

SUPORTE DE SOLDA A PARTIR DE GEOPOLIMERIZAÇÃO DE
ESCÓRIA DE FLUXO DE SOLDAGEM

SORAYA VITA DE SOUZA MENDONÇA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

DEZEMBRO - 2017

SUPORTE DE SOLDA A PARTIR DE GEOPOLIMERIZAÇÃO DE
ESCÓRIA DE FLUXO DE SOLDAGEM

SORAYA VITA DE SOUZA MENDONÇA

“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. PhD. Ronaldo P. da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
DEZEMBRO DE 2017

1.1 FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

21/2018

Mendonça, Soraya Vita de Souza

Suporte de solda a partir de geopolimerização de escória de fluxo de soldagem / Soraya Vita de Souza Mendonça. – Campos dos Goytacazes, 2017.

xii, 96 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, 2017.

Orientador: Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Metalurgia física.

Bibliografia: f. 87-96.

1. RESÍDUOS INDUSTRIAIS - REAPROVEITAMENTO 2. ESCÓRIA DE FLUXO DE SOLDAGEM 3. GEOPOLÍMERO 4. SUPORTE DE SOLDA I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados II. Título

669.96

CDD

SUORTE DE SOLDA A PARTIR DE GEOPOLÍMERIZAÇÃO DE
ESCÓRIA DE FLUXO DE SOLDAGEM

SORAYA VITA DE SOUZA MENDONÇA

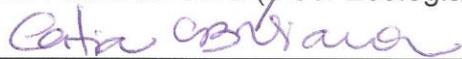
“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia e Ciência
dos Materiais”.

Aprovado em 15 de dezembro de 2017.

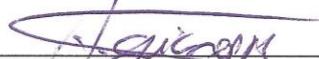
Comissão Examinadora:



Prof^a. Ana Paula da Silva (DSc. Ecologia e Recursos Naturais) - IFRJ



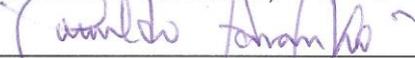
Prof^a. Cátia Cristina Brito Viana (DSc. Engenharia e Ciência dos Materiais) - IFF



Prof. Angelus G. P. da Silva (DSc. Ciências Técnicas) – UENF



Prof^a. Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova (PhD. Engenharia e Ciência dos Materiais
Metálicos e Tratamentos Térmicos) – UENF



Prof. Ronaldo P. da Rocha Paranhos (PhD. Tecnologia da Soldagem) – UENF

Orientador

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

DEZEMBRO DE 2017

"Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana." Carl Jung

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico à minha família, pelo apoio na realização dessa importante etapa da minha vida e pelo amor incondicional, sem esse amor eu nada seria. A vocês, pais Pedro e Maria, irmão Sandro e sobrinhos Thales e Sophia, sou eternamente grata. Hoje quase 400Km nos separa, mas a minha gratidão transcende a distância física. A minha família que construo a cada dia, nas venturas e desventuras da vida: ao meu consorte Gustavo Petali que tenho a sorte de poder caminhar junto, a Fu Fúria, a Etta James e a Clara Space, meus dias são melhores quando divido com vocês. Amo vocês 'tudo'.

Ao professor Ronaldo Paranhos pela orientação, atenção e transmissão de seu conhecimento para a realização desse trabalho.

Ao Professor Dylmar Penteado do LECIV, pela inestimável ajuda na pesquisa dos geopolímeros.

A banca examinadora pelas preciosas observações, certa de que são para trazer melhorias para esse trabalho e para trabalhos futuros.

Aos técnicos de laboratório do LAMAV que muito ajudaram com seus conhecimentos práticos e teóricos essenciais na condução dessa pesquisa.

A todos os professores e colegas do LAMAV e do LECIV que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho, agradeço pela oportunidade de aprendizado e convivência.

À FAETEC João Barcelos Martins, pela realização das soldas.

À Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, a universidade do terceiro milênio, que mesmo em tempos difíceis, com seus servidores à mingua, consegue realizar pesquisa de ponta e estar simplesmente entre as 12 melhores universidades do país. Grata por expandir meus horizontes.

Agradeço a vida, o universo e tudo mais.

Saudações à colher de pau!

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IIX
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	4
1.2.1 Importância Tecnológica.....	4
1.2.2 Importância Ambiental	4
1.2.3 Importância Científica	4
1.2.4 Importância Econômica.....	5
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	6
2.1.1 Processo de Soldagem MIG-MAG	7
2.1.2 Processo de soldagem a Arco Submerso (SAW - Submerged Arc Welding)	10
2.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	15
2.2.1 EFS como Resíduo Industrial	18
2.2.1.1 Caracterização das EFS.....	18
2.2.1.2 Finalidade para a EFS	21
2.2.1.2.1 Reciclagem da EFS para uso como Fluxo de Soldagem	21
2.2.1.2.2 Outras aplicações para EFS.....	22
2.3 SOLDAGEM UNILATERAL.....	23
2.3.1 Soldagem Unilateral com Suporte Cerâmico	25
2.3.2 Produção do Suporte Cerâmico.....	27
2.3.3 Suportes Alternativos para Soldagem Unilateral.....	28
2.3.3.1 Suportes de Solda de Fibra de Vidro e Fibra Cerâmica	29
2.3.3.2 Suporte com EFS	30
2.4 GEOPOLÍMEROS.....	32
2.4.1 Matérias-Primas para Produção de GPs.....	33

2.4.1.1 Metacaulim	34
2.4.1.2 Ativadores Alcalinos	35
2.4.1.2.1 Hidróxido de Sódio e de Potássio.....	36
2.4.1.2.2 Silicato de Sódio.....	37
2.4.2 Síntese dos GPs	39
2.4.3 Estrutura dos GPs.....	40
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 MATERIAIS	44
3.2 METODOLOGIA	50
3.2.1 Etapa 1: Produção do Suporte de Solda a Base de EFS.....	50
3.2.1.1 Proposição de Formulações	50
3.2.1.2 Processamento dos Protótipos.....	52
3.2.1.3 Avaliação dos Protótipos na Soldagem do passe de raiz	52
3.2.2 Etapa 2: Avaliação do Suporte de Solda e da Junta Soldada.....	54
3.2.2.1 Avaliação por Perda de Massa das Formulações	55
3.2.2.1.1 MEV dos Novos Suportes de Solda Produzidos	56
3.2.2.2 Soldagem do passe de raiz e Avaliação da Junta Soldada	57
3.2.2.2.1 Macrografia da Junta Soldada.....	57
3.2.2.2.2 Microscopia Ótica.....	58
3.2.2.2.3 Microdureza Vickers.....	59
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 ETAPA 1: PRODUÇÃO DO SUPORTE DE SOLDA A BASE DE EFS.....	60
4.1.1 Trabalhabilidade das massas formadas a partir das formulações propostas e Processamento dos protótipos	60
4.1.2 Avaliação dos Suportes na Soldagem do passe de raiz	65
4.2 ETAPA 2: AVALIAÇÃO DO SUPORTE DE SOLDA E DA JUNTA SOLDADA... 68	
4.2.1 Avaliação por Perda de Massa das Formulações.....	68
4.2.2 Produção dos Novos Suportes de Solda	72
4.2.2.1 Produção dos Suportes	72
4.2.2.2 MEV dos Novos Suportes.....	73
4.2.3 Soldagem do passe de raiz e Avaliação da Junta Soldada	76
4.2.3.1 Raiz da Solda e Suporte de Solda.....	77
4.2.3.2 Macrografia da Junta Soldada.....	79
4.2.3.3 Microscopia Ótica	81

4.2.3.4 Dureza Vickers	82
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES.....	85
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES.....	86
CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: processo de soldagem mig-mag (wainer et al., 1992).	7
Figura 2.2: esquema dos equipamentos para o processo mig-mag (labsolda, 2015)..	8
Figura 2.3: modos de transferência do metal de solda (fortes, 2005).	9
Figura 2.4: esquema do processo de soldagem a arco submerso (paranhos e souza, 1999).	11
Figura 2.5: componentes básicos do equipamento de soldagem com arco submerso automático (wainer <i>et al.</i> , 1992).	12
Figura 2.6: classificação dos resíduos sólidos (abnt, 2004).	15
Figura 2.7: gerenciamento de resíduos (wiemes, 2003)	17
Figura 2.8: escória de soldagem a arco submerso (annoni, 2011).	19
Figura 2.9: posição do suporte junto com o cordão de solda (modenesi e marques, 2006).	23
Figura 2.10: suporte não fusível de cobre (cobre junta) (paranhos e souza, 1999)...	24
Figura 2.11: junta com suporte com cama de fluxo (paranhos e souza, 1999).	24
Figura 2.12: suporte por passe de selagem na raiz (paranhos e souza, 1999).	25
Figura 2.13: suporte metálico fusível em tira (paranhos e souza, 1999).	25
Figura 2.14: variedade de suporte cerâmico katbak® (gullco, 2013)	26
Figura 2.15: ilustrativo da variedade de aplicação do backing cerâmico, marca lascentrum®: (a) cordão circular, (b) e (c) chanfro tipo k e x, (d) posição horizontal, (e) posicionamento entre chapas de 90°, (f), (g) e (h) posição plana e vertical, folheto hyundai- <i>apud</i> (andrade, 2007)	26
Figura 2.16: fixação esquemática do suporte cerâmico com fita adesiva de alumínio (obsidian welding backing, 2015).	27
Figura 2.17: fixação esquemática do suporte cerâmico suportado por base metálica (cantrell, 1982)	27
Figura 2.18: (a) suporte de solda de tecido de fibra de vidro; (b) suporte de solda de tecido de fibra de vidro conjugado com fibra (tatagiba e paranhos, 2011).	29

Figura 2.19: suporte de solda cilíndrico de fibra de vidro com diâmetro de (a) 4,8 mm e (b) 9,5 mm; suporte de solda cilíndrico de fibra cerâmica de (c) 6,4 mm (gurgel e paranhos, 2015).	30
Figura 2.20: principais componentes do caulim (bigno, 2008).....	34
Figura 2.21: fluxograma de produção do silicato de sódio, adaptado de (silva, 2011)	38
Figura 2.22: produção de geopo límero (weil et al., 2005).	39
Figura 2.23: estrutura de um geopolímero (lyon, et al., 1997).	40
Figura 2.24: estrutura proposta para aluminossilicatos de na (barbosa et al., 2000). ..	41
Figura 2.25: modelo conceitual para geopolimerização (duxson, et al., 2007).	42
Figura 3.1: moagem da escória semi-básica. Em: (a) escória como recebida; (b) após 1º tritramento; (c) após 2º tritramento; (d) após moagem em moinho de bolas; (e) após o peneiramento passante em #40 mesh.....	45
Figura 3.2: (a) triturador de mandíbula do lamav-uenf e (b) moinho de bolas do leciv-uenf.	45
Figura 3.3: representação do suporte cerâmico: (a) dimensões do corpo de prova, (b) seção transversal (júnior, 2014).	48
Figura 3.4: molde de silicone	48
Figura 3.5: esquematização (a) da prensa hidráulica manual, (b) da montagem da matriz (júnior, 2014)	49
Figura 3.6: preparação das chapas para a avaliação por soldagem dos protótipos de suporte de solda produzidos; (a) dimensões da junta utilizada, e (b) seção transversal da junta.	53
Figura 3.7: (a) seção transversal do conjunto, chapa e suporte cerâmico e (b) preparação do suporte cerâmico na junta, destacando a utilização de apêndices (júnior, 2014)	54
Figura 3.8: forno mufla modelo edg3p-s/7000 do lamav - uenf.....	55
Figura 3.9: equipamentos utilizados para análise microestrutural do suporte produzido, disponíveis no lamav. (a) metalizador ion coater – ic50, (b) mev- sedex-	

ssx 550	56
Figura 3.10: localização dos corpos de prova na chapa de teste para os ensaios de microscopia ótica, dureza e macrografia.....	57
Figura 3.11: partes do cordão de solda.	58
Figura 3.12: representação esquemática da localização dos pontos de execução da dureza.	59
Figura 4.1: aspecto da massa formada a partir da mistura dos componentes.....	60
Figura 4.2: protótipos com resquícios do material do molde de silicone.....	61
Figura 4.3: (a) adaptação do molde de silicone com fita adesiva e plástico para retroprojeção; (b) massa vertida no molde adaptado seguindo o processo de cura.	62
Figura 4.4: faces de um dos protótipos produzidos a partir do molde adaptado.....	62
Figura 4.5: protótipo de formulação 5.	64
Figura 4.6: aparência (a) do protótipo de solda de formulação 6 após processo de soldagem e (b) da raiz da solda.	66
Figura 4.7: inspeção visual do cordão de solda no passe de raiz com o suporte de formulação (a) 5, (b) 6, (c) 17 e (d) 18.	67
Figura 4.8: macrografia das juntas produzidas com os protótipos de formulação (a) 5, (b) 6, (c) 17 e (d) 18.	68
Figura 4.9: aspecto das massas após tratamento de 110°C e 300°C.....	69
Figura 4.10: gráfico da perda percentual de massa com evolução da temperatura das formulações selecionadas.	70
Figura 4.11: novo suporte produzido por dois métodos de moldagem: (a) vertido em molde e (b) prensado.	73
Figura 4.12: meV dos suportes de formulação a: (a) vertido em molde, no aumento de 150x, (b) vertido em molde, no aumento de 300x, (c) prensado, no aumento de 150x, (d) prensado, no aumento de 300x.	74
Figura 4.13: meV dos suportes de formulação b: (a) vertido em molde, no aumento de 150x, (b) vertido em molde, no aumento de 300x, (c) prensado, no aumento de 150x, (d) prensado, no aumento de 300x.	75

Figura 4.14: mev dos suportes de formulação c: (a) vertido em molde, no aumento de 150x, (b) vertido em molde, no aumento de 300x, (c) prensado, no aumento de 150x, (d) prensado, no aumento de 300x. 76

Figura 4.15: aparência dos suportes, após o processo de soldagem, de formulação (a) a, vertido em molde; (b) a, prensado; (c) b, vertido em molde; (d) b, prensado; (e) c, vertido em molde; e (f) c, prensado..... 78

Figura 4.16: aparência dos cordões de solda após o processo de soldagem, na qual foi usado suporte de formulação (a) a, vertido em molde; (b) a, prensado; (c) b, vertido em molde; (d) b, prensado; (e) c, vertido em molde; e (f) c, prensado..... 79

Figura 4.17: macrografias das juntas produzidas, com suporte vertido e suporte prensado, mostrando as seguintes regiões: 1 – zf, 2 – zta, 3 – mb, 4 – rr e 5 – fs. .. 79

Figura 4.18: macrografias das juntas produzidas com suporte de: (a) fórmula a vertido, (b) fórmula a prensado, (c) fórmula b vertido, (d) fórmula b prensado, (e) fórmula c vertido, e (f) fórmula c prensado..... 80

Figura 4.19: micrografias da seção transversal do passe de raiz, produzido com suporte de fórmula: (a) c vertido, (b) b prensado. Aumento de 500x. Ataque: nital 2%, sendo: 1- pf(g), 2- af, 3-fs(a) e 4- fs(na). 82

Figura 4.20: Gráficos de Dureza Vickers das três regiões da solda produzida com o suporte de solda de fórmula (a) “B” prensado e (b) “C” vertido 84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Sistemas para classificação de fluxos para arco submerso (Modenesi, 2004)	13
Tabela 2.2: Dados da geração de resíduos sólidos industriais do Brasil (MMA, 2012)	16
Tabela 2.3: Resultados do ensaio de lixiviação da EFS (Viana, 2007).	20
Tabela 2.4: Resultados do ensaio de solubilização da EFS (Viana, 2007).	20
Tabela 2.5: Propriedades físico-químicas do NaOH (EMBRAPA, 2001)	37
Tabela 3.1: Caracterização química das escórias: básica e semi-básica	46
Tabela 3.2: Caracterização química do metacaulim.	47
Tabela 3.3: Caracterização química do cimento Portland CPIIE-32	47
Tabela 3.4: Composição química (% de peso) do arame ER 70S-6 (belgo bekaert arames) e da chapa de aço A.36 (gerdau).	49
Tabela 3.5: Proposição de formulação com EFS	51
Tabela 4.1: Perda percentual de massa das formulações para determinadas faixas de temperatura.	70
Tabela 4.2: Composição percentual das fórmulas utilizadas para produção de suportes	72
Tabela 4.3: Dureza das três regiões da solda produzida com o suporte de solda de fórmula (a) "C" vertido e (b) "B" prensado.	83

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Ferrita Acicular
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
EFS	Escória de Fluxo de Soldagem
EFS B	Escória de Fluxo de Soldagem Básica
EFS-SB	Escória de Fluxo de Soldagem Semi-básica
FAETEC	Fundação de Apoio à Escola Técnica
FC	Agregado Ferro-Carboneto
FS	Face da Solda
FS	Fluxo de Soldagem à arco submerso
FS (A)	Ferrita de Segunda Fase Alinhada
FS (NA)	Ferrita de Segunda Fase Não Alinhada
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GP's	Geopolímero(s)
HV	<i>Hardiness Vickers</i>
IB	Índice de Basicidade
IME	Instituto Militar de Engenharia
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
LENEP	Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo
LP	Líquido Penetrante
M	Martensita
M	Molar (Concentração)
MB	Metal Base
MIG-MAG	<i>Metal Inert Gas - Metal Active Gas</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
PF(G)	Ferrita de Contorno de Grão
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RMN	Ressonância Magnética Nuclear

RR	Reforço da Raiz
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de formulações de suportes cerâmicos para soldagem a partir da geopolimerização de escória de fluxo de soldagem (EFS) a arco submerso, como uma alternativa de aproveitamento desse tipo de resíduo industrial. A parte experimental foi dividida em 2 etapas: Na etapa 1 foram propostas 22 fórmulas para produção de suportes de solda, sendo que 4 geopolimerizaram, apresentaram boa trabalhabilidade e foram selecionadas para a avaliação por soldagem. Após o processo de soldagem, os suportes permanecem inteiros, mas, os cordões de solda apresentaram depressões atribuídos à presença de gases. Na etapa 2, os geopolímeros das fórmulas selecionadas, foram avaliadas por perda de massa até 700°C. Novos suportes foram produzidos com essas fórmulas e avaliados por soldagem. As soldas foram avaliadas por ensaio de dureza, suas macrografias e suas microestrutura foram caracterizadas. Os resultados da avaliação por perda de massa mostraram maior perda na faixa de temperatura de 60°C – 300°C. A análise de MEV mostrou morfologia amorfa a semicristalina desses suportes, típica de geopolímeros. Na avaliação por soldagem os suportes permaneceram inteiros. A inspeção visual das juntas soldadas, mostrou cordões de solda melhores que os produzidos na etapa 1. Nas macrografias não foram observadas descontinuidades internas no passe de raiz. As microestruturas do metal de solda são típicas de aços ferríticos baixo carbono, e a dureza encontrada está compatível com o aço A-36 soldado com ER-70S6. Foi possível concluir que a geopolimerização de EFS é viável e cria rota de confecção de suportes para soldagem unilateral. As fórmulas de EFS geopolimerizadas precisam ser queimadas na temperatura mínima de 700°C para eliminar gases e atuar com suporte de solda. Formulações à base de EFS básica apresentaram bons resultados de geopolimerização e de soldabilidade. Por fim, A geopolimerização de EFS oferece alternativa à destinação para este tipo de resíduo industrial, que atualmente é descartado em aterros industriais, dando uma opção para seu aproveitamento.

Palavras-chave: aproveitamento de resíduos industriais, escória de fluxo de soldagem, geopolímero, suporte de solda.

