

DESENVOLVIMENTO DE SUPORTE DE SOLDA CERÂMICO A BASE
DE RESÍDUO DE ESCÓRIA DE SOLDAGEM

JUVENIL NUNES DE OLIVEIRA JÚNIOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES- RJ

OUTUBRO - 2014

DESENVOLVIMENTO DE SUPORTE DE SOLDA CERÂMICO A BASE
DE RESÍDUO DE ESCÓRIA DE SOLDAGEM

JUVENIL NUNES DE OLIVEIRA JÚNIOR

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia e
Ciência dos Materiais”.

Orientador: Prof. D.Sc. Ronaldo P. da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
OUTUBRO DE 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

48/2014

Oliveira Júnior, Juvenil Nunes de

Desenvolvimento de suporte de solda cerâmico à base de resíduo de escória de soldagem / Juvenil Nunes de Oliveira Júnior. – Campos dos Goytacazes, 2014.

xvii, 104 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2014.

Orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Metalurgia física.

Bibliografia: f. 97-104.

1. SOLDAGEM UNILATERAL 2. SUPORTE CERÂMICO 3. ESCÓRIA DE FLUXO DE SOLDAGEM I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

CDD 671.52

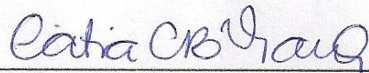
DESENVOLVIMENTO DE SUPORTE DE SOLDA CERÂMICO A BASE
DE RESÍDUO DE ESCÓRIA DE SOLDAGEM

JUVENIL NUNES DE OLIVEIRA JÚNIOR

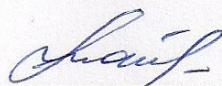
“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia e
Ciência dos Materiais”.

Aprovado em 07 de Outubro de 2014.

Comissão Examinadora:



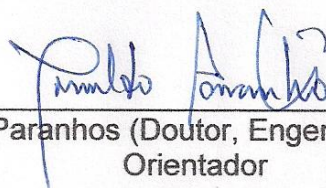
Prof^a. Cátia Cristina Brito Viana (Doutora, Engenharia e Ciência dos Materiais) - IFF



Prof^a. Liudmila Aleksandrovna Matlakhova (Doutora, Engenharia e Ciência dos
Materiais Metálicos e Tratamentos Térmicos) – UENF



Prof. José Nilson F. de Holanda (Doutor, Engenharia de Materiais) – UENF



Prof. Ronaldo P. da Rocha Paranhos (Doutor, Engenharia de Materiais) – UENF
Orientador

DEDICATÓRIA

A minha esposa Júlia Esquerdo Figueira e aos meus pais Juvenil Nunes e Ionice Correa que sempre estiveram ao meu lado, a vocês com muito amor dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Dr. Ronaldo Paranhos pela orientação, confiança, compreensão e apoio ao ingresso ao mestrado e durante a sua realização.

A todos os professores do LAMAV que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

À minha esposa Júlia Esquerdo Figueira, por ser uma amiga, uma confidente, além de ter dedicado todo amor e carinho nesta jornada.

Aos meus pais pela força e incentivo na realização desta importante etapa de vida.

Aos técnicos de laboratório do LAMAV: Bruno, Silvio Gonçalves Mendes, Rômulo Leite Loiola e Elaine Cristina Pereira, que ajudaram na condução do trabalho, preparação de amostras e ensaios em laboratórios.

Aos colegas de mestrado e a todos os amigos do LAMAV que foram fundamentais na minha trajetória até aqui.

Às empresas Machado Vianna Comércio e Indústria – Calderaria, Usinagem e Fundição e a Schulz América Latina – Importação e Exportação, pelo fornecimento das escórias de fluxo de soldagem.

À Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) pelo suporte técnico e financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XV
RESUMO.....	XVI
ABSTRACT	XVII
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Justificativas	2
1.2.1 Importância Ambiental.....	3
1.2.2 Importância Econômica	3
1.2.3 Importância Tecnológica	3
1.2.4 Importância Científica.....	3
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Resíduos Industriais	4
2.1.1 Escória de Fluxo de Soldagem	6
2.1.1.1 Processo de soldagem a arco submerso	6
2.1.1.2 Classificação do fluxo de soldagem a arco submerso	8
2.1.1.3 Escória de soldagem como resíduo industrial	9
2.2 Processo de soldagem MIG-MAG	12
2.2.1 Equipamentos	14
2.2.2 Modos de transferência de metal	14
2.2.3 Gases de proteção	15
2.2.4 Arames	16

2.3 Soldagem Unilateral	16
2.3.1 Soldagem unilateral com suporte cerâmico	18
2.4 Fabricação do suporte cerâmico	21
2.4.1 Materiais cerâmicos	21
2.4.2 Matérias-primas para fabricação do suporte cerâmico	22
2.4.2.1 Escória de fluxo de soldagem	22
2.4.2.2 Bentonita	22
2.4.2.3 Silicato de sódio	24
2.4.3 Etapas de fabricação do suporte cerâmico	27
2.4.3.1 Preparação da massa cerâmica	28
2.4.3.2 Conformação	29
2.4.3.3 Secagem	30
2.4.3.4 Sinterização	30
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Matérias-primas	32
3.2 Metodologia	33
3.2.1 Etapa 1: Produção do suporte cerâmico	33
3.2.1.1 Proposição de formulações	33
3.2.1.2 Processamento dos Protótipos	34
3.2.1.3 Avaliação por soldagem utilizando os suportes cerâmicos	36
3.2.1.4 Avaliação de absorção de água e resistência à flexão suportes cerâmicos	39
3.2.2 Etapa 2: Avaliação dos parâmetros de soldagem	40
3.2.3 Etapa 3: Avaliação das características mecânicas da junta soldada com o suporte cerâmico produzido	42
3.2.3.1 Ensaio de tração e dobramento	43

4.3.2.2 Ensaio de dobramento lateral	90
4.3.2.3 Dureza Vickers	91
4.3.2.4 Microscopia Ótica	93
4.3.2.5 Análise das inclusões do metal de solda	94
4.3.3 Considerações finais dos resultados da etapa 3	97
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO	99
SUGESTÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Classificação dos resíduos sólidos segundo ABNT NBR 10.004:2004	.4
Figura 2	Gerenciamento de resíduos	6
Figura 3	Esquema do processo de soldagem a arco submerso	7
Figura 4	Componentes básicos do equipamento de soldagem com arco submerso automático	7
Figura 5	Processo de Soldagem MIG-MAG	13
Figura 6	Esquema dos equipamentos para o processo MIG-MAG	14
Figura 7	Modos de transferência do metal de solda	14
Figura 8	Posição do suporte junto com o cordão de solda	17
Figura 9	Tipos de soldagem unilaterais	18
Figura 10	Tipos de suportes cerâmicos	19
Figura 11	Fixação esquemática do suporte cerâmico com fita adesiva de alumínio	20
Figura 12	Fixação esquemática do suporte cerâmico (a) suportado por base metálica, e (b) com cabo de aço	20
Figura 13	Classificação dos materiais cerâmicos com base em sua aplicação	21
Figura 14	Processamento da Bentonita	23
Figura 15	Processo de fabricação do silicato de sódio	25
Figura 16	Fluxograma esquemático do processamento cerâmico – Operações Básicas	26
Figura 17	Desenho esquemático da homogeneização	29
Figura 18	Em (a) Triturador de Martelo e (b) Moinho de bolas	35
Figura 19	Em (a) Prensa manual hidráulica, (b) Esquema de montagem das matrizes	36
Figura 20	Representação do Suporte Cerâmico: (a) Seção transversal, (b) Dimensões do corpo de prova	36
Figura 21	Dimensões da junta utilizada na etapa 1 para a avaliação por soldagem dos corpos-de-prova	37
Figura 22	(a) Seção transversal do conjunto, chapa e suporte cerâmico e (b) preparação do suporte cerâmico na junta, destacando a utilização de apêndices	38
Figura 23	Partes do cordão de solda	39

Figura 24	Operações para realização da avaliação de absorção de umidade	40
Figura 25	Delimitação das áreas de aplicação de cada tipo de suporte na chapa de teste	42
Figura 26	Localização dos corpos de prova para os ensaios de tração e dobramento	43
Figura 27	Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração	44
Figura 28	Desenho do corpo de prova para ensaio de dobramento lateral.....	44
Figura 29	Representação esquemática da localização dos pontos de execução da dureza	45
Figura 30	Aspectos das escórias recebidas	47
Figura 31	Moagem da escória semi-básica. Em: (a) Escória como recebida; (b) Após o 1º tritramento; (c) Após o 2º tritramento; (d) Após o 3º tritramento; (e) Após passar por 4 horas no moinho de bolas; (f) Após o peneiramento em #50 mesh.....	48
Figura 32	Sequência de compactação. Em (a) Mistura úmida peneirada; (b) Montagem das matrizes; (c) Colocação da mistura na matriz; (d) Acomodação da mistura na matriz; (e) Encaixe da matriz superior; (f) Corpo-de-prova após a compactação	49
Figura 33	Suportes Cerâmicos produzidos, (a) Escória ácida, (b) Escória básica e (c) Escória semi-básica	50
Figura 34	Em (a) detalhe dos resíduos do suporte na raiz da junta do corpo de prova da formulação 5. Em (b) comparação entre as regiões do cordão de soldo do corpo de prova da formulação 7.	51
Figura 35	Resultado da formulação 1. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	52
Figura 36	Resultado da formulação 2. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	53
Figura 37	Resultado da formulação 3. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	53
Figura 38	Resultado da formulação 4. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	54
Figura 39	Resultado da formulação 5. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	56

Figura 40	Resultado da formulação 6. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	57
Figura 41	Resultado da formulação 7. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	58
Figura 42	Resultado da formulação 8. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	58
Figura 43	Resultado da formulação 9. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	60
Figura 44	Resultado da formulação 10. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	61
Figura 45	Resultado da formulação 11. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	62
Figura 46	Resultado da formulação 12. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia	63
Figura 47	Absorção de água do suporte cerâmico comercial e dos suportes cerâmicos produzidos	65
Figura 48	Tensão de ruptura á flexão dos suportes cerâmicos produzidos à base de EFS	66
Figura 49	Comparação entre as interfaces do metal base com reforço na raiz (a) suave e (b) acentuada	68
Figura 50	Resultados da formulação básica 8, parâmetros A. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	69
Figura 51	Resultados da formulação básica 8, parâmetros B. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	70
Figura 52	Resultados da formulação básica 8, parâmetros C. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	70
Figura 53	Resultados da formulação básica 8, parâmetros D. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	71
Figura 54	Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros A. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	73
Figura 55	Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros B. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	73
Figura 56	Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros C. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	74

Figura 57	Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros D. (a) Inspeção visual, (b) LP e (c) Macrografia	75
Figura 58	Gráfico do campo operacional determinado pela análise qualitativa ..	77
Figura 59	Resultado da formulação 8 – EFS Básica. (a) Inspeção visual e (b) LP	79
Figura 60	Macrografia da junta com dimensões da largura e altura do reforço do cordão	79
Figura 61	Corpos de prova após a ruptura no ensaio de tração – Suporte de EFS Básica	81
Figura 62	Corpos de prova após o ensaio de dobramento lateral – Suporte de EFS Básica	81
Figura 63	Comparação entre os resultados de dureza Vickers da linha superior e inferior da junta soldada – Suporte EFS básico	83
Figura 64	Micrografia da seção transversal da junta soldada com aumento de 500X: (a) Passe de raiz da junta e (b) Passe de acabamento. 1 – PF(G), 2 – FS(A) e 3 – AF. Ataque: Nital 2,0%.	84
Figura 65	Imagem do passe de raiz no MEV sem ataque químico com aumento de 1500X	85
Figura 66	EDS das inclusões selecionadas no passe de raiz. (a) Ponto 1 e (b) Ponto 2	85
Figura 67	Imagem do passe de acabamento no MEV sem ataque químico com aumento de 1800X	86
Figura 68	EDS das inclusões selecionadas no passe de acabamento. (a) Ponto 3 e (b) Ponto 4	86
Figura 69	Resultado da formulação 12 – EFS semi-básica. (a) Inspeção visual e (b) LP	88
Figura 70	Macrografia da junta com dimensões da largura e altura do reforço do cordão	89
Figura 71	Corpos de prova após a ruptura no ensaio de tração – Suporte de EFS semi-básica	90
Figura 72	Corpos de prova após o ensaio de dobramento lateral – Suporte de EFS semi-básica	91
Figura 73	Comparação entre os resultados de dureza Vickers da linha superior e inferior da junta soldada – Suporte EFS semi-básico	92

Figura 74	Micrografia da seção transversal da junta soldada com aumento de 500X: (a) Passe de raiz da junta e (b) Passe de acabamento. 1 – PF(G), 2 – FS(A) e 3 – AF. Ataque: Nital 2,0%.	93
Figura 75	Imagens do passe de raiz no MEV sem ataque químico com aumento de (a) 2700X e (b)1500X	94
Figura 76	EDS das inclusões selecionadas no passe de raiz. (a) Ponto 1 e (b) Ponto 2	95
Figura 77	Imagens do passe de acabamento no MEV sem ataque químico com aumento de 1800X	95
Figura 78	EDS das inclusões selecionadas no passe de acabamento. (a) Ponto 3 e (b) Ponto 4	96

LISTA DE TABELA

Tabela 1	Resultado do ensaio de lixiviação da EFS	10
Tabela 2	Resultados do ensaio de solubilização da EFS	10
Tabela 3	Características da soldagem pelo processo MIG-MAG	13
Tabela 4	Especificações da Bentonita Sódica.....	24
Tabela 5	Propriedades Físico-Químicas do Silicato de Sódio.....	26
Tabela 6	Composição química do arame ER 70S-6 e da chapa de aço A.36.....	32
Tabela 7	Proposição de formulações em porcentagem de peso.....	34
Tabela 8	Parâmetros de soldagem que foram utilizados nas formulações escolhidas	41
Tabela 9	Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de escória ácida	54
Tabela 10	Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de escória básica	59
Tabela 11	Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de escória semi-básica	63
Tabela 12	Parâmetros de soldagem medidos e calculados durante a soldagem .	68
Tabela 13	Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de EFS básica nos parâmetros A, B, C e D .	72
Tabela 14	Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de EFS semi-básica nos parâmetros A, B, C e D	75
Tabela 15	Parâmetros de soldagem medidos durante a execução da junta soldada.....	78
Tabela 16	Resultado do ensaio de tração – Suporte de EFS Básica.....	80
Tabela 17	Resultado do ensaio de dobramento lateral – Suporte de EFS Básica	81
Tabela 18	Valores de dureza Vickers da junta soldada com EFS Básico	82
Tabela 19	Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de raiz	85
Tabela 20	Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de acabamento	86
Tabela 21	Resultado do ensaio de tração – Suporte de EFS semi-básica	90

Tabela 22	Resultado do ensaio de dobramento lateral – Suporte de EFS semi-básica.....	90
Tabela 23	Valores de dureza Vickers da junta soldada com EFS semi-básico	92
Tabela 24	Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de raiz	95
Tabela 25	Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de acabamento	96

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF – Ferrita Acicular
ANSI – American National Standards Institute
ASME – American Society of Mechanical Engineers
AA – Índice de Absorção de Água
AWS – American Welding Society
EDS – Espectrometria por Energia Dispersiva
EFS – Escória de Fluxo de Soldagem
FAETEC – Fundação de Apoio à Escola Técnica
FC – Agregado ferrita-carboneto
FS (A) – Ferrita com Secunda Fase Alinhada
MIG-MAG – Gas Metal Arc Welding
H – Energia de Soldagem
IB – Índice de Basicidade
IIW – International Institute of Welding
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LAMAV – Laboratório de Materiais Avançados
LP – Líquido Penetrante
M – Martensita
MB – Metal Base
NBR – Norma Brasileira
PF(G) – Ferrita de Contorno de Grão
SAW – Submerged Arc Welding
SC – Suporte Comercial
UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense
ZF – Zona Fundida
ZTA – Zona Termicamente Afetada

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de formulações e protótipos de suportes cerâmicos para soldagem do passe de raiz utilizando como matéria-prima a escória de fluxo de soldagem (EFS). O procedimento experimental foi dividido em três etapas. Na primeira etapa foram propostas formulações, suportes cerâmicos foram produzidos utilizando escória ácida, semi-básica e básica, e depois testados no passe de raiz pelo método de soldagem unilateral. Para avaliação desta etapa foram realizados ensaios não-destrutivos e destrutivos, além do ensaio absorção de água. Na segunda etapa formulações selecionadas na etapa 1 e foram avaliados os parâmetros de soldagem como: abertura de raiz, corrente, tensão e velocidade de soldagem. A avaliação da segunda etapa também foi por ensaios não-destrutivos e destrutivos. A terceira etapa foi realizada a avaliação das características mecânicas da junta soldada, através dos ensaios de tração, dobramento lateral e também da microestrutura por microscopia ótica. Através dos resultados das macrografias realizadas foi observado que houve penetração nas laterais do chanfro e reforço de solda adequado na raiz. Foi possível estimar uma faixa de operação para aplicação do suporte: abertura de raiz: de 2,0 a 4,0 mm; tensão: 20 e 22 V; corrente: 150 e 180 A; e energia de soldagem: 1,48 a 2,16 kJ/mm. A microestrutura encontrada no passe de raiz e no passe de acabamento foi típica do metal de solda de aços ferríticos. Não foi observada contaminação da escória de fluxo de soldagem no cordão de solda. Os resultados dos ensaios mecânicos da junta soldada mostram que o suporte não criou áreas de alta dureza, a ruptura no ensaio de tração ocorreu no metal base e que as descontinuidades observadas no ensaio de dobramento lateral ocorreram no passe de acabamento, causados possivelmente por uma limpeza inadequada entre os passes. O trabalho conclui que tanto a escória básica como a semi-básica pode ser utilizada como matéria-prima para a produção de suporte de solda cerâmico e a formulação que apresentou melhores resultados foi composta de 93% de escória, 5% de bentonita e 2% silicato de sódio, tanto para a escória básica, como para a escória semi-básica.

Palavras-chaves: soldagem unilateral, suporte cerâmico, escória de fluxo de soldagem.

ABSTRACT

The objective of this study was to development formulations and prototypes of ceramic support for welding root pass using as feedstock slag welding flux (SWF). The experimental procedure was divided into three stages. In the first stage were proposed formulations, ceramic substrates were produced using acidic slag, semi-basic and basic, and then tested in root pass using the method of one-sided welding. To evaluate this stage destructive and non-destructive tests were performed, in addition to the water absorption test. In the second stage formulations selected in step 1 and the welding parameters were evaluated as: opening root, current, voltage and welding speed. The evaluation of the second stage was also a non-destructive and destructive testing. The third stage of the evaluation of the mechanical characteristics of the welded joint was performed through tensile, side bending and also the microstructure by optical microscopy. Through the results of macrographs performed it was observed that there was penetration on the sides of the muzzle and reinforcement of proper welding the root. Was possible to estimate a range of operation to support the application: root opening: 2.0 to 4.0 mm; voltage: V 20:22; current: 150 to 180 A; and welding power: 1.48 to 2.16 kJ / mm. The microstructure found in the root pass and finish pass was typical of the weld metal of ferritic steels. No contamination of the slag welding flux in the weld was observed. The results of mechanical tests of the weld show that the support did not create areas of high hardness, break in tensile test occurred in the base metal and the discontinuities observed in the test side folding occurred in the finishing pass, possibly caused by a cleaning inadequate between passes. The paper concludes that both the basic slag as the semi-basic can be used as raw material for the production of ceramic support and welding the formulation showed better results was composed of 93% slag, 5% and 2% bentonite sodium silicate, both for basic slag, such as for semi-basic slag.

Keywords: one-sided welding, ceramic support, slag welding flux.

Capítulo 1: Introdução

A soldagem é um processo de fabricação utilizado em uma grande diversidade de setores industriais que, na maioria das vezes, tem influência direta no custo e no desempenho do produto (Wainer *et al.*, 1992). Para cada aplicação, deve ser selecionado o tipo de processo de soldagem mais adequado. Segundo Marques (2006) a operação de soldagem é bastante utilizada na recuperação e fabricação de peças, estruturas e equipamentos, como por exemplo, navios, vasos de pressão, pontes, etc.

Com o atual aquecimento da produção na indústria naval brasileira, há uma maior demanda por processos de soldagem com elevada produtividade, propiciando assim um aumento no desenvolvimento tecnológico na área. Um exemplo deste crescimento é a ampliação e implementação de novos estaleiros.

Como o papel desempenhado pela soldagem no segmento da construção naval é bastante relevante, torna-se imprescindível o desenvolvimento de novos procedimentos de soldagem, que aliem qualidade, produtividade e baixo custo.

A soldagem unilateral com suporte é utilizada em situações onde a peça não possui acesso para soldagem pelo lado oposto, assim como em situações em que se perde produtividade tendo que girar a peça para acessar o outro lado e finalizar a soldagem. Um tipo de suporte bastante utilizado é o cerâmico, também conhecido como “*backing* cerâmico”, que é empregado em operações de soldagem unilateral a fim de proteger e acomodar o metal de solda líquido.

Com o crescimento da economia e da população aumenta o consumo de minerais, tornando importante garantir a disponibilidade dos recursos demandados pela sociedade. Isto implica diretamente no crescimento dos setores siderúrgicos e metais-mecânicos nacionais e, conseqüentemente, no crescimento da geração de resíduos oriundos deste setor, que em sua maior parte é descartada no meio ambiente, dentre eles a escória de fluxo de soldagem, que será usada como matéria-prima na produção de suportes cerâmicos a serem utilizados em soldagem unilateral.

Segundo Casagrande (2010) o mercado industrial vem cada vez mais investindo em processos e equipamentos que eliminem ou diminuam o desperdício de matérias primas, reforçando assim, uma cultura de redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos.

Este trabalho tem como proposta avaliar a viabilidade da utilização de escória de fluxo de soldagem (EFS) na produção de suporte cerâmico, contribuindo para a redução do impacto ambiental, redução do risco de contaminação do solo e do lençol freático pela disposição inadequada da EFS.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de formulações e protótipos de suportes cerâmicos que utilizem como matéria-prima principal a escória de fluxo de soldagem a arco submerso (SAS), hoje tratada como resíduo industrial.

1.1.2 Objetivos Específicos

1 – Reciclar os resíduos da escória de fluxo de soldagem para a produção dos suportes cerâmicos;

2 – Determinar as propriedades e características que o suporte cerâmico a base de escória de fluxo de soldagem, deve possuir;

3 – Avaliar a eficiência do suporte cerâmico produzido durante o processo de soldagem Mig-mag (“Metal Inert Gas – Metal Active Gas”);

4 – Delinear um possível campo operacional para utilização do suporte cerâmico à base de escória de fluxo de soldagem;

5 – Avaliar as propriedades mecânicas de uma junta soldada usando a soldagem unilateral com os protótipos de suporte de solda desenvolvidos neste trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O desenvolvimento deste estudo, com a substituição das matérias primas tradicionais pela escória de fluxo de soldagem na fabricação de suportes cerâmicos, trará interesses nos seguintes aspectos:

1.2.1 Importância Ambiental

- Redução na extração de matérias-primas;
- Redução na deposição de resíduos em aterros sanitários;

1.2.2 Importância Econômica

- Redução dos custos com matérias-primas, devido ao reuso do resíduo;
- Redução nos custos de transporte e armazenamento dos resíduos em aterros sanitários;

1.2.3 Importância Tecnológica

- Desenvolvimento de suportes cerâmicos à base EFS utilizados na soldagem unilateral;
- A soldagem será efetuada apenas por um lado da junta, elevando a produtividade, uma vez que não será necessário virar a peça e também não será necessário o processo de goivagem do passe de raiz;
- Contribuirá para que no futuro próximo sejam fabricados suportes cerâmicos por empresas brasileiras, gerando novos empregos e melhorando socioeconomicamente a população envolvida.

1.2.4 Importância Científica

- Ampliar o conhecimento em relação aos suportes cerâmicos utilizados na soldagem unilateral, avaliando e caracterizando propriedades físicas e mecânicas tanto do suporte cerâmico, assim como de juntas soldadas obtidas a partir da utilização deste suporte.

Todos os aspectos apresentados anteriormente justificam o desenvolvimento de suporte de solda à base de EFS.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

2.1 Resíduos Industriais

A norma ABNT NBR 10:004:2004 define resíduo sólido como o material no estado semi-sólido ou sólido resultante das áreas das indústrias, de hospitais, de comércios e outras e acrescentam também nessa denominação alguns líquidos específicos que não devem ser lançados em esgotos ou corpos de água. Esses resíduos sólidos são então classificados em: Perigoso e Não perigoso, sendo este último com duas subcategorias: Inertes e Não inertes. A figura 1 apresenta a classificação dos resíduos sólidos.

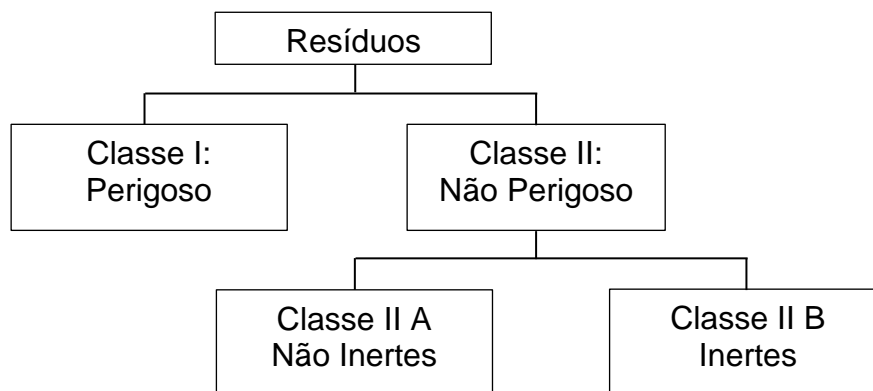


Figura 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos segundo ABNT NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004).

Os resíduos perigosos apresentam uma ou mais características descritas a seguir: Inflamabilidade; Corrosividade; Reatividade; Toxicidade; Patogenicidade. Já os resíduos não perigosos apresentam duas sub-classificação: Inertes, quaisquer resíduos que, quando amostrados e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água; e Não Inertes, aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I e classe II B, estes podem apresentar propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004).

Com a intensa fase de transformação que o parque industrial brasileiro está passando, a adequação da destinação dos resíduos industriais é um dos grandes desafios para os próximos anos. Algumas modificações no campo industrial, estão

relacionadas com as tendências de crescente urbanização e reestruturação das empresas cada vez mais preocupadas em maximizar a competitividade comercial (Lora, 2000).

No Brasil existe a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que contém instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao país no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos.

De acordo com Cruz (2005), pode ser considerado resíduo qualquer material descartado após um processo produtivo. Diversos tipos de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) são gerados nos processos de extração de recursos naturais, transformação, fabricação ou consumo de produtos e serviços. Estes resíduos passam a ser descartados e acumulados no meio ambiente, causando não somente problemas de poluição, como também caracterizando um desperdício da matéria originalmente utilizada.

Como consequência para enfrentar a carência de locais adequados para disposição de resíduos, iniciou-se a busca por soluções mais eficazes do que a simples deposição dos mesmos no meio ambiente (Souza e Silva, 1996).

- Minimização: voltada para a redução do volume e do impacto causado pelos resíduos, ou seja, uma medida preventiva;
- Reciclagem: permite trazer de volta, à origem, sob a forma de matérias-primas, os materiais que não se degradam facilmente e que podem ser reprocessados;
- Reaproveitar: abordagem corretiva, isto é, o reaproveitamento dos resíduos no ciclo produtivo na forma de matéria-prima, de modo a trazer ou não lucro à empresa (Kreush, 2005);
- Disposição: abordagem passiva, orientada para conter efeitos dos resíduos, mantendo-os sob controle, em locais que devem ser monitorados.

Essas soluções são escolhidas a partir de abordagens distintas além da sequência em sua eficácia, mostrada na figura 2, e expressas pelas seguintes providências (Wiemes, 2003):

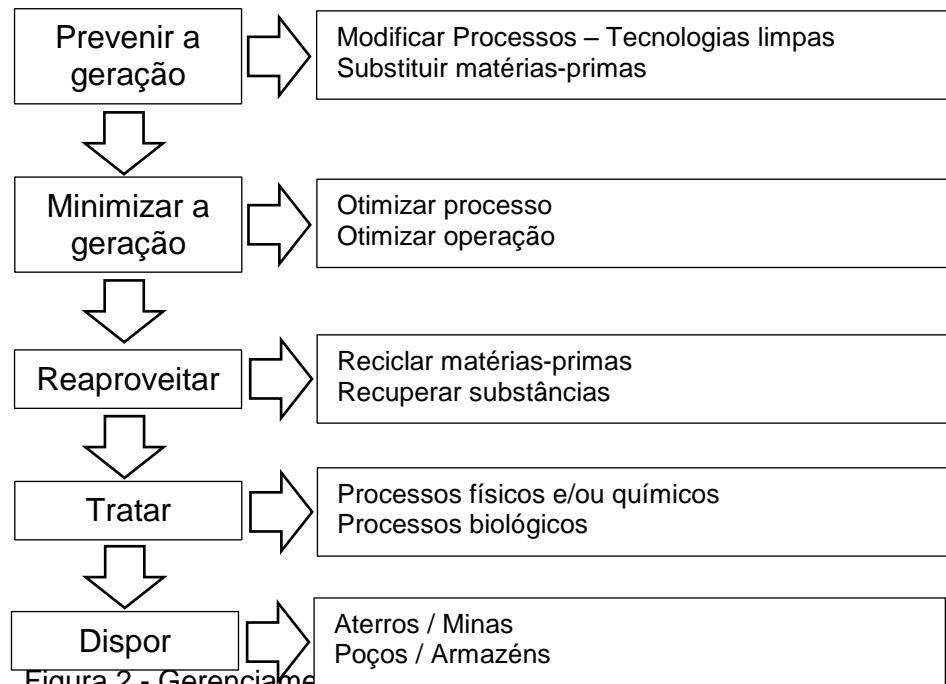


Figura 2 - Gerenciamento de Resíduos (Momeno, 2000).

Atualmente, estima-se que o Brasil produza cerca de 3,0 milhões de toneladas somente de resíduos industriais, a cada mês. Desse total, somente 1/3 do resíduo produzido possui sua destinação correta (<http://www.cetesb.sp.gov.br>, acesso em 24/01/13).

Segundo Masuero (1998) *apud* Moura (2000), dentre os resíduos metalúrgicos gerados no mundo, as escórias de alto forno e de aciarias destacam-se por constituírem quase metade deste volume. Além delas, a escória de cobre, de ferro-cromo têm despertado interesse de estudiosos e inseridas na construção civil na forma de agregado moído e/ou gráudo na produção de concretos e argamassas e na forma de adição no cimento.

2.1.1 Escória de Fluxo de Soldagem

2.1.1.1 Processo de soldagem a arco submerso

É um processo a arco elétrico, onde este é constituído sob uma camada de fluxo, tornando o arco invisível. Dessa forma a solda se desenvolve sem faíscas, luminosidades e respingos, características da soldagem a arco elétrico (Marques e Modenesi, 2006). Na figura 3, tem-se a representação do processo de soldagem a arco submerso.

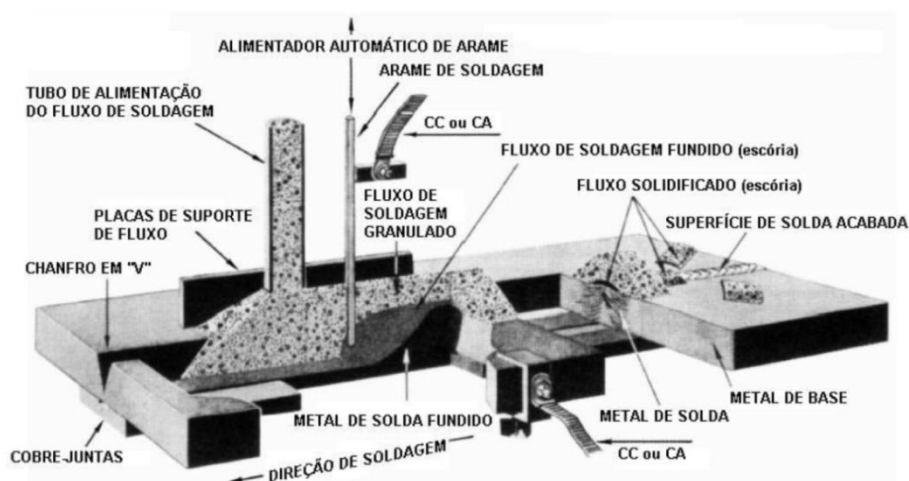


Figura 3 – Esquema do processo de soldagem a arco submerso (Fortes e Araújo, 2004).

No decorrer do processo de soldagem, o calor desenvolvido pela passagem do arco elétrico através da zona de soldagem funde a extremidade do eletrodo, uma parte do metal de base e também uma parte do fluxo. À medida que o eletrodo se desloca, o fluxo fundido sobrenada a poça de fusão e se separa do metal de solda líquida na forma de escória. Com o posterior resfriamento, o fluxo não fundido é removido, e a escória que protege a solda até seu resfriamento, se destaca do metal da solda (Wainer *et al.*, 1992).

O processo de soldagem a arco submerso se diferencia por ser um processo estável e suave, sem faíscas e respingos, e que resulta em cordões com acabamento uniforme e com uma transição suave entre o metal de base e o metal de solda (Marques *et al.*, 2009). Pode ser semi ou totalmente automático, no entanto o eletrodo é alimentado mecanicamente à medida que vai sendo fundido. (Wainer *et al.*, 1992). Os componentes básicos do equipamento para a soldagem a arco submerso automático, são mostrados esquematicamente na figura 4.

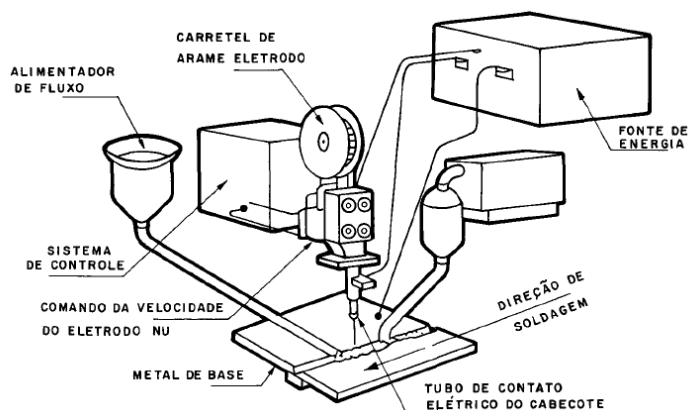


Figura 4 - Componentes básicos do equipamento de soldagem com arco submerso automático (Wainer *et al.*, 1992).

A corrente elétrica utilizada neste processo deve ter capacidade entre 600 a 1500 A, valores consideravelmente elevados em relação às praticadas em processos de soldagem com eletrodos revestidos.

O movimento do equipamento de soldagem a arco submerso pode ser realizado através de duas formas: peça a ser soldada é fixa e o cabeçote móvel, ou o contrário, onde o cabeçote permanece fixo e a peça a ser soldada se movimenta (Paranhos e Souza, 1999).

2.1.1.2 Classificação do Fluxo de Soldagem a Arco Submerso

Os fluxos para soldagem a arco submerso são compostos por uma mistura de óxidos e outros minerais, e projetados para suportar elevadas correntes e temperaturas de soldagem.

Os fluxos aglomerados são fabricados através da mistura de compostos minerais finamente moídos com um agente aglomerante, como o silicato de potássio (K_2SiO_3), ou de sódio (Na_2SiO_3) (Modenesi, 2003). A mistura de agregado e granulado é geralmente sinterizado entre 600°C e 900°C em fornos, depois, moído, peneirado e embalado (Paranhos e Souza, 1999).

Já os fluxos fundidos são constituídos dos mesmos compostos minerais dos fluxos aglomerados, porém, os ingredientes são fundidos em fornos, formando um produto que após o seu resfriamento possui a aparência cristalina. Este material é reduzido a partículas granulares, através da britagem, moagem e peneiramento, até adquirir dimensões requeridas que assegurem as características apropriadas desse processo de soldagem (Paranhos e Souza, 1999).

Os fluxos que irão produzir a escória podem ser divididos em três tipos de acordo com a sua neutralidade, uma vez que o fluxo irá interferir na composição química do metal da solda. Com isso, tem-se segundo a ANSI/AWS (*American National Standards Institute/American Welding Society*), os seguintes tipos de fluxos:

- Fluxos Neutros: não produzem alterações significativas na composição química do metal depositado como resultado de grandes mudanças na tensão do arco.

- Fluxos Ativos: contêm pequenas quantidades de manganês, silício ou ambos, utilizados para melhorar a resistência a porosidade e a trincas causadas pelos contaminantes no metal de base ou dele provenientes.

