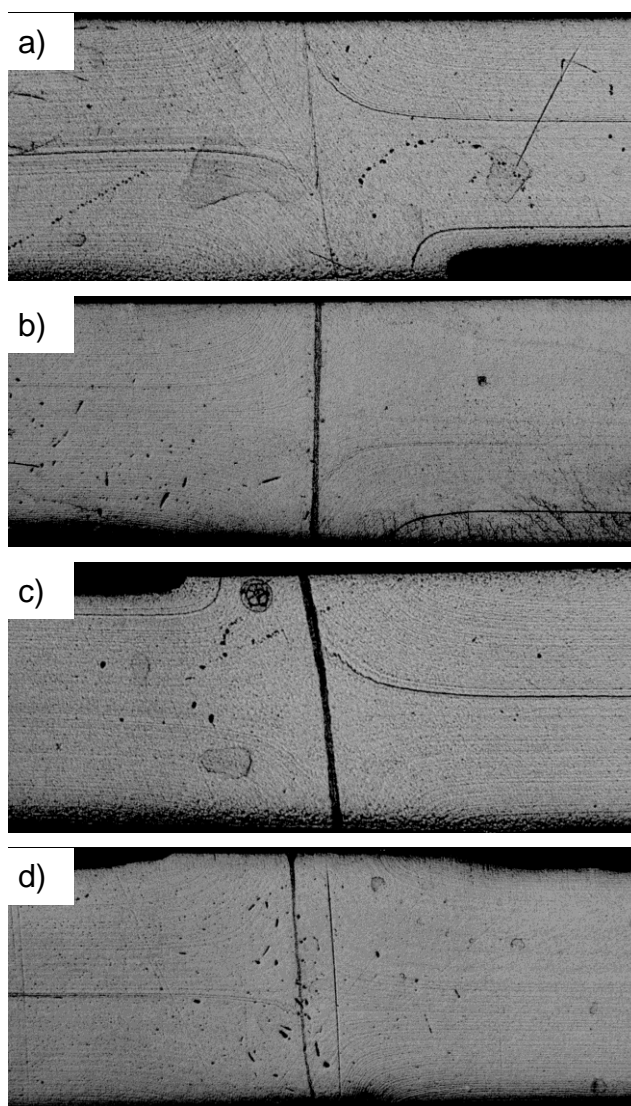


Figura 22 - Linha de fluxo da amostra 3,00mm com aumento de 12,5x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria

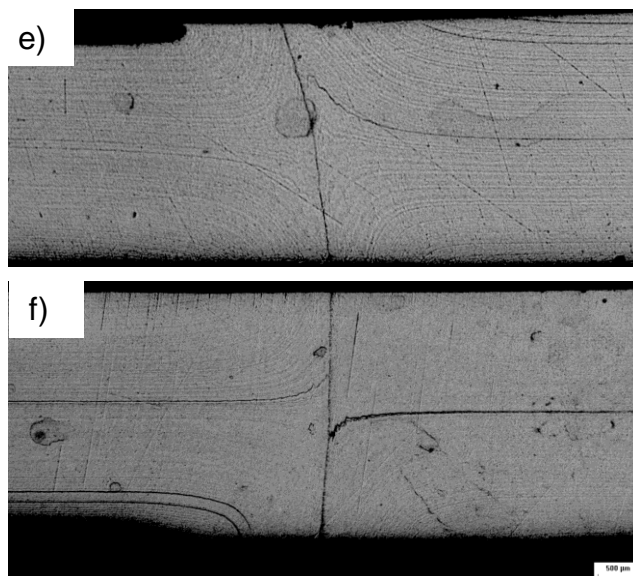


Figura 23 – (continuação) Linha de fluxo da amostra 3,00mm com aumento de 12,5x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria

Nas amostras de 3,00mm a interface mais pronunciada, diferentemente da amostra de 2,25mm, ocorre no parâmetro atual e não no parâmetro proposto. As linhas de fluxo se mostraram coerentes entre si, não apresentando diferenças significativas entre os dois parâmetros. Como a interfase no parâmetro atual é a que está mais pronunciada, foi decidido aprovar o parâmetro proposto da amostra de 3,00mm.