ABSTRACT

The aim of this research was the development of formulations of ceramic supports for welding from the geopolymerization of weld flow slag (WFS) of submerged arc welding, as an alternative to exploit this type of industrial waste. The experimental part was divided into 2 steps: In step 1, 21 formulas were proposed to produce weld supports, 4 of which were geopolymerized, presented good workability and were selected for welding evaluation. After the welding process, the supports remain intact, but the weld beads presented depressions attributed to the presence of gases. In step 2, the geopolymers of the selected formulas were evaluated for mass loss up to 700°C. New supports were produced with these formulas and tested by welding. The welds were evaluated by hardness test, macrographs and the microstructure were characterized. The results of the mass loss evaluation showed greater loss in the temperature range of 60°C - 300°C. SEM analysis showed semi - crystalline amorphous morphology of these supports, typical of geopolymers. In the evaluation by welding the supports remained whole. The visual inspection of welded joints showed better weld beads than those produced in step 1. In the macrographs, no internal discontinuities were observed in the root pass. The microstructures are typical of low carbon ferritic steel weld metal, and the hardness found is compatible with A-36 steel welded with ER-70S6. It was possible to conclude that the geopolymerization of WFS's shows the feasibility of a new route of making supports for unilateral welding. The geopolymerized WFS formulas must be burned at the minimum temperature of 700°C to eliminate gases and act with welding support. Formulations based on basic WFS presented good results of geopolymerization and weldability. Finally, the geopolymerization of WFS offers an alternative to the destination for this type of industrial waste, which is currently discarded in landfills.

Keywords: geopolymer, industrial waste utilization, welding flux slag, welding support.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo de fabricação utilizado em uma gama de setores industriais que, em geral, tem influência direta no custo e no desempenho do produto (Wainer *et al.*, 1992). O tipo de processo de soldagem mais adequado deve ser selecionado para cada aplicação. De acordo com 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 e etc.

A soldagem unilateral é utilizada em situações em que 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. O uso de suporte de solda é útil quando se deseja obter completa penetração da solda em um único passe ou quando o metal base não apresenta massa suficiente para fornecer um adequado anteparo para a poça de solda líquida (Andrade, 2007; Tatagiba *et al.*, 2012).

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. É considerado como efetiva solução para o aumento da produtividade da soldagem, obtendo um acabamento adequado e íntegro do passe de raiz e, por consequência, da junta soldada (Almeida *et al.*, 2009).

A fabricação de suporte cerâmico, porém, demanda a exploração de recursos minerais naturais, como a Caulinita, Bentonita, Bauxita, entre outros minerais (Almeida, 2009). Considerando a sustentabilidade dos recursos naturais e a preservação ambiental, os processos de produção devem, então, economizar energia e não gerar subprodutos perigosos que possam pôr em risco a natureza e o ser humano (Viana, 2007).

A sociedade moderna, no entanto, tem aumentado o consumo de produtos à base de aço, o que impulsiona o crescimento dos setores siderúrgico e metal-mecânico e, por consequência, a expectativa é de que haja um aumento cada vez maior da geração de resíduos oriundos destes setores e que, em sua maior parte no Brasil, são descartados em aterros sanitários ou no meio ambiente. Neste contexto, a reciclagem de resíduos industriais pode contribuir para amenizar problemas das indústrias, relacionados a disposição adequada dos seus resíduos e atendimento à legislação, que primam pela excelência da produção com qualidade (Moura, 2000).

Muitas empresas vêm investindo cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para eliminar a cultura do desperdício e consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos, e principalmente para o atendimento à legislação ambiental. Não só porque os resíduos provocam impactos ambientais negativos, como também a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica, muitas vezes, num menor dispêndio econômico (Moura, 2000; Casagrande, 2010).

Uma alternativa à utilização de resíduos industriais pode ser o emprego de escória de fluxo de soldagem (EFS) como matéria-prima na produção de geopolímeros, a serem utilizados como suportes para soldagem unilateral, sendo este o propósito desta pesquisa.

Pesquisadores da Ucrânia, como Glukhovsky e Kryvenko, trabalharam no desenvolvimento de cimentos álcali-ativados nos anos 1950. A partir da década de 1980, um pesquisador francês, Professor Joseph Davidovits, criou e patenteou os chamados geopolímeros ou polissialatos, terminologia adotada para abreviatura de poli-silicoaluminatos (Geo-Pol, 2016).

Os geopolímeros apresentam características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante. Trata-se de uma adaptação moderna dos processos de estabilização de solos caulíníticos ou lateríticos com cal feita há mais de 4.500 anos pelos antigos Romanos e Egípcios na confecção de peças estruturais (Geo-Pol, 2016).

Logo, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade tecnológica da utilização de EFS como substituto total ou parcial de minerais utilizados na produção de suporte cerâmico, contribuindo para a redução do risco de contaminação do solo e do lençol freático pela disposição inadequada da EFS, visto que no Brasil, segundo Viana *et al.* (2010), são geradas aproximadamente 750 toneladas/mês de EFS ainda sem destinação específica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver formulações para geopolimerização, a partir do aproveitamento de resíduo industrial de EFS a arco submerso, e produzir protótipos de suportes para aplicação na soldagem unilateral do aço.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar os resíduos da escória de fluxo de soldagem para a produção dos suportes cerâmicos;
- Propor rotas de produção em laboratório usando EFSs como precursores de geopolímeros;
- Avaliar o suporte cerâmico produzido durante o processo de soldagem MIG-MAG (“*Metal Inert Gas – Metal Active Gas*”);
- Avaliar algumas propriedades de uma junta soldada usando a soldagem unilateral com os protótipos de suporte de solda desenvolvidos neste trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, de produzir geopolímeros a partir de EFS na fabricação de suportes cerâmicos, trará interesses nos seguintes aspectos:

1.2.1 Importância Tecnológica

- Elevação da produtividade, já que a soldagem será efetuada apenas por um lado da junta, não sendo necessário virar a peça e também não será necessário o processo de goivagem do passe de raiz;
- Identificação de novas rotas tecnológicas para o aproveitamento de resíduos industriais, no caso a geopolimerização da EFS;
- Contribuição para que, no futuro próximo, sejam fabricados suportes geopoliméricos para soldagem por empresas brasileiras, gerando novos empregos e melhorando socioeconomicamente a população envolvida;
- Colaborar com o desenvolvimento de pesquisas e aplicações de geopolímeros de EFS para outras finalidades.

1.2.2 Importância Ambiental

- Redução na extração de matérias-primas;
- Redução no descarte de resíduos em aterros sanitários;
- Eliminação da emissão de gases na atmosfera provenientes do processo de sinterização.

1.2.3 Importância Científica

- Aprimorar o conhecimento sobre os suportes cerâmicos utilizados na soldagem unilateral, avaliando e caracterizando propriedades físicas, tanto do suporte cerâmico como de juntas soldadas, obtidas a partir da utilização deste suporte.

1.2.4 Importância Econômica

- Redução dos custos com matérias-primas, devido ao reuso do resíduo;
- Redução nos custos de transporte e disposição final adequada dos resíduos em aterros sanitários;
- Redução de custos energéticos em virtude da geopolimerização ser uma forma de aglomerar materiais que elimina a etapa de sinterização.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM

No início do século XX, após a eclosão da 1ª guerra mundial, a fabricação por soldagem ganhou espaço devido às necessidades da época e passou a ser mais intensamente utilizada como processo de fabricação. Desde então, a soldagem se desenvolveu rapidamente (Brito e Paranhos, 2005).

De acordo com Annoni (2011), a soldagem é definida tradicionalmente como um processo de união, e é hoje considerada o principal processo utilizado na junção permanente de metais, devido a diversos fatores, em particular devido a sua relativa simplicidade operacional e baixo custo quando comparada a outros métodos de fabricação (Brito e Paranhos, 2005).

Muitos processos de soldagem, porém, podem ser utilizados para deposição de um material sobre superfícies, visando a recuperação de peças desgastadas ou a formação de um revestimento com características específicas (Annoni, 2011).

De fato, há muitos processos de soldagem para as mais variadas aplicações. A presença de processos de soldagem e afins se encontram nas mais diferentes atividades industriais, sejam elas de baixa tecnologia, como a indústria serralheira, até os setores de elevada tecnologia e complexidade, como a indústria petroquímica, nuclear e aeroespacial. (Brito e Paranhos, 2005).

Tais processos podem ser divididos em dois grandes grupos: o primeiro, onde a união ocorre devido à aplicação de altas pressões capazes de deformar a superfície dos metais promovendo a junção das partes, e o segundo, onde ocorre a soldagem por fusão das peças, na região a ser unida, produzindo a ligação destas na solidificação do metal fundido após resfriamento (Marques *et al.*, 2009). Não é foco da presente pesquisa abordar uma revisão sobre os diversos processos de soldagem, pode-se encontrar em (AWS, 1991) e (Marques *et al.*, 2009). A seguir, será descrito o processo de soldagem MIG-MAG, que será usado para fins desta pesquisa, e também o processo de soldagem a arco submerso, método pelo qual é gerado um resíduo que será tratado neste estudo.

2.1.1 Processo de Soldagem MIG-MAG

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção (*GMAW – Gas Metal Arc Welding*), também conhecida como soldagem MIG/MAG (*MIG – Metal Inert Gas e MAG – Metal Active Gas*), um arco elétrico é estabelecido entre a extremidade de um arame nu consumível, que é alimentado continuamente, e a peça a ser soldada. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo (Scotti e Ponomarev, 2008; Fortes, 2005)

Na figura 2.1 esta esquematizado o funcionamento do processo de soldagem MIG-MAG.

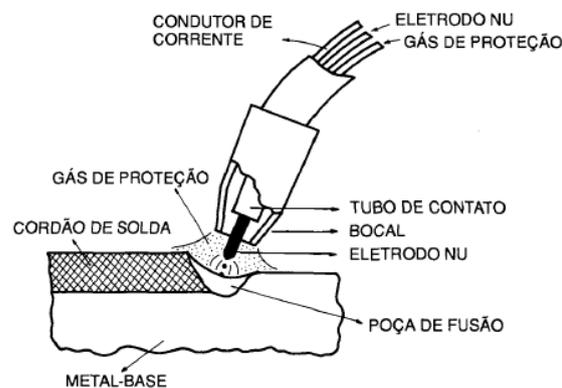


Figura 2.1: Processo de Soldagem MIG-MAG (Wainer et al., 1992).

Este processo pode ser aplicado de forma semi-automática ou de forma automática. 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).

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 2.2 são apresentados os equipamentos utilizados no processo de soldagem MIG-MAG.

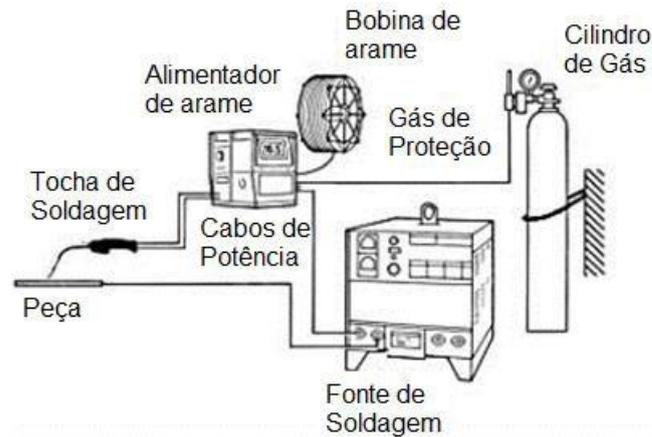


Figura 2.2: Esquema dos equipamentos para o processo MIG-MAG (LabSolda, 2015)

Uma das mais notáveis características de processos de soldagem a arco, nos quais há adição de material, é a forma em que se dá a transferência desse material para a peça a ser soldada. O modo de transferência influi grandemente na eficiência de deposição, na qualidade estética e estrutural da junta realizada, na geometria da solda, nas formas pelas quais cada operação pode ser realizada, no aporte térmico ao material de base, entre outros aspectos relacionados. Como consequência, o modo de transferência determina, junto a outras variáveis e parâmetros de soldagem, os custos e a produtividade alcançada nas operações produtivas adotadas nas empresas (Silva *et al.*, 2007).

A literatura menciona que o processo de soldagem MIG-MAG engloba três técnicas distintas de modo de transferência de metal, cada tipo com um modo pelo qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão:

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

A figura 2.3 apresenta a diferença entre os três modos de transferência de material do arame para a poça de fusão.

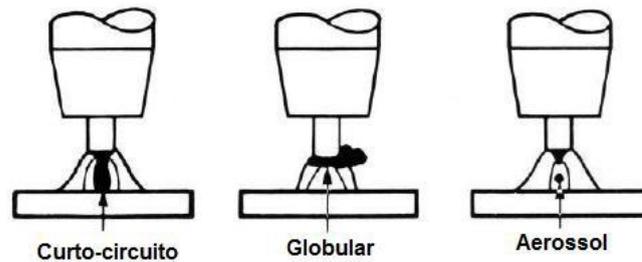


Figura 2.3: Modos de transferência do metal de solda (Fortes, 2005).

A transferência por curto-circuito ocorre quando se usam baixos valores de tensão e corrente. Este modo de transferência é frequentemente 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 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 tem o diâmetro menor que o próprio eletrodo e é axialmente direcionada. (Júnior, 2014)

No processo de soldagem MIG-MAG o metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) denominado gás de proteção, que expulsa o ar atmosférico da região de soldagem com o objetivo de evitar a contaminação da poça de solda, devido a presença de gases como nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), vapor de água (H_2O_v) e outros no ar atmosférico. Nos aços, por exemplo, o N_2 pode causar fissuração e porosidade; O O_2 pode combinar-se com o carbono (C) ou com outros elementos como o manganês (Mn) e o silício (Si), por exemplo, e formar poros e/ou inclusões no metal de solda; O hidrogênio (H), presente no H_2O_v ou óleos, pode causar porosidade e pode ocorrer fissuração sob cordão no metal de solda (Fortes, 2005).

Os gases de proteção utilizados na soldagem MIG-MAG podem ser inertes ou ativos ou, ainda, misturas destes. Três gases principais são utilizados como proteção: dois inertes, o argônio (Ar) e o hélio (He), e um ativo, o dióxido de carbono (CO_2) (Fortes, 2005; Júnior, 2014).

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. 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; Scotti e Ponomarev, 2008).

Segundo Marques, *et al.* (2009); 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.

Fortes (2005) afirma que um dos mais importantes fatores a considerar na soldagem MIG é a seleção correta do arame de solda, pois este arame, em combinação com o gás de proteção, produzirá o depósito químico que determinará as propriedades físicas e mecânicas da solda. Basicamente existem cinco fatores principais que influenciam a escolha do arame para a soldagem MIG/MAG:

- A composição química do metal de base;
- As propriedades mecânicas do metal de base;
- O gás de proteção empregado;
- O tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- O tipo de projeto de junta.

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. O arco derrete o fio formando gotículas que são arrastadas no interior do arco para a peça de trabalho. (Haidar e Lowke, 1996; Scotti e Ponomarev, 2008).

Foram desenvolvidos e fabricados arames que produzem os melhores resultados com materiais de base específicos, como arames de aço carbono, arames de aço inoxidável, arames de alumínio e suas ligas, e arames de cobre e suas ligas. Embora não exista uma especificação aplicável à indústria em geral, a maioria dos arames está em conformidade com os padrões da AWS (Fortes, 2005).

2.1.2 Processo de soldagem a Arco Submerso (SAW - *Submerged Arc Welding*)

O processo de soldagem SAW é caracterizado pelo uso de um fluxo, constituído de uma mistura de óxidos metálicos na forma granular, que submerge o arco elétrico

formado entre a ponta de um eletrodo metálico contínuo (arame sólido ou tubular) e a peça a ser soldada. A figura 2.4 ilustra o processo de soldagem a arco submerso. (Annoni, 2011).

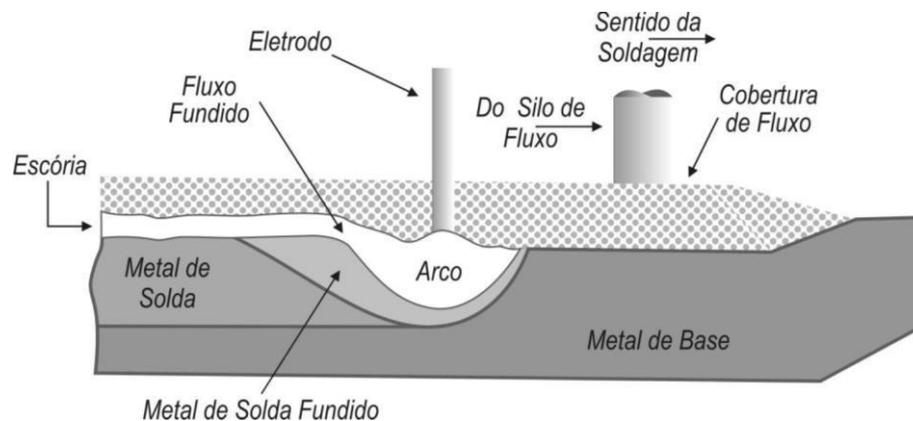


Figura 2.4: Esquema do processo de Soldagem a arco submerso (Paranhos e Souza, 1999).

No decorrer do processo de soldagem, o calor desenvolvido pela passagem do arco elétrico através da zona de soldagem funde a extremidade do eletrodo, o arco fica protegido por uma camada de fluxo que é colocado sobre a peça enquanto o eletrodo, na forma de arame, é alimentado continuamente. O fluxo na região próxima ao arco é fundido, protegendo o arco e a poça de fusão e formando, posteriormente, uma camada sólida de escória sobre o cordão. Este material pode também ajudar a estabilizar o arco e desempenhar uma função purificadora sobre o metal fundido. 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 (Modenesi e Marques, 2006; Wainer *et al.*, 1992).

O processo de soldagem SAW se diferencia por ser um processo estável e suave, sem faíscas e respingos, 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 semiautomático ou totalmente automático, pois eletrodo é alimentado mecanicamente à medida que vai sendo fundido (Wainer *et al.*, 1992). Observa-se na figura 2.5 um esquema dos componentes básicos do equipamento para a soldagem a arco submerso automático.

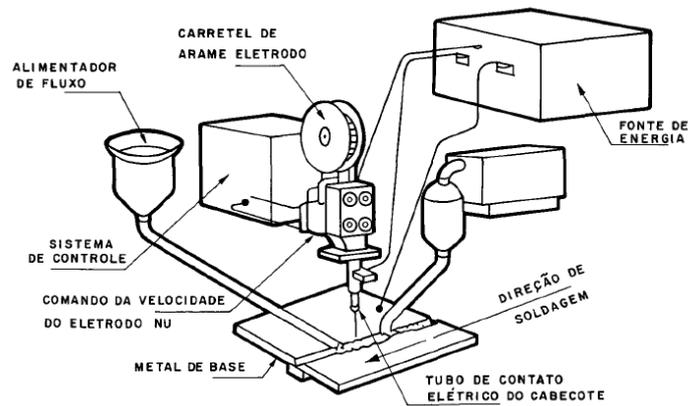


Figura 2.5: Componentes básicos do equipamento de soldagem com arco submerso automático (Wainer *et al.*, 1992).

Modenesi e Marques (2006) afirmam que este processo é muito usado na soldagem de estruturas de aço, na fabricação de tubulações e na deposição de camadas de revestimento tanto na fabricação como na recuperação de peças desgastadas. Devido à camada de fluxo e às elevadas correntes de soldagem – valores de corrente de 600 a 1500 A, consideravelmente elevados em relação às praticadas em processos de soldagem com eletrodos revestidos (Paranhos e Souza, 1999), este processo tem de ser utilizado na posição plana ou horizontal (para soldas de filete), o que torna importante o seu uso conjunto com dispositivos para o deslocamento e posicionamento das peças. Sendo, portanto, sua maior utilização na forma mecanizada ou automática, existindo equipamentos para soldagem semiautomática.

Os fluxos para soldagem a arco submerso são formados basicamente por uma mistura de óxidos e outros compostos minerais, podendo ainda conter ferro-ligas e outras adições metálicas. Podem ser classificados segundo diferentes critérios, como mostra a tabela 2.1. Destes, os mais comumente usados são os baseados na composição, nas características químicas e no método de fabricação do fluxo (Modenesi, 2004).