- Fluxos Ligados: contêm, além de manganês e silício, elementos de liga tais como: cromo, níquel, molibdênio e cobre.

Segundo IIW (*“International Institute of Welding”*) os fluxos também podem ser classificados quanto à composição química, utilizando como base o índice de basicidade (Fortes e Araújo, 2004), que é expresso pela equação:

$$IB = \frac{CaO + CaF_2 + MgO + BaO + SiO + Li_2O + K_2O + Na_2O + \frac{1}{2} (MnO + FeO)}{SiO_2 + \frac{1}{2} (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \quad Eq(1)$$

Onde:

IB < 1: Fluxo ácidos;

1 < IB < 1,5: Fluxos semi-básicos;

IB > 1,5: Fluxos básicos.

2.1.1.3 Escória de soldagem como resíduo industrial

No Brasil a Escória de Fluxo de Soldagem (EFS) geralmente é destinada a aterros sanitários simplesmente por não haver recomendações para sua destinação. Estima-se que o Brasil produza aproximadamente 750 toneladas por mês de EFS, sendo o Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, os responsáveis por 75% deste montante (Viana, 2010).

Como dito anteriormente o resíduo gerado pelo processo de soldagem a arco submerso é denominado EFS, que pode ser classificado como ácido, neutro ou básico, de acordo com o fluxo que o gerou.

Segundo Viana (2007), o resíduo de EFS pode ser classificado como Classe II-A, ou seja, não perigoso e não-inerte. Esta classificação foi resultado de testes de solubilização onde, de acordo com a norma NBR 10.004:2004, os teores máximos de cromo total e de alumínio foram excedidos. Os resultados do ensaio de lixiviação são apresentados na tabela 1 e de solubilização na tabela 2.

Tabela 1 – Resultados do ensaio de lixiviação da EFS (Viana, 2007).

Poluente	Resultado do extrato do lixiviado (mg/L)	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
Arsênio	Não detectado	5,0
Bário	Não detectado	100,0
Cádmio	Não detectado	0,5
Chumbo	Não detectado	5,0
Cromo total	0,08	5,0
Fluoreto	Não detectado	150,0
Mercúrio	<0,0001	0,1
Prata	Não detectado	5,0
Selênio	Não detectado	1,0

Tabela 2 – Resultados do ensaio de solubilização da EFS (Viana, 2007).

Poluente	Resultado do extrato do lixiviado (mg/L)	Limite máximo no lixiviado (mg/L)
Arsênio	Não detectado	0,05
Bário	Não detectado	1,0
Cádmio	Não detectado	0,005
Cianeto	Não detectado	0,05
Chumbo	Não detectado	0,1
Cromo total	0,08	0,05
Fenol	Não detectado	0,001
Fluoreto	Não detectado	10,0
Mercúrio	<0,0001	0,05
Nitrato	Não detectado	0,01
Prata	Não detectado	0,05
Selênio	Não detectado	0,01
Alumínio	1,8	0,2
Cloreto	37,0	250,0
Cobre	Não detectado	1,0
Ferro	0,28	0,3
Manganês	0,04	0,1
Sódio	161,0	200,0
Sulfato (mg SO ₄ /L)	<1,0	400,0
Zinco	Não detectado	5,0

Apesar de não haver destinação útil para o resíduo do fluxo de soldagem no Brasil, algumas empresas já reutilizam a EFS como fluxo. O reuso bem como o reprocessamento da EFS a ser usado como fluxo na soldagem a arco submerso (SAS) foi considerado possível por Carter (1988), desde que o tamanho da partícula seja semelhante à do fluxo original, característica obtida através de procedimentos para esmagamento e peneiramento.

Ainda, segundo pesquisas anteriores, é possível que a escória seja utilizada como matéria-prima na produção de novos fluxos (Datta *et al.*, 2008). Essas pesquisas revelaram resultados satisfatórios para este fim, todavia, para que a qualidade e as propriedades destes consumíveis não sejam afetadas, é preciso seguir normas rigorosas para garantir que sua composição química esteja dentro dos parâmetros exigidos (Singh e Pandey, 2009).

Nota-se que há grande interesse das indústrias do setor metal-mecânico em encontrar aplicação tecnológica para o resíduo de escória de fluxo de soldagem de forma ambientalmente limpa (Viana, 2010).

Dias *et al.* (2004) estudou a viabilidade de aplicação da EFS como agregado para a produção de concreto. Através dos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- Ao ser usado como agregado graúdo, a textura superficial lisa da EFS, confere ao concreto com relação água-cimento constante influência positiva e negativa, na trabalhabilidade e nas resistências mecânicas, respectivamente.
- A trabalhabilidade e a resistência mecânica avaliada não sofrem interferência significativa da textura superficial lisa e da morfologia irregular, alongada e lamelar quando utilizada como agregado graúdo.
- Para peças de infraestrutura urbana de concreto onde a alta resistência mecânica não é exigida, os concretos produzidos com EFS como agregado, miúdo ou graúdo, atendem satisfatoriamente às necessidades, quanto as propriedades avaliadas.
- Para a confecção de concretos não estruturais e argamassas destinados a construção civil, a EFS poderia ser usada como substituto do agregado miúdo que, nos resultados, não interferiu significativamente na resistência mecânica do concreto, diferentemente de quando o agregado graúdo foi utilizado, que devido a superfície lisa da EFS, provocou a redução da resistência mecânica do concreto.

No entanto, mais estudos com argamassas e/ou concretos com EFS substituindo o agregado miúdo deveriam ser efetuados para que a aplicação deste resíduo seja atestada e regulamentada como de uso confiável. Os resultados desse estudo também serviram de motivação para a realização desta dissertação.

Morete *et al.* (2006) realizou uma pesquisa que tinha como objetivo o reaproveitamento da EFS como uma matéria-prima alternativa para fabricação de produtos de cerâmica vermelha para a construção civil. Os resultados experimentais

comprovaram que a EFS pode ser usada como uma matéria-prima alternativa na composição de massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha. Entretanto, com apenas 10% em peso de resíduo de escória, os corpos cerâmicos apresentaram propriedades tecnológicas promissoras.

Viana (2007) estudou a viabilidade técnica do uso da EFS como agregado miúdo na produção de argamassa de múltiplo uso, visando principalmente a redução do impacto ambiental causado pela extração de areia e pela deposição sem controle deste resíduo em aterros sanitários. O resultado obtido foi a comprovação que EFS possui um desempenho satisfatório como agregado miúdo na produção de argamassas, substituindo totalmente a areia natural.

Em 2011, Annoni realizou pesquisas para criação de uma metodologia tecnologicamente capaz de reaproveitar metais contidos na escória como matéria-prima secundária para ser utilizada para outros fins e, deste modo, reduzir o impacto ambiental provocado por este tipo de resíduo.

Através destes resultados pode-se notar um comprometimento com a questão ambiental, que poderá levar a uma diminuição do despejo de EFS em aterros sanitários e com isso redefinir as despesas com a destinação do resíduo.

As escórias de fluxo de soldagem são classificadas de acordo com o fluxo que as originam. Para este trabalho foi utilizada a classificação do índice basicidade, onde foram produzidos suportes cerâmicos à base dos três tipos de fluxo: Ácido, Semi-básico e Básico.

2.2 Processo de Soldagem MIG-MAG

O processo MIG-MAG (*“Metal Inert Gas – Metal Active Gas”*) se utiliza da fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, que é alimentado continuamente, e a peça a soldar (Scotti e Ponomarev, 2008). A figura 5 mostra esquematicamente o funcionamento do processo de soldagem MIG-MAG.

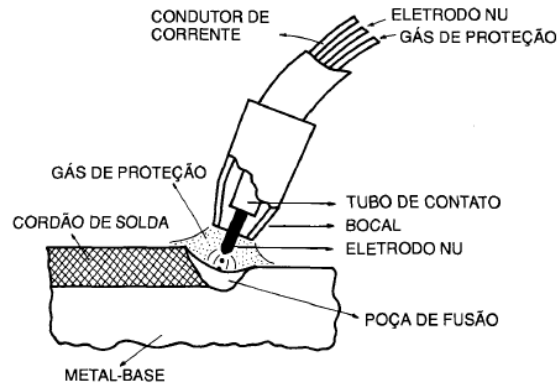


Figura 5 - Processo de Soldagem MIG-MAG (Wainer *et al.*, 1992).

Este processo pode ser aplicado de forma automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina, ou semi-automática, quando o movimento da tocha é feito manualmente pelo operador. Nas duas formas de aplicação do processo, a alimentação do arame é feita mecanicamente, onde o equipamento mantém a velocidade de alimentação e comprimento do arco constante (Scotti e Ponomarev, 2008). A tabela 3 apresenta um resumo das características da soldagem MIG-MAG.

Tabela 3 – Características da soldagem pelo processo MIG-MAG (Wainer *et al.*, 1992).

<p>Tipo de operação: Semi-automática ou automática</p>	<p>Equipamentos: Gerador, retificador Tocha Cilindro de gases Unidade de alimentação do eletrodo nu</p>
<p>Características: Taxa de deposição: 1 a 15 kg/h Espessuras soldadas: 3 mm mínima na soldagem semi-automática e 1,5 mm na soldagem automática Posições de soldagem: todas Diluição: 10 a 30% Tipo de Junta: todas Faixa de corrente: 60 a 500A</p>	<p>Custo do equipamento: 5 a 10 vezes o custo do equipamento de eletrodo revestido</p> <p>Consumíveis: Eletrodo nu 0,5 a 1,6 mm Bocal Gases: argônio, hélio, CO₂ e misturas (argônio + CO₂; argônio + oxigênio)</p>
<p>Vantagens: Taxa de deposição elevada Poucas operações de acabamento Solda com baixo teor de hidrogênio Facilidade de execução da soldagem</p>	<p>Limitações: Velocidade de resfriamento elevada com possibilidade de trincas Dificuldade na soldagem em locais de difícil acesso</p>
<p>Segurança: Proteção ocular Proteção da pele para evitar queimaduras pela radiação ultra-violeta e projeções metálicas</p>	

2.2.1 Equipamentos

Os equipamentos básicos para a soldagem MIG-MAG são compostos por: uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras. Na figura 6 são apresentados os equipamentos utilizados no processo de soldagem MIG-MAG.

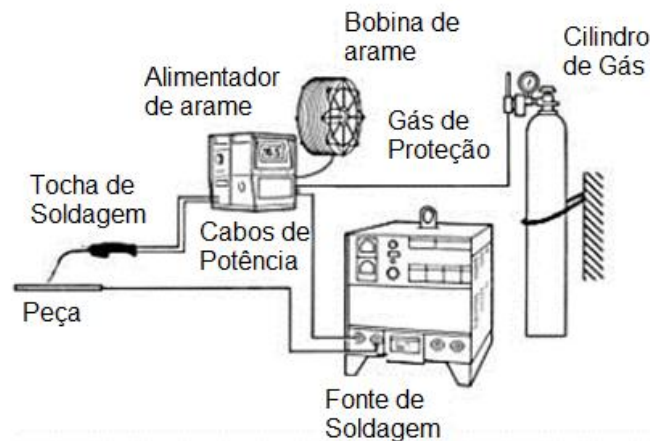


Figura 6 – Esquema dos equipamentos para o processo MIG-MAG (LabSolda, 2012).

2.2.2 Modos de Transferência de Metal

O processo de soldagem MIG-MAG inclui três técnicas distintas de modo de transferência de metal, cada tipo com uma maneira pela qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão.

- Curto-circuito (“*short arc*”);
- Globular (“*globular*”);
- Aerossol (“*spray arc*”).

A figura 7 apresenta a diferença entre os três modos de transferência de material do arame para a poça de fusão.

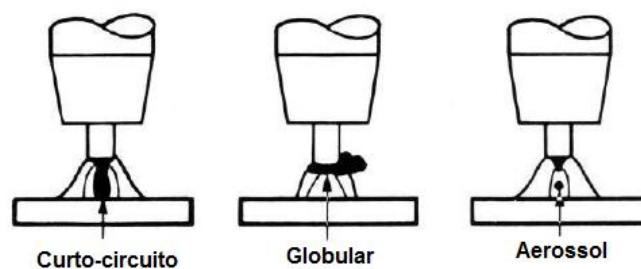


Figura 7 - Modos de transferência do metal de solda (Fortes, 2005).

A transferência por curto-circuito ocorre quando se usam baixos valores de tensão e corrente e é o modo normalmente usado para soldagem fora da posição plana ou em união peças de espessuras pequenas, quando baixa energia de soldagem é necessária (Marques *et al.*, 2009). Este método de transferência de metal se caracteriza por uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar elevado nível de respingos.

A transferência globular ocorre para baixas densidades de corrente, resultando em um arco mais estável. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro maior que ele, daí a dificuldade em soldar fora da posição (Modenesi, 2003).

Na transferência por “*spray*” as gotas metálicas sofrem a ação de várias forças de origem eletromagnética. A gota que se forma na ponta do eletrodo nu tem o diâmetro menor que o próprio eletrodo e é axialmente direcionada.

2.2.3 Gases de Proteção

Os gases utilizados na soldagem MIG-MAG podem ser inertes ou ativos ou, ainda, misturas destes. Estes gases são utilizados para evitar a contaminação da poça de fusão do ar atmosférico na região de soldagem.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008) a eficiência da proteção deve ser à proteção das gotas em transferência de reações com elementos nocivos presentes no meio ambiente e da poça de fusão.

A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor d'água (H_2O) presentes na atmosfera. Entre outros fatores, o tipo do gás de proteção influi no modo de transferência e nos formatos do arco e do cordão (Wainer *et al.*, 2004).

Três gases principais são utilizados como proteção: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO_2).

Além desses, pequenas quantidades de oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) provaram ser benéficas em algumas aplicações. Desses gases, apenas o argônio e o hélio são gases inertes (não se combinam com outros elementos) (Fortes, 2005).

A adição de gases ativos aos gases inertes visa melhorar a estabilidade do arco, além de ter as funções diminuir a ocorrência de respingos e de mordedura (Marques *et al.*, 2009).

2.2.4 Arames

O arame para soldagem é constituído de um metal ou de ligas metálicas que devem possuir composição química, dureza, condições superficiais e dimensões bem controladas. Assim, esse arame, juntamente com o gás de proteção, deverá produzir um depósito químico que determina as propriedades mecânicas e físicas do cordão de solda.

O arame-eletrodo se torna condutor de eletricidade para um arco, na sua região que ultrapassa o bico de contato, ou seja, entre o bico de contato e a poça no metal de base (Scotti e Ponomarev, 2008).

São fornecidas em diâmetros de 0,8, 0,9, 1,0 e 1,2 mm. Utilizando diâmetros menores é possível aplicar correntes mais baixas. Ainda segundo Scotti e Ponomarev (2008), arames de grandes diâmetros (>1,2 mm) exigem fontes e tochas de maiores potências nominais para se tornarem viáveis economicamente e tecnicamente.

2.3 Soldagem Unilateral

A soldagem unilateral caracteriza-se pela aplicação do cordão de solda somente em um dos lados da peça, não sendo necessário, portanto, que o lado oposto da peça receba a solda, o que conseqüentemente aumenta a produtividade e reduz custos operacionais.

Ademais, Muir (1985) destaca a redução dos ensaios não destrutivos e dos reparos comparados com a soldagem de duas passagens; a redução na distorção e nos custos devido à diminuição dos passes de solda e a redução na quantidade de exames radiográficos resultado da prevenção do defeito da falta de fusão como benefícios potenciais da soldagem unilateral.

Além disso, a soldagem unilateral evita a realização da goivagem ou esmerilhamento do passe de raiz e a finalização da soldagem através da realização do novo passe de acabamento (Andrade, 2007).

Segundo Tatagiba (2009) o processo de soldagem unilateral é bastante utilizado na indústria naval, onde os painéis formados por chapas de grandes dimensões são soldados por processos automáticos.

A utilização de suportes de solda está intimamente ligada à soldagem unilateral, pois a poça de solda gerada permanece fluida por um período de tempo e

torna-se necessário que o metal fundido tenha um suporte para contê-lo até sua solidificação (Paranhos e Souza, 1999).

Para conter o material fundido submetido ao processo de soldagem são utilizados suportes na parte inferior da peça, tala suporte que pode ser retirado ou não no térmico do processo de soldagem (Fortes, 2005). A figura 8 apresenta o posicionamento do suporte na junta soldada.

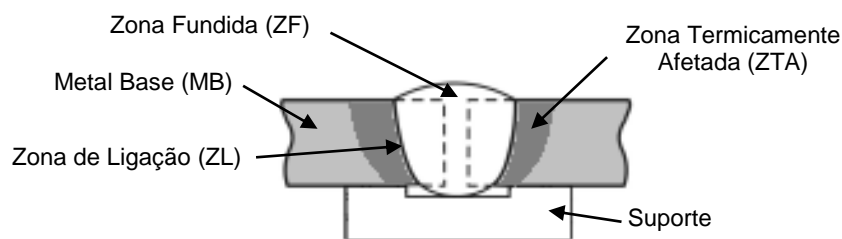


Figura 8 - Posição do suporte junto com o cordão de solda (Marques e Modenesi, 2006).

Os suportes são empregados quando a massa do metal base não é suficiente para prover um apropriado suporte para conter a poça de metal líquido ou quando se almeja alcançar uma penetração total em um único passe (Paranhos e Souza, 1999). Durante a soldagem, a poça de solda gerada permanece em estado líquido durante um período de tempo, tornando, portanto, necessário o uso do suporte para conter a poça de fusão até sua solidificação.

Existem ainda outros tipos de suportes utilizados na soldagem unilateral, como:

- Soldagem unilateral com suporte não fusível: é utilizado um suporte temporário de Cobre (cobre junta), que é removido após terminar o processo de soldagem. Segundo Fortes (2005) é importante que o suporte seja mantido pressionado contra a junta, afim de não deixar escapar o metal fundido. A figura 9(a) apresenta algumas juntas com suporte de cobre;

- Soldagem unilateral com suporte com cama de fluxo: utiliza fluxo soldagem do processo por Arco Submerso, onde é formada uma espécie de cama de fluxo sob a peça, este suporte também é temporário. A figura 9(b) mostra um método de utilização deste tipo de soldagem unilateral com suporte com cama de fluxo. A pressão exercida pela mangueira deve ser controlada para não produzir uma superfície côncava no fundo da solda, devido ao aumento desta pressão (Paranhos e Souza, 1999);

- Soldagem unilateral com suporte por passe de selagem: fornece o suporte necessário para a deposição dos passes subsequentes, sendo este o método mais utilizado na indústria nacional, pode ser aplicado tanto no lado oposto ou do mesmo lado da solda. A figura 9(c) representa um suporte por passe de selagem na raiz;

- Soldagem unilateral com suporte metálico fusível: neste processo a solda penetra e funde-se com o material do suporte, com isso, o suporte pode torna-se temporária ou permanentemente parte integrante da peça soldada. A figura 9(d) exemplifica a utilização do suporte metálico fusível em tira.

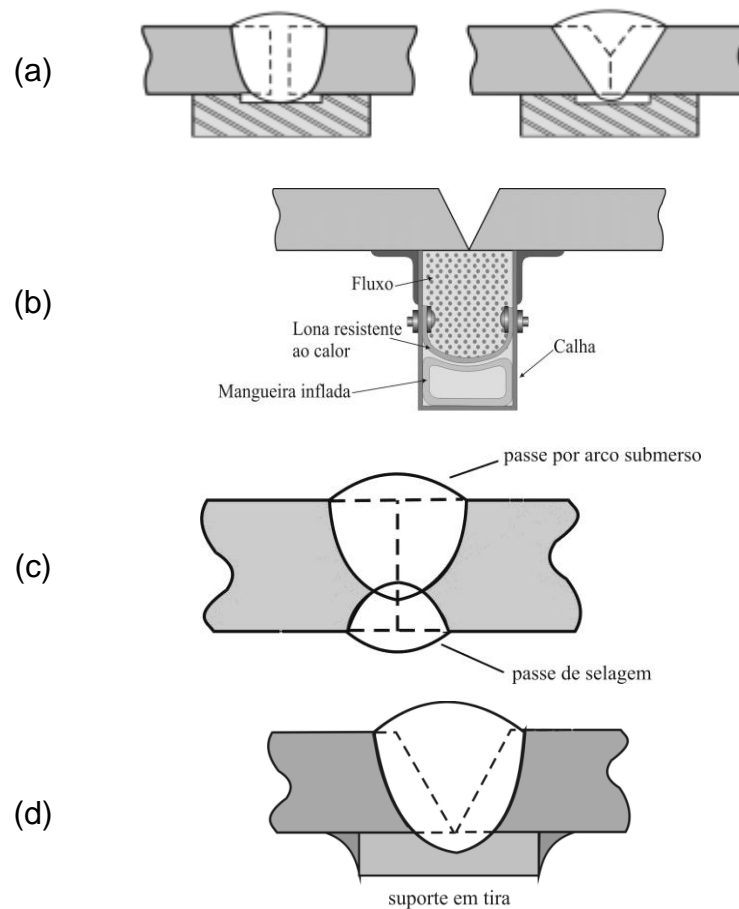


Figura 9 - Tipos de soldagem unilaterais (Paranhos e Souza, 1999).

2.3.1 Soldagem Unilateral com Suporte Cerâmico

Conforme a Gulco Internacional (2006), dentre os diversos métodos para suporte da poça de solda o suporte cerâmico é atualmente usado frequentemente na soldagem do aço.

Apesar da diversidade de situações encontradas durante a produção de peças e/ou equipamentos, como o processo de soldagem, a superfície a ser

soldada, a posição da soldagem, o tipo de junta, alinhamento ou desalinhamento da junta, juntas dissimilares e tipo de chanfro, o suporte cerâmico deve possuir diversas formas e dimensões de forma a atender às diversas necessidades.

Os países como Estados Unidos, Espanha, Singapura e China, por apresentarem um desenvolvido parque industrial naval, possuem os maiores fabricantes de suportes cerâmicos. Estas fábricas usualmente apresentam suporte com formatos e características similares, entretanto, para atender às aplicações específicas algumas variações podem ocorrer.

A figura 10 mostra modelos de suportes cerâmicos utilizados, onde se observa as mudanças nas suas configurações para que sejam mais bem adequadas ao tipo de junta a ser empregado.

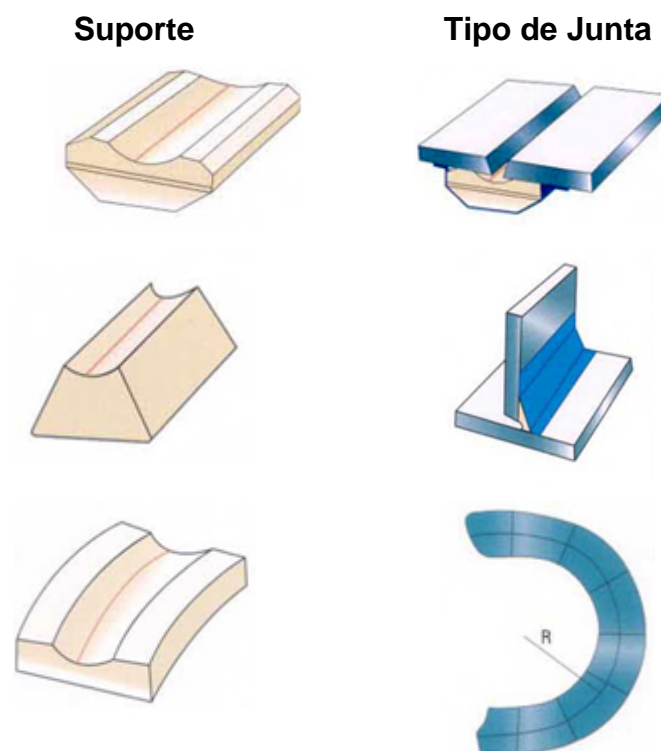


Figura 10 – Tipos de suportes cerâmicos (Obsidian Welding Backing, 2013).

Segundo Cantrell (1982) os vários tipos existentes de suporte cerâmico possibilitam variadas formas de executar a fixação, destacam-se as seguintes:

- Fixação com fita adesiva de alumínio, mostrado na figura 11;
- Fixação com auxílio de base metálica, mostrado na figura 12;
- Fixação com cordão de fio de aço, mostrado na figura 13;

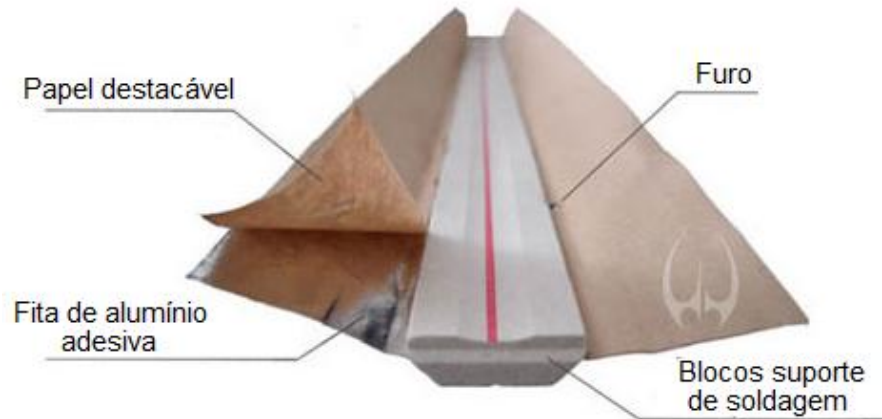
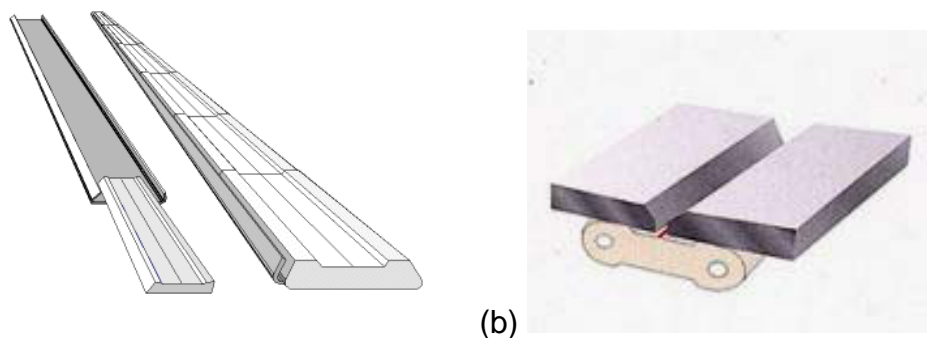


Figura 11 – Fixação esquemática do suporte cerâmico com fita adesiva de alumínio (Obsidian Welding Backing, 2013).

Segundo Andrade (2007), a fita adesiva de alumínio, além de ser o sistema mais adequado de fixação do suporte cerâmico à peça soldada é, ainda, o mais difundido nas aplicações industriais da soldagem unilateral.

Por haver o risco de queima dos elementos residuais existentes no material da base, os furos da fita adesiva possuem a função de auxiliar o escape dos gases formados durante a soldagem. Na figura 11, tem-se apresentado a localização dos furos na fita adesiva.

Na figura 12, são mostrados outros tipos de fixação dos suportes cerâmicos na base da peça.



(a) Fixação esquemática do suporte cerâmico (a) suportado por base metálica, e (b) com cabo de aço. (Cantrell, 1982).

2.4 Fabricação do Suporte Cerâmico

2.4.1 Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são compostos que contêm átomos metálicos ligados a átomos não-metálicos, mais comumente ao oxigênio, nitrogênio ou carbono. Grande parte das cerâmicas possuem ligações iônicas, mas podem conter também uma mistura de ligações iônicas e covalentes, sendo que estas ligações conferem, à maioria das cerâmicas, dureza, resistência à abrasão e estabilidade química (Newell, 2010).

Os materiais cerâmicos são utilizados em aplicações bem distintas, sua classificação compreende uma distribuição nos grupos: vidros, produtos estruturais à base de argila, louças brancas, refratários, abrasivos, cimentos e cerâmicas avançadas. A figura 13 apresenta em maiores detalhes esta classificação (Callister, 2012).

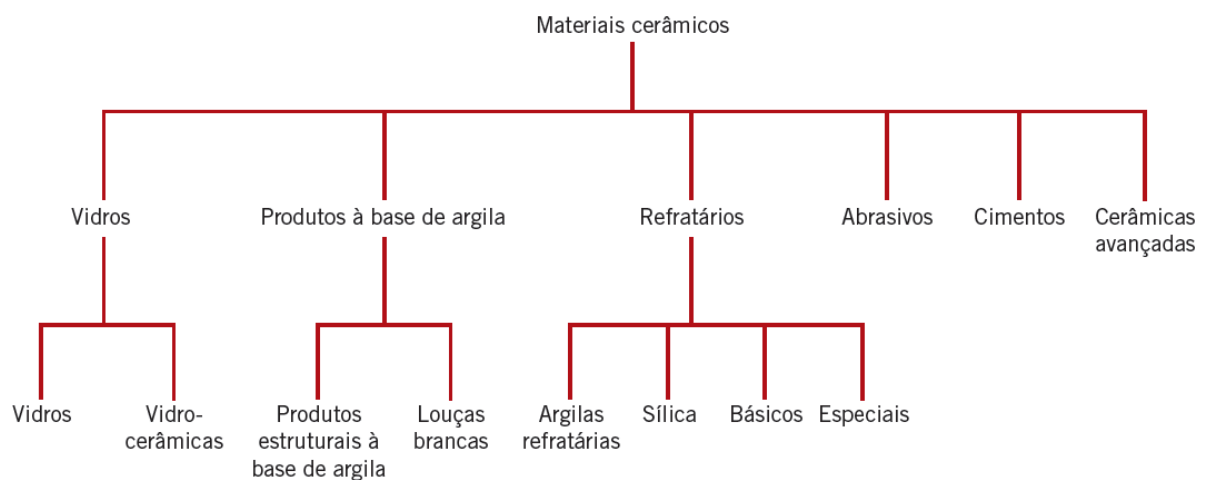


Figura 13 - Classificação dos materiais cerâmicos com base em sua aplicação (Callister, 2012).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica, o setor cerâmico pode ser dividido em segmentos de acordo com função de diversos fatores, como por exemplo, matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Assim, tem-se a seguinte classificação.

- Cerâmica Vermelha;
- Materiais de Revestimento;

- Cerâmica Branca;
- Materiais Refratários;
- Isolantes Térmicos;
- Fritas e Corantes;
- Cerâmica de Alta Tecnologia/ Cerâmica Avançada.

Dentre estes devem-se ressaltar a cerâmica refratária é uma importante classe dos materiais cerâmicos, que além de proporcionar um isolamento térmico, possuem a capacidade de resistir elevadas temperaturas sem se fundir, a capacidade de continuar não-reativo e inerte quando expostos em ambientes severos (Callister, 2012).

2.4.2 Matérias-Primas para Fabricação do Suporte Cerâmico

2.4.2.1 Escórias de Fluxo de Soldagem

Como dito no item 2.1.1.2, as escórias de fluxo de soldagem (EFS), podem ser classificadas de acordo com AWS e também IIW, sendo o fluxo Ácido, Semi-básico e Básico, escolhido para utilização neste estudo.

2.4.2.2 Bentonita

A bentonita se refere a uma argilo-mineral utilizada como aglomerante de areias de moldeagem para fundição, fluídos para perfuração de poços e na engenharia civil como agente impermeabilizante de solos e barragens (Chaves *et al.*, 1999).

Segundo Luz *et al.* (2001), a bentonita possui características físicas muito particulares que lhe confere propriedades bastante específicas e por isso tem sido empregado nos mais diversos segmentos. A bentonita, quando em contato com a água, expande várias vezes o seu volume, formando géis tixotrópicos, contendo uma alta área de superfície (até 800 m²/g).

Existem alguns tipos de bentonitas e seus nomes dependem dos elementos predominantes, tais como Potássio, Sódio, Cálcio e Alumínio.

A bentonita sódica, que possui como elemento dominante o sódio, possui uma capacidade elevada de expandir-se quando adicionada água à massa (Odom, 1984). Já quando a bentonita tem o cálcio como íon predominante, apresenta uma

menor capacidade de expansão. As bentonitas cálcicas/sódicas, denominadas mistas, expandem-se de forma moderada e formam géis com menor volume quando comparadas com as bentonitas sódicas (Darley e Gray, 1988).

As bentonitas sódicas, quando expostas à umidade atmosférica, absorverem água, o equivalente a apenas uma camada molecular de água ao redor de cada partícula. Entretanto, quando em meio aquoso, absorve várias camadas de água, provocando inchaço e aumento do seu volume, limitado apenas pelo espaço, se ela estiver confinada, e ao volume, caso a água disponível não seja suficiente. Esta absorção de água proporciona usos tecnológicos específicos ou exclusivos típicos e característicos da bentonita sódica devido ao desfolhamento individualizada das partículas até a dispersão completa da água. Essas bentonitas, que possuem a característica de inchar-se, são constituídas pelo argilomineral montmorilonita propriamente dito ou montmorilonita-beidelita, cujo cátion predominante é o sódio (Saunders, 1965).

No Brasil as frentes de lavra tem sua preparação inicial com a retirada do capeamento, realizado com auxílio de tratores e pá carregadeira. A lavra normalmente é feita a céu aberto, em bancadas que atingem uma altura de no máximo 2,5 m. A bentonita é lavrada e transportada por caminhões para um estoque localizado próximo à mina, sendo este com a função armazenagem para o período chuvoso, onde as atividades são paralisadas devido às péssimas condições de tráfego nas minas (Luz *et al.*, 2001). A figura 14 apresenta o processamento da Bentonita.

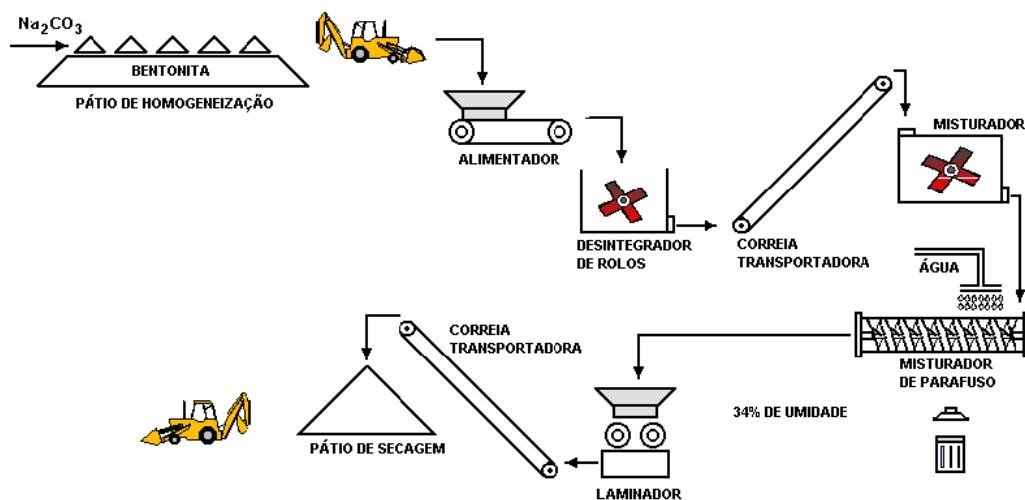


Figura 14 - Processamento da Bentonita (Luz *et al.*, 2001).

A seguir são apresentados os principais usos da bentonita:

- **Fluido de Perfuração:** Segundo Darley e Gray (1988), a bentonita possui entre outras, as seguintes funções quando usada como fluido de perfuração: refrigerar e limpar a broca de perfuração; reduzir a fricção entre o colar da coluna de perfuração e as paredes do poço e também auxilia na formação de uma torta de filtragem nas paredes do poço, de baixa permeabilidade, de forma a controlar a perda de filtrado do fluido de perfuração, contribuindo para evitar o desmoronamento do poço.
- **Aglomerante de areias de moldagem:** Durante a preparação dos moldes para fundição, a bentonita sódica é utilizada como agente ligante em proporções de 4 a 6%, com função de promover a aglutinação da areia de quartzo, conferindo as propriedades físicas como porosidade e refratariedade, que são requeridas nos moldes utilizados na fundição (Luz, 2001, *apud* Harben e Kuszvart, 1996).
- **Impermeabilização de bacias:** Conforme Darley e Gray, 1988, a bentonita é utilizada na engenharia civil como cobertura de aterros e impermeabilização, devido a suas propriedades de impermeabilidade, plasticidade, resistência à compressão e baixa compressibilidade.
- **Pelotização de minérios de ferro:** A pelotização de minério de ferro usa entre 6 e 8 kg de bentonita sódica, por tonelada de minério de ferro. A bentonita possui ainda a função de realizar a ligação entre as partículas minerais (Harben e Kuszvart, 1996).

As propriedades físicas bentonita estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Especificações da Bentonita Sódica (Luz e Oliveira, 2005).