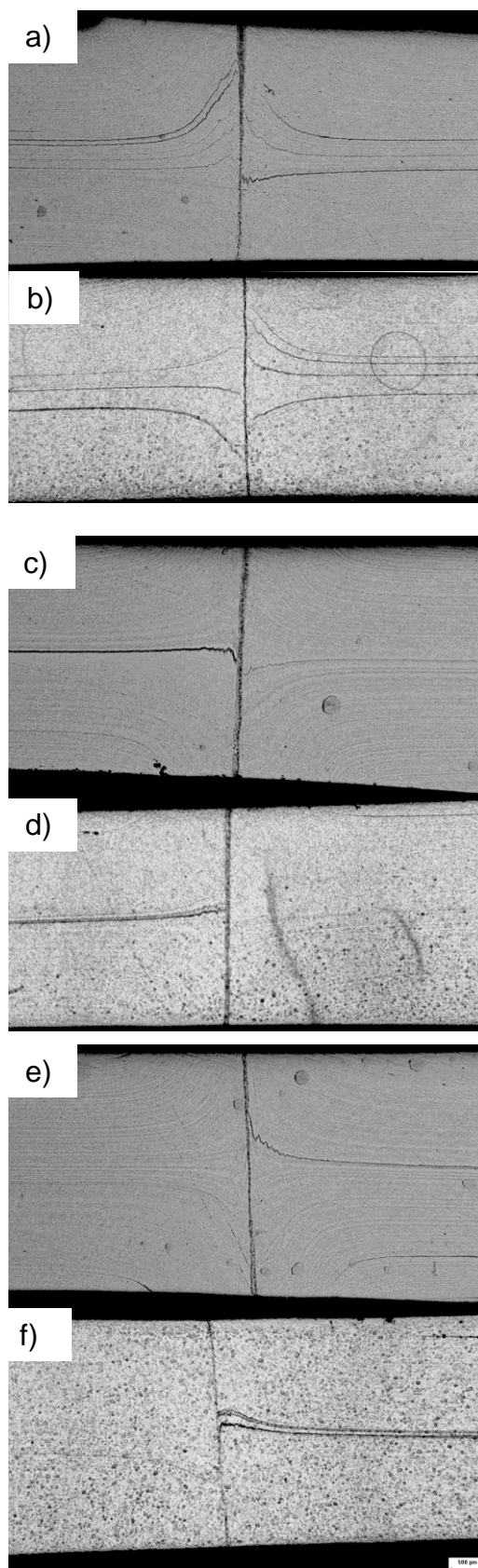


Figura 24 - Linha de fluxo da amostra 4,25mm com aumento de 12,5x. a) parâmetro atual lado operador; b) Parâmetro proposto lado operador; c) parâmetro atual centro; d) Parâmetro proposto centro; e) parâmetro atual lado motor; f) Parâmetro proposto lado motor.

Fonte: Autoria Própria

Na amostra 4,25mm, as linhas de fluxo do parametro atual estão com uma angulatura muito severa, indicando possivelmente um recalque inadequado. Já no parametro proposto, o ângulo das linhas de escoamento se aproxima do ideal de 45° para o processo. Isto garante uma melhor qualidade de solda, devido ao escoamento adequado de impurezas da interface para fora do cordão durante o recalque, evitando o excesso de oxidos na interface de solda. Por causa desta diferença de anguladura, o parametro proposto foi aprovado.

A partir das análises realizadas nos ensaios mecânicos e metalográficos, foi reunido e criado um Tabela (ver Tabela 8) que sintetiza os resultados para a avaliação da implantação do parâmetro proposto para testes em escala industrial.

Tabela 8 - Comparativo dos resultados do Parâmetro Proposto em relação ao Atual.

Espessura	Metalografia	Linhas de Fluxo	Embutimento	Ensaio de Tração	Resultado
2,25mm	NOK	NOK	OK	NOK	Reprovado
3,00mm	OK	OK	OK	OK	Aprovado
4,25mm	OK	OK	OK	OK	Aprovado

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 8, a amostra de 2,25mm, utilizando o parâmetro proposto do tempo de centelhamento, apresentou um desempenho inferior ao parâmetro usado atualmente nas linhas de produção. Através desta análise prévia, optou-se por não se realizar os ensaios de dureza na amostra de 2,25mm devido aos resultados apresentados, já reprovando de antemão esta amostra.