Tabela 2.1: Sistemas para classificação de fluxos para arco submerso (Modenesi, 2004)

(a) Classificação pela composição		
Tipos principais		Características gerais
A. Silicato de cálcio, alta sílica		Altas correntes, Tolera ferrugem, solda de baixa tenacidade
B. Silicato de cálcio		Tenacidade e resistências moderadas
C. Silicato de cálcio, baixa sílica		Boa tenacidade, alta velocidade de soldagem, não tolera ferrugem
D. Baixa sílica, alta basicidade		Boa tenacidade e resistência em solda multipasse, não tolera ferrugem, limitado a CC+, baixa destacabilidade da escória
E. Silicato de manganês		Tenacidade e resistência moderadas, tolera ferrugem, alta velocidade de soldagem, uso limitado para soldagem multipasse
F. Alta alumina		Corrente e velocidade de soldagem elevadas, boa tenacidade, tolera ferrugem, uso limitado para soldagem multipasse
(b) Classificação pelas características químicas		
Tipos principais	Tipos (a)	Características gerais
- Ácido	A, E	Alto teor de oxigênio, aumento de Si e perda de carbono na solda
- Neutro	B, F	Menor alteração na composição, menos oxigênio que o tipo anterior
- Básico	C	Menor alteração na composição e teor de oxigênio mais baixo
- Altamente básico	D	Perda de enxofre e Si e ausência de mudança de carbono na solda
(c) Classificação pelo modo de fabricação		
Tipos principais	Tipos (a)	Características gerais
- Fundido	Todos, exceto D	Menor teor/absorção de umidade, não pode ter adições que se decompõem ou se oxidam durante a fusão
- Aglomerado	Todos	Limitações na formulação são menos severas
(d) Classificação pelo uso		
Tipos principais	Tipos (a)	Características gerais
- Uso múltiplo	B	Soldas de 1, 2 ou vários passes, qualquer tipo de corrente, tenacidade e resistências moderadas, tolera ferrugem
- Uso geral	A, E	Usado quando não existem exigências quanto à tenacidade, tolera ferrugem
- Alta velocidade	F, C	Permite alta velocidade de soldagem com tenacidade boa ou moderada
- Multipasses	Todos, exceto D e alguns C	Não acumula manganês durante a soldagem
- Boa tenacidade	C, D e F	Boa tenacidade, podem existir limitações quanto ao número de passes ou tratamento térmico

Em relação a composição, a classificação dos fluxos de soldagem inclui seis tipos: (a) silicatos de cálcio de alta sílica, (b) silicato de cálcio, (c) silicato de cálcio de baixa sílica, (d) baixa sílica e alta basicidade, (e) silicato de manganês, e (f) alta alumina (Modenesi, 2004), conforme a tabela 2.1.

Em relação a classificação pela composição química, utiliza-se como critério o índice de basicidade (Fortes e Araújo, 2004), que é expresso pela equação 1.

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

Onde:

IB < 1: Fluxo ácidos;

1 < IB < 1,5: Fluxos neutros;

IB > 1,5: Fluxos básicos.

Em relação ao processo de fabricação, os fluxos de soldagem são classificados em fluxos aglomerados e fluxos fundidos. 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 *Apud* Júnior, 2014). O granulado é geralmente sinterizado entre 600°C e 900°C em fornos, depois, moído, peneirado e embalado (Paranhos e Souza, 1999).

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 conseguir dimensões requisitadas para assegurar as características apropriadas desse processo de soldagem (Paranhos e Souza, 1999). A granulação fina é utilizada nas soldagens com correntes baixas, o que permite penetração menor e um acabamento mais uniforme do cordão de solda, enquanto que a granulação grossa se presta às correntes mais altas (Araújo, 2006).

2.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Resíduo sólido é definido como o material no estado semissólido ou sólido que resultam de atividades de origem industrial, hospitalar, agrícola, e etc. Inclui-se também nessa definição alguns líquidos específicos que não devem ser lançados em esgotos ou corpos de água. Esses resíduos sólidos classificam-se em: Perigoso e Não perigoso, sendo este último subdividido em duas subcategorias: Inertes e Não inertes. Os resíduos perigosos possuem uma ou mais características descritas a seguir: Inflamabilidade; Corrosividade; Reatividade; Toxicidade; Patogenicidade. A figura 2.6 apresenta a classificação dos resíduos sólidos (ABNT, 2004).

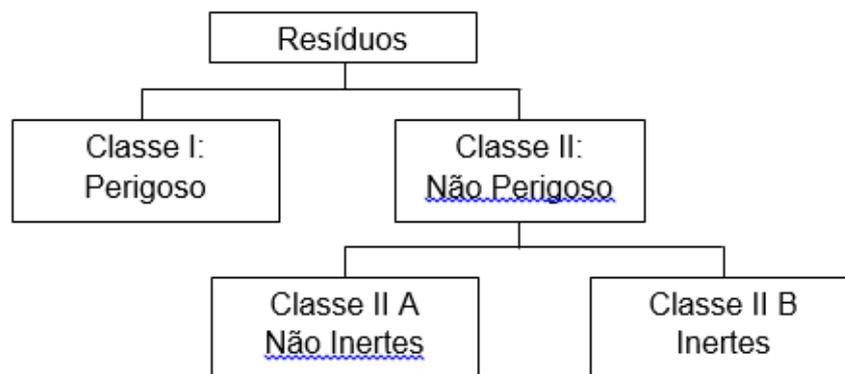


Figura 2.6: Classificação dos Resíduos Sólidos (ABNT, 2004)

Entre os resíduos Não Perigosos Inertes se enquadram 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 entre os resíduos Não Perigosos Não Inertes, se encaixam aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I e classe II B, estes podem exibir propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT, 2004).

As indústrias tradicionalmente responsáveis pela maior produção de resíduos perigosos são as metalúrgicas, as indústrias de equipamentos eletro-eletrônicos, as fundições, a indústria química e a indústria de couro e borracha (Kraemer, 2005).

Pode-se considerar como 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 (Cruz, 2005). Deste modo, o Conselho Nacional de Meio Ambiente através da resolução CONAMA nº313 de 2002, dispõe sobre inventário nacional de resíduos sólidos industriais como instrumento de política de gestão de resíduos, e resolve em seu **Art 1º** que os resíduos existentes ou gerados pelas atividades industriais serão objeto de controle específico, como parte integrante do processo de licenciamento ambiental.

Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10, contém mecanismos importantes para permitir o avanço necessário ao Brasil no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos.

A tabela 2.2 mostra que o Ministério do Meio Ambiente, através do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, estima que o Brasil produza atualmente mais de 97 milhões de toneladas por ano somente de resíduos industriais.

Tabela 2.2: Dados da geração de resíduos sólidos industriais do Brasil (MMA, 2012)

Unidade Federativa	Resíduos perigosos (t/ano)	Resíduos não perigosos (t/ano)	Total (t/ano)
AC*	5.500	112.765	118.265
AP*	14.341	73.211	87.552
CE*	115.238	393.831	509.069
GO*	1.044.947	12.657.236	13.702.273
MT*	46.298	3.448.856	3.495.154
MG*	828.183	14.337.011	15.165.194
PB*	657	6.128.750	6.129.407
PE*	81.183	7.267.930	7.349.513
PR**	634.543	15.106.393	15.740.936
RN*	3.363	1.543.450	1.546.813
RS*	182.170	946.900	1.129.70
RJ**	293.953	5.768.562	6.062.515
SP**	535.615	26.084.062	26.619.677
Total	3.786.391	93.869.046	97.655.438

*Inventários Estaduais de Resíduos Sólidos Industriais

**Panorama das Estimativas da Geração de Resíduos Industriais – ABETRE/FGV

Um resíduo não é, por princípio, algo nocivo. Muitos resíduos podem ser transformados em subprodutos ou em matérias-primas para outras linhas de produção (Tondowski, 1998).

Conforme Souza e Silva (1996), 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. Essas soluções podem ser adotadas pelas seguintes medidas mostradas na figura 2.7.

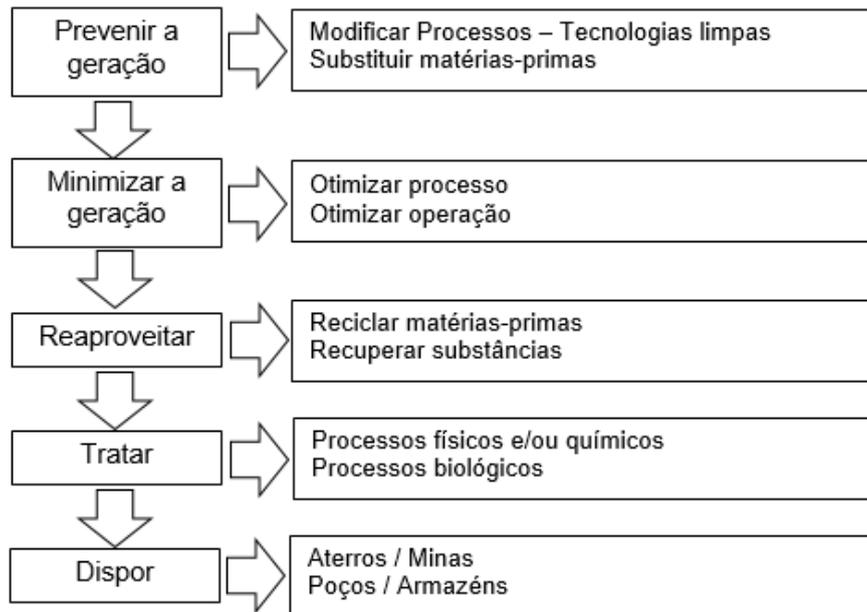


Figura 2.7: Gerenciamento de resíduos (Wiemes, 2003)

Muitas vezes, de acordo com Tondowski (1998), uma empresa quer tratar os seus resíduos, porém todo tratamento de resíduos representa custo considerável. Mesmo o reaproveitamento de resíduos gera custo e isso significa que, se uma determinada empresa fizer o tratamento e o seu vizinho ou competidor não o fizer, isto colocará a primeira empresa numa posição de menor competitividade no mercado.

2.2.1 EFS como Resíduo Industrial

Durante o processo de soldagem SAW, o fluxo granulado funde-se parcialmente, formando uma camada de escória líquida que depois se solidifica. Este material sólido, denominado de EFS, é considerado um resíduo sólido (Viana *et al.*, 2010).

A EFS é inerente ao processo de soldagem SAW e requer grandes espaços para dispor esse tipo de resíduo, que não é biodegradável e não se decompõe com o tempo. A matéria prima para a produção do fluxo de soldagem (FS) é oriunda de mineração de recursos naturais não renováveis, representando também um problema ambiental. A geração da EFS é, portanto, um desperdício e gera custo para sua destinação final (Singh e Pandey, 2009).

No entanto, mesmo não sendo possível parar a geração de escória, porque é um subproduto do processo de soldagem, o impacto ambiental pode ser minimizado por meio da reciclagem da EFS para utilização como um FS do mesmo processo de soldagem (Singh e Pandey, 2009).

No ano de 2010, foi estimado que o Brasil produziu em média 750 toneladas por mês de EFS, sendo o Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo, os responsáveis por 75% deste montante (Viana *et al.*, 2010). Usualmente o destino final da EFS são os aterros sanitários industriais simplesmente por não haver metodologias desenvolvidas para reaproveitamento de resíduo de escória de soldagem de maneira sustentável do ponto de vista ambiental e econômico. Este tipo de disposição pode causar impacto ambiental negativo uma vez que o resíduo de escória de soldagem é um material não biodegradável (Morete *et al.*, 2006a).

Assim, a busca de alternativas tecnológicas para a reciclagem das EFS é de alto interesse econômico e ambiental para as indústrias, sendo uma novidade com poucas pesquisas realizadas a respeito (Viana, 2007).

2.2.1.1 Caracterização das EFS

A Figura 2.8 mostra uma EFS típica, onde é possível observar que o resíduo não é homogêneo. Exibe uma camada interna lisa, que esteve em contato direto com o cordão de solda, e uma camada externa rugosa, de grãos de fluxo de soldagem que não fundiram totalmente durante a soldagem. A coloração da EFS pode variar de cinza claro até cinza escuro, dependendo do tipo de FS utilizado na soldagem. A largura e

a espessura das EFS também podem variar em função do valor da intensidade de corrente e da velocidade do processo de soldagem. A EFS quebra-se com relativa facilidade e pode ser fragmentada com auxílio de um britador (Annoni, 2011).



Figura 2.8: Escória de soldagem a arco submerso (Annoni, 2011).

De acordo com o resultado do ensaio de lixiviação apresentado na tabela 2.3, o extrato do lixiviado não contém nenhum poluente em concentração superior aos valores limitados pela NBR 10004 (Viana, 2007). Desta forma, as EFS não se enquadram como resíduo perigoso.

O resultado do ensaio de solubilização de Viana(2007), apresentado na tabela 2.4, segundo a NBR 10004 que classifica os resíduos inertes em função da potabilidade da água da concentração solubilizada de constituintes do resíduo, mostrou teores de cromo total e de alumínio superiores ao limite máximo prescrito, sendo, então, a EFS classificada como um resíduo classe II (não-inerte).

Tabela 2.3: 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 2.4: 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

Viana (2007), afirma que nenhuma das EFS, seja ácida, básica ou neutra, apresenta periculosidade; inflamabilidade; corrosividade; reatividade; patogenicidade

e toxicidade; e por isso classificou as EFS, como resíduo de Classe II-A, isto é, não perigoso e não-inerte.

2.2.1.2 Finalidade para a EFS

Viana et al (2010) afirma, que o descarte da EFS no Brasil eleva os custos das empresas com transporte e taxas para uso dos lixões particulares, e percebe que há grande interesse das indústrias do setor metal-mecânico em encontrar aplicação tecnológica para o resíduo de EFS de forma ambiental e economicamente viável.

Não foram encontradas na bibliografia nenhuma aplicação tecnológica prática das EFS, porém, foram encontrados estudos de sua utilização, conforme será apresentado a seguir um breve levantamento de possíveis usos da EFS.

2.2.1.2.1 Reciclagem da EFS para uso como Fluxo de Soldagem

Uma das primeiras maneiras de reuso da EFS foi transformá-la, por meio da reciclagem, em fluxo de soldagem para ser utilizada no mesmo processo de soldagem que a gerou. Algumas empresas reutilizam a EFS como fluxo de soldagem, embora não haja destinação útil para o resíduo do fluxo de soldagem (Singh e Pandey, 2009; Júnior, 2014)

A reciclagem de EFS para reuso como fluxo de soldagem do mesmo processo é conhecida há décadas. Garg e Singh (2016) reciclaram com sucesso EFS gerada durante soldagem de revestimento de aço inoxidável, para reutilização como fluxo de soldagem do mesmo processo. O custo do fluxo de soldagem reciclado mostrou ser 73% menor do que o custo do equivalente fluxo de soldagem comercial. Isto mostra claramente que, a qualidade dos revestimentos produzidos por EFS reciclada está em conformidade com aqueles cujo processo utiliza fluxo de soldagem comercial.

Apesar dos usos mencionados acima, os fabricantes de fluxo de soldagem não recomendam a reutilização da EFS para este fim. Recomendam a utilização de seus fluxos de soldagem comerciais como forma de garantir a qualidade da soldagem, visto que, o uso de fluxo de soldagem reciclado reduz a capacidade máxima de cada estação de soldagem e adiciona variáveis que afetam negativamente a qualidade de soldagem (The Lincoln Electric Company, 2010).

2.2.1.2.2 Outras aplicações para EFS

Os resultados experimentais da pesquisa de Morete et al (2006 b), comprovaram que a EFS pode ser usada como uma matéria-prima alternativa na composição de massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha. Uma vez que, com até 10% em peso de resíduo de escória os corpos cerâmicos apresentaram propriedades tecnológicas promissoras.

Os resultados da pesquisa de Viana (2007), comprovaram que EFS possui um desempenho satisfatório como agregado miúdo na produção de argamassas de múltiplo uso, substituindo totalmente a areia natural, reduzindo o impacto ambiental causado pela extração de areia e pela deposição sem controle deste resíduo em aterros sanitários.

Na intenção de reduzir o impacto ambiental provocado pela EFS, Annoni (2011) realizou pesquisas para desenvolver de uma metodologia tecnologicamente capaz de reaproveitar metais contidos na escória como matéria-prima secundária para ser utilizada com outras finalidades. Verificou-se que a lixiviação das EFS é difícil, mas possível de ser executada, no entanto ainda é necessário ser melhor estudada e otimizada.

Júnior (2014), avaliou a utilização de EFS desenvolvendo formulações para protótipos de suporte cerâmicos para aplicação na soldagem unilateral, e, deste modo, contribuir com a redução do impacto ambiental causado pela disposição inadequada do resíduo industrial de EFS. Na seção 2.3.4, são apresentados mais detalhes sobre esta pesquisa.

Pode-se observar por meio destes resultados, um comprometimento com a questão ambiental com objetivo de encontrar formas mais eficientes de destino das EFS. Estas, porém, continuam a ser perdidas enquanto recursos, assim, é necessário redefinir o ônus com a destinação desse tipo de resíduo.

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 (Júnior, 2014).

De acordo com Paranhos e Souza (1999), as características de juntas e a eliminação da necessidade de virar a peça para soldar o lado oposto suprimiram trabalhos extras de preparação na montagem antes da soldagem. Deste modo, a soldagem unilateral tem maior eficiência, podendo ser utilizada em processos automáticos, semi-automáticos e manuais. A automatização aumenta a produção e recomenda-se o seu uso em fabricação de grande porte como, por exemplo, na construção naval de plataformas de petróleo.

Uma característica que diferencia a soldagem unilateral da soldagem convencional (pelos dois lados) é a presença de suporte tipo metálico (aço ou cobre) ou tipo cerâmico, na junta a ser soldada, para conter o material fundido submetido ao processo de soldagem, que pode ser retirado ou não no término do processo de soldagem (Fortes, 2005; Andrade, 2007).

A figura 2.9 apresenta o posicionamento do suporte na junta soldada.

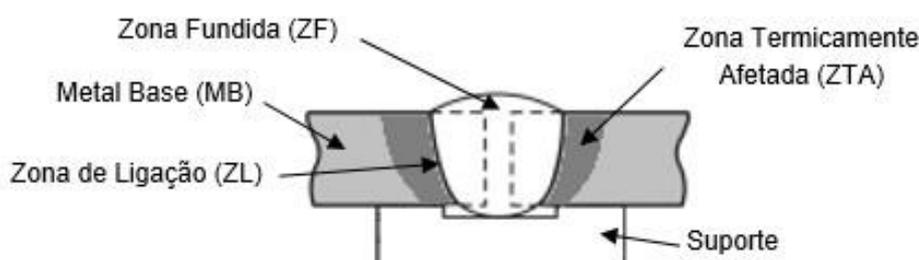


Figura 2.9: Posição do suporte junto com o cordão de solda (Modenesi e Marques, 2006).

Os suportes são empregados quando a massa do metal base não é suficiente para prover um apropriado apoio para conter a poça de metal líquido, ou quando se almeja alcançar uma penetração total em um único passe (Paranhos e Souza, 1999). Além disso, ressalta-se algumas vantagens na utilização da soldagem unilateral, como 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 (Muir, 1985).

Andrade (2007) afirma que 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.

Existem alguns tipos de suportes utilizados na soldagem unilateral. A figura 2.10, apresenta juntas com suporte não fusível de Cobre (cobre junta), que é removível após terminar o processo de soldagem; A figura 2.11 mostra um suporte com cama de fluxo, também removível, que utiliza o fluxo de solda do processo de soldagem por Arco Submerso, onde é formada uma espécie de cama de fluxo sob a peça. A figura 2.12 apresenta esquematicamente um suporte por passe de selagem na raiz, que 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 2.13 exemplifica a utilização do suporte metálico fusível em tira. Neste processo, a solda pode penetrar e fundir-se com o material do suporte, podendo ser removível ou permanecer soldada à peça (Paranhos e Souza, 1999).

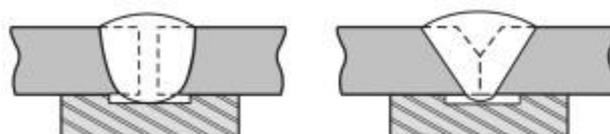


Figura 2.10: Suporte não fusível de Cobre (cobre junta) (Paranhos e Souza, 1999).

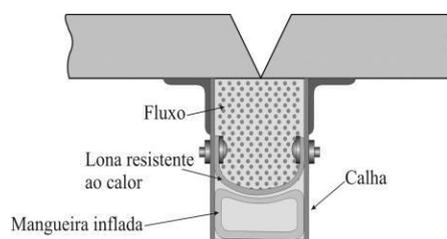


Figura 2.11: Junta com suporte com cama de fluxo (Paranhos e Souza, 1999).