Características	
Umidade Original (%)	8,0 – 12,0
Densidade	0,70 – 0,85
Inchamento (%)	Mín. 30
Estabilidade térmica (550°C)	Mín. 70,0

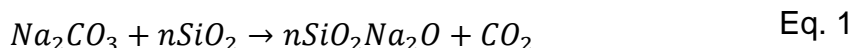
2.4.2.3 Silicato de Sódio

O silicato de sódio (Na_2SiO_3) ou vidro solúvel é produzido por fusão de uma mistura de areia e soda, encontrada em solução aquosa ou na forma sólida, é utilizada em cimentos, refratários e produção de têxteis.

Devido sua adesividade, é utilizado com sucesso na produção de tubos de papel e na colagem manual ou automatizada de caixas de papelão. Pode ser usado também como agente aglomerante de pós de metais, madeiras, argilas e outros pós, como matéria-prima na fabricação de catalisadores para a indústria petrolífera (Santos, 1997).

Para a fabricação do silicato de sódio, o processo é baseado na fusão alcalina a elevada temperatura, tendo como matérias-primas o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e areia silicosa (SiO_2) (Almeida, 2009).

No produto final, as proporções de carbonato de sódio e areia silicosa são definidas no processo inicial da preparação da mistura, através do doseamento. A equação 1 resume este processo (Santos, 1997):



Segundo o *site* Solvay.pt (acesso em 11/02/13), o processo de produção pode ser resumido em três etapas:

- **Preparação da mistura:** nesta etapa o carbonato de sódio e a areia silicosa são misturados através de processo mecânico;
- **Fusão:** realizada por meio de queima de óleo a altas temperaturas, entre 1000 a 1400 °C;
- **Dissolução:** o produto originalmente sob a forma de um sólido vítreo, torna-se uma solução aquosa de silicato de sódio após ser introduzido em autoclaves e submetido à pressão de vapor e ao contato com a água.

A figura 15 apresenta o fluxo de produção do silicato de sódio.

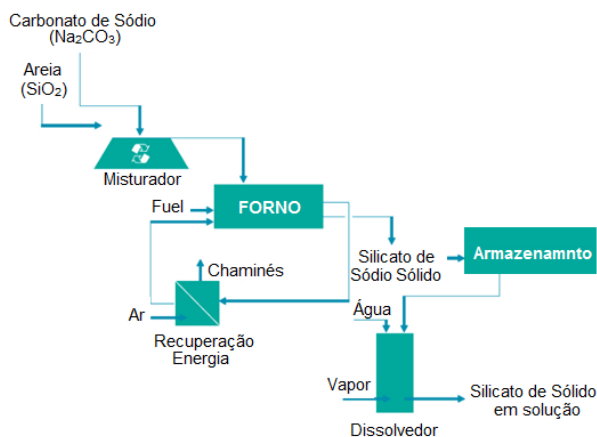


Figura 15 - Processo de fabricação do silicato de sódio (Solvay, 2013).

O silicato de sódio possui as seguintes propriedades químicas.

1. Carga Elétrica Superficial: O ânion silicato (SiO_4)⁻⁴ possui uma forte carga negativa e poderá adsorver seletivamente sobre superfícies de minérios e óxidos, mesma a baixas concentrações. O resultado das forças de atração e repulsão irá depender principalmente da relação molar do silicato, concentração e pH, trazendo as seguintes vantagens: Defloculação e prevenção da corrosão dos metais;

2. Alcalinidade e Propriedade Tampão: Os silicatos em solução possuem fortes características alcalinas e de tamponação. No qual possui em soluções comerciais pH de 11,0 à 13,5 e a grande capacidade de tamponação é confirmada mesmo quando quase todo álcali é neutralizado;

3. Reações com Íons Metálicos: Silicatos reagem com íons metálicos multivalentes para formar silicatos insolúveis;

4. Estabilidade e Formação do Gel: A estabilidade dos silicatos depende grandemente do pH, sílica hidrogel poderá ser formada sempre que o pH de uma solução comercial cair a valores abaixo de 10.

A gelificação irá ocorrer quase que instantaneamente quando uma solução rica em SiO_2 for neutralizada para menos que pH 9. Soluções muito diluídas (1% SiO_2) podem levar várias horas para gelificar a este pH.

As propriedades físicas do silicato de sódio conforme a Diatom Mineração LTDA estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades Físico-Químicas do Silicato de Sódio (Diatom Mineração LTDA).

Propriedades Físico-Químicas	
Cor	Incolor
Densidade	1,394 g/ml
Estado Físico	Líquido
Forma	Viscoso de aspecto escorregadio
Odor	Inodoro
pH	>11,0
Ponto de ebulição a 760mmhg	100,0 °C aprox.
Ponto de fusão	1088 °C (vidro de silicato)
Solubilidade	Solúvel em água

2.4.3 Etapas de Fabricação do Suporte Cerâmico

Almeida (2009) desenvolveu formulações e protótipos de suportes cerâmicos, identificando uma sequência de produção em escala de laboratório e também avaliando as variáveis de fabricação do suporte cerâmico, como a temperatura de sinterização e pressão de compactação. Pode-se notar através deste estudo que a produção de suportes cerâmicos em laboratório seguiu o ciclo tradicional de fabricação dos materiais cerâmicos, ou seja, pesagem das matérias primas, mistura seca, mistura úmida, peneiramento da mistura úmida, compactação, secagem e queima, que revelou-se apropriada para a fabricação do suporte cerâmico a fim de ser utilizada na soldagem unilateral.

Para o processo de produção das cerâmicas, os materiais devem ser beneficiados, ou seja, quando da mineração, os materiais são desagregados ou moídos, classificados de acordo com a sua granulometria e muitas vezes purificados (Anuário Brasileiro de cerâmica, 2003).

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (1980), na indústria cerâmica as matérias-primas passam por uma sequência de processamento, obtendo em cada etapa novas propriedades, ou alterando, com o uso de energia, suas características físicas e químicas até a obtenção do produto final.

O processo geral de fabricação das cerâmicas pode ser esquematizado de acordo com a figura 16. Cada etapa mostrada na figura 16 possui uma importância no resultado final, uma vez que as características podem ser controladas pela seleção das matérias-primas, processo de fabricação e produto. É fundamental que os materiais utilizados sejam elaborados visando à obtenção de propriedades que atendam a usos específicos (Pessoa, 2004).

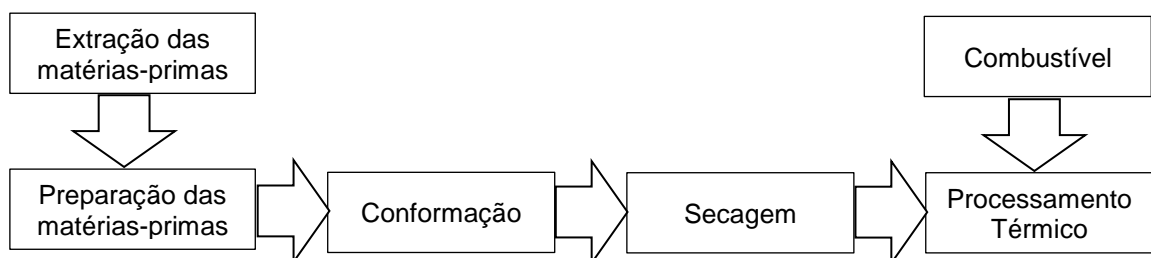


Figura 16 - Fluxograma esquemático do processamento cerâmico – Operações Básicas (Pessoa, 2004).

2.4.3.1 Preparação da Massa Cerâmica

A mistura de matérias-primas utilizadas para a fabricação de um produto cerâmico é denominada preparação da massa cerâmica. A seguir são apresentados três etapas que constituem a preparação da massa cerâmica.

- **Moagem:** Na indústria da cerâmica tradicional a maior parte das matérias-primas utilizadas são de origem natural, que podem ser encontrados em depósitos localizados em diversos pontos da crosta terrestre (Almeida, 2009). Com isso, os materiais devem passar uma etapa de beneficiamento, neste caso, a moagem, e classificados de acordo com a granulometria obtida. Já as matérias-primas sintéticas normalmente são fornecidas prontas para uso, podendo apenas ser feito um ajuste na granulometria.

A dosagem da matéria prima e do aditivo é uma das principais etapas do processo de produção dos produtos cerâmicos, normalmente duas de mais matérias primas são empregadas para a fabricação dos materiais cerâmicos, raramente emprega-se somente uma matéria-prima. Para a produção dos produtos cerâmicos a dosagem da matéria prima e dos aditivos precisam seguir rigorosamente às formulações da massa, já estabelecidas (Tomazetti, 2003).

A granulometria mais fina permite a redução das dimensões das impurezas contidas nas massas a níveis que não causem problemas durante a queima do produto (Lolli, 2000).

- **Homogeneização:** A matéria-prima na granulometria requerida é então misturada com água, onde se inicia a homogeneização que pode ser realizada manual ou mecanicamente.

Esse método envolve a aplicação de um líquido sobre o pó, ou mistura de pós secos, resultando numa massa úmida ou em grânulos com uma adequada umidade. Na maioria dos processos, o líquido utilizado é água (Bernades, 2006). Na figura 17, é mostrado esse processo de formar ilustrativa.

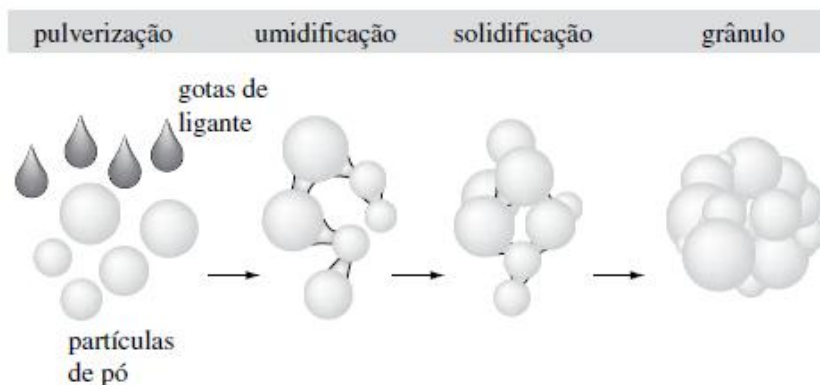


Figura 17 - Desenho esquemático da homogeneização (Bernardes, 2006).

A irregularidade na composição da matéria prima é a principal causa dos problemas durante o processo de fabricação e da falta de constância na qualidade do produto final, tornando o processo de homogeneização muito importante.

- **Peneiramento:** Essa etapa utiliza peneiras padronizadas com diferentes aberturas, sendo que cada peneira tem um número de aberturas por polegada linear denominado “*mesh*”. Assim, quanto maior for a numeração na escala “*mesh*”, maior será o número de aberturas e, conseqüentemente, mais fino deve ser o grão a passar por ela (Fonseca *et al.*, 1994).

Através do peneiramento é possível identificar o tamanho e a distribuição dos grãos, oferecendo a mistura uma maior uniformidade.

2.4.3.2 Conformação

Segundo Batista e Beltran (1986) existem diferentes tipos e técnicas empregadas na conformação para a fabricação de corpo de prova. A conformação ou prensagem, utiliza uma matriz que é preenchida com o material que será submetido a carga, em um ou mais direções de acordo com o equipamento empregado.

A prensagem uniaxial caracteriza-se na aplicação de uma carga em uma única direção, usando a ação de pistão (superior) ou dupla ação (superior e inferior), contra uma matriz contendo pó cerâmico.

As peças produzidas por prensagem uniaxial caracterizam-se por grandes gradientes interiores de densidade. Este gradiente se dá devido ao atrito entre as partículas e a parede da matriz, perdendo energia ao longo da prensagem, isso provoca uma região de menor densidade na parte inferior e uma região de maior

densidade na parte superior da peça. Uma forma de reduzir este gradiente é a prensagem de duplo pistão que concentra a região de menor densidade no centro do corpo (Tomazetti, 2003).

2.4.3.3 Secagem

O processo de secagem é uma etapa utilizada para eliminar o restante da água contida no produto após o processo de conformação. Segundo Soarese Nascimento (2007), após a secagem, o produto deve ter resistência suficiente para possibilitar a sua manipulação até o processo de queima.

Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C. Conforme Roman (1983) a secagem deve ser muito bem executada, pois é a grande causadora das deformações e fissuras que a peça pode vim apresentar.

A secagem pode ser realizada através de dois modos: secagem natural ou secagem artificial:

- Secagem Natural: as peças secam ao ar livre, acomodadas em prateleiras e sob galpões cobertos. As condições atmosféricas definem o ritmo da secagem, por este motivo o processo é lento e dificilmente obtém-se homogeneidade na umidade das peças. Além disso, caso o material contenha excesso de água, a perda desta água gera grande retratação na peça provocando trincas superficiais e deformações (Fonseca *et al.*, 1994).
- Secagem Artificial: permite o controle sobre a secagem e existe uma maior homogeneidade na umidade das peças devido à secagem em estufas onde a temperatura atinge em torno de 80 °C, através da recuperação de gases dos fornos ou de fonte própria de calor, como uma fornalha. Normalmente estas peças permanecem nestas estufas por 1 ou 2 dias (Fonseca *et al.*, 1994).

2.4.3.4 Sinterização

Nesta etapa os produtos adquirem suas propriedades e características finais. As peças, após secagem, são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800 °C a 1700 °C, em fornos contínuos ou intermitentes que operam em três fases:

- Aquecimento até a temperatura desejada;
- Patamar durante certo tempo na temperatura especificada;
- Resfriamento até atingir temperaturas inferiores a 200 °C.

As três fases citadas anteriormente, que compreendem o ciclo de sintetização podem levar alguns minutos até vários dias, dependendo do tipo de produto. A finalidade da queima é alongar as partículas formando uma massa coerente pela sintetização, que faz como consequência ao produto cerâmico a redução no volume aparente total, redução de sua área específica total e aumento da resistência mecânica (Van Vlack, 1984).

Capítulo 3: Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos aplicados a esta dissertação de mestrado, envolvendo as etapas de produção do suporte cerâmico, a avaliação dos parâmetros de soldagem e a avaliação de juntas soldadas.

3.1 Matérias-primas

Na produção dos protótipos dos suportes cerâmicos foram empregados três tipos de escórias de fluxo de soldagem: Ácida; Básica e Semi-básica descritas na seção 2.1.1.2.

Além das escórias, foram utilizadas a Bentonita Sódica (composição química de: 54% SiO₂; 33% Al₂O₃; 4% Na₂O e 10% H₂O) e Silicato de Sódio (composição química é: 30% SiO₂; 9,0% Na₂O e 61% H₂O) conforme descritos nas seções 2.4.2.2 e 2.4.2.3, respectivamente, em pequenas proporções, que contribuíram na aglomeração e na plasticidade da massa cerâmica, sendo estes chamados de aditivos. A água também foi utilizada, pois foi fundamental para se obter uma determinada umidade da massa cerâmica apta a ser compactada.

Nas operações de soldagem com suporte cerâmico, foi utilizado o processo MIG-MAG e os seguintes insumos: arame ER70S-6 diâmetro de 1,0 mm; gás de proteção composto de 100% CO₂; e chapas de aço A-36 de 122 x 100 x 6,4 mm para avaliar qualitativamente a adequação do suporte cerâmico quanto a soldagem; e posteriormente chapas do mesmo material com 500 x 300 x 15,8 mm para a execução de ensaios mecânicos. As composições químicas dos insumos, arame para soldagem e a chapa, são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 – Composição química (% de peso) do arame ER 70S-6 e da chapa de aço A.36 (Belgo Bekaert).

	C	Si	Mn	P	S	Cu
Arame ER 70S-6	0,15	1,15	1,85	0,025 máx	0,035 máx	0,5
Chapa de Aço A.36	0,26 máx	0,40 máx	---	0,04 máx	0,05 máx	---

3.2 Metodologia

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em três etapas:

- **Etapa 1: Produção do Suporte Cerâmico.** O objetivo foi propor formulações e produzir protótipos do suporte cerâmico contendo escória de fluxo de soldagem em laboratório. Ainda nesta etapa, uma junta soldada foi avaliada fazendo nesta somente o passe de raiz utilizando o suporte cerâmico produzido. Espera-se desta etapa selecionar formulações que apresentem bons resultados nos ensaios não destrutivos e macrográficos (Seção 3.2.1);

- **Etapa 2: Avaliação dos Parâmetros de Soldagem.** De acordo com a seleção oriunda da etapa anterior, foi aplicado novamente o processo de soldagem nos suportes, variando os parâmetros de soldagem, que foram: abertura de raiz, corrente e velocidade de soldagem. Com essas informações, espera-se delinear um possível campo operacional em que os suportes apresentem resultados operacionais adequados (Seção 3.2.2);

- **Etapa 3: Avaliação da Junta Soldada.** Foi feita a execução de uma junta soldada com parâmetros de soldagem dentro do campo operacional encontrado na etapa anterior (Seção 3.2.3). O objetivo foi realizar a avaliação das características mecânicas da junta soldada com o suporte cerâmico produzido, por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos.

3.2.1 Etapa 1: Produção do Suporte Cerâmico

3.2.1.1 Proposição de Formulações

Os protótipos cerâmicos foram produzidos com formulações variando a porcentagem da escória e dos aditivos, Bentonita e Silicato de Sódio. As porcentagens de cada material foram determinadas de acordo com resultados em estudos anteriores com outras matérias-primas. O corpo de prova teve 100 g de massa total. As formulações são mostradas na tabela 7.

Tabela 7 – Proposição de formulações em porcentagem de peso do corpo de prova.

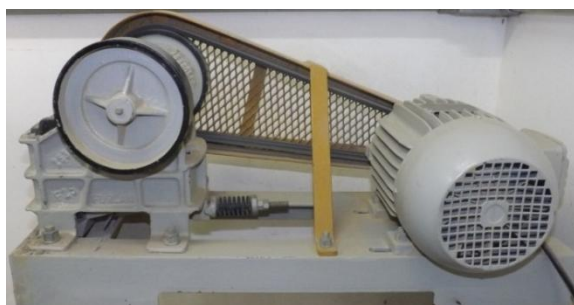
Formulação	Tipo de Escória	Escória	Bentonita	Silicato de Sódio
1	Ácida	90	-	10
2	Ácida	92	-	8
3	Ácida	92	3	5
4	Ácida	93	5	2
5	Básica	90	-	10
6	Básica	92	-	8
7	Básica	92	3	5
8	Básica	93	5	2
9	Semi-básica	90	-	10
10	Semi-básica	92	-	8
11	Semi-básica	92	3	5
12	Semi-básica	93	5	2

A adição de água foi de 5% em peso da massa total do corpo de prova.

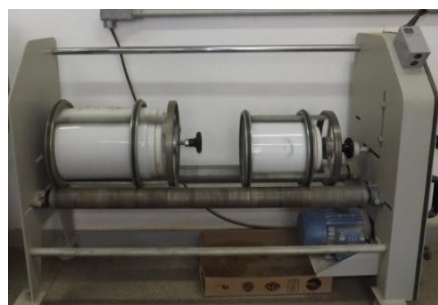
3.2.1.2 Processamento dos Protótipos

No processamento dos protótipos foram aplicadas as seguintes operações, de acordo com o ciclo tradicional da fabricação de materiais cerâmicos.

1ª operação - Moagem da escória: cada tipo de escória recebida foi triturada e moída, até atingir uma granulometria que deve ser passante em #50 mesh. Foram utilizados o triturador de martelo e o moinho de bolas. Na figura 18 são apresentados os equipamentos utilizados na moagem da escória.



(a)



(b)

Figura 18 – (a) Triturador de Martelo e (b) Moinho de bolas.

2ª operação - Pesagem das matérias-primas: foi utilizada uma balança de precisão com duas casas decimais, cada formulação foi pesada separadamente de acordo com as proporções estabelecidas na tabela 7;

3ª operação - Mistura seca: foi realizada manualmente com auxílio de uma espátula, e possuiu como objetivo a homogeneização das matérias-primas;

4ª operação - Umidificação: adição de água e silicato de sódio à mistura seca foi realizada manualmente com o uso de um borrifador;

5ª operação - Peneiramento da mistura úmida: o peneiramento foi realizado em peneira de #40 mesh, com objetivo de produzir uma massa solta e uniforme, apropriada para a operação de compactação;

6ª operação - Compactação: foi realizada em uma prensa hidráulica manual com capacidade de 30 toneladas, onde a mistura foi compactada em um molde com dimensões de 115 mm de comprimento e 25 mm de largura, a uma força de 15 toneladas por um período de tempo de 1 min. A figura 19(a) apresenta esquemática a montagem das matrizes na prensa hidráulica manual, na figura 19(b) é mostrada a forma de colocação de cada matriz e da massa cerâmica.

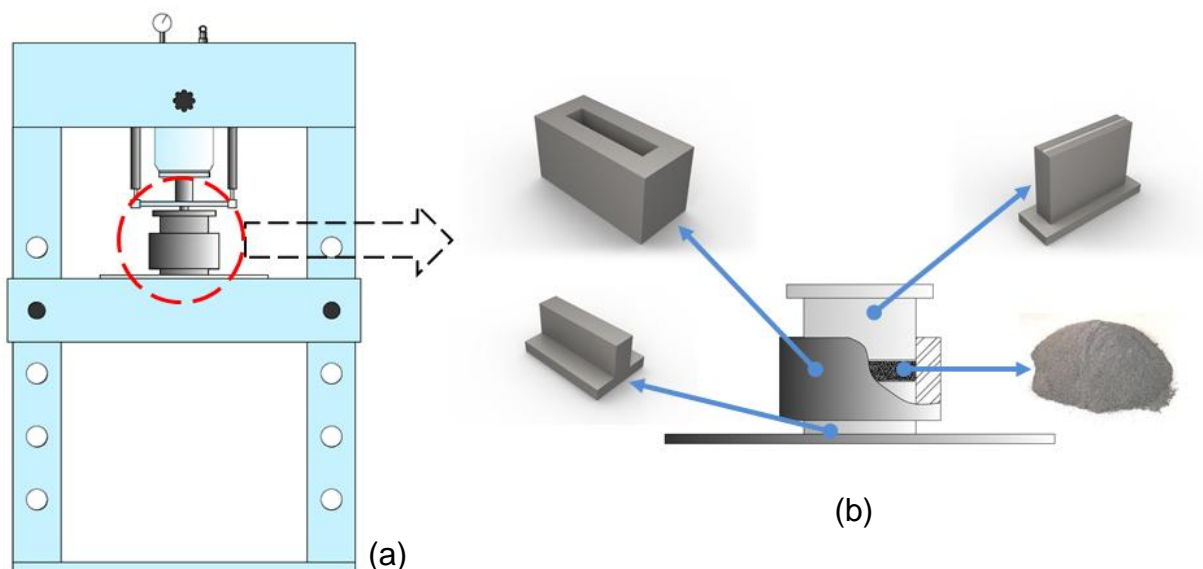


Figura 19 – (a) Prensa manual hidráulica, (b) Esquema de montagem das matrizes.

A figura 20(a) apresenta a seção transversal dos suportes cerâmicos que foram produzidos. Como mostrado na figura 20, o suporte possui uma pequena concavidade na região central que teve a função de adequar o formato do cordão de solda quando no estado líquido na parte inferior da chapa. Esta concavidade foi

prevista para ser formada no molde, no momento da compactação, tendo uma dimensão de 5,0 mm de largura por 1,6 mm de profundidade. A figura 20(b) mostra uma perspectiva isométrica do formato e das dimensões do suporte cerâmico produzido.

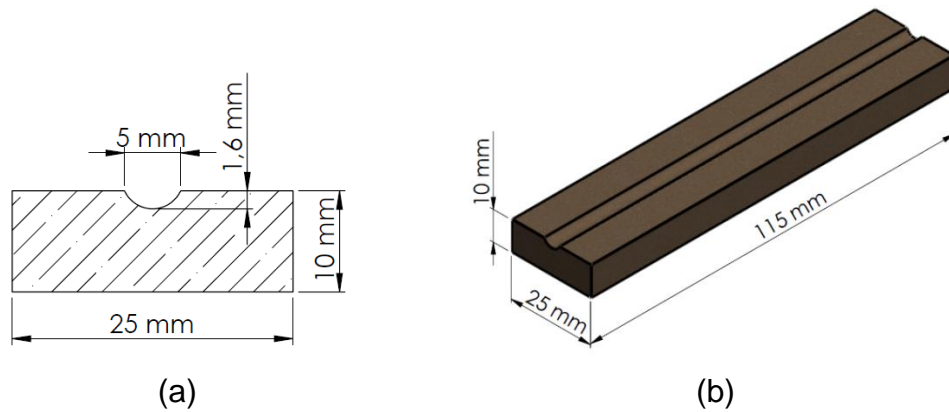


Figura 20 – Representação do Suporte Cerâmico: (a) Seção transversal, (b) Dimensões do corpo de prova.

7ª operação - Secagem: após a etapa de compactação, os corpos de prova foram submetidos a um processo de secagem em uma estufa com temperatura de 120 °C por um período de 24 h. A secagem teve por objetivo remover o excesso de umidade contida no corpo de prova;

8ª operação - Sinterização: os suportes cerâmicos foram sinterizados em 1100 °C, sendo que esta temperatura obteve os melhores resultados em estudos anteriores (Almeida, 2009). O ciclo de aquecimento foi de 3 °C/min com permanência de 3 horas na temperatura de sinterização (1100 °C). O ciclo de resfriamento foi de 4 °C/min até a temperatura ambiente, sendo estes ciclos controlados pelo forno.

3.2.1.3 Avaliação por soldagem utilizando os suportes cerâmicos

Após a preparação dos corpos de prova cerâmicos à base de escória, foram realizadas avaliações por soldagem, utilizando o processo MIG-MAG, onde somente foi aplicado o passe de raiz.

A preparação da chapa foi feita com as seguintes especificações: chapas de aço A-36 com dimensões 122 x 100 x 6,4 mm, junta de topo, chanfro em V de 60° e com abertura de raiz de 3,0 mm. A figura 21 apresenta a seção transversal da junta utilizada na avaliação do suporte por soldagem.

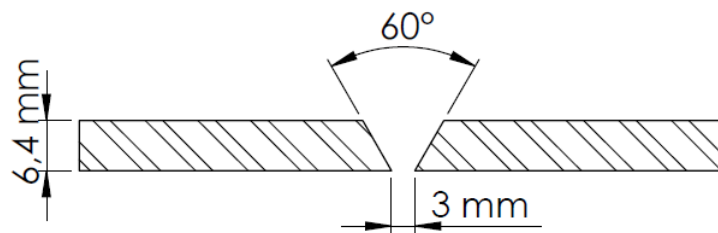


Figura 21 – Dimensões da junta utilizada na etapa 1 para a avaliação por soldagem dos corpos-de-prova.

Na figura 22 pode se observar como foi feita a montagem do suporte cerâmico na junta a ser soldada. A figura 22(a) mostra a seção transversal da chapa de aço preparada de acordo com as dimensões mostradas na figura 21, com o suporte fixado em sua parte inferior. Na figura 22(b) é apresentada uma visão geral da junta a ser soldada com dois apêndices fixados nas duas extremidades da chapa através de pontos de solda. Estes apêndices têm como objetivos: permitir que durante a montagem das chapas a abertura de raiz permaneça constante e iniciar e terminar a solda fora da chapa de teste.

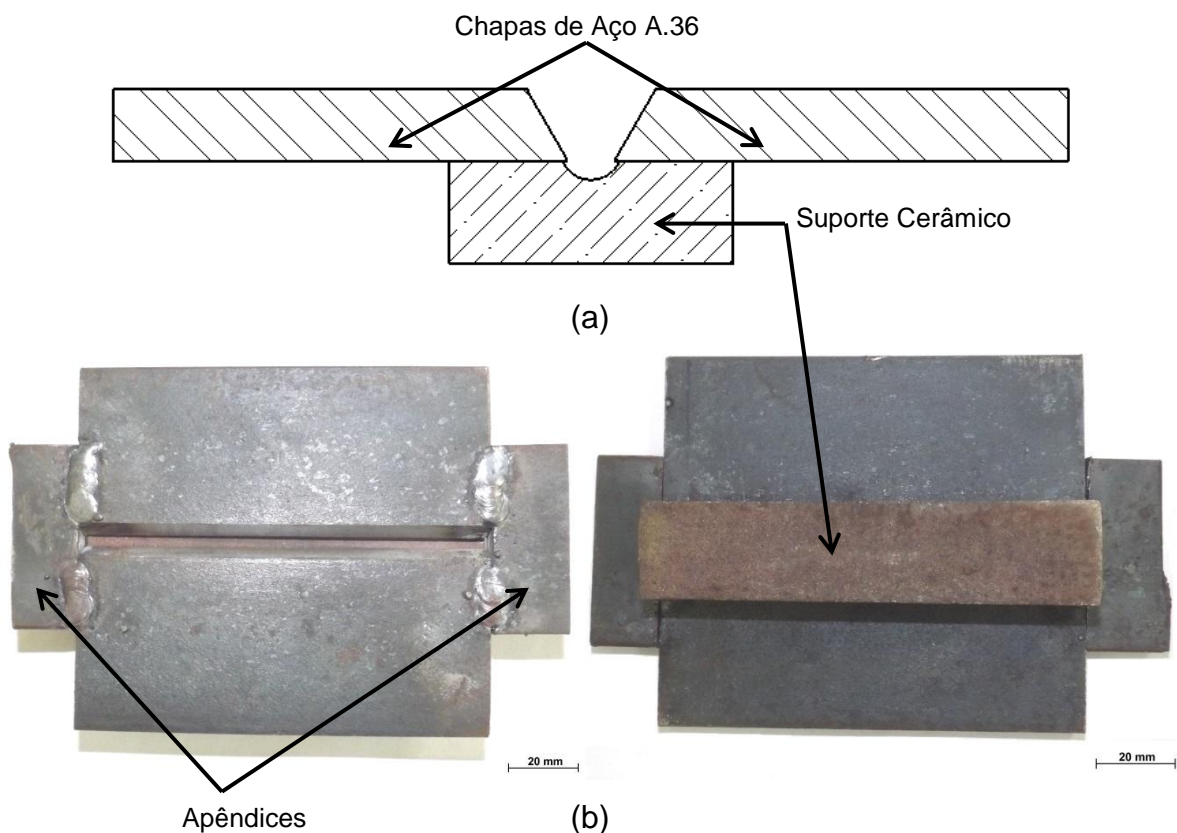


Figura 22 – (a) Seção transversal do conjunto, chapa e suporte cerâmico e (b) preparação do suporte cerâmico na junta, destacando a utilização de apêndices.

A soldagem foi realizada com os seguintes parâmetros: corrente 150 A, tensão 20-22 V e velocidade de soldagem 1,80 mm/s.

A avaliação das soldas foi feita por ensaios não destrutivos e macrografia, descritos a seguir:

- **Inspeção visual:** O cordão de solda foi inspecionado por ambos os lados, com objetivo de verificar o acabamento do cordão de solda e a presença de descontinuidades. Antes desse processo de inspeção visual, as juntas soldadas forma limpas para terem suas superfícies isentas de impurezas;

- **Líquido penetrante (LP):** Foi realizado somente no lado que esteve em contato com o suporte cerâmico. Teve como principal objetivo verificar pequenas descontinuidades superficiais na raiz do cordão de solda. Os procedimentos para a realização deste ensaio foram de acordo com a norma ASME seção V, edição 2004.

- **Macrografia:** Tem como objetivo verificar a geometria resultante do cordão de solda. As amostras para macrografia foram obtidas cortando-se ao meio as juntas soldadas, em seção transversal ao cordão de solda. Estas seções, por sua vez, foram preparadas com lixas de granulometria de #100, #220, #320, #400 e #600 mesh e logo após a superfície sofreu um ataque químico com Nital 10,0%. Neste ensaio foi verificado o tamanho do reforço da raiz e a penetração lateral do cordão de solda.

A figura 23 ilustra como foi feita a medição da abertura de raiz, do reforço da raiz e da largura do cordão.

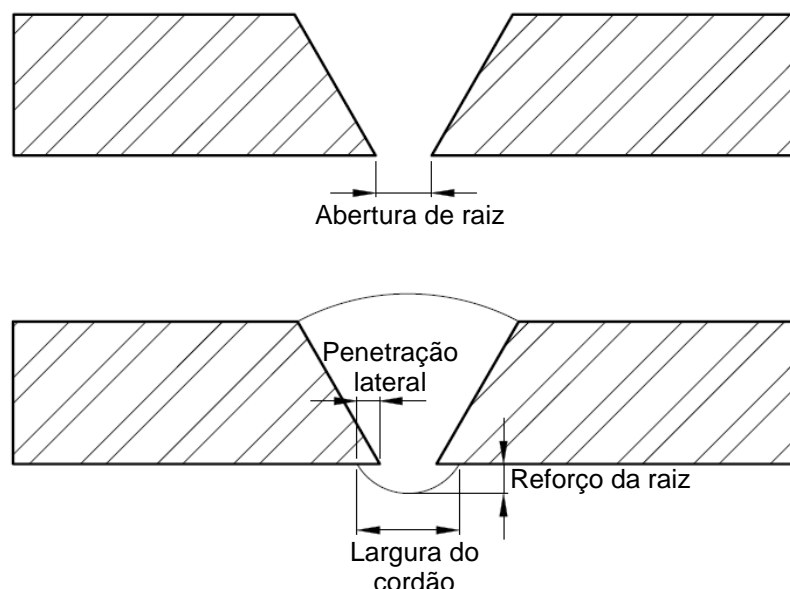


Figura 23 – Partes do cordão de solda.

O reforço da raiz da solda é encontrado medindo diretamente a diferença de altura entre o metal de base e a raiz da solda. Já a penetração lateral do cordão de solda é calculada utilizando os valores da largura do cordão e a abertura da raiz, como mostra a equação 2.

$$\text{Penetração lateral} = \frac{\text{Largura do cordão} - \text{Abertura de raiz}}{2} \quad \text{Eq. 2}$$

3.2.1.4 Avaliação da absorção de água e resistência à flexão dos suportes cerâmicos

Foram utilizados dois suportes cerâmicos de cada formulação para o ensaio de absorção de água e resistência à flexão.

Para a realização do ensaio de absorção, foram utilizados: uma balança digital com resolução de 0,001 kg; um paquímetro, utilizado para verificar se houve mudança nas dimensões dos suportes; Estufa para secagem dos suportes; Recipiente para imersão e água destilada.

As operações realizadas no ensaio de absorção de água são mostradas na figura 24. Os suportes passaram pelo processo de secagem e tiveram suas massas verificadas, logo após foram imersos na água destilada em temperatura ambiente, sendo que para cada formulação foi reservado um suporte na dessecadora. Depois da imersão foram verificadas as massas dos suportes e calculada a absorção de água (AA).

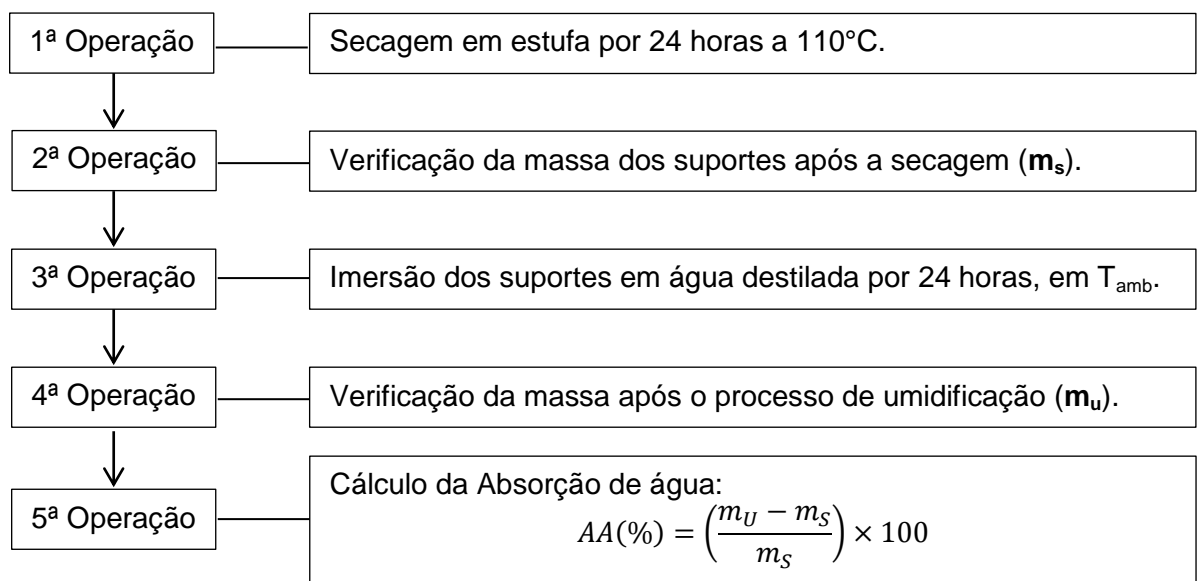


Figura 24 – Operações para realização da avaliação da absorção de umidade.