Nas demais, a partir dos resultados de dureza Vickers e utilizando o software Minitab, realizou-se um teste de hipóteses, que se baseia na análise de variâncias para se estudar a diferença entre médias de duas ou mais populações. A regra de decisão baseia-se no valor de p (p-value) que deve ser comparado ao nível de significância adotado. No caso, para valores de $p > 0,05$ não há diferença significativa entre as médias dos resultados, caso contrario há diferença. Constatou-se para a amostragem de 3,00mm que não houve variação significativa nos valores de dureza na região da solda entre os dois parâmetros utilizados conforme Figura abaixo.

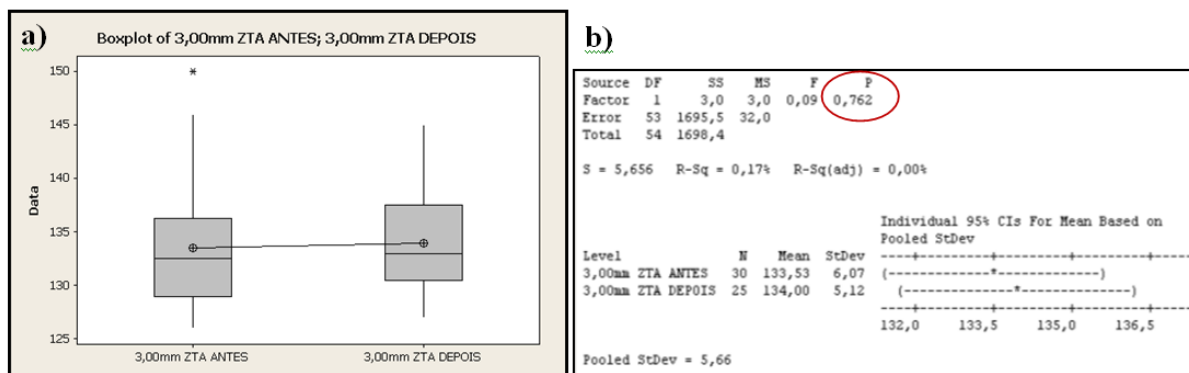


Figura 25 - Resultados do Minitab do ensaio de dureza na interface da solda amostra 3,00mm. a) Distribuição dos resultados; b) Resultado do teste de hipóteses.

Fonte: Minitab 16.

Os resultados evidenciados nas amostras de 4,25mm mostraram a existência de variação significativa entre as soldas realizadas nos dois parâmetros, entretanto, a diferença foi justificada pela própria diferença de dureza do metal base, como pode ser visto na figura abaixo.

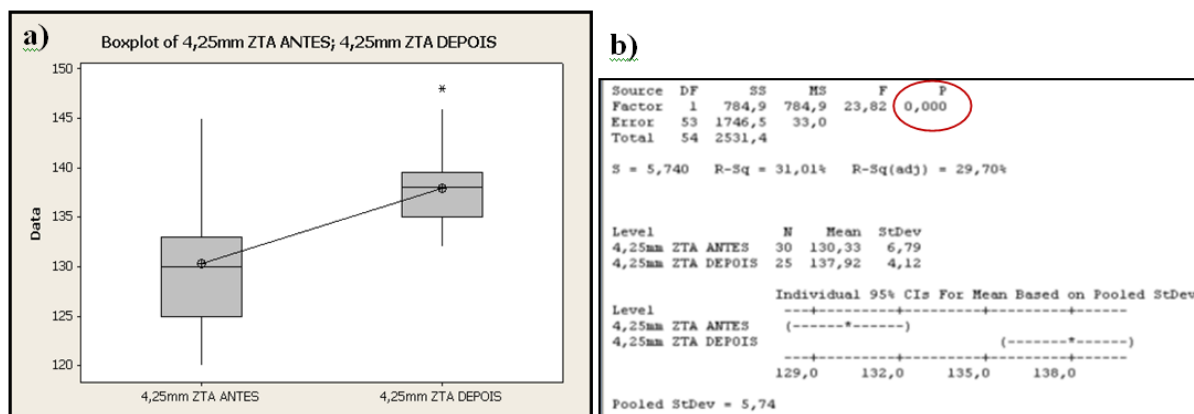


Figura 26 - Resultados do Minitab do ensaio de dureza na interface da solda amostra 4,25mm. a) Distribuição dos resultados; b) Resultado do teste de hipóteses.