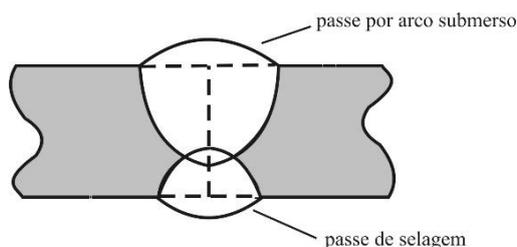


Figura 2.12: Suporte por passe de selagem na raiz (Paranhos e Souza, 1999).

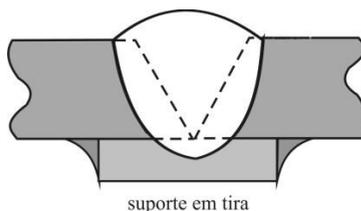


Figura 2.13: Suporte metálico fusível em tira (Paranhos e Souza, 1999).

2.3.1 Soldagem Unilateral com Suporte Cerâmico

Dentre os diversos métodos para suporte da poça de solda, o suporte cerâmico é usado atualmente com frequência na soldagem do aço (Júnior, 2014).

Andrade (2007), considera que na soldagem unilateral existe uma enorme diversidade de situações de fabricação durante a produção de peças e equipamentos, como posição de soldagem, tipo de junta, tipo de chanfro, alinhamento/desalinhamento da junta, juntas dissimilares, peças de formato reto ou curvado e processo de soldagem aplicável, é exigido que o suporte cerâmico se adapte as situações e, por conseguinte, possua diversas formas e dimensões de modo a atender às inúmeras necessidades.

Existem vários fabricantes de suportes cerâmicos, sendo que os maiores estão presentes nos países que possuem um parque industrial naval desenvolvido como: Singapura, Coréia do Sul e Japão, além dos Estados Unidos. De modo geral, fornecem o produto com as mesmas características e formatos, as pequenas variações e opções entre eles ocorrem devido à demanda pelo atendimento as aplicações específicas (Andrade, 2007).

A variedade das configurações de suportes cerâmicos encontra-se na figura 2.14. As opções com relação aos tipos de junta e posições de soldagem são mostradas na figura 2.15.

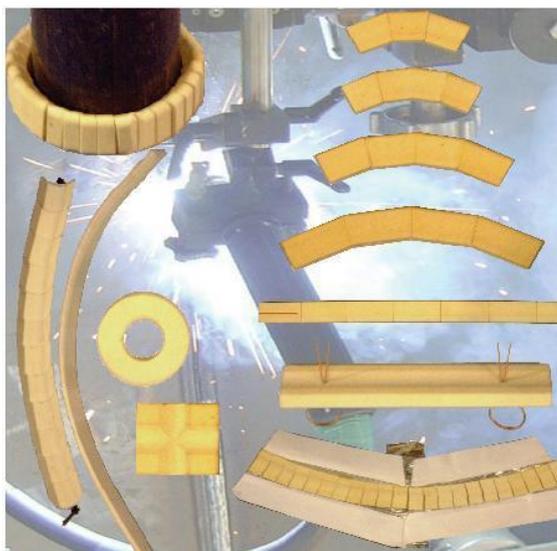


Figura 2.14: Variedade de suporte cerâmico KATBAK® (Gullco, 2013)

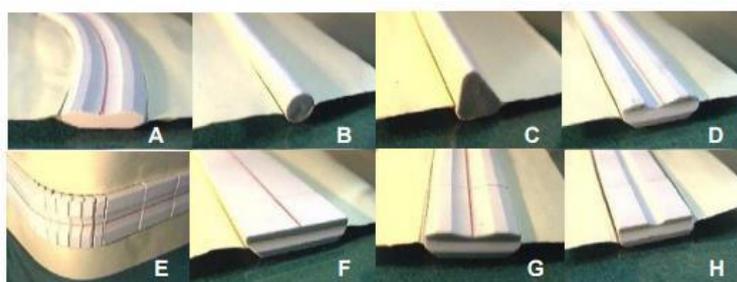


Figura 2.15: Ilustrativo da variedade de aplicação do backing cerâmico, marca LASCENTRUM®: (A) cordão circular, (B) e (C) chanfro tipo K e X, (D) posição horizontal, (E) posicionamento entre chapas de 90°, (F), (G) e (H) posição plana e vertical, Folheto HYUNDAI- *Apud* (Andrade, 2007)

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

- Suporte de fixação com fita adesiva de alumínio, mostrado na figura 2.16;
- Suporte de fixação com auxílio de base metálica, mostrado na figura 2.17;

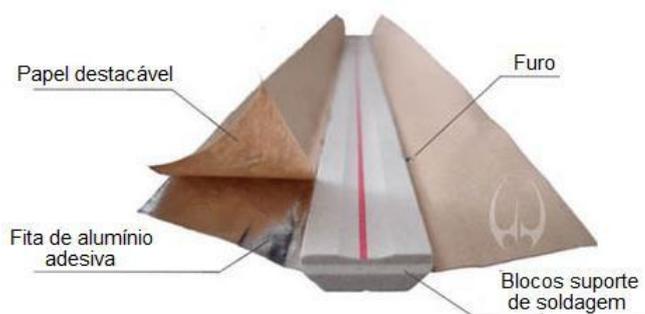


Figura 2.16: Esquema de fixação do suporte cerâmico com fita adesiva de alumínio (Obsidian Welding Backing, 2015).

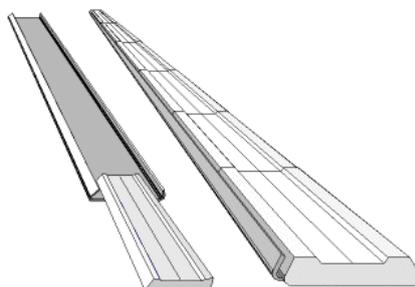


Figura 2.17: Esquema de fixação do suporte cerâmico suportado por base metálica (Cantrell, 1982)

A fita adesiva de alumínio, além de ser a mais adequada à fixação do suporte cerâmico à peça soldada é, ainda, a mais difundida nas aplicações industriais da soldagem unilateral (Andrade, 2007).

Devido ao 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 (Cantrell, 1982). Na figura 16, tem-se apresentado a localização dos furos na fita adesiva.

2.3.2 Produção do Suporte Cerâmico

As matérias primas para produção do suporte cerâmico consistem de óxidos refratários, como Cordierita, Magnesita e Bauxita, e aditivos, como Bentonita e os silicatos de sódio (Viana, 2009).

Os materiais refratários além de proporcionar um isolamento térmico, possuem a capacidade de resistir elevadas temperaturas sem se fundir e a capacidade de

continuar não-reativo e inerte quando expostos em ambientes severos (Callister, 2008).

Aplicações típicas dos materiais refratários incluem os revestimentos de fornos para o refino de metais, fabricação de vidros, tratamentos térmicos metalúrgicos e geração de energia (Sanchez, 2004 apud Vicentini, 2013). Viana (2009) utilizou o mineral refratário Cordierita para fabricação de suportes cerâmicos para soldagem, e, concluiu que, a junta soldada com o suporte produzido apresentou boa soldabilidade.

Os aditivos são utilizados em pequenas porções na formulação de modo a contribuir na aglomeração e na plasticidade da massa cerâmica. Viana (2009) usou a bentonita sódica e o silicato de sódio neutro como aditivos no desenvolvimento de suporte cerâmico para soldagem unilateral.

Os silicatos de sódio, além de servirem de aditivos para a produção de suportes cerâmicos convencionais, também servem de aditivos para a produção de Geopolímeros (GP), e por isso este assunto será tratado no item 2.5.

Formulações e protótipos de suportes cerâmicos foram desenvolvidos por Almeida (2009), que identificou uma sequência de produção em escala de laboratório e também avaliou as variáveis de fabricação do suporte cerâmico, como a temperatura de sinterização e pressão de compactação.

A produção de suportes cerâmicos em laboratório de Almeida (2009), seguiu o ciclo tradicional de fabricação dos materiais cerâmicos, que envolve trituração, homogeneização e peneiramento das matérias-primas, conformação, secagem e sinterização, e se mostrou apropriada para a fabricação do suporte cerâmico para fins de aplicação na soldagem unilateral.

2.3.3 Suportes Alternativos para Soldagem Unilateral

Objetivando uma evolução do suporte cerâmico convencional, surgiram propostas de inovação tecnológica como os trabalhos de Tatagiba e Paranhos (2011); e de Gurgel e Paranhos (2015), que realizaram testes de modelos de suporte de solda à base de tecidos de fibra de vidro e fibra cerâmica, e o trabalho de Júnior (2014), que pesquisou no sentido de desenvolver um suporte cerâmico a base de resíduo de EFS.

2.3.3.1 Suportes de Solda de Fibra de Vidro e Fibra Cerâmica

A literatura evidencia que a fibra de vidro e fibra cerâmica apresentam propriedades e características que são comuns às cerâmicas, como por exemplo a temperatura de fusão elevada (aprox. 1760° C). O baixo custo de fios contínuos e tecidos de fibra de vidro e a capacidade de moldar-se sobre qualquer superfície demonstram seu potencial uso como materiais para suporte da poça de solda (Gurgel e Paranhos, 2015; Tatagiba e Paranhos, 2011).

A figura 2.18 exibe modelos de suporte de solda de tecido de fibra de vidro e de tecido de fibra de vidro disposto com fibra cerâmica usados na pesquisa de Tatagiba e Paranhos (2011).

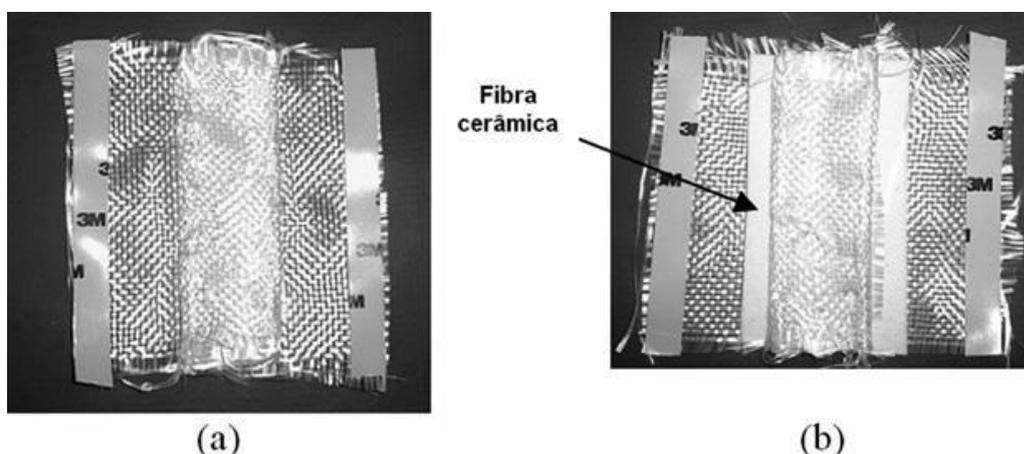


Figura 2.18: (a) Suporte de solda de tecido de fibra de vidro; (b) Suporte de solda de tecido de fibra de vidro conjugado com fibra (Tatagiba e Paranhos, 2011).

Tatagiba e Paranhos (2011) concluíram que os materiais à base de fibra de vidro e fibra cerâmica foram eficientes para suportar a poça de solda líquida, sem que houvesse a formação de gases durante a soldagem e proporcionou um cordão de solda isento de descontinuidade, ou seja, com acabamento adequado; E o modo de fixação do suporte de solda na junta soldada com tecido de fibra de vidro, mostrou ser efetivo como alternativa a fita adesiva de alumínio utilizado em suporte cerâmico.

Gurgel e Paranhos (2015), testaram diferentes diâmetros de cilindros de fibra de vidro e de fibra cerâmica, como mostra a figura 2.19, e mostram nos seus resultados que os suportes de solda cilíndricos de fibra de vidro e de fibra cerâmica, além de possuírem excelentes propriedades refratárias, ofereceram vedação da abertura de raiz, contendo adequadamente a poça de solda fundida, produzindo um passe de raiz isento de descontinuidades, com adequado formato e geometria do

cordão. Apresentando, portanto, excelentes perspectivas para a soldagem do passe de raiz em chanfros duplo V em aplicações na indústria naval e no setor metal-mecânico.

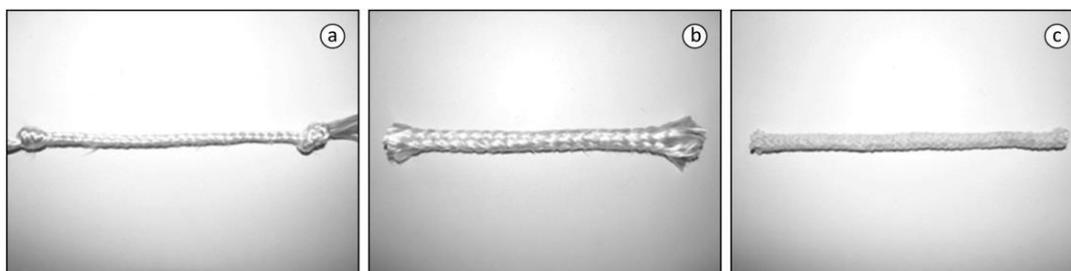


Figura 2.19: Suporte de solda cilíndrico de fibra de vidro com diâmetro de (a) 4,8 mm e (b) 9,5 mm; suporte de solda cilíndrico de fibra cerâmica de (c) 6,4 mm (Gurgel e Paranhos, 2015).

2.3.3.2 Suporte com EFS

De acordo com Júnior (2014), as formulações com EFS básica ou semi-básica + silicato de sódio + bentonita apresentaram bons resultados. Já as formulações 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.

A formulação com 93% de EFS básica + 5% de bentonita + 2% de silicato de sódio, e a formulação com 93% EFS semi-básica + 5% de bentonita + 2% de silicate de sódio, em porcentagem de peso do corpo de prova, por apresentarem melhores resultados, foram selecionadas para avaliação dos parâmetros de soldagem 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 (Júnior, 2014).

Utilizando os seguintes parâmetros de soldagem: 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, Júnior (2014) constatou que não houve 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. E concluiu, de acordo com as propriedades mecânicas e microdureza que a junta soldada apresentou, 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.

Por fim, Júnior (2014) determinou que a utilização de EFS na confecção de suportes para soldagem unilateral é uma nova aplicação deste resíduo industrial, e registrou patente de sua invenção no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (Patente Nº BR1020150105320, 2015).

Em busca de novas alternativas de produção de suporte para soldagem, e visando colaborar no desenvolvimeto de pesquisas para aproveitamento de resíduo de EFS, este trabalho propõe uma no rota de produção de suporte de solda por meio de geopolimerização de EFS.

2.4 GEOPOLÍMEROS

Pretende-se neste trabalho desenvolver um novo suporte para soldagem unilateral de a partir do reaproveitamento de EFS, descrita no item 2.1.2, como um precursor para a produção de Geopolímero (GP).

Em 1972, Davidovits denominou “geopolímeros” os aluminossilicatos tridimensionais formados rapidamente à baixa temperatura por aluminossilicatos de ocorrência natural (Blissari et al., 2011). Os chamados GPs, no entanto, só foram descritos pela primeira vez em patentes pelo Prof. J. Davidovits em 1981, onde estão apresentados vários exemplos de mistura de reagentes e processos de obtenção (Geo-Pol, 2016).

A geopolimerização pode ser modelada e conduzida em sistemas cimentícios de modo similar ao processo geológico de formação de rochas sedimentares, como a transformação de algumas rochas vulcânicas em zeólitas, que ocorre a baixas pressões e temperaturas. Esses sistemas cimentícios de aluminossilicatos alcalinos foram denominados primeiramente de “solossilicatos” (Blissari et al., 2011).

Os GPs são também conhecidos por polissialatos (grande cadeia molecular constituída de silício, oxigênio e alumínio). Sialato é uma abreviação para sílico-óxido-aluminato. Os polissialatos apresentam características particulares que revelam o seu grande potencial de aplicação como aglomerante, em substituição ao cimento Portland. Trata-se de uma adaptação moderna dos processos de estabilização de solos caulíníticos ou lateríticos com cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), feita pelos antigos Romanos e Egípcios na confecção de peças estruturais. Inclusive, Davidovits apud GeoPol (2016) afirmou em sua publicação, intitulada “The Pyramids: An Enigma Solved”, que, as grandes pirâmides do Egito foram erguidas, há 4.500 anos, com blocos moldados com este material (Geo-Pol, 2016).

Maijid (2009), afirma que os GPs são polímeros inorgânicos com estrutura 3D que apresentam propriedades físicas e mecânicas superiores. Esta nova geração de materiais tem potencial de aplicações em fibras compósitas resistente ao fogo, concretos para aplicação infraestrutural, selantes e cerâmicas. Os GPs são substitutos ambientalmente amigáveis do cimento Portland, por isso despertou interesse entre cientistas e engenheiros nos anos recentes (Rickard et al., 2011): os GPs em muitas aplicações não só reduzem a emissão de gases do efeito estufa, como também consomem grande volume de resíduos industriais como por exemplo cinzas volantes, resíduos de mina e escória metalúrgica.

GPs de alumino silicato de potássio, ou poli(sialato-siloxo), tem sido desenvolvidos para aplicações de painel a prova de fogo do interior de cabines de aviões, compósitos estruturais marinhos e infraestrutura (Lyon, *et al.*, 1997).

GPs também tem sido estimado para aplicação de uso em altas temperaturas, fazendo uso de sua estabilidade térmica intrínseca. Materiais geopoliméricos feitos para aplicações em altas temperaturas não necessariamente requerem elevada resistência mecânica. A título de exemplo, para revestimento à prova de fogo uma elevada resistência a compressão não é necessária, todavia essa resistência se faz essencial para aplicações estruturais, como colunas e túneis. Mas uma característica significativa do material em altas temperaturas é sua estabilidade durante e após a exposição à elevada temperatura (Rickard *et al.*, 2011).

2.4.1 Matérias-Primas para Produção de GPs

Os GPs consistem basicamente de material ligante de silicato-aluminato sólido e um ativador alcalino líquido (Weil *et al.*, 2005).

Os materiais de base para GPs baseado em alumino-silicatos, devem ser ricos em silício (Si) e alumínio (Al). Esses podem ser minerais naturais como Caulinita, argila, etc. Alternativamente, materiais subprodutos como cinzas, escória, cinzas de casca de arroz, etc. podem servir de material de base. A escolha do material de base para produzir o GP depende de fatores como disponibilidade, custo, tipo de aplicação, e demanda específica de utilização. (Rangan, 2014).

Dependendo das matérias-primas e das condições de processamento, os GPs podem exibir uma ampla variedade de propriedades e características, incluindo alta resistência à compressão, baixa contração, resistência à ácidos, resistência ao fogo e baixa condutividade térmica. Essas propriedades, no entanto, não são necessariamente comuns a todas as formulações geopoliméricas (Duxson, *et al.*, 2007).

As características desejadas da matéria prima para GPs dependerão da aplicação final. Assim, GPs feito para aplicação em altas temperaturas requerem matérias primas diferentes dos GPs feitos para uso em aplicações estruturais. Por exemplo, pesquisas anteriores têm mostrado que elevado nível de ferro nas cinzas volantes tem efeito negativo na performance dos GPs em altas temperaturas. O efeito de outras características dos GPs em altas temperaturas, como a tendência a

cristalizar e o efeito sob a temperatura de fusão não foram encontrados na literatura (Rickard *et al.*, 2011).

2.4.1.1 Metacaulim

Lima *et al.* (2005) utilizaram o caulim tratado termicamente como fonte de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) para produzir GP, além de silicato de sódio alcalino ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), como fonte complementar de SiO_2 , e KOH para garantir o pH necessário para a copolimerização.

Pesquisas do Instituto Militar de Engenharia (IME), analisaram como a adição de diferentes porcentagens de metacaulinita influenciam compósitos geopoliméricos (pasta e argamassa), com escória de alto-forno endurecido por ativação alcalina, que induzem reações de polimerização inorgânica para produzir cimentos geopoliméricos (Lima *et al.*, 2005).