Após estas operações utilizadas no ensaio de absorção de água foi realizada a secagem em estufa dos suportes que sofreram o processo de imersão em água destilada, com parâmetros semelhantes a primeira operação. Este processo de secagem serviu para a verificação da retirada ou não, da água absorvida pelos suportes cerâmicos.

Para verificar se a água absorvida influenciou na resistência do suporte, foi realizado o ensaio de flexão de três pontos. Foram comparados os resultados dos suportes que foram mantidos secos com os suportes submetidos ao processo de umidificação de cada formulação.

No ensaio de flexão foi calculada a tensão de ruptura à flexão através da equação 3.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

- σ: Tensão de ruptura à flexão (MPa);
- P: Carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura (N);
- L: Distância entre os cutelos de apoio (mm);
- b: Largura do corpo de prova (mm);
- d: Espessura do corpo de prova (mm).

A carga foi aplicada pelo cutelo superior com velocidade de 0,5 mm/min, a distância entre os cutelos de apoio foi de 90 mm.

3.2.2 Etapa 2: Avaliação dos Parâmetros de Soldagem

A partir do resultado obtido na avaliação da etapa um, foram selecionadas formulações que apresentaram um bom resultado nas avaliações, para que a partir delas, sejam aplicadas variações dos parâmetros de soldagem.

O processo de soldagem utilizado foi o MIG-MAG variando os seguintes parâmetros: corrente, velocidade de soldagem e abertura de raiz.

A variação dos parâmetros de soldagem seguiu as seguintes faixas: abertura de raiz de 0 a 6 mm; corrente, de 130 a 200 A; velocidade de soldagem de 1,70 a 2,10 mm/s; e tensão, de 20 a 22 V, como descrito na tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem que foram utilizados nas formulações escolhidas.

Varição	Tensão (V)	Corrente (A)	Abertura de raiz (mm)	Velocidade de Soldagem (mm/s)
A	20-22	130 - 140	0	1,70
B	20-22	150 - 160	2	1,80
C	20-22	170 - 180	4	1,90
D	20-22	190 - 200	6	2,10

A tensão do arco ocorre entre a extremidade do arame e a peça, é diretamente proporcional ao comprimento do arco, ou seja, quanto maior o comprimento do arco, maior a tensão do arco. A corrente de soldagem pode ser medida na saída da fonte quando a solda está sendo realizada. Já a velocidade de soldagem é a medida entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo.

A medição de corrente e da tensão de soldagem foi feita por um alicate volt-amperímetro e através do painel do equipamento de soldagem. O tempo de soldagem foi medido por um cronômetro digital.

O passe de raiz foi avaliado por inspeção visual e por líquido penetrante, com os mesmos procedimentos e materiais descritos na etapa anterior. Também foram realizadas macrografias, para verificação do aspecto da seção transversal do passe de raiz de cada junta soldada.

Para a determinação do campo operacional foi elaborado um gráfico de Energia de Soldagem *versus* Abertura de Raiz. A energia de soldagem ou aporte Térmico (H), que é a quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento, foi calculada utilizando equação 4.

$$H = \frac{V \times I}{v} \quad \text{Eq. 4}$$

onde: V é a tensão do arco (V), I é a corrente de soldagem (A) e v a velocidade de soldagem (mm/s) e H é o aporte térmico (kJ/mm).

3.2.3 Etapa 3: Avaliação das características mecânicas da junta soldada com o suporte cerâmico produzido

Com os resultados obtidos na etapa anterior, foi selecionado um parâmetro para as duas formulações, pois apresentaram resultados satisfatórios durante e após o processo de soldagem MIG-MAG.

Nesta etapa a chapa de teste de aço A-36, com 500 x 300 x 15,8 mm, foi preparada com um chanfro em V de 60°. A figura 25 mostra a divisão das áreas.



Figura 25 – Chapa de teste para levantamento das características mecânicas.

Após a soldagem foram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos para cada área, para obter as propriedades mecânicas da junta soldada.

Os parâmetros de soldagem utilizados nesta etapa foram selecionados de acordo com o resultado da etapa anterior, ou seja, foi escolhido um ponto de trabalho dentro do campo operacional delineado no final da etapa 2.

Os suportes cerâmicos foram posicionados na parte inferior da chapa, começando da divisão central para a extremidade. O primeiro passe (passe de raiz) foi feito com os parâmetros escolhidos no campo operacional. Após este passe foi feita a remoção da escória para iniciar o segundo passe e também a retirada do suporte cerâmico na parte inferior da chapa. Após cada passe foi feita a remoção da escória para receber o próximo passe e assim preencher todo chanfro.

3.2.3.1 Ensaio de Tração e Dobramento

A figura 26 apresenta a localização e a quantidade de corpos de prova retirados de cada área da chapa de teste soldada para a realização dos ensaios de tração e dobramento de acordo com a norma ASME IX de 2004.

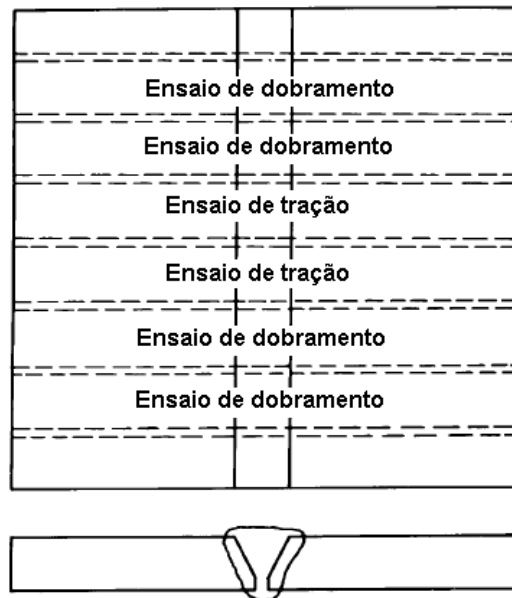


Figura 26 – Localização dos corpos de prova para os ensaios de tração e dobramento. (ASME IX, 2004)

Para o ensaio de tração foram preparados dois corpos de provas com as dimensões especificadas na figura 27.

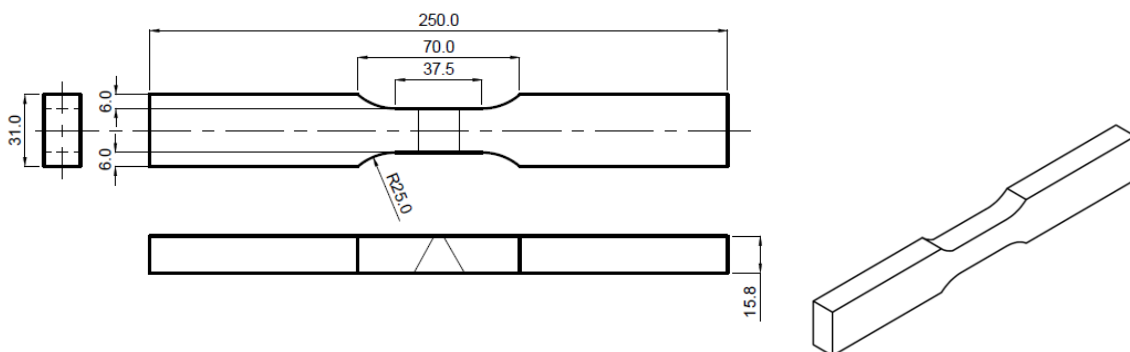


Figura 27 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração. (ASME IX, 2004)

Para o ensaio de dobramento lateral foram preparados quatro corpos de prova com dimensões mostradas na figura 28.

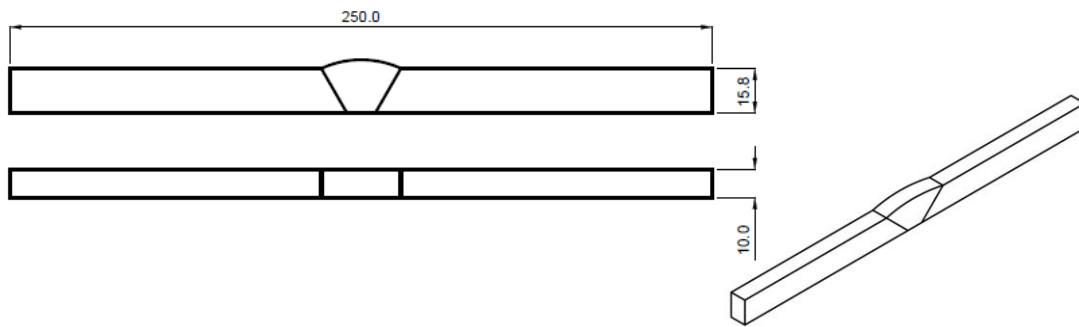


Figura 28 – Desenho do corpo de prova para ensaio de dobramento lateral (ASME IX, 2004)

Para o ensaio de dobramento lateral, o critério de aceitação foi a ausência de descontinuidades na solda ou na ZTA da superfície dobrada, e não surgimento de trincas maiores ou iguais a 3,0 mm. Não foi levada em consideração descontinuidades aberta nos cantos do corpo de prova.

Já o critério de aceitação do ensaio de tração foi que o corpo de prova rompa no metal de base, fora da solda ou na interface com a solda (ZTA), sendo que a resistência registrada não seja menor que 5% em relação à resistência mínima especificada para o aço A-36.

3.2.3.2 Dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers teve a finalidade de verificar a existência de pontos com dureza elevada na junta com o suporte cerâmico à base EFS. Foram considerados aceitáveis valores abaixo de 200 HV.

A dureza Vickers foi feita em um durômetro modelo Shimadzu HVM-2, do LAMAV/UENF, com uma carga de 50 g. Foram realizadas 18 medições, distribuídas da seguinte forma: 6 medidas para o metal base (MB), 6 medidas para a zona termicamente afetada (ZTA) e 6 medidas para a zona fundida (ZF). Todas as medidas foram feitas sob uma linha horizontal ao longo da extensão de toda junta soldada, a uma distância de 1,5 mm da parte inferior e superior da chapa. A figura 29 mostra o desenho esquemático com a localização dos pontos onde foram executadas as impressões.

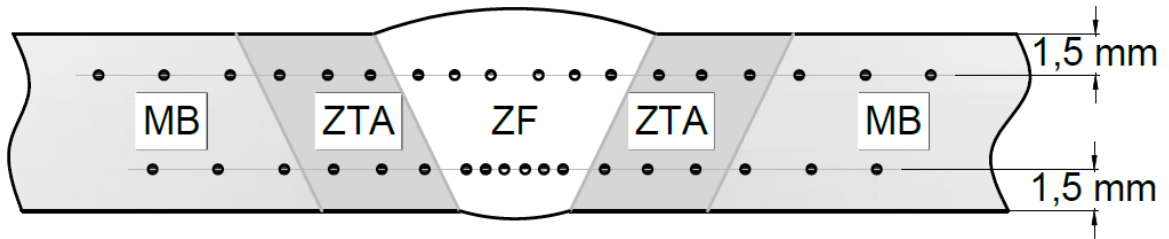


Figura 29 – Representação esquemática da localização dos pontos de execução da dureza.

3.2.3.3 Microscopia Ótica

Através da microscopia ótica foi possível observar a quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de inclusões da zona fundida.

As amostras para microscopia ótica foram obtidas cortando-se ao meio as juntas soldadas, em seção transversal ao cordão de solda. Para facilitar o manuseio das amostras foi realizado o embutimento a frio, que utiliza uma resina epóxi que endurecem a temperatura ambiente pela ação de um catalisador.

As seções, por sua vez, foram preparadas com lixas de granulometria de #100, #220, #320, #400 e #600 e #1200 mesh. O polimento foi realizado com pastas de granulometria de 1 μm e 0,05 μm , de alumina (Al_2O_3) e logo após a superfície foi atacada quimicamente utilizando o reagente Nital (2,0% de ácido nítrico, misturado com álcool etílico).

Após esta preparação foi realizado o exame da amostra, levando-a ao microscópio para observação da microestrutura e posterior registro do aspecto observado (fotografia). O microscópio utilizado foi o Olympus – GX41 do LAMAV/UENF.

3.2.3.4 EDS das inclusões do cordão de solda

Esta análise teve como objetivo identificar se houve inclusões de materiais do suporte cerâmico no passe de raiz e compara-las com as inclusões dos passes de acabamento da junta soldada.

As amostras foram preparadas de acordo com a seção anterior, mas sem ataque químico e depois levadas para a análise química das inclusões utilizando uma microanálise EDS. Foi utilizado o micro-analisador acoplado ao Microscópio

Eletrônico de Varredura (MEV) SSX-550, da empresa SHIMADZU, modelo SEDX, do LAMAV/UENF.

Capítulo 4: Resultados e Discussão

4.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA - PRODUÇÃO DO SUPORTE CERÂMICO

4.1.1 Processamento Cerâmico

Nesta etapa o objetivo foi produzir em laboratório suportes cerâmicos contendo os três tipos de escória de fluxo de soldagem a arco submerso, propondo formulações e utilizando a sequência de produção tradicional do suporte cerâmico utilizada por Almeida (2009).

A escória ácida foi fornecida já triturada e moída, e possuía aparência muito escura. Já as escórias básica e semi-básica foram fornecidas em pequenos pedaços de comprimento entre 3 e 8 cm e suas aparências eram clara e escura, respectivamente, conforme mostrado na figura 30.

As escórias básica e semi-básica continham fluxo original, não fundido durante o processo de soldagem, impregnado na superfície externa em relação à poça de fusão. Este fluxo não fundido juntamente com o fluxo fundido, é muito importante para composição do suporte cerâmico, uma vez que a função fluxo na soldagem por arco submerso é proteger a poça de fusão e fornecer elementos desoxidantes.

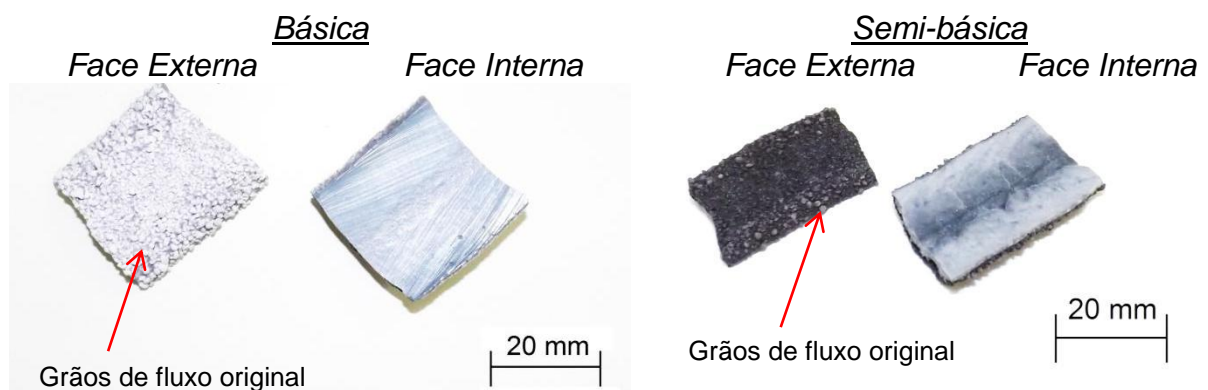


Figura 30 – Aspectos das escórias recebidas.

Em relação à moagem da escória, foram utilizados os equipamentos mostrados na figura 18. A escória primeiramente foi triturada utilizando o triturador

de martelo e posteriormente foi utilizado o moinho de bolas a fim de diminuir ainda mais a sua granulometria.

Um ponto de destaque seguido durante esta operação foi que quando uma porção da escória era triturada e moída, esta não podia ser peneirada antes que toda sua massa chegasse a granulometria de #50 mesh. Desta forma, foi garantido ter as duas partes da escória moída, tanto a parte fundida, quanto a parte não fundida.

Os aspectos de cada momento da moagem da escória semi-básica, podem ser observados na figura 31.

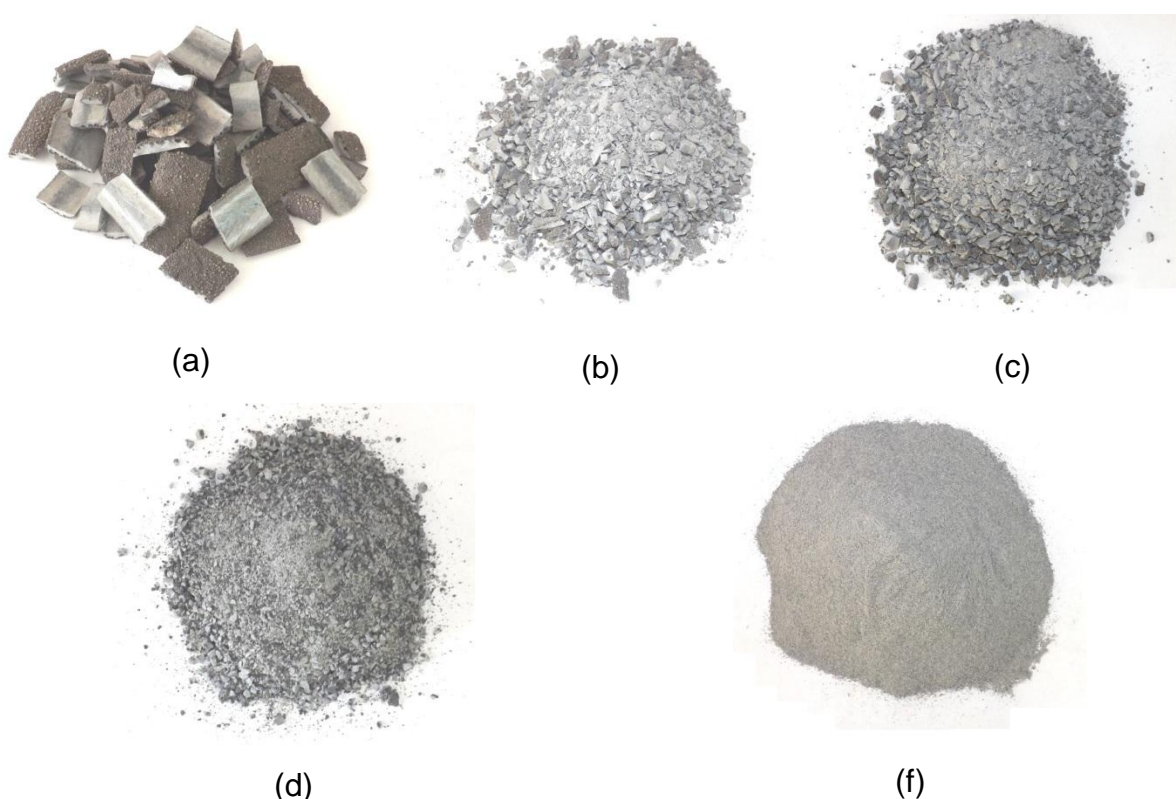


Figura 31 – Moagem da escória semi-básica. Em: (a) Escória como recebida; (b) Após o 1º tritramento; (c) Após o 2º tritramento; (d) Após o 3º tritramento; (e) Após o peneiramento em #50 mesh.

Durante a etapa de pesagem das matérias-primas, utilizou-se de um conta-gotas para o silicato de sódio, devido a sua viscosidade elevada, facilitando a precisão durante esta operação.

Em relação à operação de peneiramento da mistura úmida, observou-se, com exceção das formulações 4, 8 e 12, uma grande dificuldade na realização, principalmente nas formulações 1, 5 e 9, onde se percebeu que a mistura ficava

muito úmida, dificultando o peneiramento. Nestes casos, a homogeneização da formulação via peneiramento foi realizada após o processo da mistura a seco antes da adição de água.

Na compactação de todas as formulações foi utilizada a carga de 15 toneladas. A figura 32 mostra a sequência de compactação do corpo de prova. Durante a acomodação da mistura na matriz, figura 32(c), foi utilizada uma espátula de aço de pequena espessura, para melhor distribuir e nivelar a massa cerâmica por toda matriz. Caso contrário, poderia ocorrer variação de espessura ao longo do comprimento do suporte cerâmico e também danificar o conjunto de matrizes.

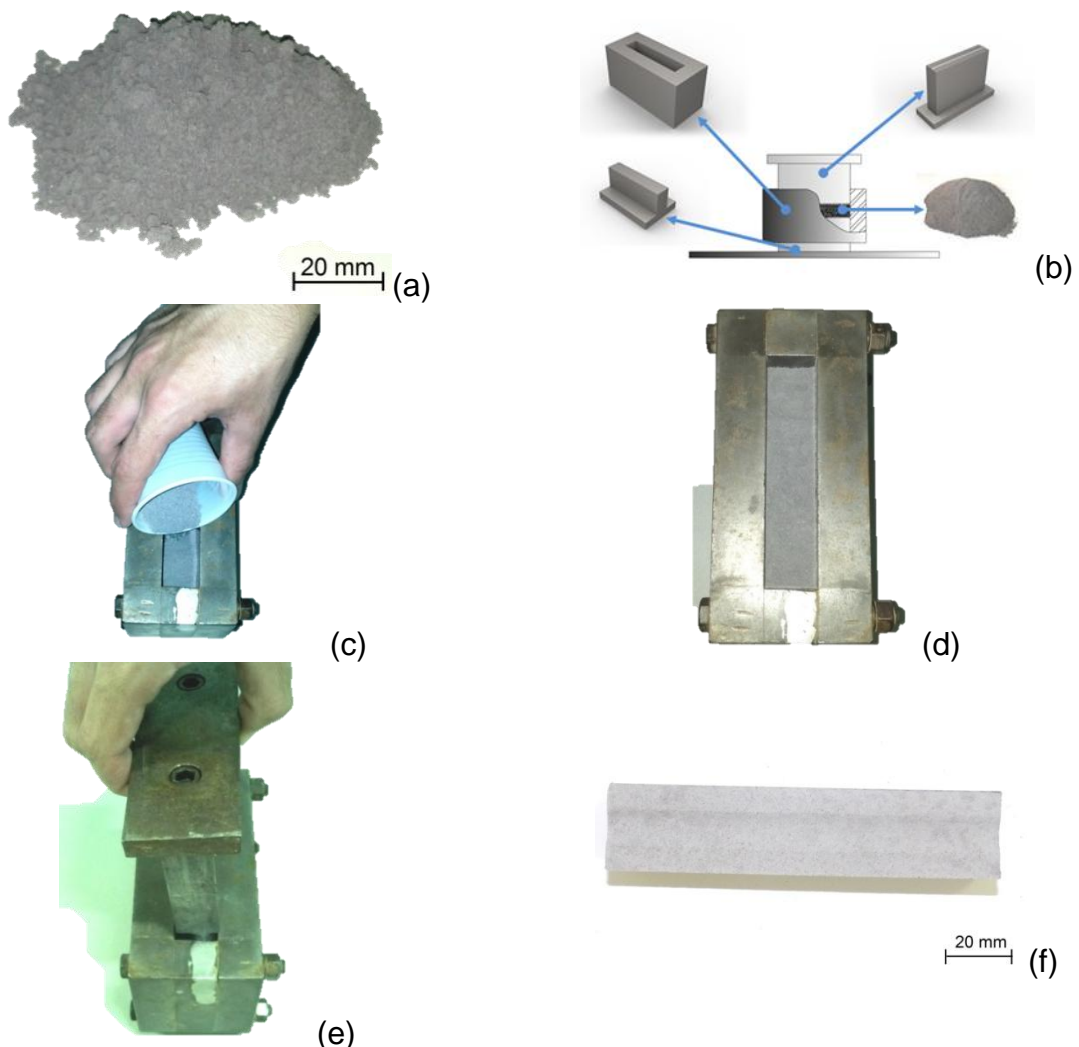


Figura 32 – Sequência de compactação. Em (a) Mistura úmida peneirada; (b) Montagem das matrizes; (c) Colocação da mistura na matriz; (d) Acomodação da mistura na matriz; (e) Encaixe da matriz superior; (f) Corpo de prova após a compactação.

As dimensões de comprimento e largura dos suportes cerâmicos não sofreram variações, devido à dimensão padrão das matrizes utilizadas na operação de compactação. A figura 33 apresenta três corpos de prova produzidos, sendo um de cada tipo de escória.

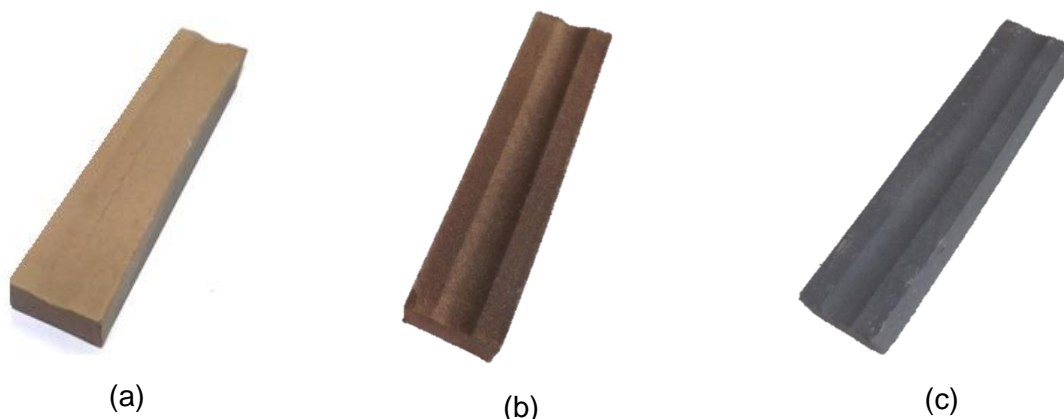


Figura 33 – Suportes Cerâmicos produzidos, (a) Escória ácida, (b) Escória básica e (c) Escória semi-básica.

Todos os suportes apresentaram um bom acabamento superficial, fato importante para o acabamento da raiz da solda. A massa de cada corpo de prova foi 100 g, com uma pequena variação de 5 g.

Durante a operação de sinterização foi utilizado um peso sobre os corpos de prova a fim de evitar qualquer tipo de distorção.

Os suportes da escória ácida apresentaram pequenas trincas superficiais após a operação de sinterização, mas não apresentaram grande fragilidade quando transportados e apresentaram qualidade adequada para utilização na soldagem. Este comportamento pode ser justificado pela carga aplicada durante a compactação do suporte, que para esta formulação não foi adequado.

Foram produzidos e sinterizados quatro suportes cerâmicos de cada formulação proposta na tabela 7, totalizando quarenta e oito suportes, a fim de escolher apenas o melhor suporte para ser avaliado por soldagem.

Com relação às etapas do processamento cerâmico, proposto na seção 3.2.1.2, pode-se garantir que estas foram consideradas satisfatórias para a produção de suportes cerâmicos utilizando escória de soldagem.

4.1.2 Resultado da avaliação por soldagem

As doze juntas foram preparadas conforme o procedimento experimental descrito no item 3.2.1.3. As soldas foram realizadas na FAETEC, em Campos dos Goytacazes – RJ.

A abertura de raiz nesta etapa foi de 3,0 mm, a corrente variou entre 147 a 152 A, a tensão manteve-se em 21 V. A velocidade de soldagem, que é o terceiro parâmetro para o cálculo da energia de soldagem, variou de 1,5 a 1,8 mm/s. Com isso a energia de soldagem variou de 1,85 a 2,10 kJ/mm.

Em alguns cordões de solda foi constatado que o material do suporte cerâmico ficou aderido ao contorno do cordão de solda, como mostra a figura 34. O material aderido no cordão de solda era facilmente removido com a utilização de uma escova de aço.

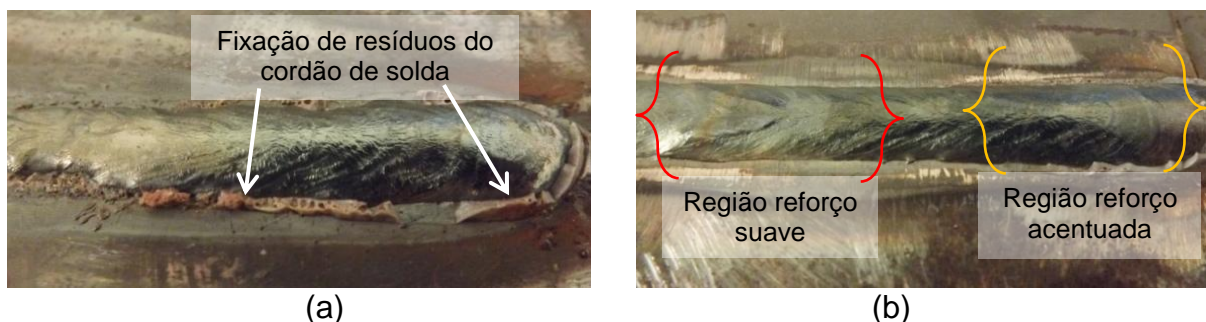
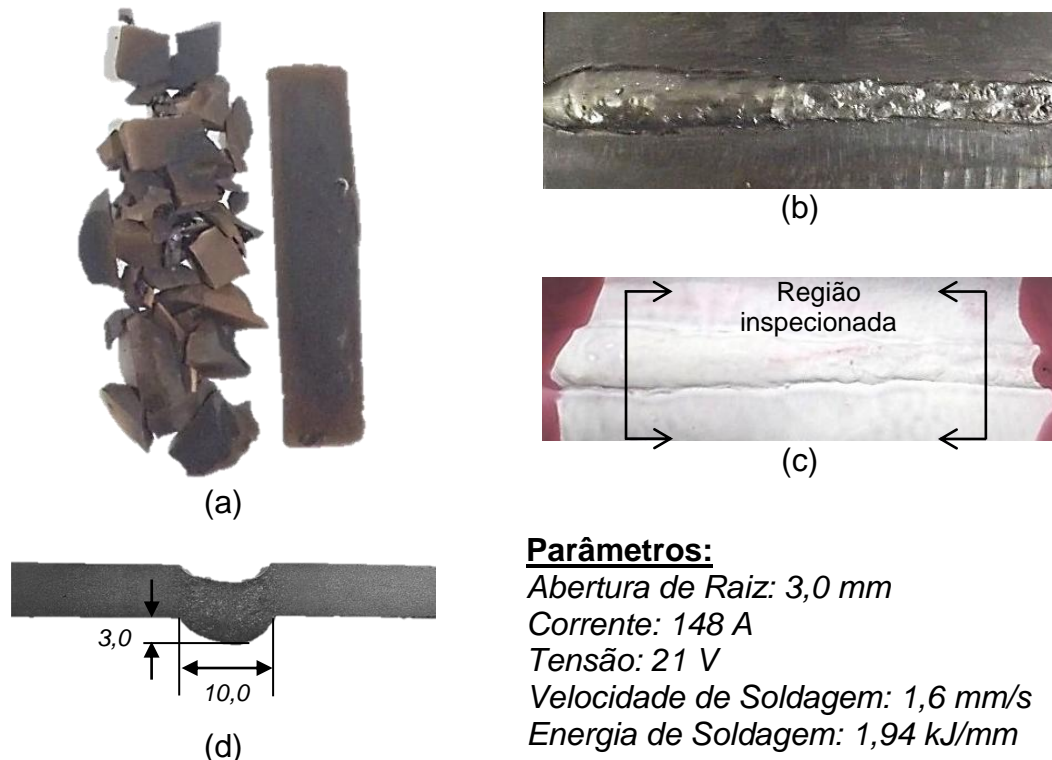


Figura 34 – (a) Detalhe dos resíduos do suporte na raiz da junta do corpo de prova da formulação 5. (b) Comparação entre as regiões do cordão de solda do corpo de prova da formulação 7.

4.1.2.1 Suporte à base de escória ácida

A figura 35 apresenta os resultados da formulação 1. Na figura 35(a) é mostrado o suporte cerâmico que após a operação de soldagem fragmentou-se significativamente. A inspeção visual da raiz do cordão de solda (figura 35(b)), observa-se depressões superficiais e não possui uniformidade em sua largura no decorrer da chapa. O ensaio de líquido penetrante (figura 35(c)) não apresentou descontinuidade superficial na raiz do cordão. A macrografia da seção transversal do cordão de solda (figura 35(d)) mostra que o reforço de raiz foi de 3,0 mm e a largura do cordão foi de 10,0mm. Como a abertura da raiz foi de 3,0 mm, foi estimada em 3,5 mm a penetração lateral no metal de base em cada um dos lados. A formulação

1 quanto a quantificação de resíduo aderido do suporte na lateral do cordão obteve perímetro total de 105 mm.



Parâmetros:

Abertura de Raiz: 3,0 mm

Corrente: 148 A

Tensão: 21 V

Velocidade de Soldagem: 1,6 mm/s

Energia de Soldagem: 1,94 kJ/mm

Figura 35 – Resultados da Formulação 1. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

Os resultados dos testes da formulação 2 são apresentados na figura 36. Na figura 36(a) é mostrado o suporte cerâmico após o teste que também se fragmentou. A inspeção visual é apresentada na figura 36(b), onde é possível observar pequenas depressões e uma uniformidade na largura do cordão. Na figura 36(c) é mostrado o ensaio de líquido penetrante onde não foi observado descontinuidades. A macrografia, figura 36(d), possui reforço de raiz de 3,0 mm e largura de 12,0 mm, com isso houve uma penetração estimada de 4,5 mm no metal de base de cada uma das chapas, uma vez que a abertura de raiz utilizada foi de 3,0 mm. Com relação à quantificação de resíduo aderido na lateral do cordão, a formulação 2 teve um somatório do perímetro do cordão de aproximadamente 130 mm.

A figura 37 apresenta os resultados da formulação 3. Na figura 37(a) é mostrado o suporte cerâmico após o teste de soldagem, que também se fragmentou. A figura 37(b) mostra a inspeção visual da raiz do cordão de solda, que apresenta um aspecto uniforme em sua largura, bom acabamento e pequenas depressões superficiais. No ensaio de líquido penetrante (figura 37(c)) não foi observado descontinuidade superficial na raiz do cordão. Na figura 37(d) é apresentada a

macrografia que teve abertura de raiz de 3,0 mm e a largura do cordão foi de 10,0 mm, assim a penetração em cada chapa foi cerca de 3,5 mm e o reforço de raiz foi de 2,0 mm. A formulação 3 teve cerca de 25 mm de resíduo aderido no perímetro do cordão de solda.