Fonte: Minitab 16.

A partir disto foi feita a análise quantitativa dos resultados, objetivando mensurar o aumento percentual de valor de dureza na região da ZTA em relação ao MB.

A ZTA pelo critério proposto sofreu um incremento de dureza inferior ao atual – ver Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de dureza das amostragens estudadas

AMOSTRAGEM	Dureza MB (HV)	Dureza ZTA (HV)	AUMENTO (%)
3,00mm (Ambos os Parâmetros)	107,9	133,8	24%
4,25mm (Parâmetro Atual)	107,9	130,3	21%
4,25mm (Parâmetro Proposto)	118,5	137,9	16%

Fonte: Autoria própria.

Com dados verificados dentro da usina, aumento de dureza até 30% não afetam o processo dentro da usina.

Como complemento, foi realizado uma nova bateria de testes somente para o grupo de amostras <2,52mm para verificar o por que somente este grupo ter sido reprovado nos testes.

Para tal, foi realizado o DOE com objetivo em avaliar a influência tanto da redução do tempo de centelhamento pelo parâmetro proposto quanto pela utilização ou não do gás na faixa de espessuras < 2,52mm, onde foi escolhido para nova amostragem a espessura de 2,00mm.

As análises podem ser vistas abaixo na figura 36.

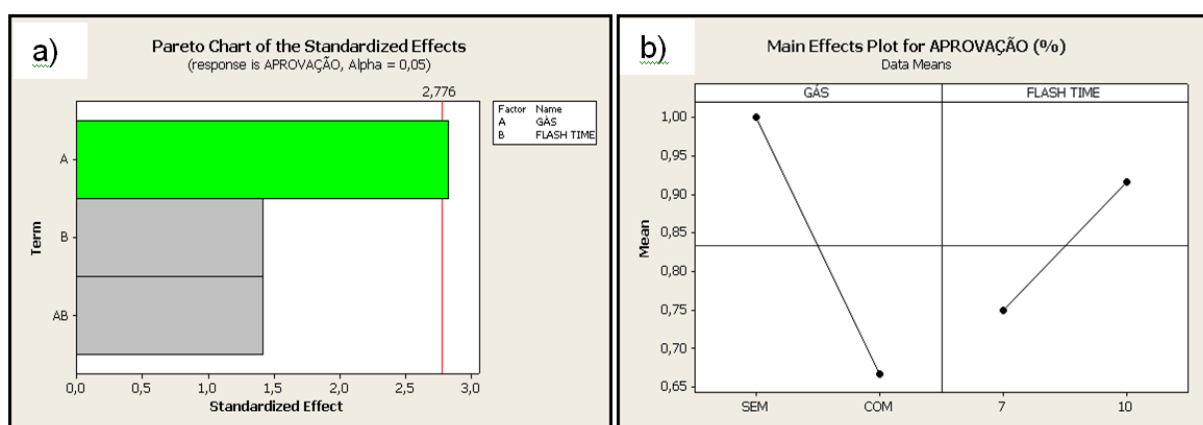


Figura 27 - Resultados DOE. a)Gráfico de Pareto sobre a adoção do parâmetro proposto e o uso de gás natural; b)Análise do principal efeito na aprovação da solda.

Fonte: Minitab 16.

A partir da análise do software minitab, foi verificado que a utilização do gás é o que mais influencia a qualidade da solda, onde, no gráfico a direita, pode-se ver que sem

a utilização do gás, se teve uma aprovação de 100% das soldas, diferente de quando usado o gás, onde se teve 68% de aprovação das soldas.

Já em relação ao tempo de centelhamento, foi visto que com o tempo de 10s, se teve 90% das soldas aprovadas, enquanto com o tempo de 7s, somente 75% das soldas apresentaram aprovação.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises e resultados obtidos, foi verificado que o tempo de centelhamento para espessuras maiores do que 2,52mm pode haver uma redução no tempo de centelhamento, sem comprometer a qualidade da solda e, em alguns casos, até melhorar a qualidade da junta soldada.