Em sua pesquisa, Barbosa *et al.* (2000) sintetizou GP a partir de metacaulinita, preparada pelo aquecimento da caulinita a 700°C por 6 horas, e outros reagentes como silicato de sódio e hidróxido de sódio.

A matéria prima para a produção do metacaulim é o caulim que é uma argila formada pela alteração de uma variedade de rochas amorfas e cristalinas. Sendo que a caulinita é o principal argilomineral constituinte do caulim (Bigno, 2008).

Bigno (2008) afirma que, o principal componente do Caulim é a caulinita, e existem também outros componentes em menor concentração tais como o quartzo, feldspato, mica e rutilo, que são inertes, como se observa na figura 2.20.

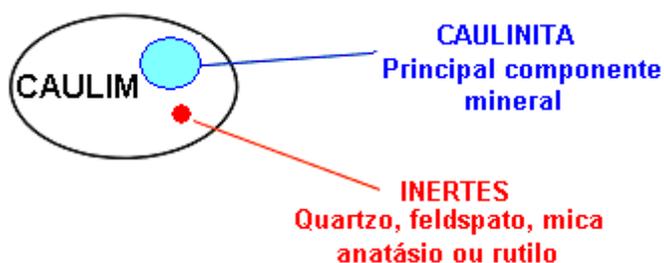


Figura 2.20: Principais componentes do caulim (Bigno, 2008)

Bigno (2008) afirma que o metacaulim é produzido através de tratamento térmico do caulim em temperaturas entre 600 e 850°C . O processo objetiva remover

apenas os grupos estruturais de hidroxila e criar instabilidade química pela mudança do número de coordenação do alumínio, de seis para quatro.

A dissolução parcial do metacaulim, como também de outros aluminossilicatos em meio alcalino, formaram uma matriz amorfa de silicatos com partículas nanocristalinas dispersas, sendo que os detalhes desse processo ainda não foram completamente esclarecidos (Dias, 2008).

2.4.1.2 Ativadores Alcalinos

A álcali-ativação, muitas vezes chamada de geopolimerização, é um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfos e/ou metaestáveis) em um compósito bem compactado e cimentante (Palomo *et al.*, 1999). Para que ocorra a polimerização é necessário um meio fortemente alcalino para ser possível dissolver certa quantidade de sílica e alumina, assim como hidrolisar a superfície das partículas das matérias-primas. Este meio pode ser conseguido utilizando soluções alcalinas (Van Jaarsveld *et al.*, 1997)

A natureza e a concentração dos ativadores têm influência direta na estrutura e nas propriedades mecânicas dos produtos originados na geopolimerização. A escolha do ativador utilizado no processo de geopolimerização deve basear-se nas características dos precursores de origem (Bezerra *et al.*, 2013).

O ativador pode ser simples ou composto. A diferença está no fato de se utilizar um ativador constituído por uma única substância ou por duas ou mais substâncias, que podem ser silicatos alcalinos, como o silicato de sódio, e/ou hidróxido de sódio ou de potássio (Silva, 2011)

De acordo com Bezerra (2013), a concentração do ativador alcalino é muito importante no processo de geopolimerização. O aumento da concentração dos íons hidróxidos aumenta a solubilidade do material. Em contrapartida, a formação do GP é atrasada se a concentração do ativador for elevada, pois o aumento na concentração de espécies iônicas limita a mobilidade dos íons causando retardamento na formação de estruturas coaguladas.

Dentre os ativadores químicos mais comuns estão a cal hidratada (Ca(OH)_2), os sulfatos de cálcio hidratados como a gipsita, hemidrato e a anidrita, hidróxidos de metais alcalinos como KOH e NaOH, os silicatos alcalinos de sódio ou potássio ($\text{R}_2\text{O.nSiO}_2$), o cimento Portland ou mesmo mistura destes compostos (John, 1995).

Mahendran e Arunachalam (2016) usaram, em sua pesquisa sobre desempenho de cinzas industriais e escórias de cobre como base para concreto geopolimérico, uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio na proporção de 1:2.5. Sendo, a solução de NaOH(aq) de concentração 14M e o Silicato de sódio de proporção 2:1 de Na₂ para SiO₂.

2.4.1.2.1 Hidróxido de Sódio e de Potássio

Os hidróxidos de sódio (NaOH) e potássio (KOH) constituem soluções aquosas de pH elevado, que acelera a dissolução da escória. Por outro lado, facilitam a precipitação do CaO pois diminuem sua solubilidade. Os silicatos alcalinos também produzem soluções de pH relativamente elevados, ricas em SiO₂, acelerando a precipitação dos produtos de hidratação.

Segundo a EMBRAPA (2001), o NaOH em solução aquosa é um líquido incolor, transparente, sem cheiro, meio viscoso, dependendo da concentração. Recomenda-se manusear com cuidado, evitando todo tipo de contato e inalação de névoa, devido a ser extremamente corrosivo, podendo causar irritação do nariz, garganta e trato respiratório superior, em contato com a pele, podendo causar queimaduras severas com ulcerações profundas e cicatrizes permanentes, no contato com os olhos pode causar ulceração da córnea e conjuntiva e pode levar a uma opacidade permanente da córnea, com perda de visão. Se ingerido, causa queimaduras severas na boca, garganta, esôfago e no estômago com sangramento, vômito, diarreia, forte dor abdominal, colapso circulatório e até a morte.

O mesmo cuidado deve ser tomado com o manuseio do KOH, visto que apresenta características físicas e químicas muito parecidas com o NaOH (UNICAMP, 2009).

A tabela 2.5 apresenta algumas propriedades físico-químicas do Hidróxido de sódio.

Tabela 2.5: Propriedades Físico-químicas do NaOH (EMBRAPA, 2001)

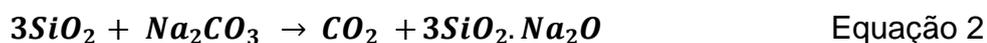
Propriedades Físico-Químicas do Hidróxido De Sódio	
Ponto de ebulição	149°C
Ponto de fusão	12°C
Densidade relativa (água = 1)	1,53
Pressão de vapor, mmHg a 20°C	1,5
Solubilidade em água	Muito solúvel

2.4.1.2.2 Silicato de Sódio

John (1995) afirma que von Fuchs, no final da segunda década do século 19, iniciou seus experimentos com os silicatos de sódio que chamou de “wasserglass” ou “vidros líquidos”, por apresentarem elevada solubilidade em água, e observou que seus produtos poderiam ser usados como adesivos, cimentos e pinturas à prova de fogo.

Os silicatos de sódio são os silicatos de elevada solubilidade em água mais comuns, segundo John (1995), e por isso serão utilizados como ativadores alcalinos para fins desta pesquisa.

Em conformidade com Santos (1997), o silicato de sódio ($n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$), é produzido por fusão de uma mistura de areia e soda, e suas características físicas, como viscosidade e densidade, podem depender da relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. No Brasil, 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). A equação 2 descreve a reação química que se passa nesse processo de fusão (Santos, 1997).



Na figura 2.21 esta mostrado um fluxograma genérico de produção do silicato de sódio (Silva, 2011).

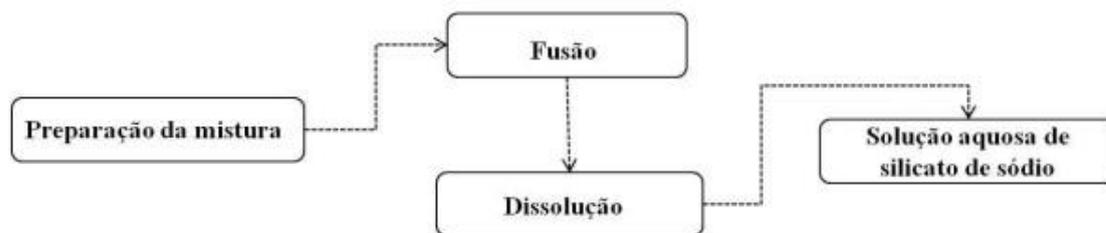


Figura 2.21: Fluxograma de produção do silicato de sódio, adaptado de (Silva, 2011)

O silicato de sódio apresenta-se no estado sólido em condições ambientes, porém pode ser encontrado em solução aquosa para diversas utilizações comerciais, que abrange desde a fabricação de adesivos até abrasivos, tendo emprego direto nas indústrias de materiais cerâmicos e de cosméticos (Santos, 1997).

O silicato de sódio encontra aplicação no tratamento de água funcionando como “sequestrador” de ferro e manganês, protegendo e prevenindo metais e tubulações da corrosão em sistema de água potável e de uso industrial. Na indústria têxtil, sua função é de estabilizar o peróxido de hidrogênio no processo de alvejamento do algodão e na lavagem e estonagem de jeans. Na fundição atua como aglomerante no processo silicato/ CO_2 . Na indústria de cimentos e refratários, serve de aditivo para acelerar a cura do cimento, atua como agente ligante na produção de refratários e é um defloculante da argila para pisos, pastilhas, porcelanatos, etc (Silva, 2011).

A composição química do silicato de sódio pode ser expressa pela fórmula geral $m\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, podendo variar de acordo com a relação (n/m) dos seus óxidos, denominada módulo de sílica, que varia entre 1,6 e 3,75, em massa. A medida que cresce a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, cresce a viscosidade. O percentual de dióxido de silício (SiO_2), o percentual de óxido de sódio (Na_2O), a relação entre estes óxidos, e o peso específico são quatro fatores que permitem a identificação precisa de um silicato de sódio. O conhecimento de dois destes fatores permite a determinação dos outros dois fatores remanescentes. Dentre os tipos de compostos que podem ser formados estão: Ortossilicato de sódio (Na_4SiO_4), metassilicato de sódio (Na_2SiO_3), dimetassilicato de sódio ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$), polissilicato de sódio (Na_2SiO_3)_n, entre outros. Todos são vítreos, incolores e solúveis em água (John, 1995; Silva, 2011).

2.4.2 Síntese dos GPs

Para produzir cimento geopolimérico é necessário um material alumino silicato, reagente alcalino (silicato de sódio ou potássio de razão molar $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O} > 1,65$, M sendo Na ou K), e água. O endurecimento em temperatura ambiente baseia-se na adição de cátions de cálcio, essencialmente de escória de alto forno. (Davidovits, 2013)

Segundo Barbosa *et al.* (2000), os GPs podem ser sintetizados a baixas temperaturas para obter produtos com propriedades úteis como elevada compressão, dureza de 4 – 7 Mohs, e ser estável até 1300 – 1400°C.

Duxon *et al.* (2007) afirmam que a reação de um aluminossilicato sólido com uma solução aquosa de hidróxido alcalino ou solução de silicato produz um material aluminossilicato alcalino sintético genericamente denominado de geopolímero (GP), embora, provavelmente, seja mais apropriado referi-lo como um exemplo de 'polímero inorgânico'.

Após a mistura simples de ambos os componentes, aluminossilicato sólido e um ativador alcalino líquido, a dissolução começa, acompanhada e seguida por policondensação, como mostra a figura 2.22. A rede polimérica de aluminossilicato formada endurece em uma estrutura amorfa a semicristalina. Dependendo da quantidade de óxido de cálcio da matéria prima, também pode ocorrer algumas fases minerais, similar a produtos hidratados de cimento Portland. Acerca disto, GPs representam uma ligação entre o cimento Portland comum e silicatos de sódio ligantes (Weil *et al.*, 2005).

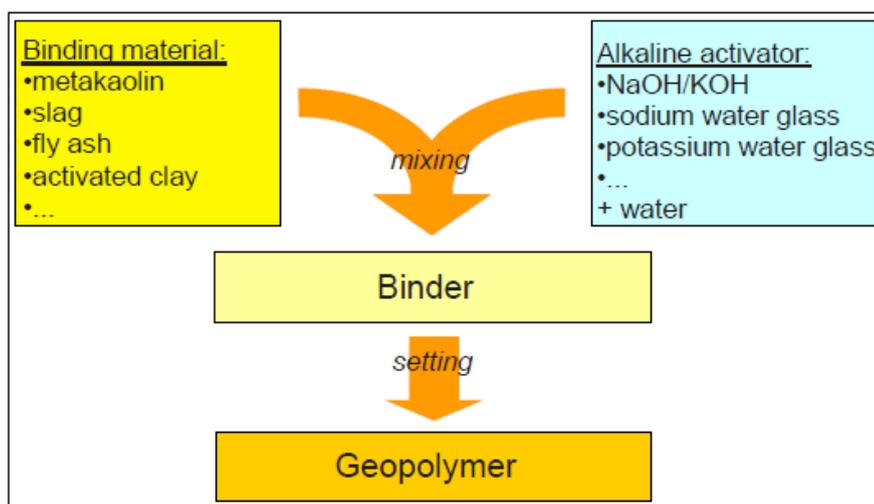


Figura 2.22: Produção de Geopolímero (Weil *et al.*, 2005).

2.4.3 Estrutura dos GPs

Os GPs formam um pequeno subconjunto de todos os polímeros inorgânicos possíveis. GPs são redes de heteropolímero, contendo monômeros tetraédricos alternados de SiO_4 e AlO_4 unidos por um oxigênio compartilhado (Rowles, 2004).

A matriz de GP de resina de aluminossilicato de potássio, ou poli(sialato-siloxo), com fórmula empírica $\text{Si}_{32}\text{O}_{99}\text{H}_{24}\text{K}_7\text{Al}$, em particular, endurece em temperaturas moderadas como um material amorfo ou vítreo com densidade de $2,14 \text{ g/cm}^3$. A representação do GP poli(metasilicato) linear com ligações cruzadas de aluminato tetracoordenado, curado e seco esta mostrada na figura 2.23 (Lyon *et al.*, 1997).

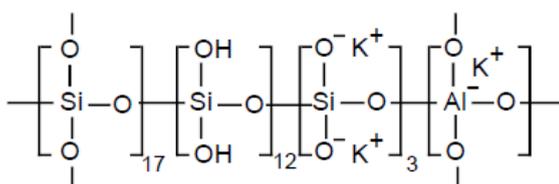


Figura 2.23: Estrutura de um Geopolímero (Lyon, et al., 1997).

Barbosa et al. (2000) propuseram uma estrutura para os polímeros inorgânicos de aluminossilicatos, onde SiO_4 e AlO_4 tetraédricos estão ligados por pontes de hidrogênio com íon sódio hidratado (Na^+), presente nas cavidades da estrutura. A estrutura saturada de Al apresentada na figura 2.24, é resultado de ressonância magnética nuclear (RMN) e indica a presença de Na^+ hidratado nas cavidades da estrutura, e a presença de todos os Al, essencialmente em sítios tetraédricos Q4(3Al) e Q4(2Al), indicados por \otimes e \ast respectivamente.

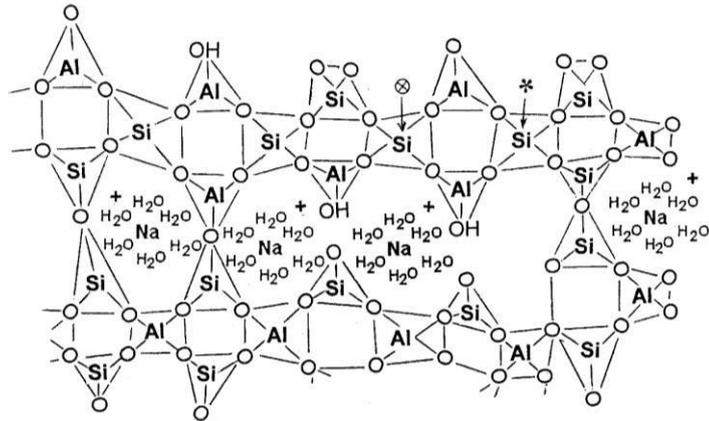


Figura 2.24: Estrutura proposta para aluminossilicatos de Sódio (Barbosa et al., 2000).

De acordo com Duxon et al. (2007), nos anos de 1950 Glukhovsky propôs um mecanismo geral para ativação alcalina dos materiais compostos primariamente de sílica e alumina reativa. Este mecanismo divide o processo em três estágios: (a) dissolução-coagulação; (b) coagulação-condensação; (c) condensação-cristalização.

A figura 2.25 ilustra um modelo simplificado do mecanismo de reação para geopolimerização.

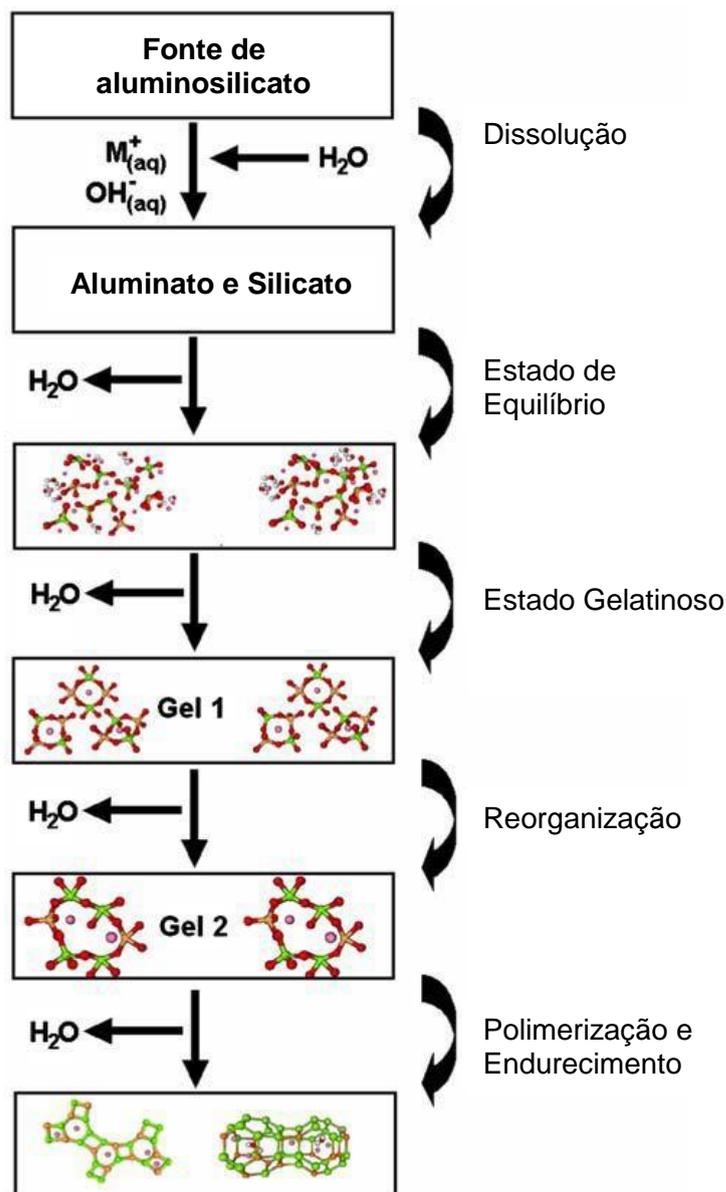


Figura 2.25: Modelo conceitual para geopolimerização (Duxson, et al., 2007).

O mecanismo de reação, mostrado na figura 2.25, esquematiza o processo principal que ocorre na transformação da matéria-prima aluminossilicato sólido em aluminossilicato alcalino sintético. Observe que a dissolução da matéria prima aluminossilicato sólido por hidrólise alcalina (consumindo água), produz espécies aluminatos e silicatos, muito provavelmente na forma monomérica. Uma vez em solução, as espécies oriundas da dissolução são incorporadas na fase aquosa, que pode já conter silicato presente na solução de ativação. A dissolução do aluminossilicato amorfo é rápida em pH elevado, e isso cria rapidamente uma solução supersaturada de aluminossilicato. Em soluções concentradas, isto resulta na formação

de um gel como oligômeros em fase aquosa formando grandes redes por condensação. Este processo libera a água que foi consumida durante a dissolução (Duxson, *et al.*, 2007).

Conforme Duxson *et al.* (2007), após a transformação em gel, o sistema continua a rearranjar e reorganizar conforme a rede de gel vai crescendo, resultando em uma rede de aluminossilicato tridimensional comumente atribuída a GPs. Este processo de reorganização estrutura determina a microestrutura e a distribuição de poros do material, que são críticos para a determinação de muitas propriedades físicas.