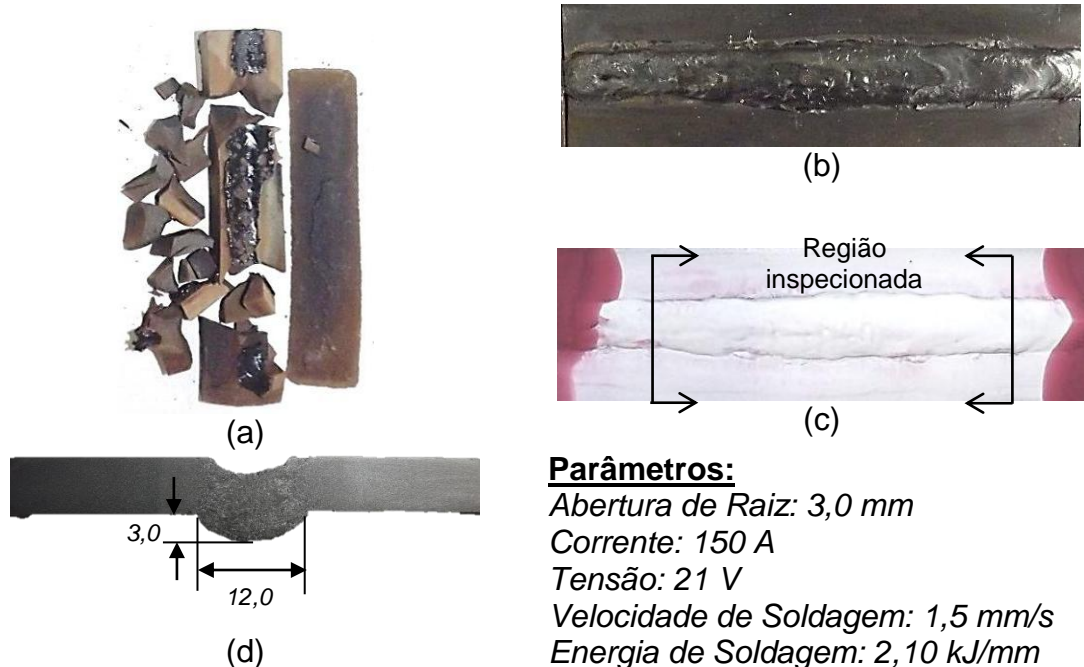


Figura 36 – Resultados da Formulação 2. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

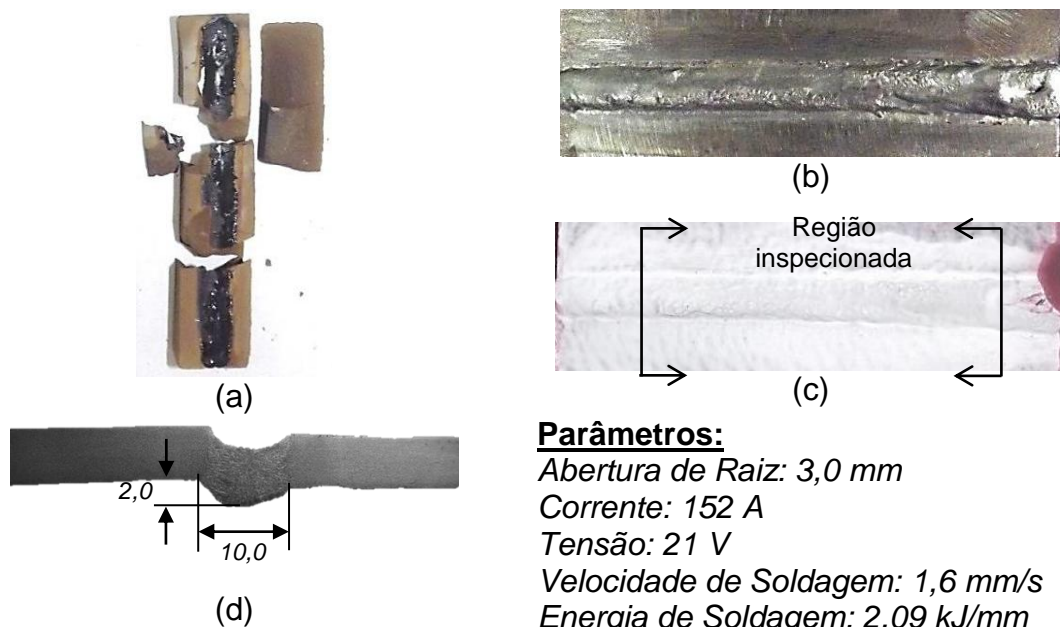


Figura 37 – Resultados da Formulação 3. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

Na figura 38 são apresentados todos os resultados dos ensaios da formulação 4. A figura 38(a) apresenta o suporte cerâmico após o teste. Na figura 38(b) mostra a inspeção visual da raiz do cordão de solda, nota-se que o cordão

mantém uma uniformidade na largura, mas não no perfil, apresentando pequenas depressões. A figura 38(c) mostra o resultado do ensaio de líquido penetrante da raiz do cordão de solda, onde se observa que não houve o aparecimento de descontinuidades superficiais na raiz do cordão. Já a macrografia mostrada na figura 38(d), apresenta largura do cordão de 11,0 mm, houve então uma penetração de 4,0 mm no metal de base em cada uma das chapas devido à abertura de raiz de 3,0 mm e o reforço de raiz foi de 1,5 mm. A formulação 4 teve cerca de 73 mm de resíduo do suporte cerâmico aderido no perímetro do cordão de solda.

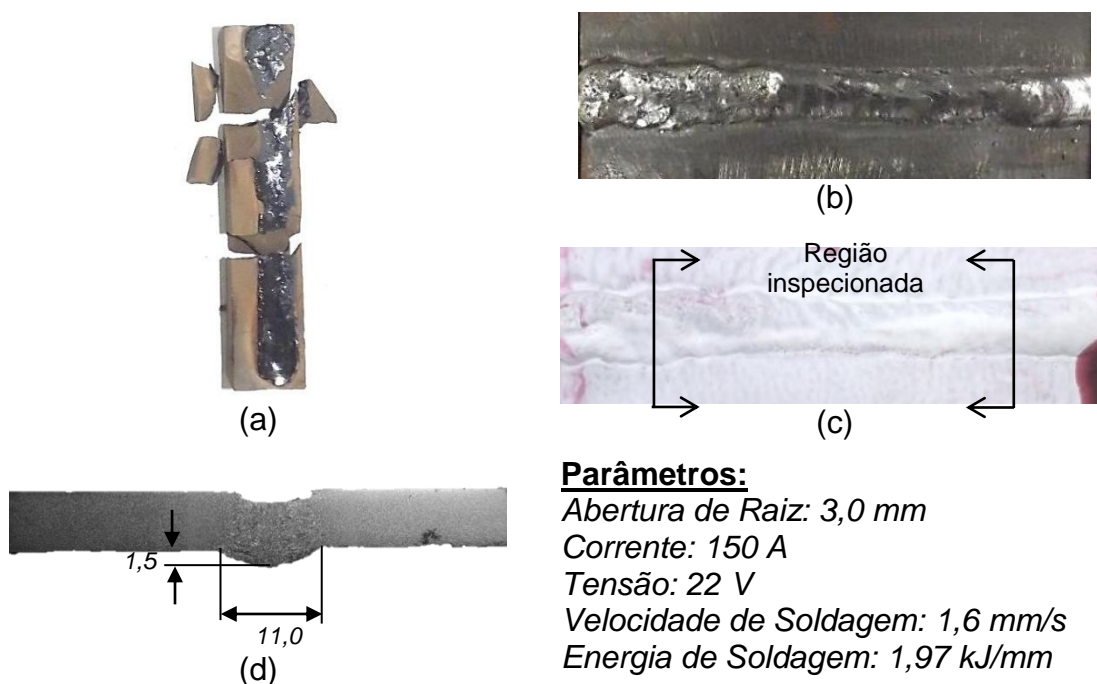


Figura 38 – Resultados da Formulação 4. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

• Resumo dos resultados dos suportes à base de escória ácida

Na tabela 9 é apresentado o resultado dos ensaios das formulações que utilizaram a escória ácida.

Todas as formulações à base de escória ácida suportaram a poça de fusão do processo de soldagem, ou seja, funcionaram como suporte de soldagem.

A inspeção visual das quatro formulações apresentaram depressões na superfície do cordão de solda e a formulação 3 apresentou boa uniformidade na largura do cordão, por isso o restante das formulações foram consideradas reprovadas na inspeção visual.

Os resultados do ensaio de líquido penetrante foram considerados aprovados, pois não apresentaram descontinuidades superficiais na raiz dos cordões.

As macrografias apresentaram um bom aspecto, com exceção das formulações 1 e 2, que tiveram um reforço de raiz mais elevado.

As formulações com escória ácida tenderam a apresentar adesão de material no cordão solda, principalmente as formulações 1 e 2, que tiveram apenas silicato de sódio como aditivo em suas composições. As formulações 3 e 4 apresentam a menor quantidade de material do suporte cerâmico aderido no contorno do cordão da raiz da solda e também os menores valores de reforço de raiz.

Tabela 9 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de escória ácida.

Formulação	Integridade do suporte cerâmico	Inspeção Visual	Líquido Penetrante	Macrografia			Somatório do perímetro aderido de resíduo
				Reforço de raiz	Largura do cordão	Penetração Lateral	
1	Fragmentou-se em muitas partes	Depressões superficiais e largura não uniforme ao longo do cordão	Não foram observadas descontinuidades	3,0 mm	10,0 mm	3,5 mm	105,0 mm
2	Fragmentou-se em muitas partes	Pequenas depressões e largura não uniforme ao longo do cordão		3,0 mm	12,0 mm	4,5 mm	130,0 mm
3	Fragmentou-se em três grandes partes	Pequenas depressões e uniformidade na largura do cordão		2,0 mm	10,0 mm	3,5 mm	25,0 mm
4	Fragmentou-se em três grandes partes	Depressões superficiais e largura não uniforme ao longo do cordão		1,5 mm	11,0 mm	4,0 mm	73,0 mm

4.1.2.2 Suporte à base de escória básica

Na figura 39 são apresentados os resultados da formulação 5. A figura 39(a) mostra o suporte cerâmico após o processo de soldagem, diferentemente de todos os anteriores não se fragmentou. A inspeção visual (figura 39(b)) apresenta uma boa uniformidade na largura do cordão e pequenas depressões. Na figura 39(c) é mostrado o resultado do ensaio de líquido penetrante onde não foi observado descontinuidade superficial na raiz do cordão. Na macrografia (figura 39(d)), o

reforço de raiz foi de 3,0 mm, a largura do cordão de solda foi de 10,5 mm, com abertura da raiz igual a 3,0 mm, houve cerca de 3,75 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas. A formulação 5 teve cerca de 140 mm de resíduo aderido no perímetro do cordão de solda.



Figura 39 – Resultados da Formulação 5. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

A figura 40 apresenta os resultados da formulação 6. Na figura 40(a) é mostrado o suporte cerâmico após o processo de soldagem que também não se fragmentou. A inspeção visual é mostrada na figura 40(b) e apresenta uniformidade da largura do cordão ao longo da chapa e algumas depressões. Na figura 40(c) é mostrado o resultado do ensaio de líquido penetrante onde não foi observado nenhum tipo de descontinuidade superficial na raiz do cordão. A macrografia, figura 40(d), possui reforço de raiz de 2,0 mm e a largura do cordão foi de 7,0 mm, com isso houve cerca de 2,0 mm de penetração no metal de base de cada uma das chapas. A formulação 6 teve cerca de 52 mm de resíduo do suporte cerâmico aderido no perímetro do cordão de solda.

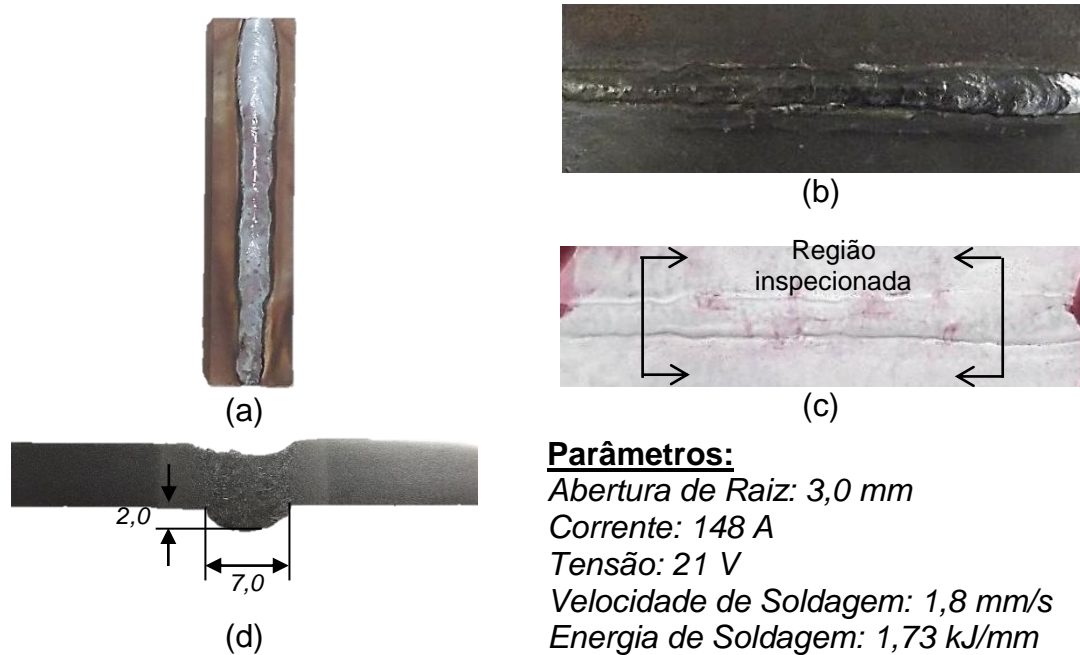


Figura 40 – Resultados da Formulação 6. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

Os resultados da formulação 7 são apresentados na figura 41. A figura 41(a) mostra o suporte cerâmico intacto após o processo de soldagem. Na figura 41(b) é apresentada a inspeção visual da raiz do cordão de solda, nota-se que o cordão apresenta uniformidade na largura do cordão no decorrer da chapa. O ensaio de líquido penetrante, mostrado na figura 41(c), não revelou descontinuidade superficial na raiz do cordão. Na figura 41(d) é mostrada a macrografia da seção transversal do cordão que apresentou uma largura do cordão de 10,0mm. Como a abertura da raiz foi de 3,0mm, a penetração em cada chapa foi de 4,1mm e o reforço de raiz foi de 1,8 mm. O somatório de resíduo aderido na formulação 7 foi de 67mm no perímetro do cordão de solda.

A figura 42 apresenta os resultados da formulação 8. Na figura 42(a) é mostrado o suporte cerâmico intacto após o processo de soldagem. Na inspeção visual, figura 42(b), nota-se que o cordão apresenta pequenas depressões e uniformidade na largura do cordão. Na figura 42(c) é mostrado o resultado do ensaio de líquido penetrante onde não foi observado descontinuidade superficial na raiz do cordão. A macrografia apresentada na figura 42(d) possui largura do cordão de 10,5mm, houve então uma penetração de cerca de 3,75 mm no metal de base em cada lado e o reforço de raiz foi de 1,5 mm. Na formulação 8 não houve a adesão de resíduo no contorno do cordão de solda.

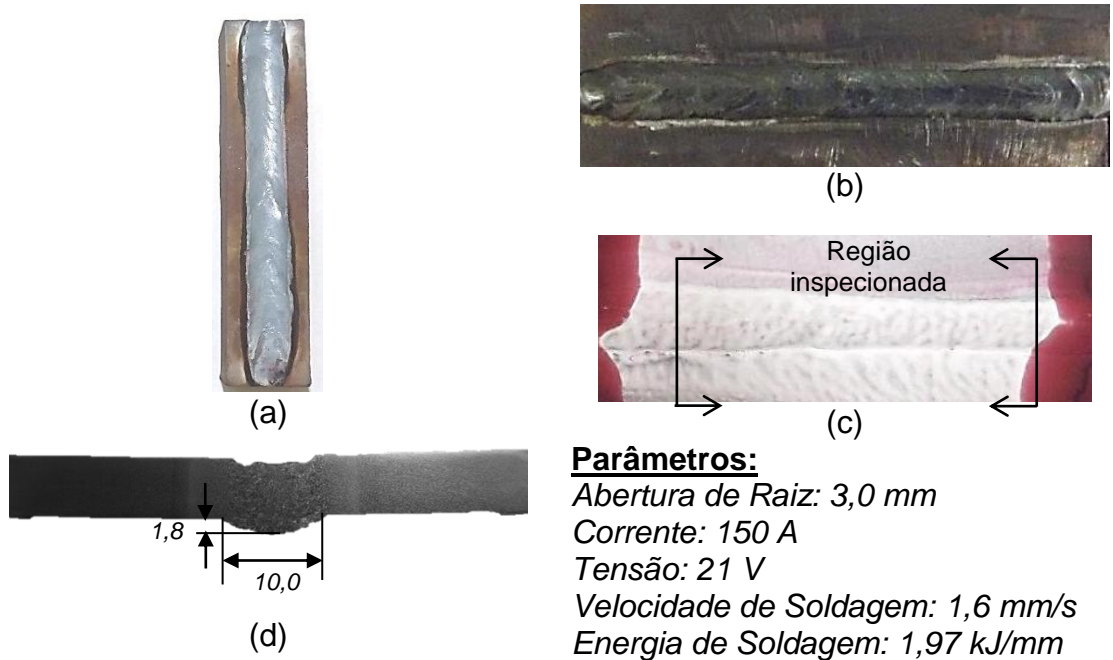


Figura 41 – Resultados da Formulação 7. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.



Figura 42 – Resultados da Formulação 8. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

- **Resumo dos resultados dos suportes à base de escória básica**

Na tabela 10 é apresentado o resultado dos ensaios de todas as formulações que utilizaram a escória básica.

Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de escória básica.

Formulação	Integridade do suporte cerâmico	Inspeção Visual	Líquido Penetrante	Macrografia			Somatório do perímetro aderido de resíduo
				Reforço de raiz	Largura do cordão	Penetração Lateral	
5	Não se fragmentou	Pequenas depressões e uniformidade na largura do cordão	Não foram observadas descontinuidades	3,0 mm	10,5 mm	3,75 mm	140,0 mm
6	Não se fragmentou	Depressões superficiais e uniformidade na largura do cordão		2,0 mm	7,0 mm	2,0 mm	52,0 mm
7	Não se fragmentou	Uniformidade na largura do cordão		1,8 mm	10,0 mm	4,1 mm	67,0 mm
8	Não se fragmentou	Depressões superficiais e uniformidade na largura do cordão		1,5 mm	10,5 mm	3,75 mm	Não houve adesão

Como visto, os suportes à base de escória básica se mantiveram intactos ao processo de soldagem e mesmo assim, houve adesão de material cerâmico no contorno do cordão de solda, com exceção da formulação 8.

A inspeção visual das formulações 5, 6 e 8 apresentaram depressões na superfície do cordão de solda e todas as formulações tiveram uniformidade na largura do cordão. As formulações 7 e 8 foram consideradas aprovadas na inspeção visual.

Os resultados do ensaio de líquido penetrante, onde não foi observado nenhum tipo de descontinuidade superficial na raiz dos cordões, sendo assim estes cordões foram considerados como aprovados.

Observa-se que nas macrografias foi obtida penetração nas laterais do chanfro e reforço de solda apropriado na raiz. O reforço de raiz variou de 1,5 a 3,0 mm, a largura do cordão variou 7,0 a 10,5 mm e penetração lateral variou de 2,0 a 4,1 mm.

As formulações com escória básica, assim como as ácidas, também tenderam a apresentar adesão de material no cordão solda. A formulação 8 não apresentou material aderido ao contorno do cordão e apresentou também o menor valor de reforço de raiz na macrografia. Isso demonstra que há uma tendência entre o reforço

da raiz e a adesão material no contorno do cordão também nos suportes com EFS básica.

4.1.2.3 Suporte à base de escória semi-básica

Na figura 43 são apresentados os resultados da formulação 9. A figura 43(a) mostra o suporte cerâmico intacto após a operação de soldagem. Na inspeção visual (figura 43(b)) nota-se certa regularidade na largura do cordão e pequenas depressões ao longo da solda. Na figura 43(c) é mostrado o ensaio de líquido penetrante onde não foi observada descontinuidade superficial. Na macrografia da formulação 9, figura 43(d), o reforço de raiz foi de 2,0 mm, a largura do cordão de solda foi de 7,0 mm, como a abertura da raiz nesta etapa foi de 3,0 mm, houve cerca de 2,0 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas. O somatório de resíduo aderido na formulação 9 foi de 30,0 mm no perímetro do cordão de solda.

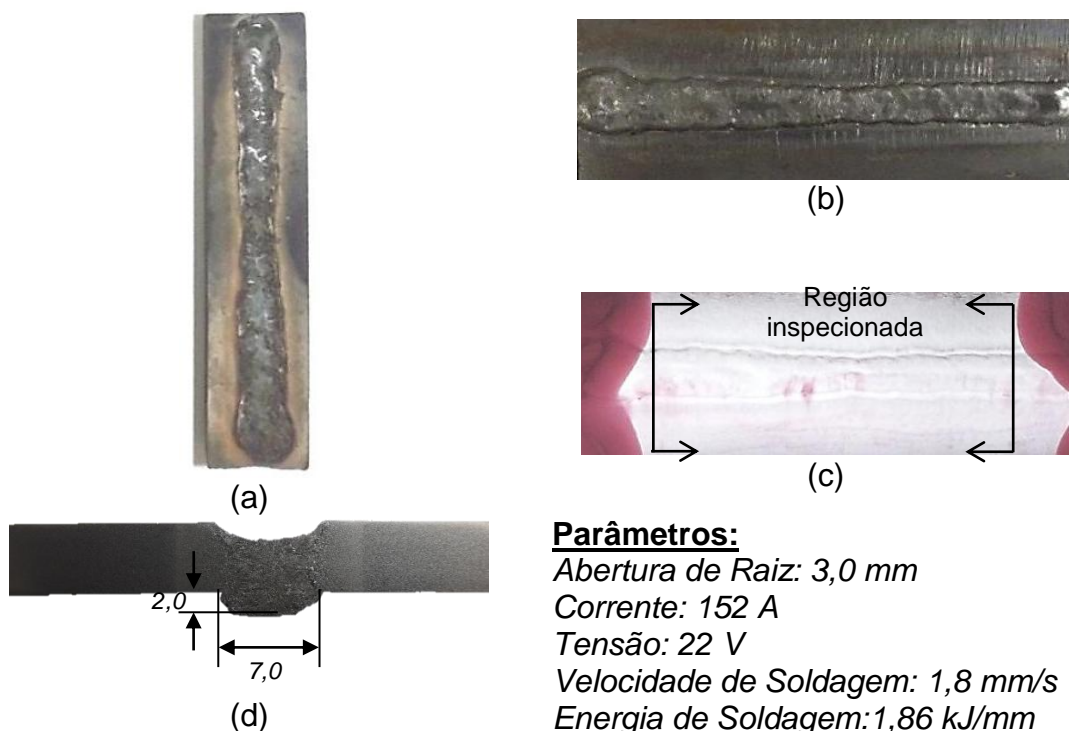
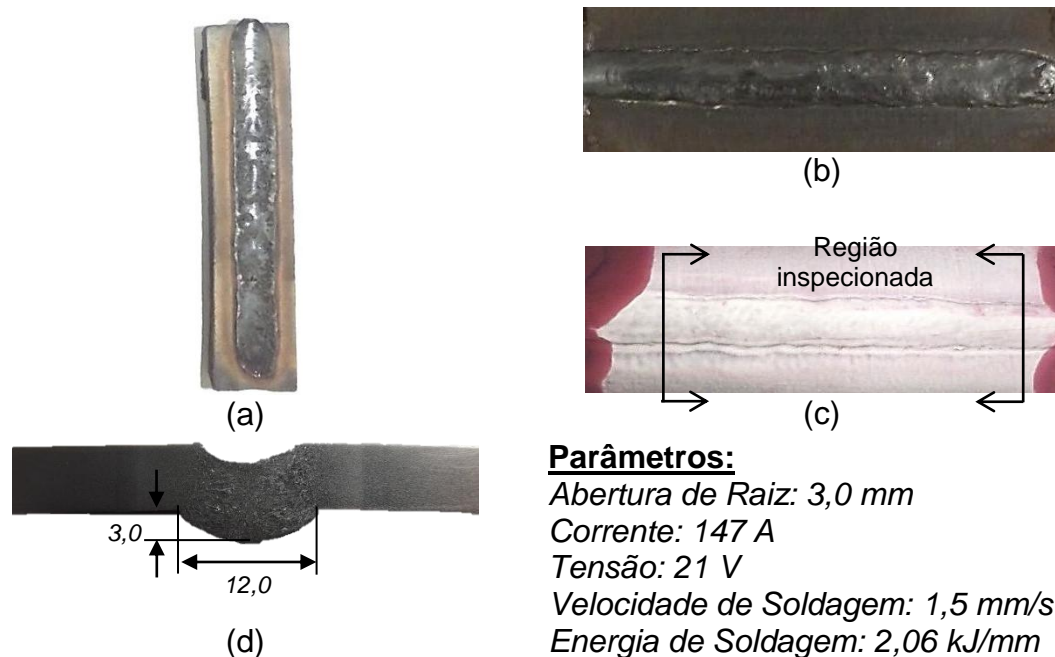


Figura 43 – Resultados da Formulação 9. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

A figura 44 apresenta todos os resultados da formulação 10. A figura 44(a) mostra o suporte cerâmico intacto após o processo de soldagem. A inspeção visual da raiz do cordão de solda é mostrada na figura 44(b) e possui boa uniformidade da largura do cordão e poucas depressões. Na figura 44(c) é mostrado o resultado do

ensaio de líquido penetrante onde não foram detectadas descontinuidades superficiais na raiz do cordão. A macrografia (figura 44(d)) possui reforço de raiz de 3,0 mm, largura do cordão de 12,0 mm, com isso houve uma penetração de 4,5 mm no metal de base de cada uma das chapas. A formulação 10 teve cerca de 65 mm de resíduo do suporte cerâmico aderido no perímetro do cordão de solda.

**Parâmetros:**

Abertura de Raiz: 3,0 mm

Corrente: 147 A

Tensão: 21 V

Velocidade de Soldagem: 1,5 mm/s

Energia de Soldagem: 2,06 kJ/mm

Figura 44 – Resultados da Formulação 10. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

Os resultados da formulação 11 são apresentados na figura 45. Na figura 45(a) é mostrado o suporte cerâmico após a operação de soldagem, que diferentemente dos suportes anteriores se fragmentou. Na inspeção visual (figura 45(b)) observa-se a presença de pequenas depressões e uniformidade na largura do cordão. Na figura 45(c) é mostrado o resultado do ensaio de líquido penetrante onde não foram observadas descontinuidades superficiais na raiz do cordão. A macrografia, figura 45(d), apresentou uma largura de cordão de 9,0 mm, como a abertura de raiz foi de 3,0mm, a penetração em cada chapa foi de aproximadamente 3,0 mm e o reforço de raiz foi de 2,0 mm. A formulação 11 teve aproximadamente de 20 mm de resíduo do suporte cerâmico aderido no contorno do cordão.

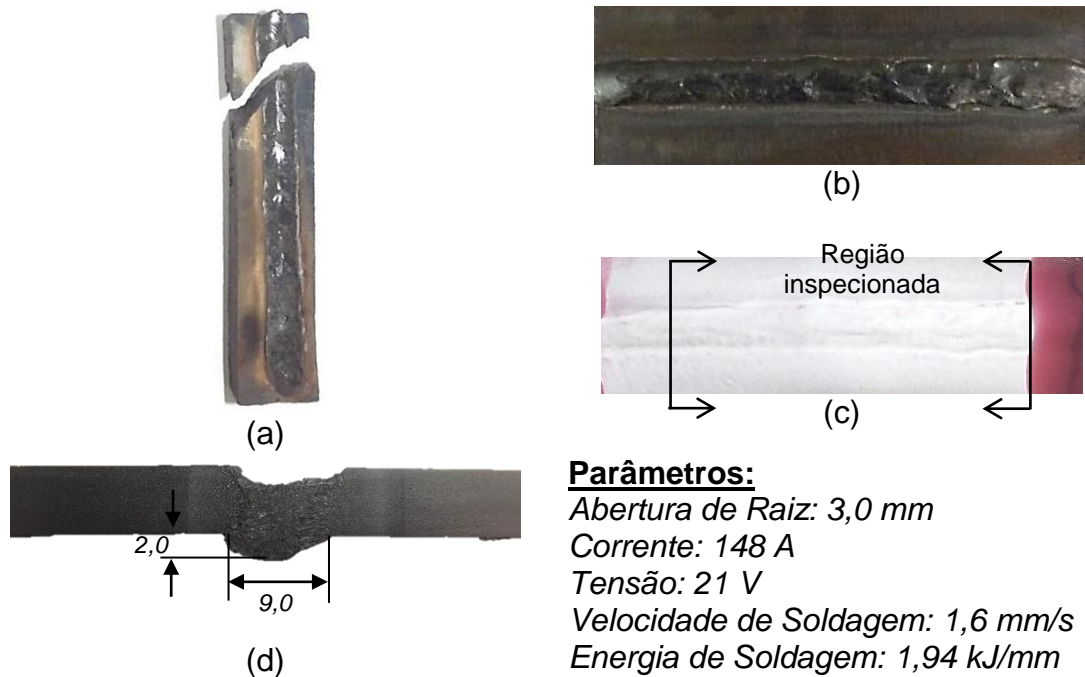


Figura 45 – Resultados da Formulação 11. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

A figura 46 apresenta todos os resultados da formulação 12. Na figura 46(a) é mostrado o suporte cerâmico utilizado, nota-se que este se fragmentou. Na inspeção visual da raiz do cordão de solda, figura 46(b), observa-se que o cordão possui algumas depressões e que mantém a largura ao longo da chapa. No ensaio de líquido penetrante, mostrado na figura 46(c), não foi observada descontinuidade superficial na raiz do cordão. Na figura 46(d) é mostrada a macrografia que possui uma largura de cordão de 9,0 mm, como a abertura de raiz foi de 3,0 mm, houve então uma penetração de 3,0 mm no metal de base em cada uma das chapas e o reforço de raiz foi de 2,0 mm. Na formulação 12 não houve a adesão de resíduo no contorno do cordão de solda.

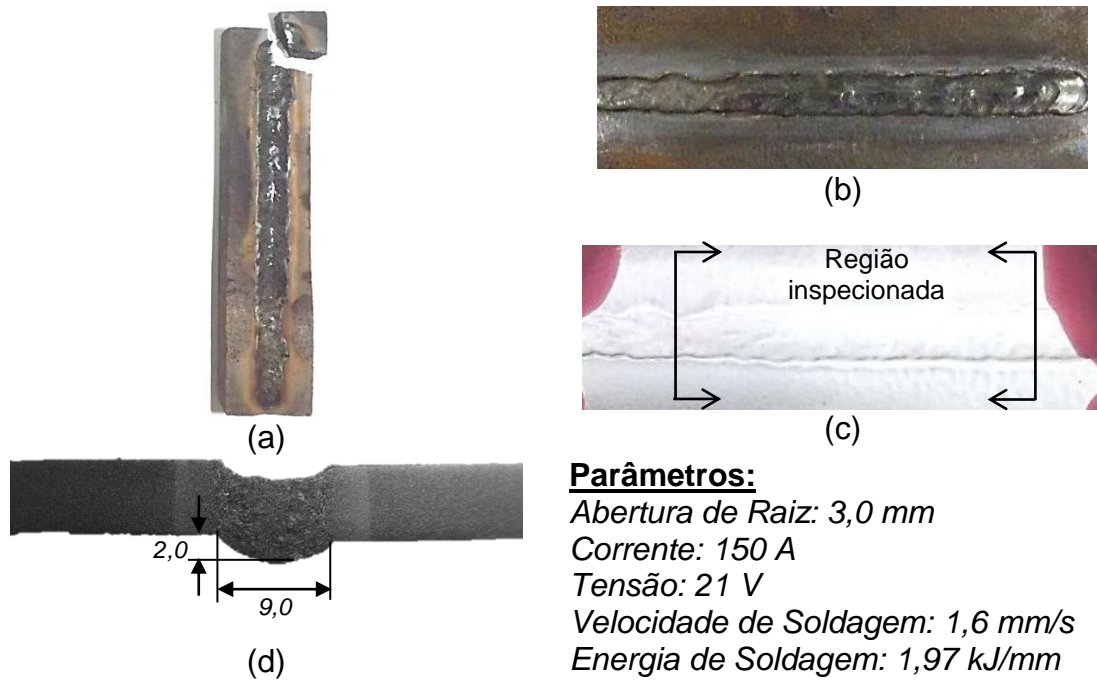


Figura 46 – Resultados da Formulação 12. (a) Suporte cerâmico, (b) Inspeção visual, (c) Líquido Penetrante, (d) Macrografia.

• Resumo dos resultados dos suportes à base de escória semi-básica

Na tabela 11 é apresentado o resultado dos ensaios das formulações que utilizaram a escória semi-básica.

Tabela 11 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de escória semi-básica.

Formulação	Integridade do suporte cerâmico	Inspeção Visual	Líquido Penetrante	Macrografia			Somatório do perímetro aderido de resíduo
				Reforço de raiz	Largura do cordão	Penetração Lateral	
9	Não se fragmentou	Pequenas depressões e uniformidade na largura do cordão	Não foram observadas discontinuidades	2,0 mm	7,0 mm	2,0 mm	30,0 mm
10	Não se fragmentou	Pequenas depressões e uniformidade na largura do cordão		3,0 mm	12,0 mm	4,5 mm	65,0 mm
11	Fragmentou-se em duas partes	Pequenas depressões e uniformidade na largura do cordão		2,0 mm	9,0 mm	3,0 mm	20,0 mm
12	Fragmentou-se em duas partes	Depressões superficiais e uniformidade na largura do cordão		2,0 mm	9,0 mm	3,0 mm	Não houve adesão

Os suportes cerâmicos à base de escória semi-básica suportaram a poça de fusão do cordão de solda. As formulações 11 e 12 tiveram apenas um pequeno fragmento do corpo de prova, isso aconteceu durante a retirada do suporte da solda.

As inspeções visuais foram consideradas aprovadas, pois apresentaram pequenas depressões na superfície do cordão de solda e uniformidade na largura do cordão.

Nos resultados do ensaio de líquido penetrante não foram observadas descontinuidades superficiais na raiz dos cordões, assim estes foram considerados aprovados.

Nas macrografias foi observado que o reforço de raiz variou de 2,0 a 3,0 mm, a largura do cordão variou 7,0 a 12,0 mm e penetração lateral variou de 2,0 a 4,5 mm. Em todas as formulações foi obtida penetração nas laterais do chanfro.

Assim como as formulações ácidas e básicas, as semi-básicas também tenderam a apresentar resíduo aderido ao contorno do cordão, mas em quantidade menor. A formulação 12, assim como a formulação 8, também não apresentou material aderido.

4.1.2.4 Avaliação da absorção de água e resistência à flexão dos suportes cerâmicos

A figura 47 apresenta o resultado do teste de absorção de água. Os suportes produzidos tiveram absorção na faixa de 3,24 a 9,06%. Os suportes com EFS ácida tiveram uma média de absorção de 7,40%, variando entre 6,22 a 9,06%. Os suportes com EFS básica tiveram uma média de 4,60% de absorção de água, variando entre 3,24 a 5,18%. Os suportes com EFS semi-básica tiveram uma média de 5,70% absorção de água, variando entre 4,80 a 6,54%.

Para comparação foi incluído no gráfico de absorção de água (figura 47) o resultado da absorção de umidade do suporte comercial (SC) que foi de 7,25%. Nota-se que apenas as formulações 1 e 4 ultrapassaram este valor.

Almeida (2009) descreve que os suportes produzidos com cordierita possuem absorção na faixa de 20,64 a 25,03%, superior ao resultado encontrado e ao suporte comercial.

Este resultado mostra que o suporte à base de EFS possui tendência em absorver água, contudo em quantidade menor que os suportes à base de cordierita e que este encontra-se na faixa de absorção dos suportes comerciais.

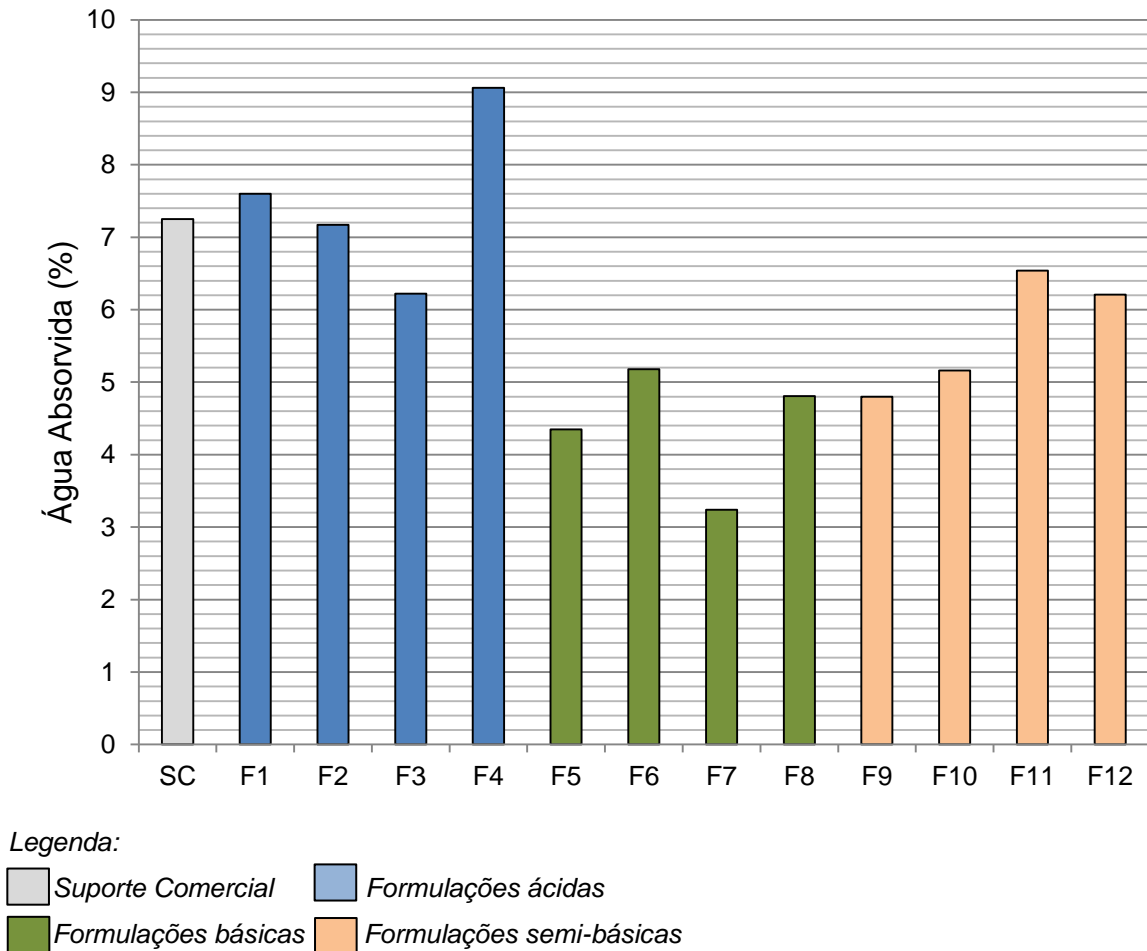


Figura 47 – Absorção de água do suporte cerâmico comercial e dos suportes cerâmicos produzidos.