Com a retirada do gás de proteção foi verificado que não afetou a qualidade da solda para os aços baixo carbono, sendo possível inclusive, um resultado superior com a sua ausência nas amostras representativas de espessuras menores do que 2,52mm.

Foi verificado que com o aumento da espessura analisada, em torno de 4,25mm, foi visto uma melhora na qualidade da solda, podendo, inclusive ser realizado diminuições maiores no tempo de centelhamento.

REFERÊNCIAS

- 1- ALMEIDA, V. C. **NOVA DECAPAGEM DA USIMINAS CUBATÃO** 2010. 40º seminário de laminação ABM,
- 2- **AWS Welding Handbook**. 8. ed. AWS: AWS, 2012. 600p.
- 3- MODENESI, P. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2006. 250p.
- 4- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Resistência**.. 2000. 40f. Monografia (Bacharelado em Metalurgia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.
- 5- BRANDI, S. D. **Soldagem - Processos e Metalurgia**. Editora Edgard BlücherLtda: Sérgio Duarte Brandi, 1995. 504p.
- 6- FILHO, O. **Influência da corrente elétrica, da força de recalque e do tratamento térmico de revenimento na soldagem topo a topo por centelhamento de serras de fita bimetálica**. . 2007. 45f. Monografia (Tecnologia em Metalurgia) - USP, São Paulo, 2007.
- 7- KIM, D.C.; SO W.J.; KANG, M.J. **Effect of flash butt welding parameters on weld quality of mooring chain**. Advanced Welding & Joining R&D Department, Korea, n.78, p.113, 2009.
- 8- Natal, Y.D. **Seminário sobre “FLASH WELDING”**. 1980, Usiminas. Ipatinga – MG.
- 9- MÜLLER, A. **Fundamentos da Técnica de Soldagem por Resistência e sua Aplicação na Prática**. . Brasil: LBM Máquinas e Equipamentos de Solda Ltda. , 2002.
- 10-RESISTENCE WELDER MANUFACTURERS RWMA **Resistance Welding Manual**. RWMA: RWMA, 2003. 443p.
- 11-SAVAGE, W. F. **Welding - The Process and Application**. Welding Journal, EUA, n.3, p.227-237, 1962.

- 12-Omweg, G.M.; Frankel, G.S.; Bruce, W.A.; Ramirez, J.E.; Koch, G. **Performance of Welded High-Strength Low-Alloy Steels in Sour Environments**. Corrosion Engineering Section, 2003.
- 13-Domingues, N. **Soldabilidade por Centelhamento do Aço Dual Phase 780**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia UFMG. 2013.
- 14-Madeira, R. P. **Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas**. 2010, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 15-Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: **Elastic Emission Machining**, Prec. Engg., 9, (1987) 123.
- 16-SHARMA, M. M.; WHALEY, D. E.; ZIEMIAN, C. W. **Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints**. Materials and Design, www.elsevier.com/locate/matdes, n.33, p.177, 2006.
- 17-PEÇANHA, R.M. **Avaliação de um aço conformável e um aço microligado ao nióbio submetidos a soldagem a topo por centelhamento na produção de rodas automotivas**. Trabalho de dissertação, EEIMVR, UFF, 70p, 1999.
- 18-NATAL, Y. D. **SOLDABILIDADE DOS AÇOS ALCAMADOS AO ALUMINIO NA SOLDAGEM A TOPO POR CENTELHAMENTO**. 1988, XIV Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem
- 19-CUNHA, M.L.A. **Avaliação de desempenho de juntas soldadas a laser de aros de rodas automotivas, em aço de alta resistência, microligado ao nióbio**. Trabalho de dissertação de Mestrado, UFRJ, 264p, 2008.
- 20-MIN, K.B. **A study on resistance welding in steel sheets for tailor welded blank Evaluation of Flash weldability and formability (2nd Report)**. 2000, Journal Materials Processing Technology. P. 218-224.
- 21-SHINOZAKI, M.; HASHIMOTO H.; KATO, T. **Effect of chemical composition on the flash butt weldability in high strength sheet steels**. 1982, Kawasaki Steel Technical Report.
- 22-ASM. **Metals Handbook 9^{ed}. Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering (Metals Handbook)**. p.1152