De acordo com Weil *et al.* (2005), os GPs tem sido pesquisado por mais de 25 anos. Apesar dessas longas e contínuas pesquisas, os GPs ainda não alcançaram vasta aplicação. De fato, uma gama de aplicações está descrita na literatura, mas poucos campos de aplicação têm encontrado lugar no mercado.

A posição da indústria de GPs e os desafios que devem ser superados para alcançar vasta aceitação e a aplicação é notável, pois progressos nessa área estão sendo feitos e os GPs serão uma importante parte do desenvolvimento sustentável para o século XXI (Majidi, 2009).

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no processamento e seleção dos protótipos de suporte de solda, para aplicação do processo de soldagem e avaliação da junta soldada.

3.1 MATERIAIS

Para a produção dos protótipos dos suportes cerâmicos foram empregados dois tipos de escórias de fluxo de soldagem: Básica e Semi-Básica, descritas na seção 2.2.1, aqui denominadas de EFS-B e EFS-SB, respectivamente.

As EFSs foram doadas pela empresa Machado Viana indústria metalúrgica e foram recebidas em escamas e foram trituradas e, moídas até atingir uma granulometria passante em peneira de malha #40 mesh, conforme mostra a figura 3.1. Para essa operação, foram utilizados o triturador de mandíbula, disponível no laboratório de materiais avançados (LAMAV) da UENF e o moinho de bolas, disponível no laboratório de engenharia civil (LECIV) da UENF, que estão apresentados na figura 3.2.

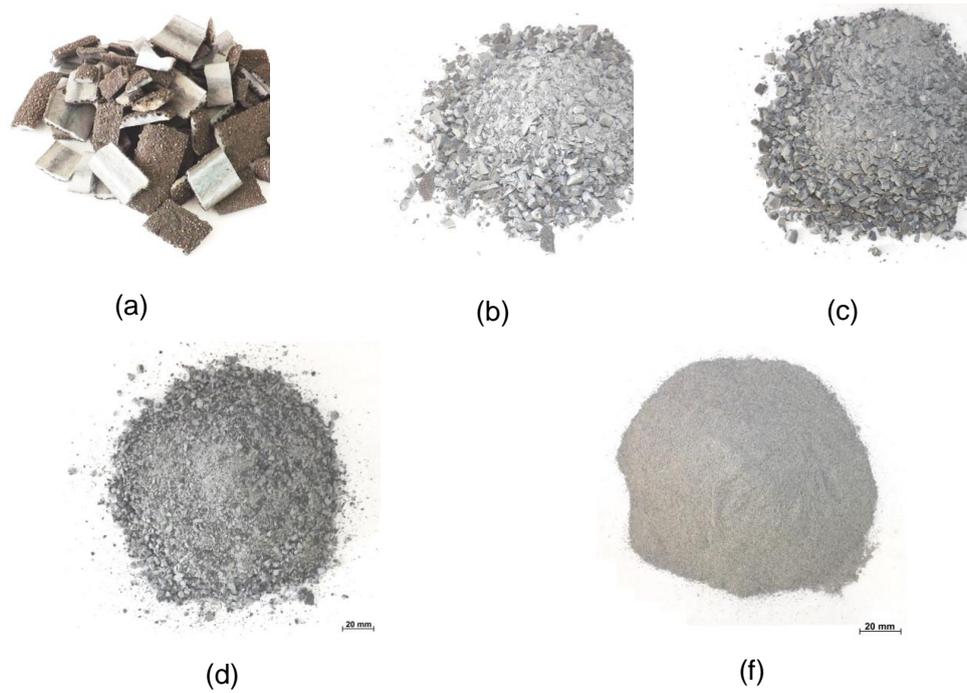


Figura 3.1: Moagem da escória semi-básica. Em: (a) Escória como recebida; (b) Após 1º tritramento; (c) Após 2º tritramento; (d) Após moagem em moinho de bolas; (e) Após o peneiramento passante em #40 mesh.



(a)



(b)

Figura 3.2: (a) Triturador de Mandíbula do LAMAV-UENF e (b) Moinho de bolas do LECIV-UENF.

A tabela 3.1 apresenta a caracterização química por fluorescência de raios-X das escórias recebidas, realizada no equipamento Brunner – AXS/GmbH do laboratório de engenharia e exploração de petróleo (LENEP) da UENF.

Tabela 3.1: Caracterização Química das Escórias: Básica e Semi-Básica

Óxidos (%)	Escória Básica	Escória Semi-Básica
Na ₂ O	2,422	3,029
MgO	1,176	20,92
Al ₂ O ₃	32,88	23,79
SiO ₂	12,68	27,88
K ₂ O	2,942	0,6724
CaO	44,48	7,593
Cr ₂ O ₃	1,412	0,0545
MnO	1,056	10,48
Fe ₂ O ₃	0,7513	4,51
BaO	-	0,4126
TiO ₂	-	0,2451
Outros	0,2	0,413

Foram usados como aditivos metacaulim, cimento Portland CPIIE-32 e areia. As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, a caracterização do metacaulim e do cimento Portland CPIIE32, obtido por fluorescência de raios-X no LECIV-UENF. Para solução ativadora foram usados hidróxidos, de sódio (NaOH) e de potássio (KOH), e silicatos, de sódio alcalino (Na₂SiO₃), e de potássio (K₂SiO₃); conforme descritos na seção 2.4.1, de modo que contribuam para a reação de geopolimerização.

Tabela 3.2: Caracterização química do metacaulim.

Óxidos (%)	Metacaulim
SiO ₂	53,167
Al ₂ O ₃	37,252
K ₂ O	4,526
Fe ₂ O ₃	1,769
SO ₃	1,436
TiO ₂	1,393
CaO	0,303
V ₂ O ₅	0,093
ZrO ₂	0,025
Rb ₂ O	0,010
SrO	0,005

Tabela 3.3: Caracterização química do cimento Portland CPIIE-32

Óxidos (%)	CPIIE-32
CaO	79,212
SiO ₂	13,603
Fe ₂ O ₃	3,099
SO ₃	3,002
K ₂ O	0,459
TiO ₂	0,352
SrO	0,155
MnO	0,109
ZrO ₂	0,008

Os protótipos de suporte de solda foram confeccionados com dimensões de 115 mm de comprimento, 25 mm de largura e 10 mm de altura, conforme as dimensões determinadas no trabalho de Júnior(2014), mostrado na figura 3.3 (a). A figura 3.3 (b), mostra a seção transversal dos suportes cerâmicos, com uma pequena concavidade na região central do suporte para adequar o formato do cordão de solda, ainda no estado líquido, na parte inferior da chapa. Esta concavidade tem uma dimensão de 5,0 mm de largura por 1,6 mm de profundidade.

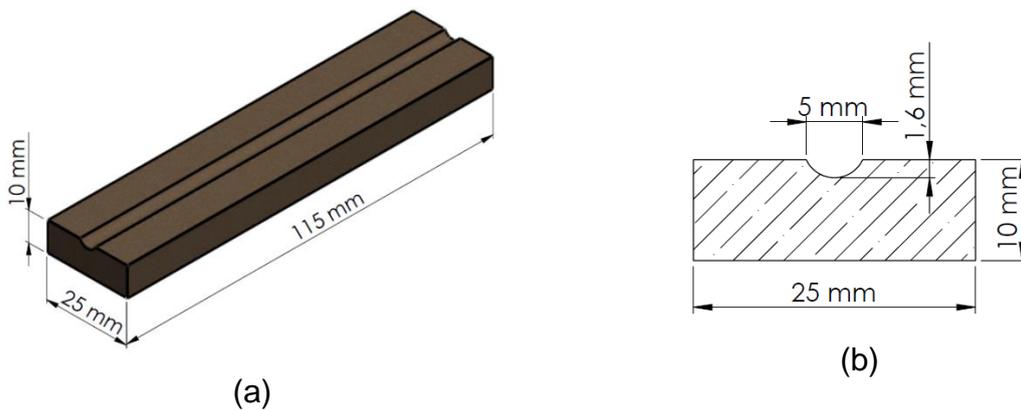


Figura 3.3: Representação do Suporte Cerâmico: (a) Dimensões do corpo de prova, (b) Seção transversal (Júnior, 2014).

Para a produção dos protótipos de suporte de solda com tais dimensões, foram utilizadas duas técnicas de moldagem: (i) vertido em molde plástico; e (ii) prensado em matriz metálica.

O molde plástico foi confeccionado usando borracha de silicone para molde, com respectivo ativador, e modelos de suporte de solda. A figura 3.4 mostra o molde de silicone produzido.



Figura 3.4: Molde de silicone

Para a técnica de moldagem por prensagem, foi utilizada uma matriz metálica e prensa hidráulica manual com aplicando 15 toneladas de força de pressão, conforme mostra o esquema da figura 3.5 (a). A montagem da matriz com a massa cerâmica se apresenta na figura 3.5 (b). Para facilitar o desmolde, foi usado grafite em pó nas paredes da matriz.

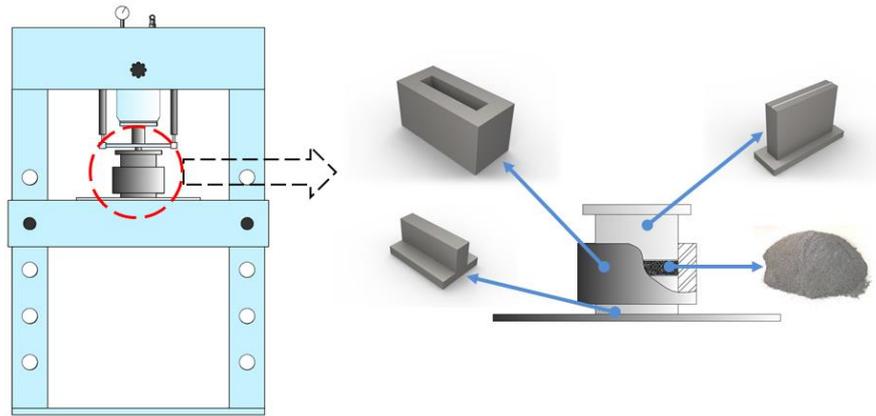


Figura 3.5: Esquematização (a) da prensa hidráulica manual, (b) da montagem da matriz (Júnior, 2014)

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. As composições químicas dos insumos, arame para soldagem e a chapa são apresentadas, respectivamente, na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Composição química (% de peso) do arame ER 70S-6 (Belgo Bekaert Arames) e da chapa de aço A.36 (Gerdau).

	C	Si	Mn	P	S	Cu
ER 70S-6	0,06	0,8	1,4	0,025	0,035	0,5
Aço A.36	0,26	0,4	---	0,04	0,05	---

3.2 METODOLOGIA

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido em duas etapas:

- **Etapa 1: Produção do Suporte de Solda (seção 3.2.1);**

Nesta etapa foram avaliados aglomerantes e produzidos protótipos do suporte de solda contendo EFS como precursor geopolimérico, com objetivo de selecionar formulações adequadas para avaliações complementares.

- **Etapa 2: Avaliação do Suporte de Solda e da Junta Soldada (seção 3.2.2).**

As formulações selecionadas na etapa 1 foram processadas da seguinte forma:

- i) foi determinada a perda de massa para definir a temperatura adequada de queima;
- ii) Em seguida, novos protótipos foram preparados para a soldagem do passe de raiz. Algumas juntas soldadas foram submetidas a ensaios como macrografia, micrografia e dureza.

3.2.1 Etapa 1: Produção do Suporte de Solda a Base de EFS

Nesta etapa foram propostas formulações e produzidos protótipos do suporte de solda em laboratório. O objetivo foi de selecionar formulações, que apresentaram boa trabalhabilidade da massa cerâmica e que se observou a geopolimerização, para a aplicação na soldagem do passe de raiz. Os suportes que apresentaram resultados satisfatórios na inspeção visual do cordão de solda foram selecionados para etapa 2.

3.2.1.1 Proposição de Formulações

Os protótipos cerâmicos foram produzidos com formulações variando a porcentagem da escória, dos aditivos e de solução ativadora alcalina. Foram preparadas vinte e duas fórmulas, conforme as formulações propostas na tabela 3.5 (a) com cimento, (b) com metacaulim e (c) somente EFS.

Tabela 3.5: Proposição de formulação com EFS (% peso)

Fórmula \ Composição	EFS-SB	EFS-B	CPIIE-32	Areia	Silicato de sódio alcalino	Silicato de Potássio	Hidróxido de Sódio	Hidróxido de Potássio	Total
1	21,6%	-	12,0%	33,6%	31,9%	-	0,9%	-	100%
2	20,2%	-	11,1%	33,0%	34,9%	-	0,8%	-	100%
3	-	21,6%	11,9%	33,6%	31,9%	-	0,9%	-	100%
4	-	20,2%	11,1%	33,0%	34,9%	-	-	0,8%	100%
5	-	21,6%	12,0%	33,6%	31,9%	-	-	0,9%	100%
6	-	20,2%	11,1%	33,0%	-	34,9%	0,8%	-	100%
7	-	21,6%	12,0%	33,6%	-	31,9%	0,9%	-	100%
8	-	20,2%	11,1%	33,0%	-	34,9%	-	0,8%	100%
9	-	21,6%	12,0%	33,6%	-	31,9%	-	0,9%	100%

(a) Formulações de cimento

Fórmula \ Composição	EFS-B	Metacaulim	Areia	Silicato de sódio alcalino	Hidróxido de Sódio	EFS-B grosseira	Total
10	13,1%	30,6%	21,9%	27,3%	7,2%	-	100%
11	21,8%	21,9%	21,9%	27,3%	7,2%	-	100%
12	30,6%	13,1%	21,9%	27,3%	7,1%	-	100%
13	-	43,7%	21,9%	27,3%	7,2%	-	100%
14	-	43,6%	-	27,3%	7,2%	21,9%	100%

(b) Formulações de metacaulim

Fórmula \ Composição	EFS-SB	EFS-B	Areia	Silicato de sódio alcalino	Silicato de Potássio	Hidróxido de Sódio	Hidróxido de Potássio	Total
15	31,3%	-	33,0%	34,9%	-	0,8%	-	100%
16	-	31,3%	33,0%	34,9%	-	0,8%	-	100%
17	-	40,0%	40,0%	19,0%	-	1,1%	-	100%
18	-	38,1%	40,1%	21,2%	-	-	0,5%	100%
19	-	38,1%	40,1%	-	21,2%	0,5%	-	100%
20	-	38,1%	40,1%	-	21,2%	-	0,5%	100%
21	-	43,7%	21,9%	27,2%	-	7,2%	-	100%
22	-	51,1%	25,6%	22,0%	-	1,2%	-	100%

(c) Formulações de EFS

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 - 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 3.5.

2ª operação - Mistura seca: A mistura das EFSs com os demais aditivos (metaculim ou cimento, e areia), foi realizada manualmente e teve como objetivo a homogeneização das matérias-primas.

3ª operação – Mistura alcalina: Ao silicato foi adicionado hidróxido em pérolas e misturado com bastão até que houvesse a dissolução das pérolas.

4ª operação – Ativação alcalina: Com auxílio de uma espátula, foi adicionado a mistura líquida alcalina à mistura seca, misturando os componentes até a completa homogeneização. Durante a operação de ativação alcalina, observou-se a trabalhabilidade da massa cerâmica formada.

Seguiu-se então, os processos de moldagem descritos no item 3.1. As formulações moldadas em molde plástico, foram levadas à estufa pré-aquecida em temperatura de 50°C com o molde, por um período de 1 hora para promover a cura da massa, sendo posteriormente desmoldadas e deixadas em temperatura ambiente. As formulações onde não se observou o processo de cura nesse período de tempo, permaneceram em estufa até completar 24 horas.

Para seguir o processo de moldagem por pressão, a massa formada ficou curando até que tivesse consistência adequada para prensar, em seguida foi moldado por prensagem de acordo com a figura 3.5. Em seguida, foi desmoldado e os protótipos produzidos por este método permaneceram em temperatura ambiente.

3.2.1.3 Avaliação dos Protótipos na Soldagem do passe de raiz

Os protótipos de suporte de solda, selecionados na etapa de processamento dos protótipos, foram avaliados 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 3.6 apresenta a seção transversal da junta que foi utilizada na avaliação do suporte por soldagem.

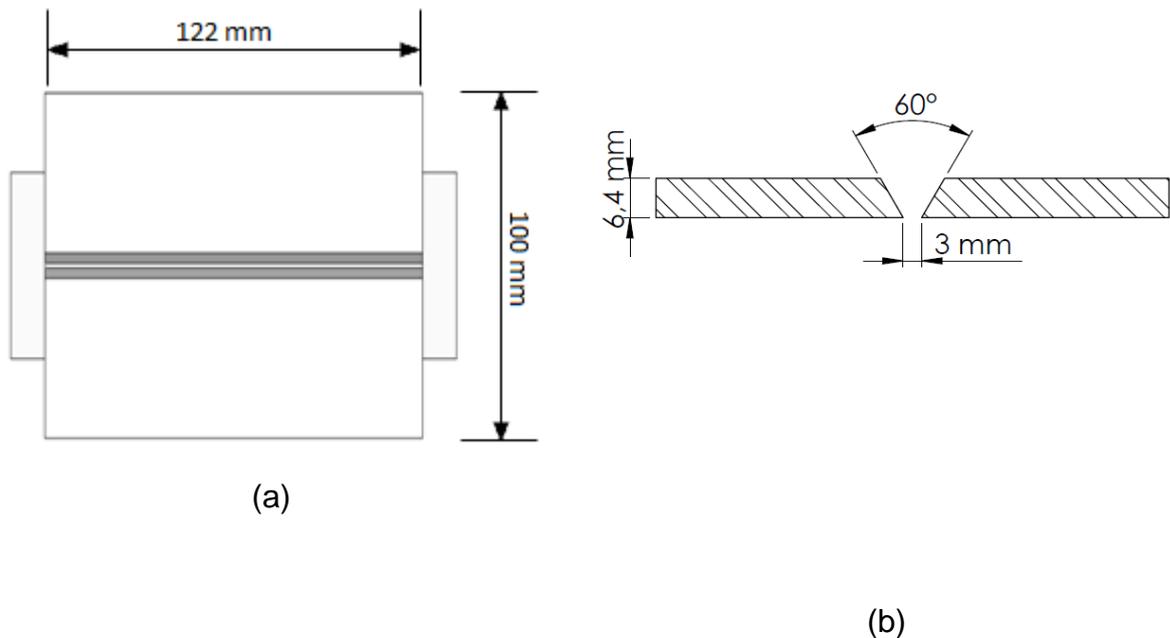


Figura 3.6: Preparação das chapas para a avaliação por soldagem dos protótipos de suporte de solda produzidos; (a) Dimensões da junta utilizada, e (b) Seção transversal da Junta.

Na figura 3.7 pode se observar como foi feita a montagem do suporte cerâmico na junta soldada, de acordo com Júnior (2014). A figura 3.7(a) mostra a seção transversal da chapa de aço preparada de acordo com as dimensões mostradas na figura 3.6, com o suporte fixado em sua parte inferior. Na figura 3.7(b) é apresentada uma visão geral da junta soldada com dois apêndices fixados nas duas extremidades da chapa através de pontos de solda. Estes apêndices tiveram 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.