Para verificação do efeito da água absorvida na resistência do suporte cerâmico, foi realizado o ensaio de flexão dos suportes que passaram pelo processo de umidificação e com os suportes mantidos secos. Na figura 48 é apresentado o gráfico com os resultados deste ensaio. A tensão de ruptura à flexão variou de 15,60 a 31,84 MPa nos suportes mantidos secos e de 14,57 a 32,48 MPa nos suportes submetidos ao processo de umidificação. Os valores mínimo e máximo para cada tipo de formulação é descrito a seguir:

- Formulações ácidas: para os suportes mantidos secos, valor mínimo de 16,70 MPa e máximo de 23,52 MPa, e para os suporte umidificados, valor mínimo de 15,88 MPa e máximo de 22,50 MPa;

- Formulações básicas: para os suportes mantidos secos, valor mínimo de 15,60 MPa e máximo de 23,23 MPa, e para os suporte umidificados, valor mínimo de 14,57 MPa e máximo de 22,58 MPa;

- Formulações semi-básicas: para os suportes mantidos secos, valor mínimo de 19,27 MPa e máximo de 31,84 MPa, e para os suporte umidificados, valor mínimo de 18,33 MPa e máximo de 32,48 MPa.

Nota-se que os resultados apresentados possuem valores próximos e que o processo de umidificação não acarretou em uma variação significativa na resistência à flexão dos suportes. Observa-se ainda que as formulações com maiores porcentagens do aditivo silicato de sódio (formulações 1, 2, 5, 6, 9 e 10) apresentaram maiores valores de tensão de ruptura à flexão. O silicato de sódio em temperaturas elevadas, como a de sinterização utilizada neste estudo (1100°C), funde-se e preenche os vazios que existem entre as partículas sólidas, oferecendo ao suporte maior resistência mecânica. Este comportamento também foi relatado por Almeida (2009), onde os suportes de cordierita obtiveram valores entre 1,5 a 5,0 MPa, resultado baixo, pois neste estudo o objetivo era variar a carga de compactação, utilizando como valor inicial 7 ton e valor máximo 15 ton.

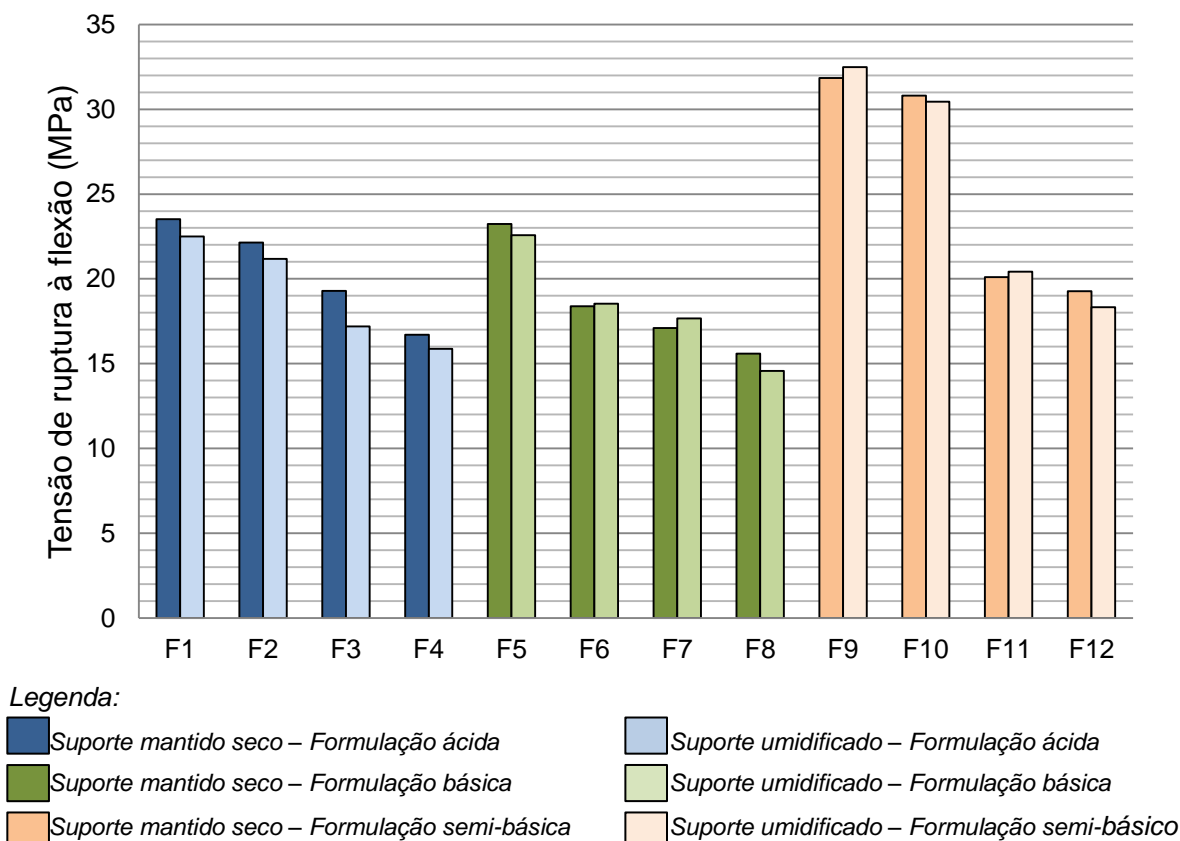


Figura 48 – Tensão de ruptura à flexão dos suportes cerâmicos produzidos à base de EFS.

4.1.3 Considerações finais dos resultados da etapa 1

Os suportes à base de escória básica não se fragmentaram e as formulações 11 e 12, à base de escória semi-básica, tiveram apenas um pequeno fragmento. Os suportes cerâmicos à base da escória ácida se fragmentaram e, devido a isso, não foram selecionados para a próxima da etapa. Nota-se que para as formulações propostas neste estudo, a EFS ácida não obteve resultados satisfatórios.

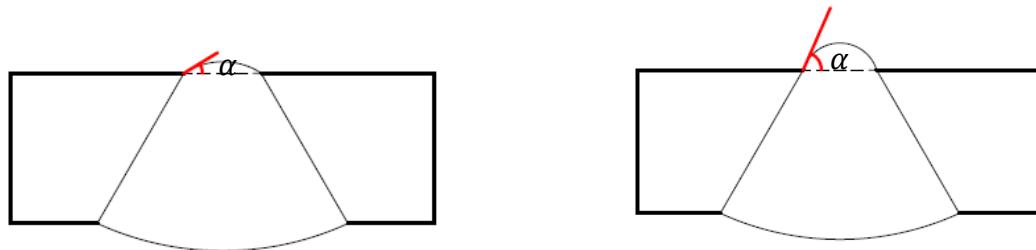
Na inspeção visual, as formulações básicas e semi-básicas obtiveram uma boa uniformidade na largura do cordão ao contrário das formulações ácidas, onde este aspecto só foi observado na formulação 3. Depressões também foram observadas quase todos os cordões de solda, as formulações 3, 7, 8 e 12 tiveram a menor quantidade de depressões ao longo do cordão.

No ensaio de líquido penetrante não foram observadas descontinuidades nas formulações ácida, básica e semi-básica. Por isso, foram consideradas aprovadas.

O perfil do reforço da raiz da solda, obtidos pelas macrografias, também se mostrou satisfatório nas três formulações, principalmente nas formulações: ácida 2 e 4; básica 7 e 8; e semi-básica 12. Este perfil é importante, pois variações bruscas agem como concentradores de tensão, facilitando o aparecimento de descontinuidades e aprisionamento de resíduos nos contornos dos cordões.

Foi observado que os suportes à base de EFS apresentaram menor porcentagem de absorção de água em comparação com suporte comercial, com exceção das formulações ácidas 1 e 4. E que a umidificação, quando retirada por processo de secagem não interfere na resistência à flexão do suporte.

Com relação à adesão de resíduo no contorno dos cordões, foi observado que as formulações 8 e 12 não apresentaram este comportamento. Como visto existe uma tendência de adesão de resíduo onde o reforço do cordão era mais acentuado. Já onde o reforço era suave, este fenômeno não foi observado, como ilustra a figura 49 e que é comprovado na figura 34(b). Este efeito deve-se a restrição oferecida pelo reforço de raiz elevado, como mostra a figura 49(b), criando um efeito de cunha na transição entre o metal base e o cordão da raiz.



(a) Interface suave entre a superfície do metal base e o plano tangente ao reforço da solda

(b) Interface acentuada entre a superfície do metal base e o plano tangente ao reforço da solda

Figura 49 – Comparação entre as interfaces do metal base com reforço na raiz (a) suave e (b) acentuada.

Para a próxima etapa, que é a determinação do possível campo operacional, foram selecionadas uma formulação à base de escória básica e outra semi-básica, sendo estas as formulações 8 e 12 respectivamente com composições de 93% escória, 5% bentonita e 2% silicato de sódio. Estas formulações foram selecionadas devido ao acabamento do cordão, formato da raiz da solda, isenção de descontinuidades e menor quantidade de adesão de resíduo no contorno do cordão de solda. As formulações ácidas não foram selecionadas pelo fato dos suportes não resistirem ao processo e se fragmentarem.

4.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA – AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Foram preparadas oito juntas variando a abertura de raiz, conforme mostrado na tabela 12, que traz os parâmetros de soldagem medidos e calculados durante a soldagem. Nesta avaliação a corrente de soldagem variou entre 136 a 194 A, a abertura de raiz variou de 0 a 6 mm, a velocidade de soldagem entre 1,21 a 3,83 mm/s e a energia de soldagem entre 0,77 a 3,53 kJ/mm.

Tabela 12 – Parâmetros de soldagem medidos e calculados durante a soldagem.

Identificação	Tensão (V)	Corrente (A)	Abertura de raiz (mm)	Velocidade (mm/s)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
<i>Básica</i> F8	A	136	0	3,59	0,80
	B	156	2	1,80	1,82
	C	172	4	1,67	2,16
	D	194	6	1,21	3,53
<i>Semi-Básica</i> F12	A	140	0	3,83	0,77
	B	150	2	2,13	1,48
	C	175	4	1,98	1,94
	D	192	6	1,47	2,87

4.2.1 Juntas Soldadas – Formulação 8

- **Formulação 8A**

Na figura 50 são apresentados os resultados dos ensaios realizados na formulação 8 com parâmetros A. Na figura 50(a) é mostrada inspeção visual da raiz da solda, como esta junta soldada teve abertura de raiz igual a 0,0mm não houve penetração do cordão de solda. No ensaio de líquido penetrante (figura 50(b)), não se observa descontinuidades. Já na figura 50(d) é mostrada a macrografia da seção transversal do cordão, constata-se a presença de um vazio situação próxima a raiz da solda, isso pode ser justificado pela baixa energia de soldagem empregada. Nesta junta não foi possível avaliar a eficiência do suporte cerâmico em suportar o metal de solda líquido.

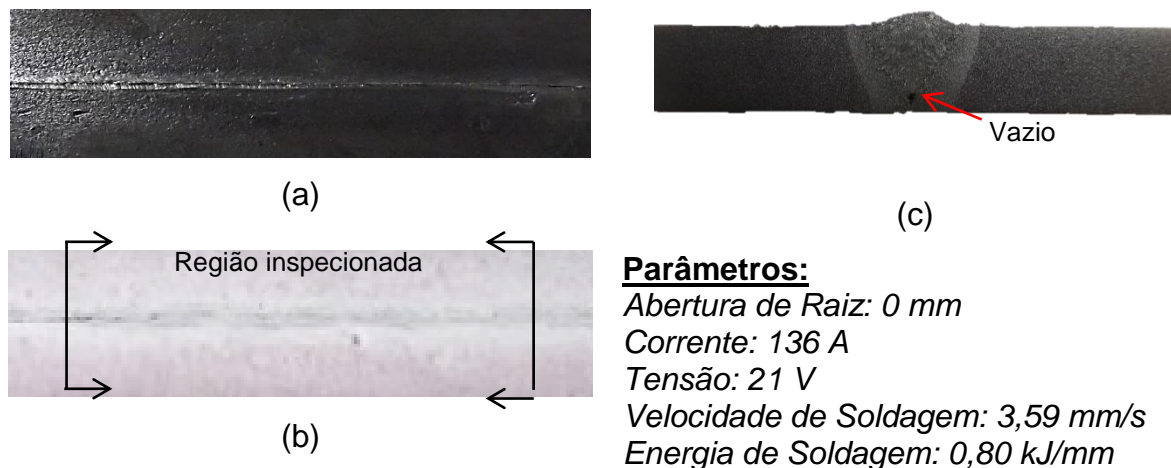


Figura 50 – Resultados da formulação básica 8, parâmetros A. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

- **Formulação 8B**

A figura 51 apresenta os resultados da formulação 8 com os parâmetros B. A inspeção visual (figura 51(a)) apresenta pequenas depressões ao longo do cordão de solda e uniformidade na largura do cordão. A figura 51 (b) mostra o ensaio de líquido penetrante onde não é observada descontinuidade superficial. Na macrografia, figura 51(c), o reforço de raiz foi de 1,8 mm, a largura do cordão de solda foi de 8,0 mm, como a abertura da raiz nesta junta foi de 2,0 mm, houve aproximadamente 3,0 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas.

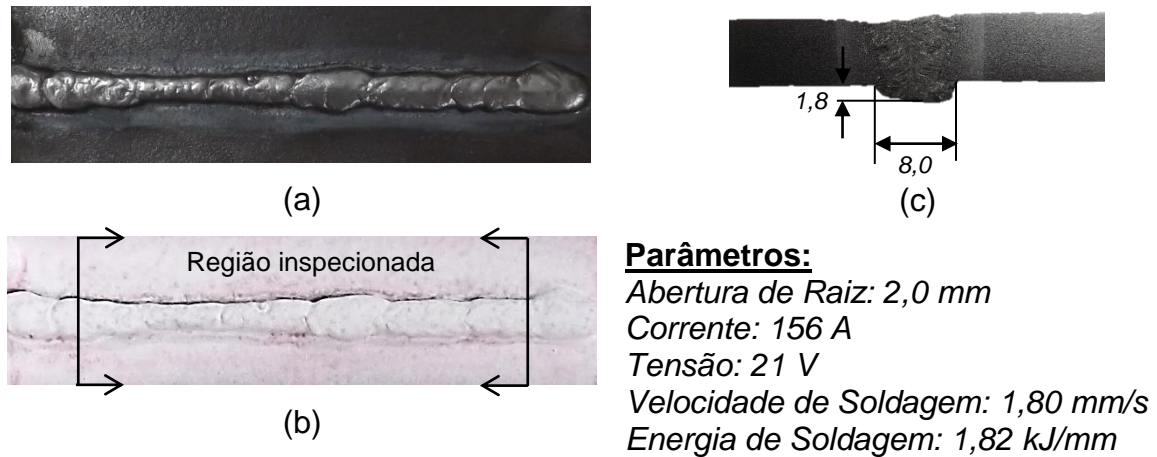


Figura 51 – Resultados da formulação básica 8, parâmetros B. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

- **Formulação 8C**

Na figura 52 são apresentados os resultados da formulação 8 e parâmetro C. A figura 52(a) apresenta a inspeção visual onde não foi observada descontinuidade, além da solda apresentar uma boa uniformidade na largura do cordão. No ensaio de líquido penetrante (figura 52(b)) não foi detectado descontinuidade superficial. A figura 52(c) mostra a macrografia que possui um reforço de raiz foi de 2,0 mm, largura do cordão de solda foi de 8,0 mm, como a abertura da raiz foi de 4,0 mm, houve cerca de 2,0 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas.

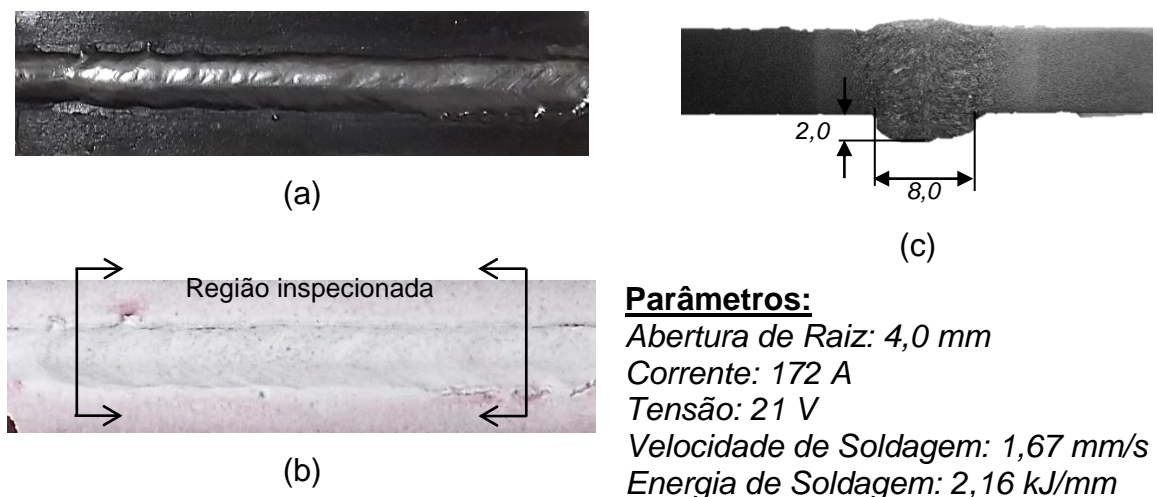


Figura 52 – Resultados da formulação básica 8, parâmetros C. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

- **Formulação 8D**

Na figura 53 são apresentados todos os resultados da formulação 8 e parâmetros D. A figura 53(a) apresenta o ensaio de inspeção visual da raiz da solda, foram observadas depressões e escorrimento do reforço. Na figura 53(b) observam-se algumas mordeduras no contorno do cordão. A macrografia é mostrada na figura 53(c), o reforço de raiz foi de 3,5 mm, largura do cordão de solda foi de 11,0 mm, como a abertura da raiz nesta etapa foi de 6,0 mm, houve cerca de 2,5 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas.

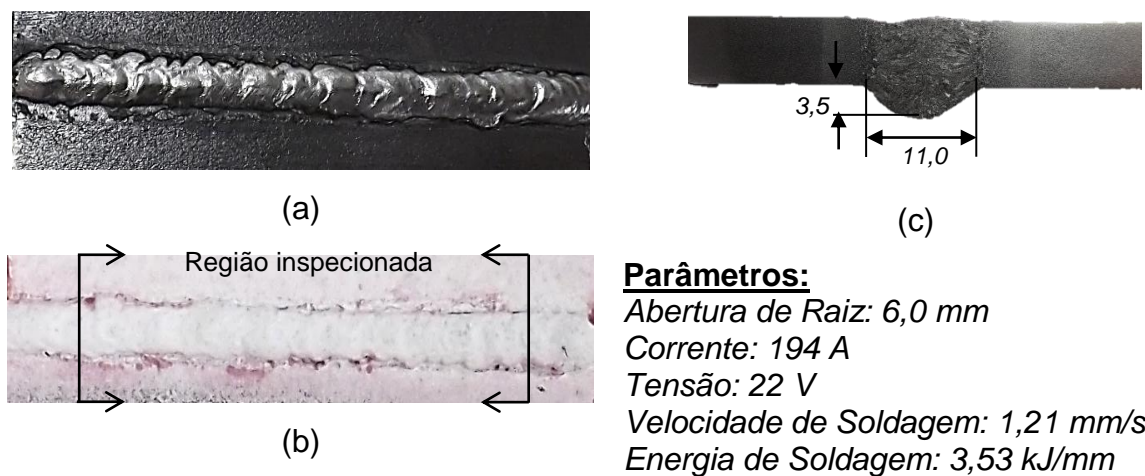


Figura 53 – Resultados da formulação básica 8, parâmetros D. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

- **Resumo dos resultados dos suportes da formulação 8**

Na tabela 13 é apresentado o resultado dos ensaios de todas as formulações que utilizaram a escória básica nos parâmetros A, B, C e D.

Os suportes cerâmicos se mantiveram intactos após o processo de soldagem. Para abertura de raiz igual a 0,0 mm não houve penetração da solda na raiz, portanto, não é adequada para esta técnica de soldagem unilateral.

Na inspeção visual as juntas 8B e 8D apresentaram depressões superficiais e a junta 8C apresentou o melhor acabamento, sendo esta aprovada neste ensaio.

Através dos resultados do ensaio de líquido penetrante foi observado que nas juntas 8B e 8C não apresentaram descontinuidades. Já a junta 8D apresentou mordeduras no contorno do cordão e foi considerada reprovada.

Nas soldas realizadas com suportes da formulação 8, o reforço de raiz variou de 1,8 a 3,5mm, a largura do cordão variou 8,0 a 11,0mm e penetração lateral variou de 2,0 a 3,0mm.

Tabela 13 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de EFS básica nos parâmetros A, B, C e D.

Identificação	Inspeção Visual	Líquido Penetrante	Abertura de raiz	Macrografia		
				Reforço de raiz	Largura do cordão	Penetração Lateral
F8A	Falta de penetração na raiz	Falta de penetração na raiz	0 mm	-	-	-
F8B	Depressões superficiais e uniformidade na largura do cordão	Não foram observadas descontinuidades	2,0 mm	1,8 mm	8,0 mm	3,0 mm
F8C	Uniformidade na largura do cordão, bom acabamento.	Não foram observadas descontinuidades	4,0 mm	2,0 mm	8,0 mm	2,0 mm
F8D	Depressões, escorrimento do reforço e uniformidade na largura do cordão	Mordeduras no contorno do cordão	6,0 mm	3,5 mm	11,0 mm	2,5 mm

Como já apresentado na etapa anterior (ver item 4.1.2) os corpos de prova soldados com suporte cerâmico de escória básica continuam apresentando um bom formato e acabamento do cordão de solda.

4.2.2 Juntas Soldadas – Formulação 12

- **Formulação 12A**

A figura 54 apresenta os resultados da junta 12A. Na figura 54(a) é mostrada a inspeção visual, nota-se que não houve penetração da solda. Com isso não foi possível avaliar a eficiência do suporte cerâmico em suportar o metal de solda líquido nesta junta. A figura 54(b) apresenta o resultado do ensaio de líquido penetrante, como não houve penetração não se observa descontinuidades. A figura 54(c) mostra a macrografia da seção transversal do cordão onde se observa que não há reforço de raiz e nem penetração nas laterais do chanfro. Este cordão apresentou um vazio na região da raiz da solda, justificado pelo baixo aporte térmico.

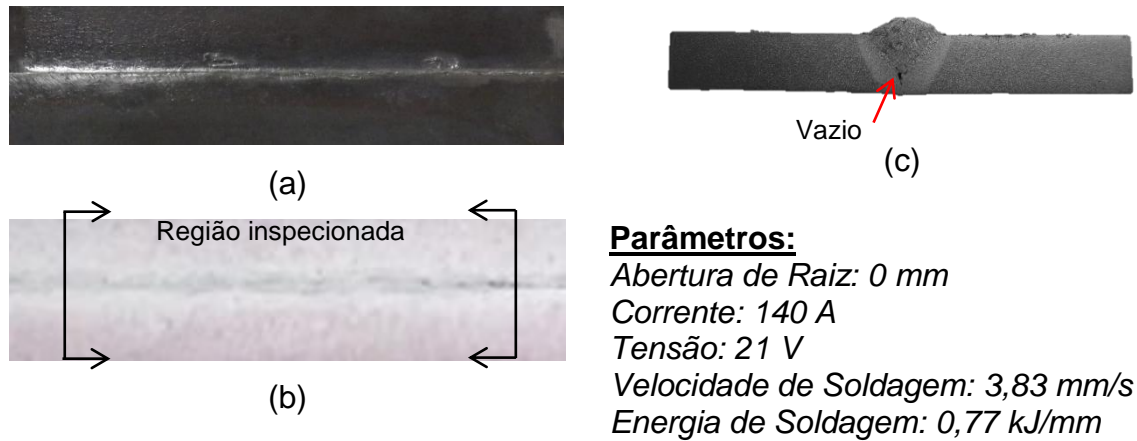


Figura 54 – Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros A. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

- **Formulação 12B**

A figura 55 apresenta os resultados da junta 12B. Na figura 55(a) apresenta o ensaio de inspeção visual da raiz, foi observada pequenas depressões ao longo do cordão de solda. Na figura 55(b) observa-se o ensaio de líquido penetrante onde não foi observada descontinuidade superficial. Na macrografia da figura 55(c), o reforço de raiz foi de 2,0 mm. A largura do cordão de solda foi de 7,0 mm, como a abertura da raiz nesta junta foi de 2,0 mm, houve cerca de 3,5 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas.

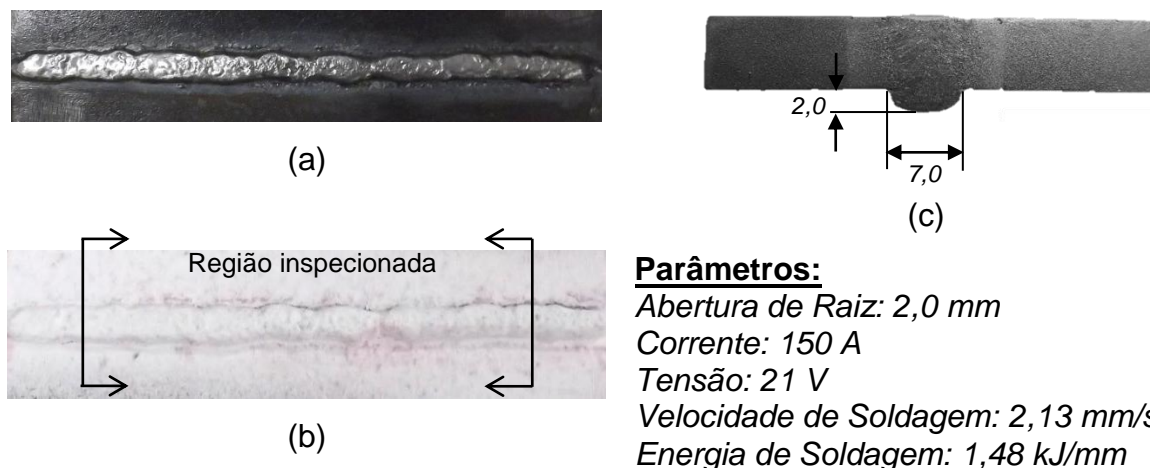


Figura 55 – Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros B. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

• **Formulação 12C**

Na figura 56 são apresentados todos os resultados da junta 12C. Na figura 56(a) é apresentada a inspeção visual, onde observa-se depressões ao longo do cordão de solda. Na figura 56(b) é mostrado o ensaio de líquido penetrante onde não foi constatada descontinuidades superficiais no cordão. Na figura 56(c), macrografia da junta 12C, o reforço de raiz foi de 1,5 mm, largura do cordão de solda foi de 8,0 mm, como a abertura da raiz nesta junta foi de 4,0 mm, houve cerca de 2,0 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas. Através da macrografia também é possível notar uma assimetria no perfil do reforço da raiz.



Figura 56 – Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros C. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

• **Formulação 12D**

A figura 57 apresenta os resultados da junta 12D. Na figura 57 (a) é mostrada a inspeção visual na raiz do cordão, nota-se depressões ao longo do cordão e escorrimento do reforço, mas mantém uniformidade da largura. A figura 57(b) apresenta o resultado do ensaio de líquido penetrante, nota-se três pontos que são possíveis mordeduras no contorno do cordão. Na figura 57(c) é mostrada a macrografia, o reforço de raiz foi de 2,0 mm e a largura do cordão de solda foi de 9,0 mm, com abertura da raiz de 6,0 mm, houve aproximadamente 1,5 mm de penetração no metal de base em cada uma das chapas.



Figura 57 – Resultados da formulação semi-básica 12, parâmetros D. (a) Inspeção Visual, (b) LP e (c) Macrografia.

- **Resumo dos resultados dos suportes da formulação 12**

Na tabela 14 é apresentado o resultado dos ensaios de todas as formulações que utilizaram a escória semi-básica nos parâmetros A, B, C e D.

Tabela 14 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos cordões de solda das formulações à base de EFS semi-básica nos parâmetros A, B, C e D.

Identificação	Inspeção Visual	Líquido Penetrante	Abertura de raiz	Macrografia		
				Reforço de raiz	Largura do cordão	Penetração
F12A	Falta de penetração na raiz	Falta de penetração na raiz	0 mm	-	-	-
F12B	Depressões superficiais e uniformidade na largura do cordão	Não foram observadas discontinuidades	2,0 mm	2,0 mm	7,0 mm	2,5 mm
F12C	Uniformidade na largura do cordão, bom acabamento.	Não foram observadas discontinuidades	4,0 mm	1,5 mm	8,0 mm	2,0 mm
F12D	Depressões, escorrimento do reforço e uniformidade na largura do cordão	Mordeduras no contorno do cordão	6,0 mm	2,0 mm	9,0 mm	1,5 mm

Assim como os suportes cerâmicos básicos, os semi-básicos também se mantiveram intactos após o processo de soldagem. Para abertura de raiz igual a 0,0 mm, novamente não houve penetração da solda na raiz, portanto, não é adequada para esta técnica de soldagem unilateral.

No ensaio de inspeção visual da junta 12A não foi apresentado reforço de raiz devido à abertura de raiz ser 0,0mm. A junta 12D apresentou depressões superficiais e escorrimento do reforço, e a junta 12C apresentou o melhor acabamento, apesar de uma assimetria no perfil do cordão constatada na

macrografia. Todas as três juntas, 12A, 12B e 12D, apresentaram uniformidade na largura do cordão.

Por meio dos resultados do ensaio de líquido penetrante foi observado que nas juntas 12B e 12C não apresentaram descontinuidades. Já a junta 12D apresentou mordeduras no contorno do cordão.

Nas soldas realizadas com suportes da formulação 12, o reforço de raiz variou de 1,5 a 2,0 mm, a largura do cordão variou 7,0 a 9,0 mm e penetração lateral variou de 1,5 a 2,5 mm.

4.2.3 Considerações finais dos resultados da avaliação por soldagem da etapa 2

Os suportes cerâmicos utilizados nesta etapa resistiram à poça de fusão e não foi verificada a fragmentação dos mesmos, confirmando os resultados da etapa 1.

Para abertura de raiz igual a 0,0mm, verificou-se a presença de vazios na região da raiz do cordão nas duas juntas com este parâmetro A e também houve falta de penetração em ambas juntas. Assim como em outros estudos, Tatagiba (2009), Gurgel (2012) e Vicentini (2013), nota-se que com este valor de abertura de raiz a solda poderá apresentar falta de fusão.

Na inspeção visual tanto as juntas básicas e semi-básicas apresentaram uniformidade na largura do cordão. As juntas 8C e 12C apresentaram o melhor acabamento e foram consideradas aprovadas. Já as juntas 8D e 12D apresentaram um escorrimento do reforço, causando assimetria nos cordões, fato este constatado na macrografia das soldas e foram reprovadas. Este fato é atribuído à falta de contato do suporte cerâmico com a superfície da chapa, que também foi relatado por Vicentini (2013).

No ensaio de líquido penetrante foi observado que nas juntas 8B, 8C, 12B e 12C não apresentaram descontinuidades. Porém as juntas 8D e 12D apresentaram mordeduras no contorno do cordão.

As macrografias das seções transversais dos cordões de solda mostraram penetração nas laterais do chanfro, reforço de solda adequado na raiz e não foram encontradas descontinuidades.

Na figura 58 é apresentado o gráfico que indica o campo operacional das formulações básicas e semi-básicas determinado através da análise qualitativa das juntas. Além dos resultados desta etapa, foram incluídos os resultados das juntas com abertura de raiz de 3,0 mm da primeira etapa.

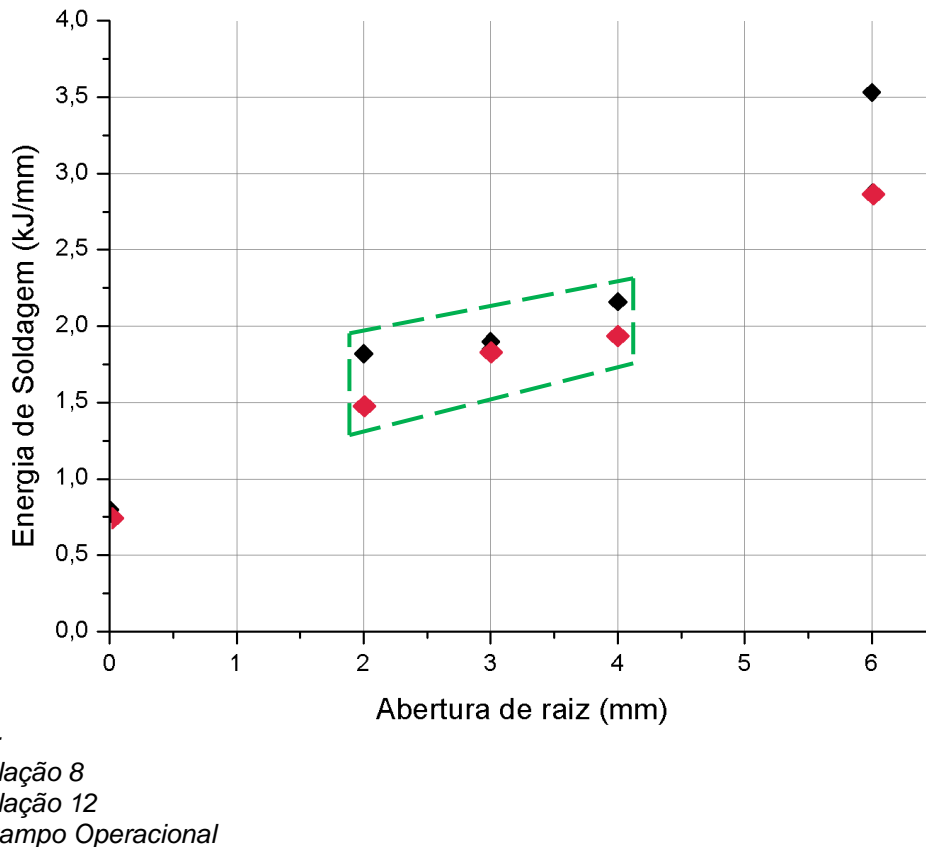


Figura 58 – Gráfico do campo operacional determinado pela análise qualitativa.

Através do comportamento descrito anteriormente e da tabela 14, foi possível delinear um campo operacional: abertura de raiz entre 2,0 e 4,0 mm; tensão entre 20 e 22 V; Corrente entre 150 e 180 A e velocidade de soldagem entre 170 e 190 mm/s. Este campo operacional é válido para soldagem unilateral com suporte cerâmico à base de EFS na posição plana, com chanfro com ângulo de 60°, processo MIG-MAG, arame ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro e gás de proteção 100% CO₂.

Esta faixa operacional apresenta similaridade com outros campos de trabalho determinados por Tatagiba (2009) e Vicentini (2013).

Foi escolhido para a execução da terceira etapa o parâmetro de soldagem C: corrente entre 170-180 A; tensão 21-22 V; Abertura de raiz de 4,0 mm e velocidade de soldagem entre 1,65 a 2,00 mm/s. E as formulações escolhidas foram 8 e 12, com composição de 93% de escória, 5% de bentonita e 2% de silicato de sódio.

4.3 RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Esta etapa teve como objetivo a avaliar as propriedades mecânicas através de ensaios que normalmente são utilizados para qualificar procedimentos de soldagem.

Foi utilizado o parâmetro C da tabela 9 para a soldagem da raiz da junta, que foi preparada de acordo com o procedimento experimental descrito no item 3.2.3.

A soldagem foi executada em uma chapa de aço A-36 dividida em duas áreas, metade da chapa foi empregado suporte cerâmica da formulação 8 (Básica) e a outra metade com formulação 12 (Semi-básica). Os parâmetros medidos e calculados durante a soldagem são apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros de soldagem medidos durante a execução da junta soldada.

Passe	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
1	21	168	2,76	1,28
2	21	150	1,85	1,70
3	21	152	2,23	1,43
4	21	150	4,17	0,76
5	22	150	5,08	0,65
6	22	155	5,45	0,63
7	22	150	5,55	0,59
8	22	154	5,43	0,62
9	22	151	5,21	0,64
10	22	158	5,56	0,63

Após a soldagem, foram realizadas avaliações por meio de ensaios não destrutivos e destrutivos para cada metade da chapa.