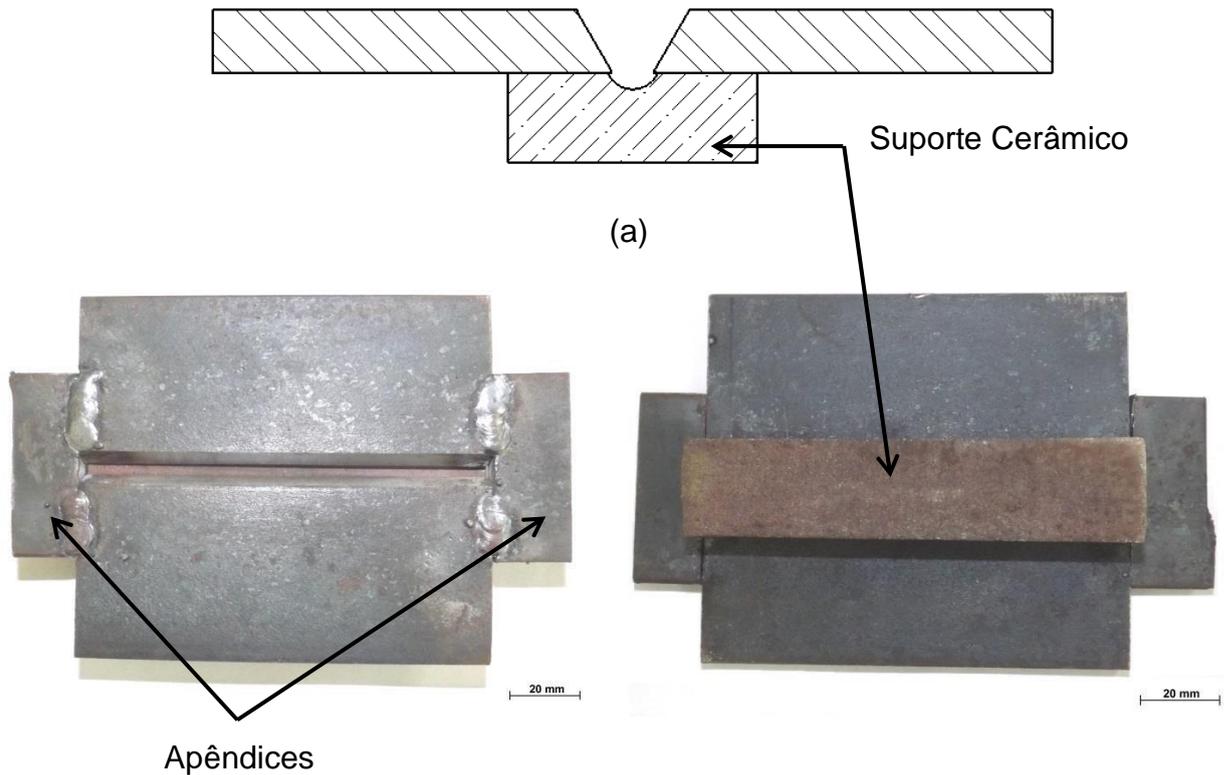


Figura 3.7: (a) Seção transversal do conjunto, chapa e suporte cerâmico e (b) preparação do suporte cerâmico na junta, destacando a utilização de apêndices (Júnior, 2014)

A soldagem foi realizada com os seguintes parâmetros adotados no trabalho de Júnior (2014): corrente 160 A, tensão 20-22 V e velocidade de soldagem 1,80 mm/s.

Para inspeção visual as juntas soldadas foram limpas com escova de aço para terem suas superfícies isentas de impurezas. O cordão de solda produzido utilizando o protótipo como suporte, foi inspecionado visualmente por ambos os lados, com objetivo de verificar o acabamento do cordão de solda e a presença de descontinuidades.

3.2.2 Etapa 2: Avaliação do Suporte de Solda e da Junta Soldada

Nessa etapa foi feita determinação da perda de massa das formulações selecionadas na etapa 1, e foram produzidos novos suportes queimando-os em temperatura adequada. Também foi feita análise microestrutural dos novos protótipos

produzidos por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, foram produzidas e avaliadas juntas soldadas com as formulações selecionadas.

3.2.2.1 Avaliação por Perda de Massa das Formulações

Foram selecionadas formulações para determinar a perda de massa. Aproximadamente 50 gramas de cada fórmula, foi preparada em copo plástico descartável, de acordo com o processamento dos protótipos adotados no item 3.2.1.2, e foram tratadas termicamente da seguinte maneira:

- a) Em estufa previamente aquecida nas temperaturas seguintes:
 - i) 60°C, permanecendo nessa temperatura por 24 horas;
 - ii) 110°C, permanecendo nessa temperatura por 24 horas;
- b) Em forno mufla, modelo EDG3P-S/7000, disponível no LAMAV-UENF conforme mostra a figura 3.8, nas seguintes temperaturas:
 - i) 300°C;
 - ii) 500°C;
 - iii) 700°C.

Para as temperaturas determinadas para o forno mufla, a taxa de aquecimento foi de 3 °C/min, com patamares de 3 horas em cada temperatura, e taxa de resfriamento foi de 4°C/min até a temperatura ambiente, sendo estes ciclos controlados pelo forno.



Figura 3.8: Forno mufla modelo EDG3P-S/7000 do LAMAV - UENF

A cada intervalo de temperatura, a massa foi medida usando uma balança digital da marca Bel Engineering modelo M22 Classe II, com precisão de duas casas decimais, disponível no LAMAV.

Após a avaliação por perda de massa, novos suportes de solda foram produzidos e moldados conforme descrito no item 3.1. Após serem desmoldados, os suportes produzidos foram queimados de acordo com as temperaturas de queima estabelecidas.

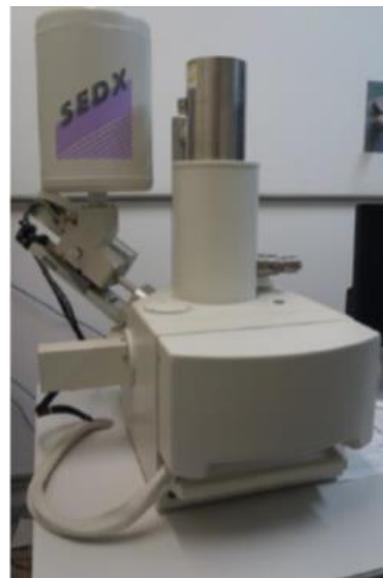
3.2.2.1.1 MEV dos Novos Suportes de Solda Produzidos

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), teve como objetivo identificar a morfologia do material dos protótipos produzidos após o tratamento térmico adotado.

Para essa análise, as amostras foram preparadas utilizando o metalizador ION COATER - IC50 da SHIMADZU, e analisadas no equipamento MEV modelo SEDX - SSX-550 da SHIMADZU, ambos disponíveis no LAMAV/UENF. A figura 3.9 mostra os respectivos equipamentos utilizados.



(a)



(b)

Figura 3.9: Equipamentos utilizados para análise microestutural do suporte produzido, disponíveis no LAMAV. (a) Metalizador Ion Coater – IC50, (b) MEV- SEDEX- SSX 550

3.2.2.2 Soldagem do passe de raiz e Avaliação da Junta Soldada

Os novos suportes produzidos foram submetidos à soldagem MIG-MAG do passe de raiz de acordo com o item 3.2.1.3.

Após a soldagem, foram realizados ensaios de macrografia, micrografia e dureza da chapa testada. A figura 3.10 apresenta a localização dos corpos de prova retirados de cada área da chapa de teste soldada para a realização desses ensaios, com base na norma ASME IX de 2004. Para retirada dos corpos de prova as amostras foram cortadas na máquina de corte Mesoton disponível no LAMAV-UENF.



Figura 3.10: Localização dos corpos de prova na chapa de teste para os ensaios de microscopia ótica, dureza e macrografia.

3.2.2.2.1 Macrografia da Junta Soldada

A macrografia da junta soldada teve como objetivo verificar a geometria do cordão de solda. As amostras para macrografia foram obtidas cortando-se uma seção transversal ao cordão de solda de acordo com a figura 3.10. Esta seção, por sua vez, foi preparada 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, conforme a figura 3.11, sendo medidos com auxílio de uma régua de escala em milímetros.

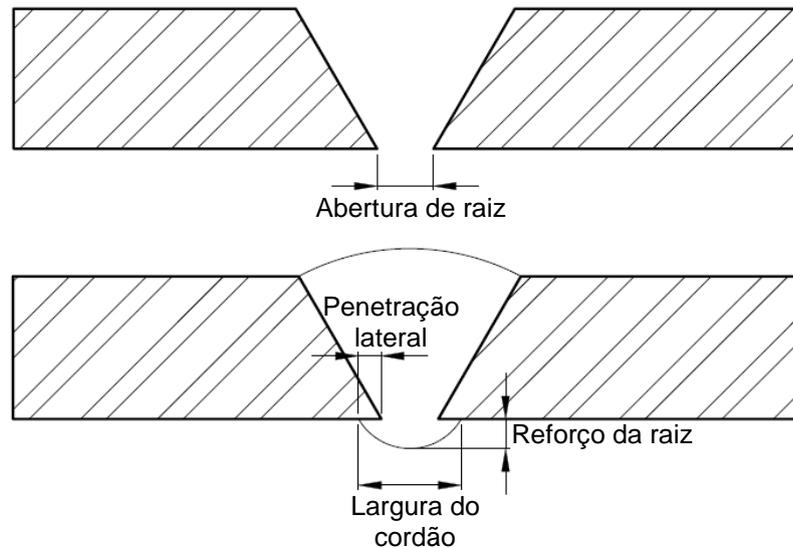


Figura 3.11: Partes do cordão de solda.

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 3.

$$\text{Penetração lateral} = \frac{\text{Largura do cordão} - \text{Abertura de raiz}}{2} \quad [\text{Equação. 3}]$$

3.2.2.2 Microscopia Ótica

Através da microscopia ótica foi possível observar a quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de inclusões da zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de base (MB).

As amostras para microscopia ótica foram obtidas como mostrado na figura 3.10. Para facilitar o manuseio das amostras foi realizado o embutimento a quente com baquelite.

As amostras, 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 no microscópio Olympus – GX41 do LAMAV/UENF para observação da microestrutura.

3.2.2.2.3 Microdureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers teve a finalidade de verificar a existência de pontos com dureza elevada na junta produzida com o suporte cerâmico à base EFS. Foram considerados aceitáveis valores abaixo de 250 HV que são compatíveis com o Aço A36.

A dureza Vickers foi feita em um durômetro modelo Shimadzu HVM-2, do LAMAV/UENF, com uma carga de 50 g. Foram realizadas 36 medições, distribuídas da seguinte forma: 12 medidas para o metal base (MB), 12 medidas para a zona termicamente afetada (ZTA) e 12 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 3.12 mostra o desenho esquemático com a localização dos pontos onde foram executadas as impressões.

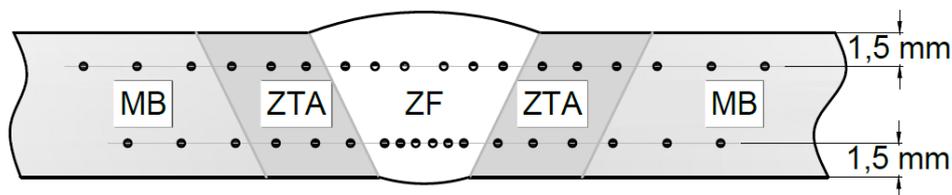


Figura 3.12: Representação esquemática da localização dos pontos de execução da dureza.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões sobre a produção do suporte de solda a base de EFS, avaliação e seleção do suporte de solda produzido, bem como a avaliação da junta soldada.

4.1 ETAPA 1: PRODUÇÃO DO SUPORTE DE SOLDA A BASE DE EFS

Nessa etapa, são apresentados os resultados do processamento da massa cerâmica formada para produção de protótipos de suporte de solda, de acordo com os itens 3.2.1.1 e 3.2.1.2, e o resultado da avaliação da soldagem do passe de raiz do item 3.2.1.3. Ainda apresenta a discussão acerca desses resultados.

4.1.1 Trabalhabilidade das massas formadas a partir das formulações propostas e Processamento dos protótipos

Em relação às massas cerâmicas formadas durante o processamento dos protótipos, de modo geral, apresentaram aspecto de argamassa podendo, depois de bem homogeneizada, ser facilmente vertida no molde. A figura 4.1 apresenta o aspecto da massa formada.



Figura 4.1: aspecto da massa formada a partir da mistura dos componentes.

Para todas as formulações propostas, foi verificada a liberação de calor após a adição da mistura ativadora à mistura seca, observado pelo ligeiro aquecimento do recipiente no qual foi preparada a massa cerâmica. O que indica uma reação química, característica da reação de ativação alcalina ou geopolimerização. Pois, segundo os resultados de condução calorimétrica da pesquisa de Palomo *et al.*(1999), a reação de ativação alcalina ocorre por um processo exotérmico de dissolução, com rápida e

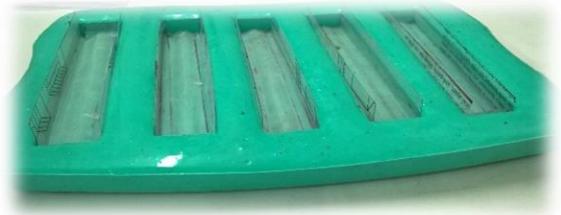
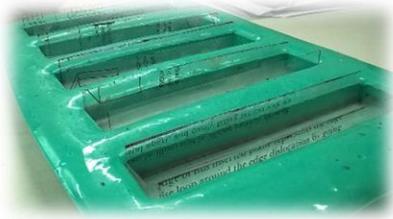
intensa liberação de calor, a partir do contato da solução ativadora e a fonte de sílica e alumina. Esse processo exotérmico ocorre devido à quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Al, passando os íons de alumínio e silício à solução (Palomo *et al.*, 1999).

A seguir, o material foi levado à estufa na temperatura 50°C juntamente com o molde por 1 hora. A figura 4.2 mostra dois protótipos, logo após desmoldar, apresentando poros de diversos tamanhos, com resquícios do material do molde, além de aspecto pegajoso. Evidenciando que a massa cerâmica reagiu com o molde de silicone, independente da utilização de desmoldante.



Figura 4.2: protótipos com resquícios do material do molde de silicone.

O molde, entretanto, não sofreu alterações significativas. Foi feita, então, uma adaptação do molde com fita adesiva e plástico transparente de retroprojeter. Nesse molde adaptado, o conjunto fita e plástico se desprende facilmente do protótipo após resfriado até a temperatura ambiente. A figura 4.3 ilustra o molde adaptado e a moldagem do suporte de solda.



(a)



(b)

Figura 4.3: (a) adaptação do molde de silicone com fita adesiva e plástico para retroprojeção; (b) massa vertida no molde adaptado seguindo o processo de cura.

As dimensões de comprimento e largura dos suportes de solda, produzidos com o molde adaptado, sofreram pequenas variações e a superfície apresentou pequenos poros. A figura 4.4 apresenta um protótipo produzido a partir do molde adaptado.



Figura 4.4: Faces de um dos protótipos de EFS produzidos a partir do molde adaptado.

A seguir, são comentados os resultados obtidos com as formulações que foram apresentadas na tabela 3.5.

- **Formulações com EFS-SB:**

As formulações 1, 2 e 15, não apresentaram processo de cura no período de 24 horas em temperatura de 50°C. Parece não ter acontecido a reação de ativação alcalina desejada. Desse modo, as formulações com escória semi-básica (EFS-SB) foram descartadas para produção dos suportes. As formulações propostas necessitam ser revistas e reformuladas, de forma a ocorrer a reação de ativação alcalina.

- **Formulações com EFS-B**

As formulações 16, 18, 19 e 20, não apresentaram processo de cura para as condições de tempo e temperatura determinadas. Assim, não ficou evidente a reação de ativação alcalina desejada e as essas formulações foram então descartadas.

A reação de ativação alcalina depende da reatividade do percussor, que é fonte de aluminossilicatos, da natureza e a concentração do ativador alcalino, que influenciam diretamente na estrutura e nas propriedades mecânicas dos produtos originados (Bezerra *et al.*, (2013), e de condições de cura no processo de geopolimerização (Fernández-Jimenez *et al.*, 2015). A razão entre $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ modifica significativamente o grau de polimerização das espécies dissolvidas na solução alcalina. Uma ótima razão entre $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ na solução de silicato está na faixa de 0.75-1.25 (Fernández-Jimenez *et al.*, 2015). Os geopolímeros mais comuns são melhores formados com a razão molar Si:Al entre 1 e 3 (Davidovits, 1991). A razão molar Na:Al igual a 1 é a ideal para formação de geopolímero, afirma Rahier *et al* (1996). Então, os ajustes necessários para as formulações onde não ficou evidente a reação de geopolimerização, pode ser trabalhar as relações estequiométricas dos componentes, adicionando mais EFS ou mistura de EFS e outros aditivos fontes de aluminossilicatos, de modo a encontrar uma razão ideal entre Si:Na:Al.

As formulações 4, 5, 6, 7, 8 e 9, com silicato de potássio e/ou hidróxido de potássio, apresentaram processo de cura, porém a massa formada reduziu bastante de volume, encolhendo durante esse processo. O processo de cura pode ser atribuído à presença de cimento em suas composições. Entretanto, apesar dessas formulações

apresentarem a cura desejada nas condições de tempo e temperatura determinadas, foram descartadas devido à redução de volume.

A formulação 21 apresentou aspecto de argamassa e, após o desmolde, houve relaxamento da massa e, por isso, perdeu a concavidade que serviria para acomodar a poça de solda, deste modo foi descartada. Talvez, o tempo determinado não tenha sido o suficiente para que houvesse a cura completa do material.

As formulações 12, 13 e 14, com metacaulim, apresentaram aspecto de massa de modelar não sendo possível verter em molde. A formulação 12 foi moldada pressionando a massa sobre o molde. Após desmoldar, a massa relaxou e perdeu a concavidade que serviria para acomodar a poça de solda. Para essa formulação, o tempo de cura não foi o suficiente para a cura completa. Pois, em geral, o tempo de cura preliminar dos geopolímeros varia entre 24 e 48 horas em temperatura ambiente, e a cura total acontece em torno de 28 dias (Davidovits, 1994).

As formulações 13 e 14, que tinham os maiores percentuais de metacaulim, enrijeceram de tal modo durante a adição dos componentes, que não foi possível moldá-las. Em vista disso, foram descartadas para produção dos protótipos. Presume-se que a adição de água à essas formulações melhora a trabalhabilidade da massa, e o aumento de tempo seja necessário para que se tenha cura completa da massa.

- **Fórmulas com EFS-B selecionadas:**

Até o momento falou-se das formulações que foram descartadas para a produção dos protótipos. A seguir são apontadas as formulações com EFS-B que serão aproveitadas para a próxima etapa.

A formulação 3, com 11,9% de cimento, formou uma argamassa que foi vertida facilmente no molde e apresentou a cura desejada no tempo de uma hora em 50°C. A figura 4.5 apresenta o protótipo de formulação 3.



Figura 4.5: Protótipo de formulação 5.

As formulações 10 e 11, com metacaulim, formaram massas mais secas de aspecto de massa de modelar escolar. Essas foram moldadas pressionando a massa sobre o molde e exibiram a cura no tempo e temperatura desejados.

A formulação 17, apresentou aspecto de massa de modelar não sendo possível verter em molde. Essa formulação foi, então, moldada pressionando a massa sobre o molde, apresentou cura desejada no tempo de uma hora em 50°C.

As Formulações 3, 10, 11 e 17, com EFS-B, foram selecionadas para a etapa de soldagem, pois apresentaram boa trabalhabilidade da massa formada, com tempos de cura adequados na temperatura 50°C e resistência mecânica suficiente para o desmolde e manuseio dos corpos de provas.

4.1.2 Avaliação dos Suportes na Soldagem do passe de raiz

Para avaliação dos protótipos com as formulações selecionadas quatro 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.

Antes da aplicação do passe de raiz, os suportes de solda com as formulações selecionadas foram levados em estufa a 110°C por 24 horas de modo a eliminar alguma umidade remanescente.

A figura 4.6a apresenta o aspecto do suporte cerâmico de EFS-B, logo após a operação de soldagem pelo processo MIG-MAG. Observa-se que o suporte permaneceu inteiro após soldagem, resistindo às elevadas temperaturas resultantes do contato com o metal líquido, e teve sua aparência irregular e vitrificada.

Já a raiz da solda, que esteve em contato com o suporte durante a operação de soldagem (figura 4.6b), apresentou um cordão de solda com geometria irregular e resquícios do material do suporte, bem como óxidos formados na superfície da solda, que foram removidos posteriormente com auxílio de escova de aço. Este aspecto foi verificado para todas as formulações testadas.



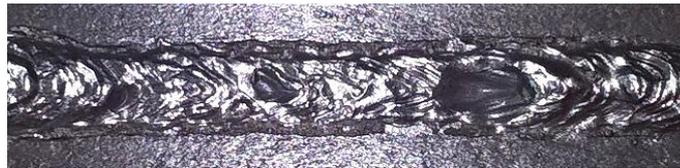
(a)



(b)

Figura 4.6: Aparência (a) do protótipo de solda de formulação 17 após processo de soldagem e (b) da raiz da solda.