4.3.1 Resultados da Formulação 8 – EFS Básica

Na figura 59 são apresentados os resultados da inspeção visual e do líquido penetrante. Na inspeção visual (figura 59(a)) observa-se que a solda mantém uniformidade da largura do cordão ao longo da chapa e apresenta pequenas depressões. Na Figura 59 (b) é apresentado o resultado do ensaio de líquido penetrante. Não foram observadas descontinuidades. Também não foi verificada nenhuma adesão do material do suporte no cordão de solda.

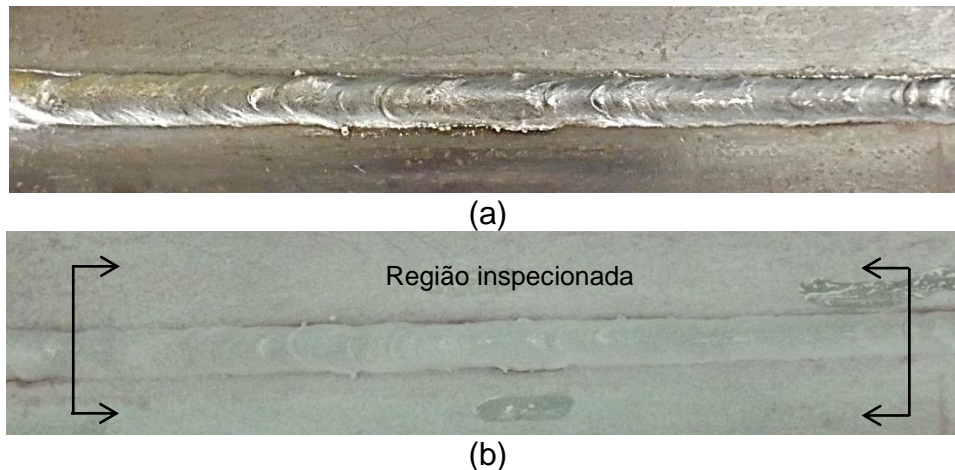
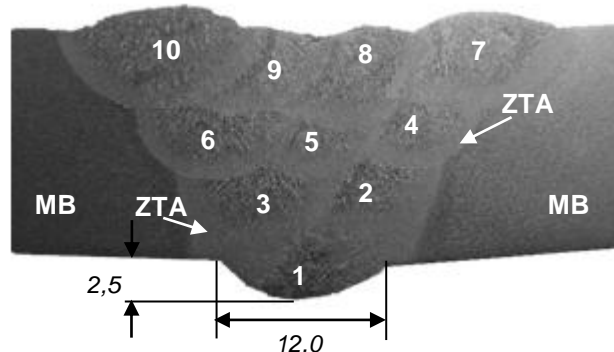


Figura 59 – Resultados da formulação 8 – EFS Básica. (a) Inspeção Visual e (b) LP.

A figura 60 mostra a macrografia da seção transversal do cordão de solda da junta soldada com a sequência de soldagem dos 10 passes de solda. Na raiz da solda, a largura do cordão foi de 12,0 mm e o reforço de 2,5 mm. Como a abertura de raiz utilizada foi de 4,0 mm, houve aproximadamente 4,0 mm de penetração em cada lado da chapa.



Legenda:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 – sequência de passes de solda

MB – Metal de Base

ZTA – Zona Termicamente Afetada

Figura 60 – Macrografia da junta com dimensões da largura e altura do reforço do cordão.

4.3.1.1 Ensaio de Tração

A tabela 16 apresenta os valores de tensão de ruptura medidos nos ensaios de tração transversal. A faixa de resistência mecânica especificada para o metal de base A-36 através da norma ASTM (2008) é de 400 a 550 MPa. Ao comparar os resultados obtidos, observa-se que a resistência à tração está dentro da faixa estabelecida para este tipo de aço. Na figura 61 são apresentados os corpos de

prova CP-T1 e CP-T2 rompidos. Em ambos os local da ruptura foi no metal base e o formato da fratura possui a característica de materiais dúcteis. Através deste resultado pode-se afirmar que com a adoção do suporte cerâmico à base de escória básica, o procedimento de soldagem não foi afetado e as regiões ZTA e ZF não podem ser consideradas regiões menos resistentes da junta.

Tabela 16 – Resultado do ensaio de tração – Suporte de EFS Básica.

Identificação	Resistência à Tração	Local de Ruptura
CP - T1	<i>470 MPa</i>	<i>Metal base</i>
CP - T2	<i>465 MPa</i>	<i>Metal base</i>

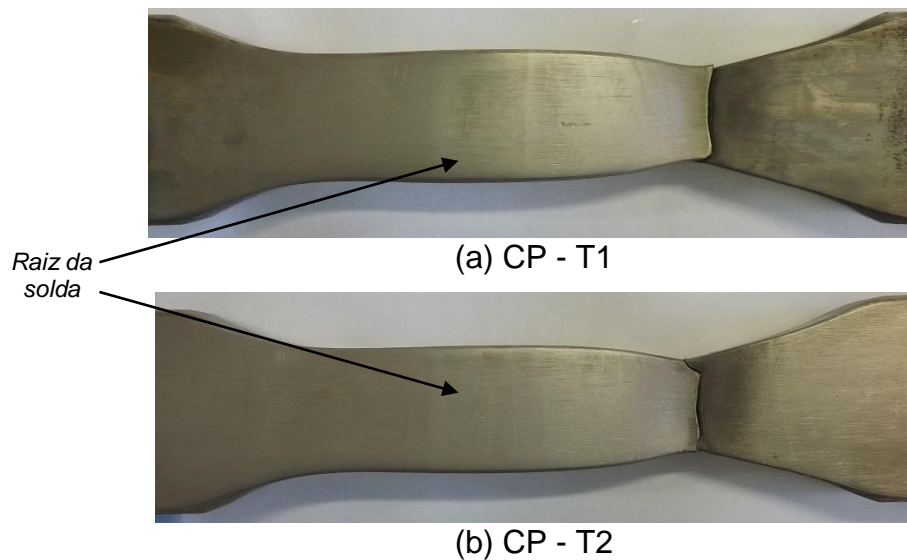


Figura 61 – Corpos de prova após a ruptura no ensaio de tração – Suporte de EFS Básica.

4.3.1.2 Ensaio de Dobramento Lateral

O resultado do ensaio de dobramento lateral dos quatro corpos de prova é mostrado na tabela 17. As descontinuidades apresentadas foram menores que 3,0mm, conforme critério de aceitação da norma ASME IX (2004).

A figura 62 mostra estes corpos de prova após dobramento lateral. Nos pontos circulados encontram-se as descontinuidades. Todos os corpos de prova foram considerados aprovados.

Tabela 17 – Resultado do ensaio de dobramento lateral – Suporte EFS Básica.

Identificação	Descrição do resultado
CP-D1	Apresentou descontinuidade com 1,8 mm de comprimento
CP-D2	Apresentou descontinuidade com 2,8 mm de comprimento
CP-D3	Sem indicação
CP-D4	Apresentou descontinuidade com 1,0 mm de comprimento

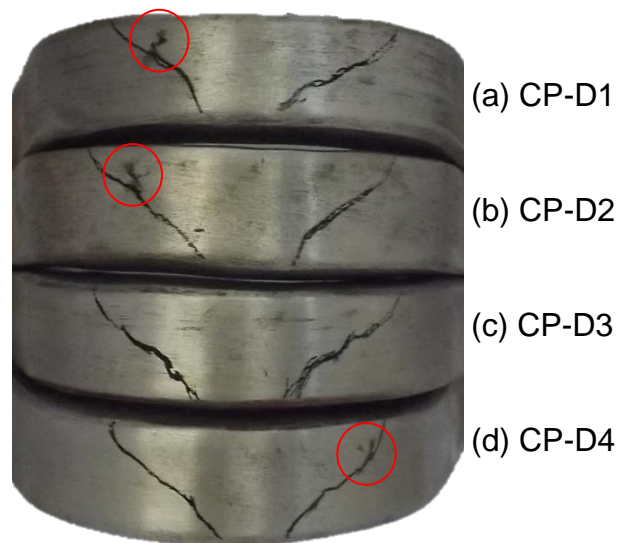


Figura 62 – Corpos de prova após o ensaio de dobramento lateral – Suporte de EFS Básica.

As descontinuidades apresentadas por três dos quatro corpos de provas foram observadas nos passes de acabamento, sendo estas possivelmente causadas por uma limpeza inadequada da escória do cordão anterior. Quando uma junta possui vários passes, parte da escória depositada em um passe pode ser inadequadamente removida e não ser refundida pelo passe seguinte ficando aprisionada sob este passe. Estes tipos de inclusões de escória possuem a forma alongada e podem ser concentradores de tensão que irão favorecer a iniciação de trincas na junta. Assim as descontinuidades mostradas não são causadas pelo uso suporte cerâmico à base de EFS básica.

4.3.1.3 Dureza Vickers

A tabela 18 apresenta os resultados da dureza Vickers da junta soldada com suporte básico. Nota-se que o valor da dureza do metal base (MB) tanto na linha superior e quanto na inferior, apresentou valores entre 161 a 190 HV, compatível

com o aço A-36 que foi utilizado nesta junta. A zona termicamente afetada (ZTA) apresentou valores entre 150 a 191 HV, mostrando que o ciclo térmico da soldagem não produziu um endurecimento significativo nesta região. A zona fundida (ZF) apresentou valores entre 141 a 189 HV, compatível ao metal de adição produzido com o arame ER70S-6 utilizado na soldagem MIG-MAG.

Estes resultados são compatíveis com outros trabalhos que utilizaram as mesmas variáveis (metal base, metal de adição e processo de soldagem), como Almeida (2009) e Tatagiba (2009). Além disso, este resultado está em conformidade com o resultado do ensaio de tração, confirmando que o ciclo térmico não fragilizou a ZF ou ZTA.

Tabela 18 – Valores da dureza Vickers da junta soldada com suporte EFS básico.

Região	Pontos	Dureza Vickers	Pontos	Dureza Vickers	Média de Dureza
MB (superior)	1	169 HV	16	163 HV	177 HV
	2	173 HV	17	184 HV	
	3	181 HV	18	188 HV	
MB (Inferior)	1	180 HV	16	190 HV	174 HV
	2	161 HV	17	169 HV	
	3	172 HV	18	177 HV	
ZTA (Superior)	4	185 HV	13	175 HV	174 HV
	5	173 HV	14	191 HV	
	6	168 HV	15	171 HV	
ZTA (Inferior)	4	156 HV	13	150 HV	162 HV
	5	168 HV	14	172 HV	
	6	170 HV	15	155 HV	
ZF (Superior)	7	175 HV	10	188 HV	179 HV
	8	184 HV	11	189 HV	
	9	165 HV	12	168 HV	
ZF (Inferior)	7	176 HV	10	146 HV	153 HV
	8	150 HV	11	156 HV	
	9	141 HV	12	160 HV	

Na figura 63 é apresentada a comparação entre os resultados de dureza Vickers da linha superior e da linha inferior. Observa-se que os valores do MB superior e inferior estão próximos, confirmado pela média das regiões superior 177 HV e inferior 174 HV. Analisando a distribuição dos pontos na ZTA e na ZF nota-se que a linha superior apresenta maiores valores do que na linha inferior. Este fato pode ser justificado pelo ciclo de reaquecimento que ocorre na raiz da solda após os passes seguintes, aliviando as tensões e modificando a estrutura bruta de fusão, o

que não ocorre nos passes de acabamento da junta. Estes resultados mostram que a utilização do suporte cerâmico à base de escória de fluxo básica não afeta a dureza da junta soldada.

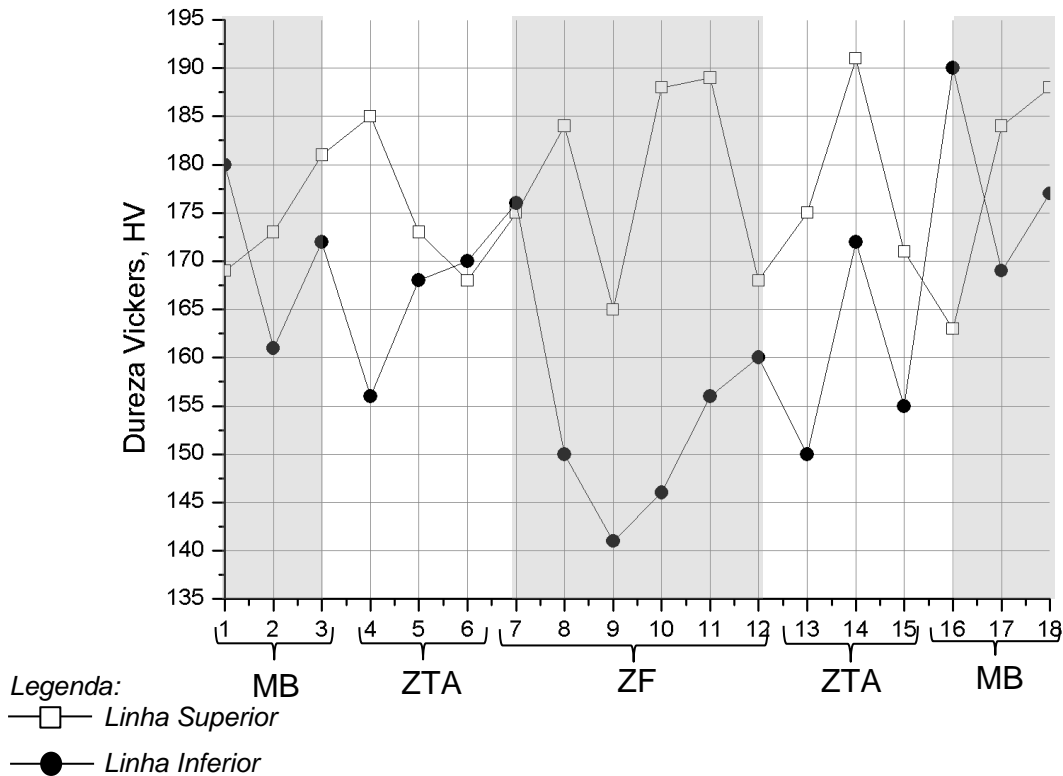


Figura 63 – Comparação entre os resultados de dureza Vickers da linha superior e inferior da junta soldada.

4.3.1.4 Microscopia Ótica

A figura 64(a) e (b) apresenta a micrografia do passe de raiz e do passe de acabamento, respectivamente, soldado com suporte cerâmico à base escória básica.

Tanto na região do passe de raiz quanto no passe de acabamento foi observada uma quantidade significativa dos constituintes microestruturais: ferrita de contorno de grão (PF(G)) e ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)). No passe de raiz a PF(G) apresenta em maior quantidade e a ferrita acicular (AF) aparece em quantidade significativamente menor quando comparado com os outros constituintes mencionados. Não foi verificada a presença de martensita (M) nas micrografias.

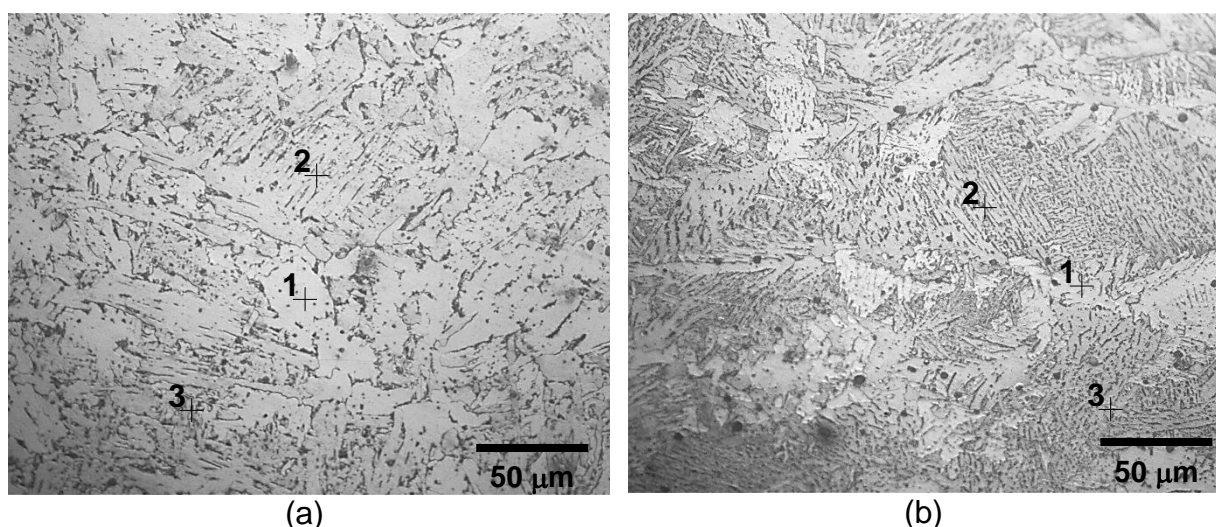


Figura 64 – Micrografia da seção transversal da junta soldada com aumento de 500X: (a) Passe de raiz da junta e (b) Passe de acabamento. 1- PF(G), 2- FS(A) e 3- AF. Ataque: Nital 2,0 %.

Nas duas regiões observadas, passe de raiz e acabamento, as microestruturas obtidas são típicas do metal de solda de aços ferríticos de baixo carbono, como apresentado por Fonseca (1992), Silva (2003) e Araújo (2006).

Ainda as microestruturas observadas estão de acordo com os resultados encontrados no ensaio de dureza Vickers, onde o passe de raiz sofreu ciclos de reaquecimento com a sobreposição dos passes seguintes, alterando a estrutura bruta de solidificação. E está também de acordo com os resultados dos trabalhos de Irikura (2006), Almeida (2009) e Tatagiba (2009).

4.3.1.5 Análise das inclusões do metal de solda

As figuras 65 e 66 mostram a microfotografia e os espectros de EDS das inclusões não metálicas do passe de raiz que esteve em contato com o suporte cerâmico à base de escória de fluxo básica, executadas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

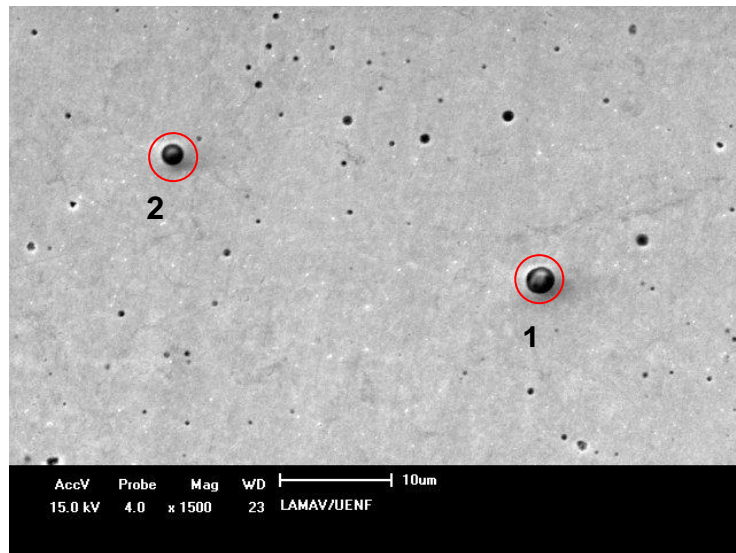


Figura 65 – Imagem do passe de raiz no MEV sem ataque químico com aumento de 1500X.

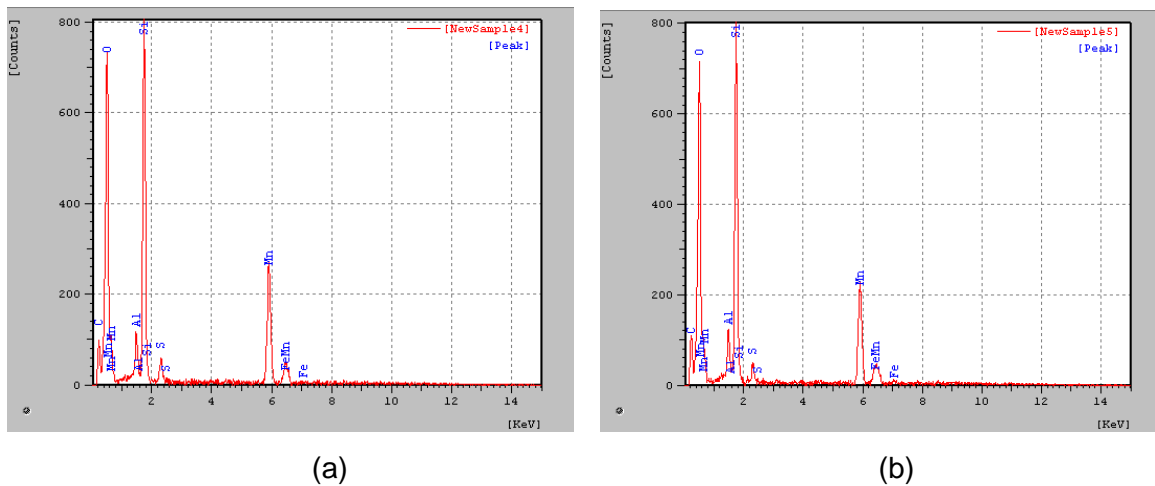


Figura 66 – EDS das inclusões selecionadas no passe de raiz. (a) Ponto 1 e (b) Ponto 2.

As composições das inclusões em porcentagem de peso dos elementos detectados são mostradas na tabela 19.

Tabela 19 – Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de raiz.

Pontos	Elementos					
	C	O	Al	Si	Fe	Mn
1	9,098	43,023	2,087	15,004	2,185	27,258
2	9,747	44,821	2,303	15,960	2,719	23,334

As figuras 67 e 68 mostram as microfotografias e os espectros de EDS das inclusões não metálicas do passe de acabamento.

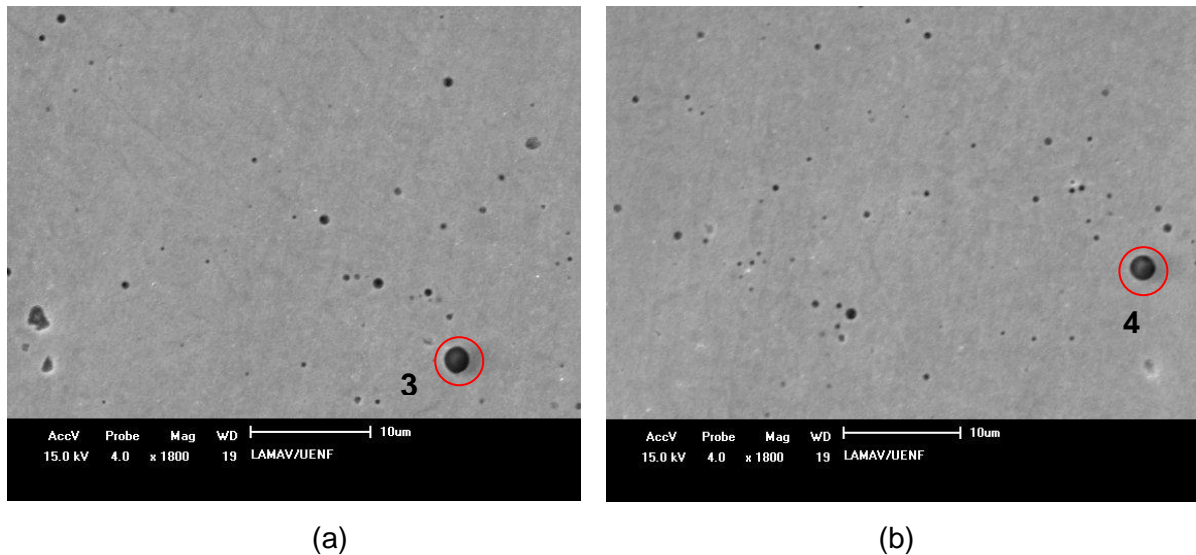


Figura 67 – Imagens do passe de acabamento no MEV sem ataque químico com aumento de 1800X.

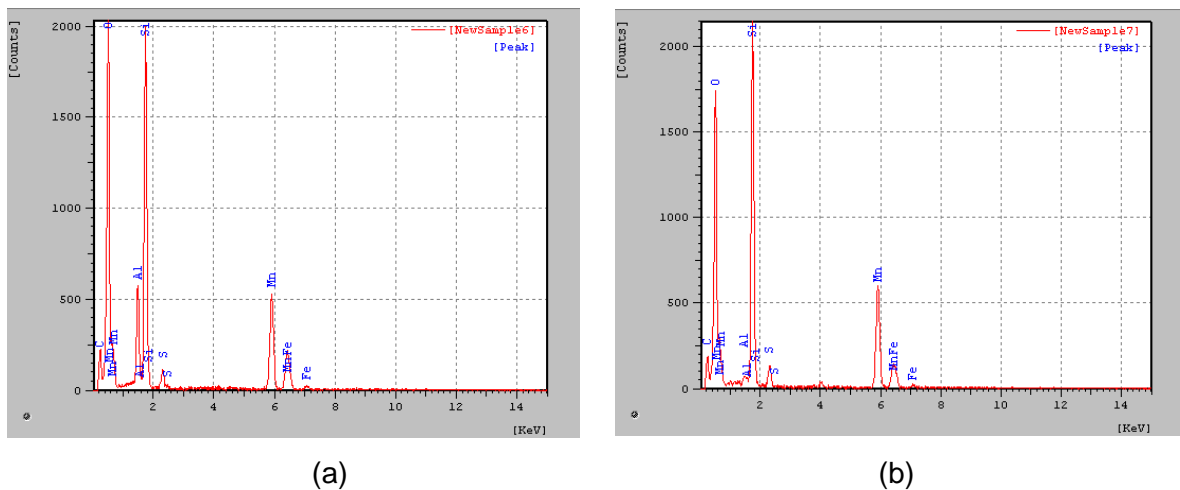


Figura 68 – EDS das inclusões selecionadas no passe de acabamento. (a) Ponto 3 e (b) Ponto 4.

As composições das inclusões em porcentagem de peso dos elementos detectados são mostradas na tabela 20.

Tabela 20 – Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de acabamento.

Pontos	Elementos					
	C	O	Al	Si	Fe	Mn
1	7,309	43,737	4,183	14,565	8,725	20,458
2	5,995	42,502	3,373	15,980	5,620	24,701

As microanálises EDS realizadas mostraram que a composição média das inclusões do passe de raiz e do último passe de solda possuem os mesmos constituintes, embora apresentem porcentagens diferentes. Através deste resultado pode-se dizer que não houve contaminação no metal de solda pelo material do suporte cerâmico à base EFS básica. Os elementos detectados na composição das inclusões são justificados pelos mecanismos de solidificação da poça de fusão.

Na solidificação da poça de fusão, o excesso de oxigênio é expulso da solução e liga-se com outros elementos como alumínio, silício e manganês, que estão presentes no MB e no metal de solda no formato de inclusões (Liu e Olson, 1987).

O silício e alumínio detectados são de origem do metal de adição, que agem sob a forma de desoxidantes (Musardo *et al.*, 2005).

Os resultados mostrados evidenciam a complexidade da natureza química das inclusões verificadas e está em conformidade com a literatura (Liu e Olson, 1987; Abson, 1989; Byun *et al.*, 2003).

• Considerações finais dos ensaios destrutivos e não-destrutivos – Suporte de EFS básica

O cordão de solda que esteve em contato com o suporte apresentou boa aparência, poucas depressões e uniformidade na largura, e foi considerado aprovado.

A macrografia indicou uma boa geometria do passe de raiz, indicando que houve penetração nas laterais da peça.

No ensaio mecânico de tração, os corpos de prova comportaram-se de maneira esperada, rompendo-se no metal base. No ensaio de dobramento lateral todos os corpos de prova foram aprovados. As descontinuidades apontadas em alguns corpos de prova foram provocadas por uma limpeza inadequada de um dos cordões de preenchimento, não sendo causado pelo emprego do suporte cerâmico à base de EFS básica. Como mostrado na tabela 13 o processo de soldagem unilateral com o suporte à base de EFS básica não criou pontos de alta dureza.

A análise química por EDS apresentou que não houve inclusão de material cerâmico no passe de raiz e nos cordões de acabamento.

Contudo é importante ressaltar alguns cuidados na preparação da junta citados por Muir (1985), Millar (2000) e Malin (2001), o alinhamento da junta com o suporte e o perfeito contato do suporte na chapa, estão associados á qualidade da junta soldada.

4.3.2 Resultados da Formulação 12 – EFS Semi-Básica

Na figura 69 são apresentados os resultados da inspeção visual e do líquido penetrante da junta soldada com a formulação 12 e parâmetros C. Na inspeção visual (figura 69(a)) observa-se que a solda mantém uniformidade da largura do cordão ao longo da chapa e apresenta depressões. Na Figura 69 (b) é mostrado o resultado do ensaio de líquido penetrante, destacam-se duas regiões onde há presença de pequenas depressões mais acentuadas. Assim como na formulação básica, esta junta não apresentou adesão do material do suporte na superfície do cordão de solda.

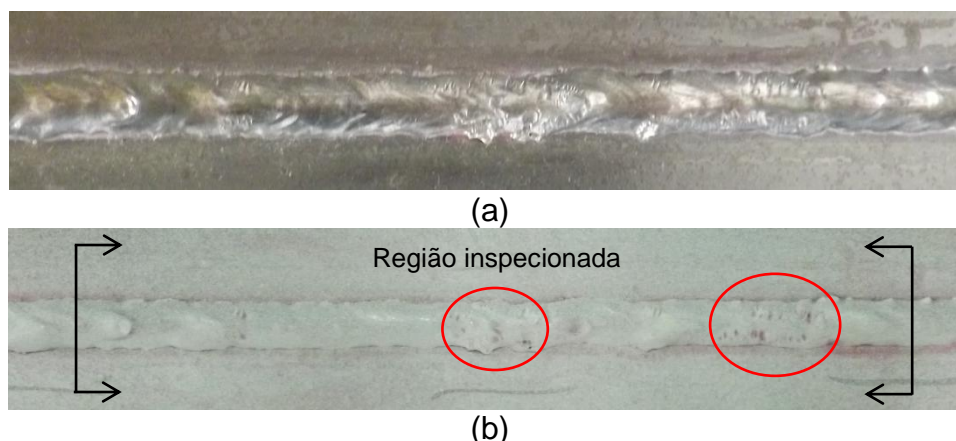
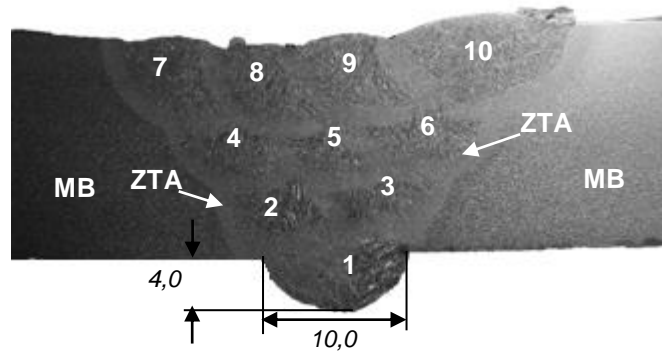


Figura 69 – Resultados da formulação 12 – EFS Semi-Básica. (a) Inspeção Visual e (b) LP.

A macrografia da seção transversal do cordão de solda da junta soldada é mostrada na figura 70 com a sequência de soldagem dos 10 passes de solda e as regiões da junta soldada. Na raiz do cordão solda, a largura foi de 10,0 mm e o reforço foi de 4,0 mm. Como a abertura de raiz utilizada foi de 4,0 mm, houve aproximadamente 3,0 mm de penetração em cada lado da chapa. Nota-se que o reforço da raiz foi acentuado, isso se deve ao não acoplamento correto do suporte na chapa.



Legenda:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 – sequência de passes de solda

MB – Metal de Base

ZTA – Zona Termicamente Afetada

Figura 70 – Macrografia da junta com dimensões da largura e reforço da raiz do cordão.

4.3.2.1 Ensaio de Tração

A tabela 21 apresenta os valores de tensão de ruptura medidos nos ensaios de tração transversal. Ao comparar os resultados obtidos neste ensaio, nota-se que a resistência à tração está dentro da faixa estabelecida para o aço A-36, que é entre 400 a 550 MPa, especificada pela norma ASTM (2008). Na figura 71 são apresentados os corpos de prova rompidos. Observa-se que nos dois corpos de prova a ruptura foi no metal base e o formato da fratura possui a característica de materiais dúcteis. Este resultado comprova que com a utilização do suporte cerâmico à base de EFS semi-básica, as regiões ZTA e ZF não resultaram em regiões de menor resistência na junta.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de tração – Suporte de EFS Semi-Básica.

Identificação	Resistência à Tração	Local de Ruptura
CP – T3	<i>475 MPa</i>	<i>Metal base</i>
CP – T4	<i>465 MPa</i>	<i>Metal base</i>

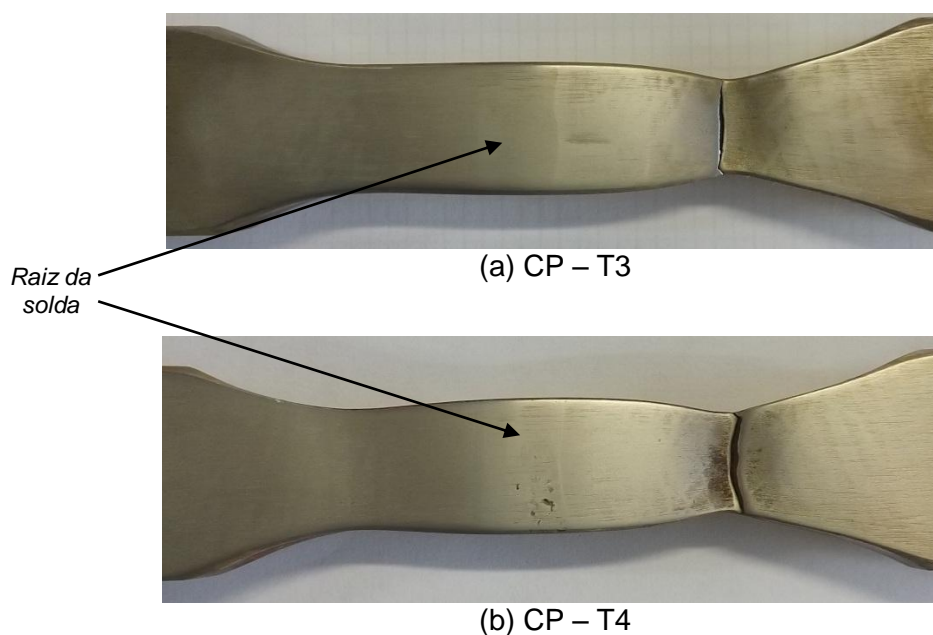


Figura 71 – Corpos de prova após a ruptura no ensaio de tração – Suporte de EFS Semi-Básica.

4.3.2.2 Ensaio de Dobramento Lateral

O resultado do ensaio de dobramento lateral dos quatro corpos de prova é apresentado na tabela 22. Pelo critério de aceitação descrito pela norma ASME IX (2004), apenas o corpo de prova D8 apresentou uma descontinuidade maior que 3,0 mm, sendo este reprovado. Os outros corpos de prova foram considerados aprovados. A figura 72 mostra estes corpos de prova após dobramento lateral, nos pontos circulados encontram-se as descontinuidades detectadas.

Tabela 22 – Resultado do ensaio de dobramento lateral – Suporte EFS Semi-Básico.

Identificação	Descrição do resultado
CP-D5	Apresentou descontinuidade com 2,3 mm de comprimento
CP-D6	Sem indicação
CP-D7	Apresentou descontinuidade com 2,2 mm de comprimento
CP-D8	Apresentou descontinuidade com 3,5 mm de comprimento

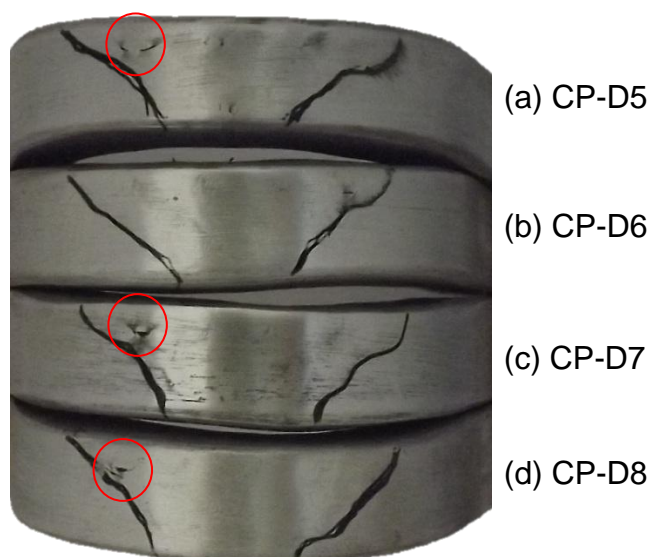


Figura 72 – Corpos de prova após o ensaio de dobramento lateral – Suporte de EFS Semi-Básico.

As discontinuidades observadas não estão localizadas no passe de raiz, o que poderia ser causado pelo uso do suporte cerâmico. Estas estão localizadas entre os passes de acabamento, que podem ter sido causadas por uma remoção de escória inadequada do cordão anterior, que ficou aprisionada sob o passe seguinte.

4.3.2.3 Dureza Vickers

O resultado da dureza Vickers da junta soldada com suporte EFS semi-básico é apresentada na tabela 23. Nota-se que o valor da dureza para MB tanto na linha superior e quanto na inferior, apresentou valores entre 162 a 189 HV, compatível com o aço A-36. A ZTA apresentou valores entre 155 a 186 HV, mostrando que o ciclo térmico da soldagem não produziu pontos de endurecimento significativo nesta região. A ZF apresentou valores entre 149 a 172 HV, compatível ao metal de adição produzido com o arame ER70S-6 utilizado na soldagem MIG-MAG.

Tabela 23 – Valores da dureza Vickers da junta soldada com suporte EFS Semi-Básico.

Região	Pontos	Dureza Vickers	Pontos	Dureza Vickers	Média de Dureza
MB (superior)	1	170 HV	16	177 HV	179 HV
	2	182 HV	17	188 HV	
	3	185 HV	18	167 HV	
MB (Inferior)	1	181 HV	16	185 HV	178 HV
	2	176 HV	17	189 HV	
	3	168 HV	18	162 HV	
ZTA (Superior)	4	170 HV	13	177 HV	176 HV
	5	182 HV	14	186 HV	
	6	176 HV	15	169 HV	
ZTA (Inferior)	4	163 HV	13	160 HV	166 HV
	5	169 HV	14	171 HV	
	6	155 HV	15	179 HV	
ZF (Superior)	7	188 HV	10	182 HV	180 HV
	8	190 HV	11	178 HV	
	9	172 HV	12	166 HV	
ZF (Inferior)	7	161 HV	10	149 HV	158 HV
	8	155 HV	11	163 HV	
	9	166 HV	12	155 HV	

Na figura 73 é apresentada a comparação entre os resultados de dureza Vickers da linha superior e da linha inferior.

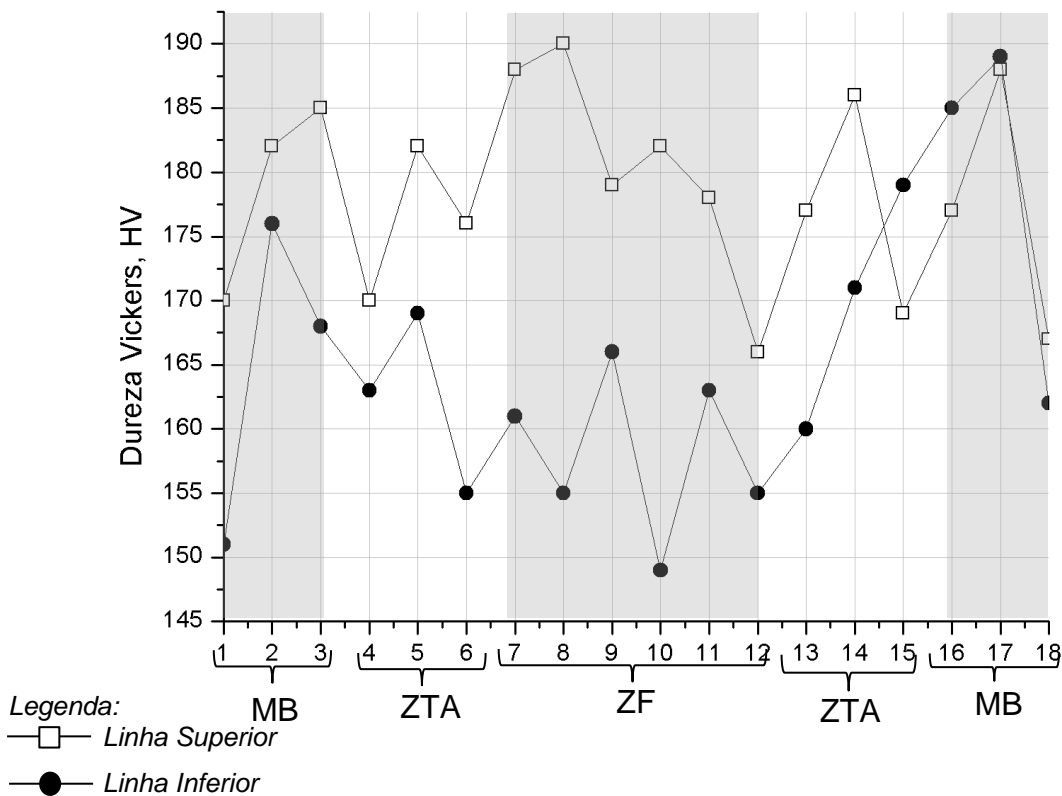


Figura 73 – Comparação entre os resultados de dureza Vickers da linha superior e inferior da junta soldada – Suporte EFS semi-básico.

As médias dos valores do MB superior e inferior estão próximas, mostrando que não houve mudança de dureza nestas regiões. Considerando a linha superior de dureza na região da ZF e da ZTA, a distribuição dos pontos apontam maiores valores em relação a linha inferior. Justificado pelo ciclo de reaquecimento que ocorre no passe de raiz após os passes seguintes, que proporciona o alívio das tensões e modifica a estrutura bruta de fusão. Este fato não ocorre nos passes de acabamento da junta soldada.

4.3.2.4 Microscopia Ótica

As micrografias do passe de raiz da junta e do acabamento, são mostradas na figura 74(a) e (b), respectivamente.

Como pode ser observado na figura 74(a) existe uma quantidade significativa de FS(A) e de PF(G). A AF é observada em quantidade significativamente menor quando comparado com os outros microconstituintes mencionados anteriormente. Não foi observada a presença de martensita e nem de agregado ferrita-carbeto.

Já na figura 74(b), que apresenta a micrografia do passe acabamento da solda, observa-se uma maior quantidade de AF, uma boa quantidade ainda de FS(A) e em menor quantidade a PF(G). Assim como dito no resultado da dureza Vickers, o passe de raiz sofre um ciclo de reaquecimento devido aos passes seguintes, isto provoca a modificação da estrutura bruta de fusão. O que não ocorre nos passes de acabamento da junta soldada.

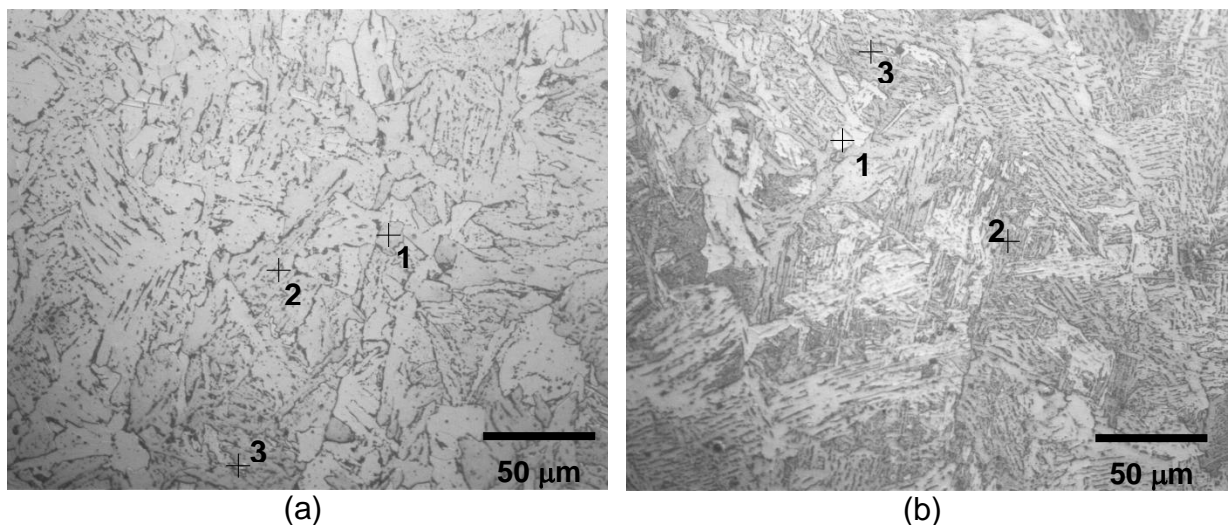


Figura 74 – Micrografia da seção transversal da junta soldada com aumento de 500X: (a) Passe de raiz da junta e (b) Passe de acabamento. 1- PF(G), 2- FS(A) e 3- AF. Ataque: Nital 2,0%.

Nas duas regiões analisadas, os constituintes microestruturais observados são tipicamente da zona fundida aços ferríticos de baixo carbono, como apresentado por Modenesi (2006) e também foram observados por Irikura (2006) e Tatagiba (2009).

Através destas observações nota-se a relação entre o resultado do ensaio de dureza Vickers e as micrografias, onde o passe de raiz teve sua estrutura alterada pelos ciclos de reaquecimento com a sobreposição dos passes seguintes.

4.3.2.5 Análise das inclusões do metal de solda

A figura 75(a) e (b) mostra a microfotografia das inclusões não metálicas do passe de raiz do cordão de solda que esteve em contato com o suporte cerâmico à base de EFS semi-básica. Nesta amostra o número e o tamanho das inclusões foram menores em comparação a amostra soldada com suporte de EFS básico, por isso o aumento utilizado na figura 75(b).

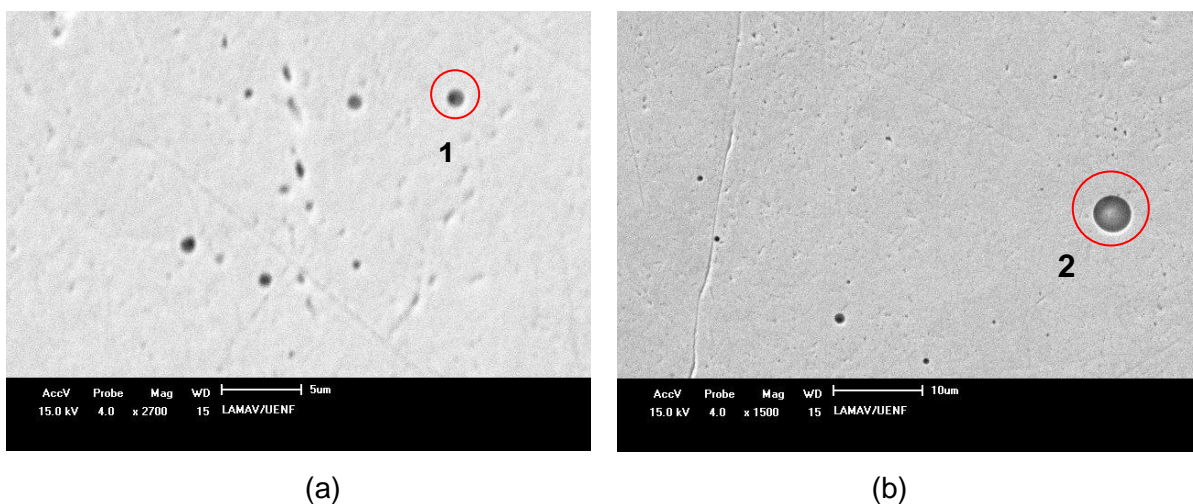


Figura 75 – Imagens do passe de raiz no MEV sem ataque químico com aumento de (a)2700X e (b)1500X.

Na figura 76(a) e (b) são apresentados os espectros de EDS das inclusões não metálicas do passe de raiz dos pontos 1 e 2. As composições das inclusões em porcentagem de peso dos elementos detectados são mostradas na tabela 24.

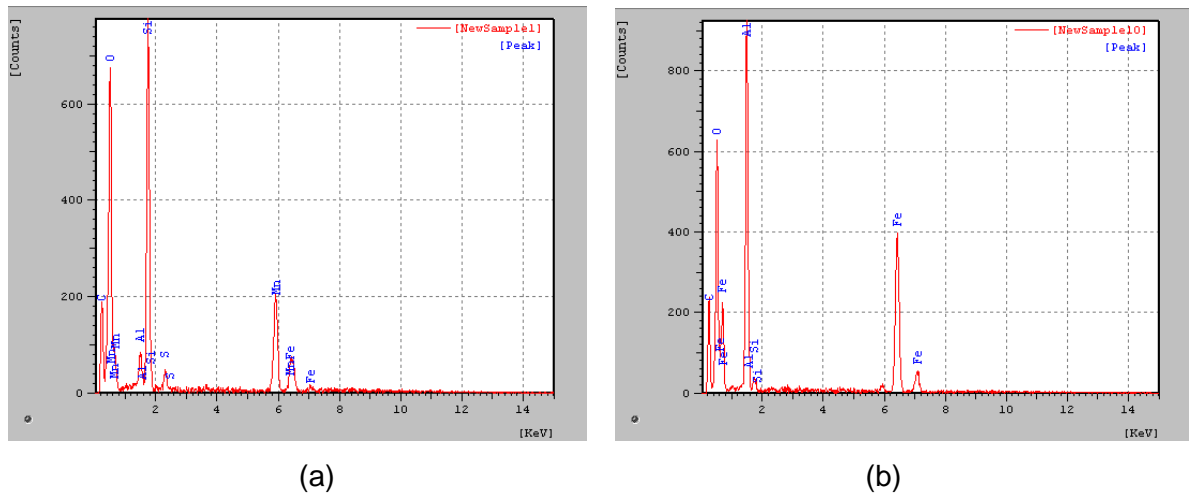


Figura 76 – EDS das inclusões selecionadas no passe de raiz. (a) Ponto 1 e (b) Ponto 2.

Tabela 24 – Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de raiz.

Pontos	Elementos					
	C	O	Al	Si	Fe	Mn
1	14,258	42,139	1,581	14,032	6,080	20,756
2	12,950	28,095	15,958	2,658	37,120	3,210

Nas figuras 77 e 78 são apresentadas as microfotografias e os espectros de EDS das inclusões não metálicas do passe de acabamento. As composições das inclusões em porcentagem de peso dos elementos detectados são mostradas na tabela 25.

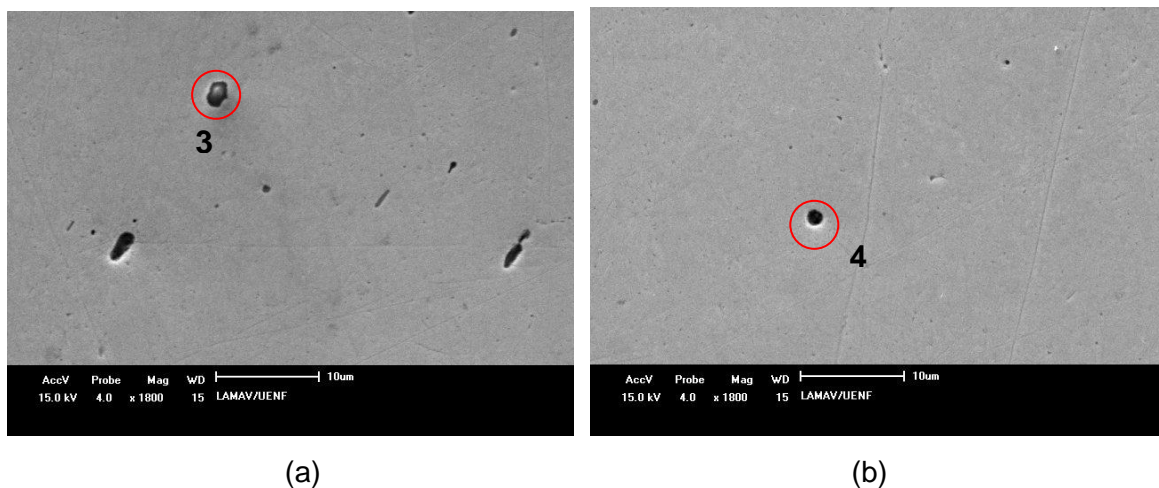


Figura 77 – Imagens do passe de acabamento no MEV sem ataque químico com aumento de 1800X.

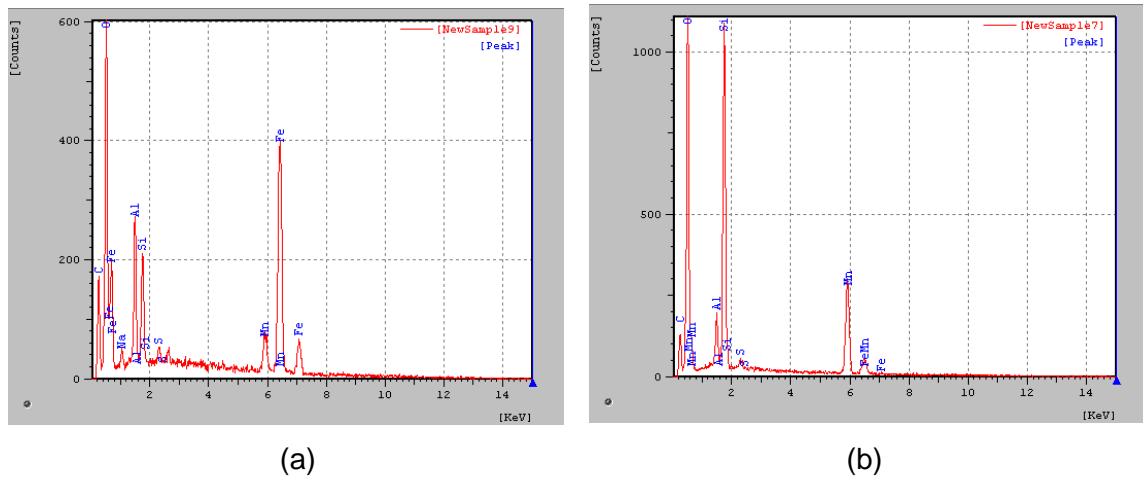


Figura 78 – EDS das inclusões selecionadas no passe de acabamento. (a) Ponto 3 e (b) Ponto 4.

Tabela 25 – Resultado do EDS em porcentagem de peso dos elementos detectados nas inclusões não metálicas do passe de acabamento.

Pontos	Elementos					
	C	O	Al	Si	Fe	Mn
3	10,407	30,465	6,250	14,841	28,229	5,099
4	7,877	48,928	2,830	12,136	4,557	22,672

As microanálises EDS realizadas mostraram que a composição média das inclusões do passe de raiz e do último passe de solda possuem os mesmos constituintes, embora apresentem porcentagens diferentes. Este resultado indica que não houve contaminação no metal de solda pelo material do suporte cerâmico à base EFS semi-básica. Uma vez que, os elementos detectados na composição das inclusões nos passes de raiz e acabamento estão relacionados aos mecanismos de solidificação da poça de fusão.

Durante a solidificação da poça de fusão, o oxigênio em excesso é rejeitado da solução e associa-se com outros elementos como alumínio, silício e manganês, que estão presentes no MB e no metal de solda no formato de inclusões (Liu e Olson, 1987). A quantidade de inclusões é comprometida pela composição química, em especial do oxigênio em solução no metal fundido (Abson, 1989).

O silício detectado é de origem do metal de adição, que age sob a forma de desoxidantes. Segundo Liao e Liu (1992) quando a concentração de oxigênio é alta e a de silício é baixa, o composto FeO-SiO_2 pode ser formado. O comportamento do alumínio também é atribuído ao mesmo motivo (Musardo *et al.*, 2005).

• Considerações finais dos ensaios destrutivos e não-destrutivos – Suporte à base de escória semi-básica

Nos ensaios não-destrutivos, o cordão apresentou boa aparência, e em apenas dois pontos foram apontadas pequenas depressões, contudo o cordão foi considerado aprovado.

Nos ensaios destrutivos os corpos de prova comportaram-se como esperado, rompendo-se metal base. No ensaio de dobramento lateral apenas um corpo de prova foi reprovado (CP-D8), mas o resultado foi satisfatório, uma vez que o que provocou estas descontinuidades foi uma limpeza inadequada de um dos cordões de preenchimento, não sendo causado pelo emprego do suporte cerâmico.

Como mostrado na tabela 4.15 e figura 4.43 o processo de soldagem unilateral com o suporte à base de EFS semi-básica não criou pontos ou regiões de alta dureza. As microestruturas apresentadas mostram uma estrutura típica da ZF de aços ferríticos e na análise das inclusões pode-se notar que não houve contaminação do metal solda pelo uso do suporte.

4.3.3 Considerações finais dos resultados da etapa 3

Através das macrografias dos cordões de solda foi possível notar que o cordão de solda utilizando o suporte à base EFS básica obteve uma melhor geometria do passe raiz, largura adequada e reforço suave.

O ensaio de dureza Vickers mostrou que tanto o suporte à base de EFS básica quanto o suporte à base de EFS semi-básica, não produziram pontos com alto valor dureza. As médias por regiões das duas amostras analisadas ficaram próximas, ressaltando que sobre o aspecto de dureza, os dois tipos de suporte se assemelham.

Os resultados desta etapa mostraram concordância com os resultados das micro-análises EDS do trabalho de Almeida (2009), onde foi utilizado suporte cerâmico à base de cordierita para soldagem unilateral e com os trabalhos Tatagiba (2009) e Gurgel (2013), onde foi utilizado fibra de vidro como suporte da poça de fusão.

Assim, a técnica de soldagem unilateral utilizando os parâmetros determinados pelo campo operacional adequa-se a utilização do suporte cerâmico à base de EFS básica ou semi-básica com múltiplos passes.

Outros estudos já foram realizados procurando uma nova alternativa para a utilização da EFS. Dias (2004) utilizou a EFS como agregado para concreto, Morete (2006) que estudou a influência da incorporação de EFS em corpos de cerâmica vermelha e obteve melhora da resistência mecânica, além de indicar a possibilidade de incorporar este resíduo nas massas para fabricação de tijolos e blocos cerâmicos. Viana (2007) estudou a EFS como agregado miúdo na produção de argamassa de múltiplo uso na construção civil e concluiu que pode-se substituir totalmente a areia natural por EFS que não haverá nenhuma perda da característica da argamassa.

Nota-se com este estudo a comprovação de uma nova aplicação para EFS, um resíduo industrial, que atualmente ainda é destinado a aterros sanitários. Tanto a escória básica como a semi-básica mostrou-se satisfatório para aplicação em suportes cerâmicos para soldagem unilateral.

Todas essas aplicações contribuem para a minimização do impacto ambiental, seja pela redução da extração da matéria-prima original e também pela redução no risco de contaminação do subsolo pelo despejo inadequado da EFS.

Capítulo 5: Conclusões

As conclusões com base nos resultados obtidos neste trabalho, sobre o desenvolvimento de suporte cerâmico à base de escória de fluxo de soldagem foram:

1. A sequência de produção em laboratório para o suporte cerâmico proposta por Almeida (2009), mostrou-se adequada também para a produção do suporte à base de EFS.

2. As formulações à base de EFS básica e semi-básica apresentaram bons resultados, à base de EFS ácida não mostraram bons resultados, necessitando de aprimoramento nas condições de processamento e também nas formulações para se adequarem ao processo de soldagem unilateral.

3. Com relação ao material aderido no contorno do cordão, foi consequência da geometria do reforço da raiz, visto que quanto mais suave era a transição do cordão para o metal base, menor era a quantidade de material aderido no contorno do cordão. As formulações 8 e 12 não apresentaram este comportamento na etapa 1 e nem nas etapas posteriores.

4. As macrografias das juntas aprovadas indicaram que houve penetração nas laterais do chanfro e geometria do reforço de raiz adequado.

5. Os resultados das propriedades mecânicas e microdureza mostraram que a aplicação do suporte cerâmico à base de EFS básico ou semi-básico na técnica de soldagem unilateral não afetou o comportamento da junta soldada.

6. Foi possível delinear um campo operacional que mostrou resultados satisfatórios: abertura de raiz de 2,0 a 4,0 mm; Tensão de 20 a 22 V; Corrente de 150 a 180 A e Energia de soldagem de 1,48 a 2,16 kJ/mm.

7. Não foi observada contaminação da EFS utilizada como matéria-prima do suporte no passe de raiz e as inclusões desse passe são semelhantes às inclusões do passe de acabamento.

8. A utilização de EFS na confecção de suportes para soldagem unilateral é uma nova aplicação para este resíduo industrial, que atualmente é destinado a aterros sanitários.

Sugestões

Sugestões para trabalhos futuros:

1. Realizar o estudo de novos procedimentos de processamento e novas formulações com misturas de tipos diferentes de escórias de fluxo de soldagem;
2. Realizar o estudo com processo de soldagem automatizada, para melhorar o controle dos parâmetros de soldagem;
3. Avaliar todo o processo de produção do suporte cerâmico à base de EFS, utilizado na técnica de soldagem unilateral e compará-lo com a técnica de soldagem convencional, com o intuito de comprovar a sua viabilidade econômica;
4. Confeccionar novas matrizes para fazer suportes com geometrias diferentes para aplicação em outros tipos de chanfros.

Referências Bibliográficas

Abson, D. J., 1989, Non-metallic inclusions in ferritic steel weld metals – a review. *Welding in the World*, v. 27, n. 3/4, 101p.

Almeida, L. L. P. (2009). *Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais com elevada produtividade*. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 108p.

American Society For Testing And Materials (1998) Specification For Carbon Steel Electrodes And Rods For Gas Shielded Arc Welding, ASTM A5.18.

American Welding Society (AWS) (1991). *Welding Handbook*. Vol. 2. Miami, 191-231p.

Andrade, S. T (2007). Mapeamento do processo mecanizado de Soldagem unilateral FCAW com backing cerâmico aplicável no passe de raiz em aço Carbono. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 103p.

Annoni, R. (2011). *Lixiviação de escórias de soldagem a arco submerso visando à recuperação dos óxidos de alumínio e titânio*. Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte - MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 130p.

Anuário Brasileiro de Cerâmica (2003). *Anuário Brasileiro de Cerâmica*. 54p.

Araújo M. R. V.; Asselli, A. A. C.; Yamakami, W. J.; Tokimatsu, R. C.; Ventrella, V. A.; Gallego, J. (2006). Estudo das Inclusões Não-metálicas Formadas no Metal de Solda Depositado por Arco Submerso. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, p. 5318 a 5329, Anais.

ASME (2004). The American Society of Mechanical Engineers - Boiler & Pressure Vessel Code - Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators: ASME IX. New York, USA.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) Resíduos sólidos – Classificação. ABNT. NBR- 10004. Rio de Janeiro, RJ.

Batista, J., Beltran, V. (1986). Arcilas de la provincia de valência. Bol. Soc. Esp. Ceram., 25: 231-235.

Bernardes, L.J.L. (2006). A Granulação de Materiais. GranTec Tecnologias para Homogeneização e Granulação de Materiais. Piracicaba – SP.

Byun, J.-S.; Shim, J.-H.; Cho, Y. M. and Lee, D. N., 2003, Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn steel. Acta Materialia, v. 51, pp. 1593-1606.

Callister Jr., W. D; Rethwisch, D. G. (2012). Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro. 8ª edição. LTC Editora. 817 p.

Cantrell, R. E. (1982), "Ceramic weld backing evaluation", Welding Journal, vol. 61 pp.27-34.

Carter, G.J. (1988) The reprocessing and re-use of slag as flux in submerged-arc welding – 1 e 2. The Welding Institute Research Bulletin. 1988 february: 52-55 and march/april: 99-105.

Cetesb. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 24/01/13.

Chaves, L. H. G.; Azevedo, N. C.; Tito, G. A. (1999) Efeito da aplicação de bentonita nas propriedades químicas de um regossolo distrófico. CCA – UFPB.

Cruz, M. L. F. R. (2005). A caracterização de resíduos sólidos no âmbito da sua gestão integrada. Tese (Mestrado) – Universidade do Minho. 152p.

Daley, H. C. Gray, G. R. (1988) Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Fifth Edition, 634p, Gulf Publishing Company, Houston-USA, p.1-37.

Datta, S., BANDYOPADHYAY, A., PAL, P.K. (2008). Slag recycling in submerged arc welding and its influence on weld quality leading to parametric optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, p. 935-942.

Dias, D.P., Paranhos, R.R., Barbosa, L.R., (2004). Escória de fluxo de soldagem como agregado para concreto. Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-NOCMAT.

Fonseca, J.F., Fernandez, T.H., Bernardin, A.M. (1994). Manual para a produção de cerâmica vermelha. Florianópolis: UFSC/SEBRAE, 81p.

Fonseca, A.S.M., Almeida, A.L.S., Rios, P.R., 1992, Análise Comparativa Ponto A Ponto Da Quantificação Da Microestrutura Do Metal De Solda Segundo O Método Do Iiw, In: Encontro Nacional De Tecnologia Da Soldagem, 18, P. 513 – 522, Anais.

Fortes, C., Araújo, W. (2004). Arco Submerso OK. Brasil: ESAB BR, 104p.

Fortes, C., Araújo, W. (2005). Arames Tubulares OK. Brasil: ESAB BR, 101p.

Gerda. Catálogo de produtos. <https://www.gerdau.com.br/arquivos-tecnicos/12.brasil.es-ES.force.axd> em 10/02/2013.

Gullco Internacional. Catálogo de produtos. KATBAK Ceramic Weld Backing, http://www.gullco.com/index_files/Page593.htm em 10/02/2013 página mantida pela Gullco Internacional.

Gurgel, (2013). Desenvolvimento de suporte de solda a base de fibra de vidro e fibra cerâmica para aplicação em soldas unilaterais com elevada produtividade. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Campos dos

Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

Harben, P., Kuszvart, M. (1996). Clays: Bentonite and Hectorite. In: Industrial Minerals – A Global Geology, p.128-138, Industrial Minerals Information Ltd., Metal Bulletin PLC, London.

Irikura S. I.; Hirayama, R.; Tokimatsu, R. C.; Ventrella, V. A.; Gallego, J.; Yamakami, W. J (2006). Análise Microestrutural de uma Junta Soldada - Microdureza e Fração Volumétrica. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, p. 5036 a 5047, Anais.

Kreusch, M. A. (2005). *Avaliação com Proposta de Melhoria do Processo Industrial de Reciclagem do Chumbo e Indicação de Aplicabilidade para a Escória Gerada*. Dissertação de mestrado em Engenharia Química. Curitiba - SC, Universidade Federal do Paraná - UFPA.

LabSolda. Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG. Disponível em: http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/imagens/mig_mag_solda.jpg. Acesso em: 28/12/12.

Lima, R. G. C., Ferreira, O. M. (2007). Resíduos Industriais – Métodos de tratamento e análise de custos.

Liu, S.; Olson, D. L., (1987). The Influence of Inclusion Chemical Composition on Weld Metal Microstructure. J. Materials Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 237-251.

Lora, Electo Silva. Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte/Electo Silva Lora. Brasília. ANEEL, 2000.

Lolli, L.; Nasseti, G.; Marino, L.F.B. (2000). A Preparação a Seco de Massas Cerâmicas. Centro Cerâmico de Bolonha, Itália.

Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Neto, M. A. A. (2001). Bentonita: UBM – União Brasileira de Mineração. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil, p.373-376, Editores: João A Sampaio, Adão B. da Luz e Fernando F. Lins, CETEM/MCT, 398p.

Luz, A. B., Oliveira, C. H. (2005). Bentonita. CETEM/MCT, p.217 – 230.

Malin, V. (2001). Root Weld Formation in Modified Refractory Flux One-Sided Welding: part 1 – Effect of Welding Variables, *Welding journal*, vol. 80 pp. 217s-226s, e part 2 – Effect of Joint Geometry, *Welding journal*, vol. 80 pp. 227s-237s, September.

Marques, P. V., Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q (2009). Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. 3º edição. Belo Horizonte. Editora UFMG. 363 p.

Marques, P. V., Modenesi, P. J. (2006) Introdução aos processos de Soldagem. Belo Horizonte.

Masuero, A.B., Dal Molin, D.C.C., Vilela, A.C.F. (2004) Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. *Revista Ambiente Construído*. Porto Alegre - RS. v. 4, n. 2, p. 57-81.

Millar, D.W. (2000), Welding automation in Japanese shipbuilding, *Welding & Metal fabrication*, vol. 68 pp 8-10, mar.

Modenesi P.J. (2003). Técnica operatória da soldagem SAW. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Modenesi, P. J. (2006). Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Morete, G.F., Paranhos R.P.R., Holanda J.N.F. (2006) Aproveitamento de Resíduo de Escória de Soldagem em Materiais Cerâmicos para Construção Civil. *Revista Soldagem e Inspeção*. v.11, n.3, p141-146.

Moura, W.A. (2000) *Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Porto Alegre - RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, 232p.

Muir, J. (1985), Single side panel welding with ceramic tile backing, *Metal Construction* , p.651-653.

Musardo, G.B, Araújo, M.R.V, Yamakami, W.J.,Ventrella, V.A., Gallego, J. (2005), Recuperação de turbinas hidráulicas cavitadas por deposição de revestimentos à base de cobalto – aspectos microestruturais. 60º Congresso da ABM. Belo Horizonte – MG.

Newell, J. (2010). *Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais*. Rio de Janeiro. LTC Editora. 288p.

Obsidian Welding Backing Ltda. Catálogo de produtos. Welding Backing Ltda; http://www.weldingbacking.com/welding_ceramics.html em 11/02/2013 página mantida por Obsidian Welding Backing Ltda.

Odom, I.E. (1984) Smectite clay minerals: properties and uses. *Philosophical Transactions Royal Society, London, A.*, 311, 391-409.

Paranhos, R.; Souza, A. C. (1999). *Soldagem a arco submerso*. Rio de Janeiro: FIRJAN/SENAI-RJ/CETEC de solda. 77p.

Pessoa, J. M. A. P. (2004). *Tecnologias e Técnicas Apropriadas para o Desenvolvimento Sustentável: O caso da indústria cerâmica de Russas-CE*. Tese (Mestrado) – Fortaleza – CE, Universidade Federal do Ceará – UFC, 104p.

Roman, H. R. (1983). *Determinação das características físicas e análise estática da capacidade resistente de tijolos cerâmicos maciços*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 102p.

Saunders, C.A. (1965) – The use of Southern bentonite, Bull. PC-100, American Colloid Co., Skokie, Illinois, EUA.

Santos, R.S.(1997) Materiais Cimentosos Isentos de Macro Defeitos Utilizando Álcool Polivinílico (PVA) e Silicato de Sódio: Influência da Massa Molar Média e do Grau de Hidrólise do Polímero. Tese (Mestrado) - Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 76p.

Scotti, A; Ponomarev, V. (2008). Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, Melhor desempenho. São Paulo. Artliber Editora, 284p.

Silva, A. F.; Delforge, D. Y. M.; Tokimatsu, R. C.; Ventrella, V. A, 2003. Análise Microestrutural do Metal de Solda de Perfis Soldados de Um Lado Só Utilizados na Construção Civil – UNESP.

Singh, K., Pandey, S. (2009). Recycling of slag to act as a flux in submerged arc welding. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, p. 552-558,

Soares, R. A. L., Nascimento, R. M. (2007). O processo produtivo e a qualidade do produto cerâmico estrutural. CEFET-PI.

Solvay – Solvay: *asking more from chemistry*. Silicato de Sódio. Disponível em: <http://www.solvay.pt/PT/solvayemp Portugal/complexoindustrial/produtosaplicacoes/home/silicatosodio.aspx>. Acesso em: 11/02/13.

Souza, M. R.; Silva, R. J. (1996). A Geração de Resíduos Industriais e sua Destinação Final. Departamento de Produção. Escola Federal de Engenharia de Itajubá – MG.

Tatagiba, L. C. S. (2009). *Desenvolvimento de suporte de solda à base de tecido de fibra de vidro*. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

Tomazetti, R.R. (2003) *Análise da produção de cerâmica vermelha da região central do estado do Rio de Grande do Sul*. Tese (Mestrado) – Santa Maria –RS, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 207p.

Van Vlack, L.H. (1984) *Princípios de Ciência e tecnologia dos materiais*. 4 ed. Rio de Janeiro: Campus, 566p.

Viana, C. E. (2007). *Escórias de Fluxo de Soldagem como Agregado Miúdo para a produção de Argamassas de Múltiplo Uso*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

Vicentini, R. (2013). *Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais em ligas de alumínio*. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

Wiemes, L., (2003). *Minimização de Resíduos no Processo de Pintura da Indústria Automotiva*, Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Hidráulica, 102p.

Wainer, E.; Brandi, S.; Mello, Fábio. (1992). *Soldagem: Processos e Metalurgia*. 1º edição. São Paulo, Editora Edgard Blucher. 504p.