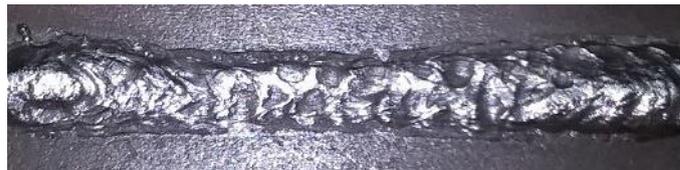
Após a limpeza do cordão de solda do passe de raiz, conforme a figura 4.7, o cordão de solda apresentou formato irregular com descontinuidades no formato de depressões, além de pequenos respingos. Essas depressões foram atribuídas à umidade presente no material do protótipo pois, durante o processo de soldagem, observou-se a formação de bolhas. Além disso, prejudicou a estabilidade do arco elétrico durante o processo de soldagem.



(a) Fórmula 3



(b) Fórmula 10



(c) Fórmula 11



(d) Fórmula 17

Figura 4.7: Inspeção visual do cordão de solda no passe de raiz com o suporte de formulação (a) 3, (b) 10, (c) 11 e (d) 17.

- **Macrografia das juntas produzidas**

Após a limpeza dos cordões de solda, foram cortadas seções transversais para preparação das macrografias de acordo com o item 3.2.2.2.1. As macrografias das juntas produzidas com os suportes são mostradas na figura 4.8.

Os resultados das macrografias se mostraram satisfatórios, visto que não foram observadas descontinuidades internas no passe de raiz com os protótipos de formulações 3, 10 e 17; foi obtida penetração nas laterais do chanfro, e o reforço de solda mostrou-se apropriado na raiz. Porém, constata-se a presença de descontinuidades internas em formato de bolhas com o protótipo de formulação 11, mostrado na figura 4.8 (d). Essa descontinuidade pode ter causa na evolução de gases do suporte de solda. E, a formulação 3 (figura 4.8 (a)), apresentou geometria achatada, devido a concavidade presente no protótipo ter sido rasa. Observa-se que não houve enchimento suficiente das juntas soldadas na parte superior da solda, ou seja, de toda a espessura da chapa, pois só foi executado o passe de raiz.

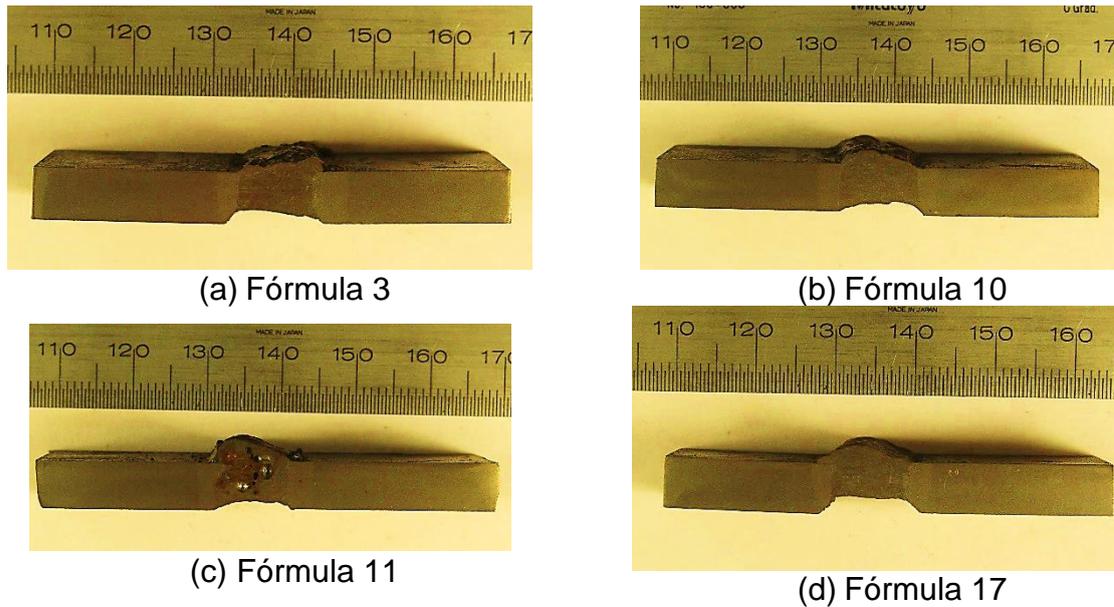


Figura 4.8: Macrografia das juntas produzidas com os protótipos de formulação (a) 3, (b) 10, (c) 11 e (d) 17.

Os resultados mostram a viabilidade da produção de suporte de solda por meio da geopolimerização da EFS. Porém, embora as macrografias tenham sido satisfatórias, as aparências da superfície dos cordões de solda ficaram prejudicadas devido a ocorrência de depressões (veja figura 4.7). Assim, a geopolimerização não basta para produção de suportes de solda, pois foi observado que ainda restam materiais formadores de gases que precisam ser removidos para se adequar à operação de soldagem. Logo, os suportes ainda precisam de melhorias, sendo necessária alguma queima dos protótipos para remoção de gases. Essas melhorias são tratadas na etapa 2.

4.2 ETAPA 2: AVALIAÇÃO DO SUPORTE DE SOLDA E DA JUNTA SOLDADA

Nessa etapa são apresentados os resultados obtidos: i) da avaliação por perda de massa das fórmulas selecionadas; ii) da Produção de novos suportes, bem como MEV dos novos suportes; e iii) da soldagem do passe de raiz dos novos suportes.

4.2.1 Avaliação por Perda de Massa das Formulações

Na intenção de melhorar o desempenho dos suportes testados, as formulações, selecionadas na etapa 1, foram submetidas a tratamento térmico para avaliar a perda

de massa das mesmas, de acordo com o item 3.2.2.1. Além disso, mais uma formulação com EFS-SB foi proposta, a formulação 22 da tabela 3.5, e teve sua perda de massa avaliada.

A figura 4.9 apresenta o aspecto das massas após tratamento térmico a 110°C e 300°C. Observa-se nessa figura uma mudança na coloração das massas para todas as formulações avaliadas.



Figura 4.9: Aspecto das massas após tratamento de 110°C e 300°C.

A tabela 4.1 apresenta o percentual de perda de massa das formulações em determinadas faixas de temperatura.

Tabela 4.1: Perda percentual de massa das formulações para determinadas faixas de temperatura.

Fórmula \ Faixa de temperatura (°C)	60° - 110°	110° - 300°	300° - 500°	500° - 700°	Total de redução
3	6,82%	1,46%	1,52%	0,28%	10,08%
10	5,83%	8,61%	0,74%	0,43%	15,61%
11	7,02%	7,31%	1,15%	0,42%	15,89%
17	0,00%	6,57%	0,82%	0,04%	7,44%
22	1,29%	7,22%	0,56%	0,13%	9,20%

A figura 4.10 mostra o gráfico do percentual de perda de massa acumulado das formulações com a evolução da temperatura de 60°C até 700°C.

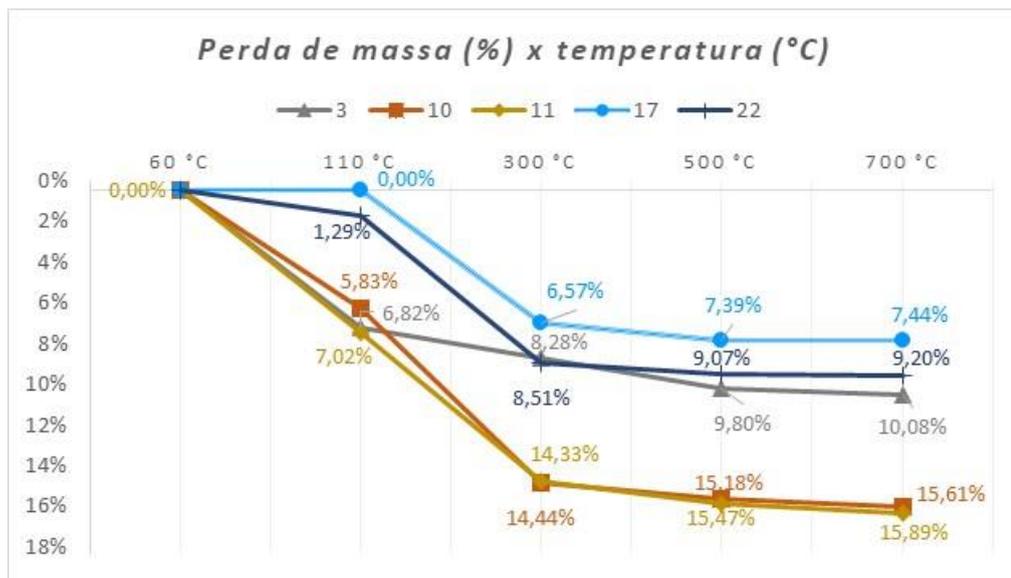


Figura 4.10: Gráfico da perda percentual de massa com evolução da temperatura das formulações selecionadas.

A perda de massa na faixa de temperatura de 60°C – 300°C, possivelmente se deve à perda de água de hidratação. Após 300°C, a perda de massa continua, porém em menor quantidade, o que pode ser atribuída a alguma água de hidratação remanescente adsorvida no interior da massa. Na faixa de temperatura de 500°C – 700°C as perdas de massa passam a ser pouco significativas, menos de 0,5% para

todas as formulações, deste modo a máxima temperatura testada para avaliar a perda de massa das formulações foi de 700°C, pois, além não ter mais perda de massa significativa, o aumento da temperatura notoriamente aumenta custo de produção.

Van Vlack (1984), afirma que para a maioria dos produtos cerâmicos a temperatura de queima situa-se entre 800 °C a 1700 °C, em fornos contínuos ou intermitentes. Almeida (2009) e Júnior (2014), produziram suportes cerâmicos sinterizando-os em 1100°C.

De acordo com a figura 4.11 e a tabela 4.1, entre as formulações avaliadas, a formulação 3, com cimento, apresentou perda de massa de 10,08% no intervalo de 60°C a 700°C. Sendo que, desse total, 6,82% foi perdida na faixa de temperatura entre 60°C – 110°C.

As formulações 17 e 22, foram as que sofreram menor perda de massa com a evolução da temperatura até 700°C. Essas formulações tiveram perda de massa significativas na faixa de temperatura 110°C – 300°C. Na faixa de temperatura 60°C – 110°C, parece não ter ocorrido a geopolimerização para a formulação 6, visto que não houve perda de massa, e para a formulação 22 a redução de massa foi bem pequena para essa faixa de temperatura.

As formulações 10 e 11, com metacaulim, foram as que sofreram maior perda de massa em comparação com as demais formulações. Nesse caso, as perdas de massa foram significativas na faixa de temperatura de 60 – 110° e, também, na faixa de temperatura 110°C – 300°C. Até 700°C essas formulações apresentaram redução de massa de 15,61% e 15,69%, respectivamente.

A evolução de gases durante o processo de soldagem, está ligada à perda de massa do suporte. Além disso, maior perda de massa significa maior redução do volume da massa, que pode gerar mudanças significativas na geometria do suporte. Deste modo, as formulações 10 e 11, que apresentaram maior perda de massa, foram descartadas para produção de novos suportes.

Após entender o efeito da perda de massa nas formulações, novos suportes foram produzidos (item 4.2.2), com as formulações que apresentaram menores perdas de massa, ou seja, as formulações 3, 17 e 22, para soldagem do passe de raiz e avaliação da junta soldada (item 4.2.3).

4.2.2 Produção dos Novos Suportes de Solda

Neste item estão apresentados os novos suportes que foram produzidos, com as formulações selecionadas no item 4.2.1, aqui chamadas de fórmula A, B e C, moldada por dois métodos: i) vertido em molde plástico; ii) prensagem da massa cerâmica, de acordo com o item 3.1.; também estão apresentadas as imagens de MEV nos aumentos de 150x e 300x, obtidas das superfícies das fraturas dos suportes produzidos.

4.2.2.1 Produção dos Suportes

Os novos suportes foram produzidos de acordo com o processamento dos protótipos adotados no item 3.2.1.2., e as formulações selecionadas para a produção dos novos suportes se encontram na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição percentual das fórmulas utilizadas para produção de suportes

Composição Fórmula	EFS-B	CPIIE-32	Areia	Silicato de sódio alcalino	Hidróxido de Sódio	Total
A	21,6%	11,9%	33,6%	31,9%	0,9%	100%
B	40,0%	-	40,0%	19,0%	1,1%	100%
C	51,1%	-	25,6%	22,0%	1,2%	100%

Os suportes foram moldados por dois métodos: i) prensado, e ii) vertido em molde, de acordo com os processos de moldagem descritos no item 3.1.

Para seguir o processo de moldagem por pressão, a massa formada ficou curando até que tivesse consistência adequada para prensar, e após desmoldar, foram levados em estufa pré-aquecida em 60°C por 24 horas, seguido de tratamento térmico posterior.

As formulações vertidas em molde, foram levadas à estufa pré-aquecida em temperatura de 50°C por 24 horas com o molde, sendo posteriormente desmoldadas e em seguida foram tratadas termicamente.

Os novos suportes produzidos pelos dois métodos de moldagem foram tratados termicamente em forno mufla, com patamares de temperatura em 110°C, 300°C e 700°C. A taxa de aquecimento foi de 3 °C/min, com patamares de 3 horas em cada

temperatura, e taxa de resfriamento foi de 4°C/min até a temperatura ambiente, sendo estes ciclos controlados pelo forno.

A figura 4.11 (a) apresenta um suporte produzido pelo método de moldagem vertido em molde, e a figura 4.12 (b) um suporte produzido pelo método de moldagem de prensagem.

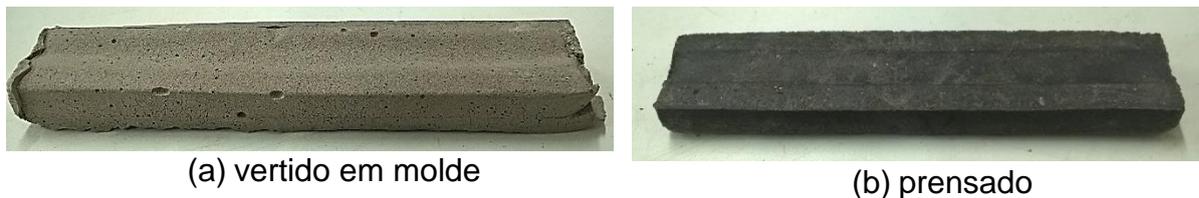


Figura 4.11: Novo suporte produzido por dois métodos de moldagem: (a) vertido em molde e (b) prensado.

O suporte produzido prensado ficou com a coloração cinza escuro devido a utilização de grafite como lubrificante da matriz metálica, e a concavidade ficou um pouco rasa devido a relaxamento da massa após o desmolde. Essas características foram observadas para as três formulações.

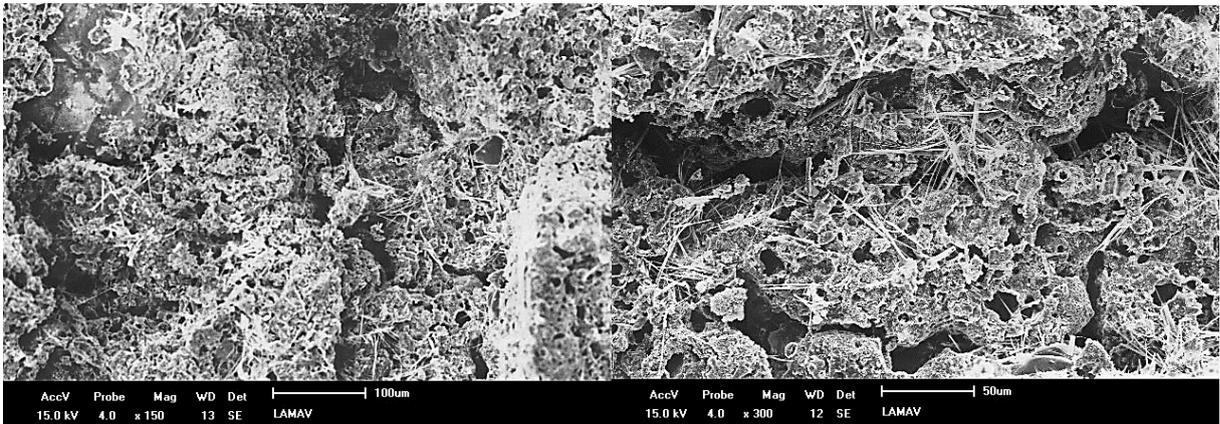
4.2.2.2 MEV dos Novos Suportes

A Figura 4.12 mostra as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos suportes da formulação “A”. A morfologia da amostra vertida em molde (Figuras 4.12a e 4.12b) diferencia-se da amostra prensada (Figuras 4.12c e 4.12d), ambas de mesma formulação. A amostra vertida em molde apresenta-se porosa e com os cristais aciculares dispersos na matriz, possivelmente etringita (sulfoaluminato de cálcio hidratado, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$) – cristais comumente encontrados após a hidratação do cimento Portland (Berman e Newman, 1963). Já a amostra que foi prensada apresenta-se com baixa porosidade e morfologia típica de estruturas amorfas a semicristalinas, podendo ser observadas microfissuras para os maiores aumentos. Essas microfissuras são devidas à compressão excessiva utilizada durante o processo de moldagem. As amostras prensadas não continham cristais de etringita, ao contrário das amostras vertidas em molde. Ressalta-se que para a formação da etringita há necessidade de elevada quantidade de água (31 moléculas).

Aumentos

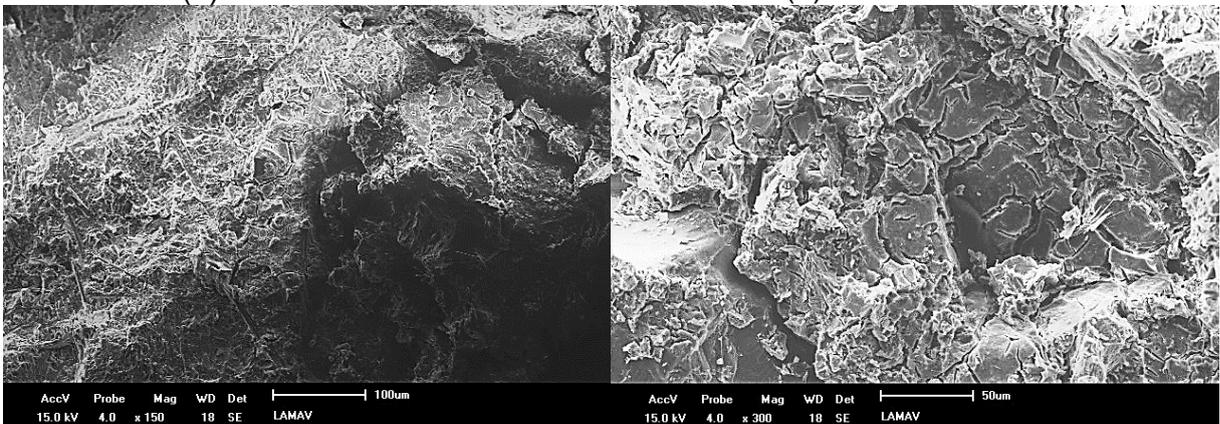
150x

300x



(a) Fórmula A vertida

(b) Fórmula A vertida



(c) Fórmula A prensada

(d) Fórmula A prensada

Figura 4.12: MEV dos suportes de formulação A: (a) vertido em molde, no aumento de 150x, (b) vertido em molde, no aumento de 300x, (c) prensado, no aumento de 150x, (d) prensado, no aumento de 300x.

Já a Figura 4.13 mostra as micrografias dos suportes da formulação “B”. A microestrutura apresenta-se amorfa a semicristalina, com elevada porosidade, tanto para a amostra vertida em molde (Figuras 4.13a e 4.13b) quanto para a prensada (Figuras 4.13c e 4.13d). Porém, ambas não continham cristais de etringita, já que não possuíam cimento Portland em sua composição (somente escória de fluxo de soldagem). Logo, a quantidade de água não foi o fator determinante com relação a não formação de etringita, mas sim a ausência de cimento Portland.

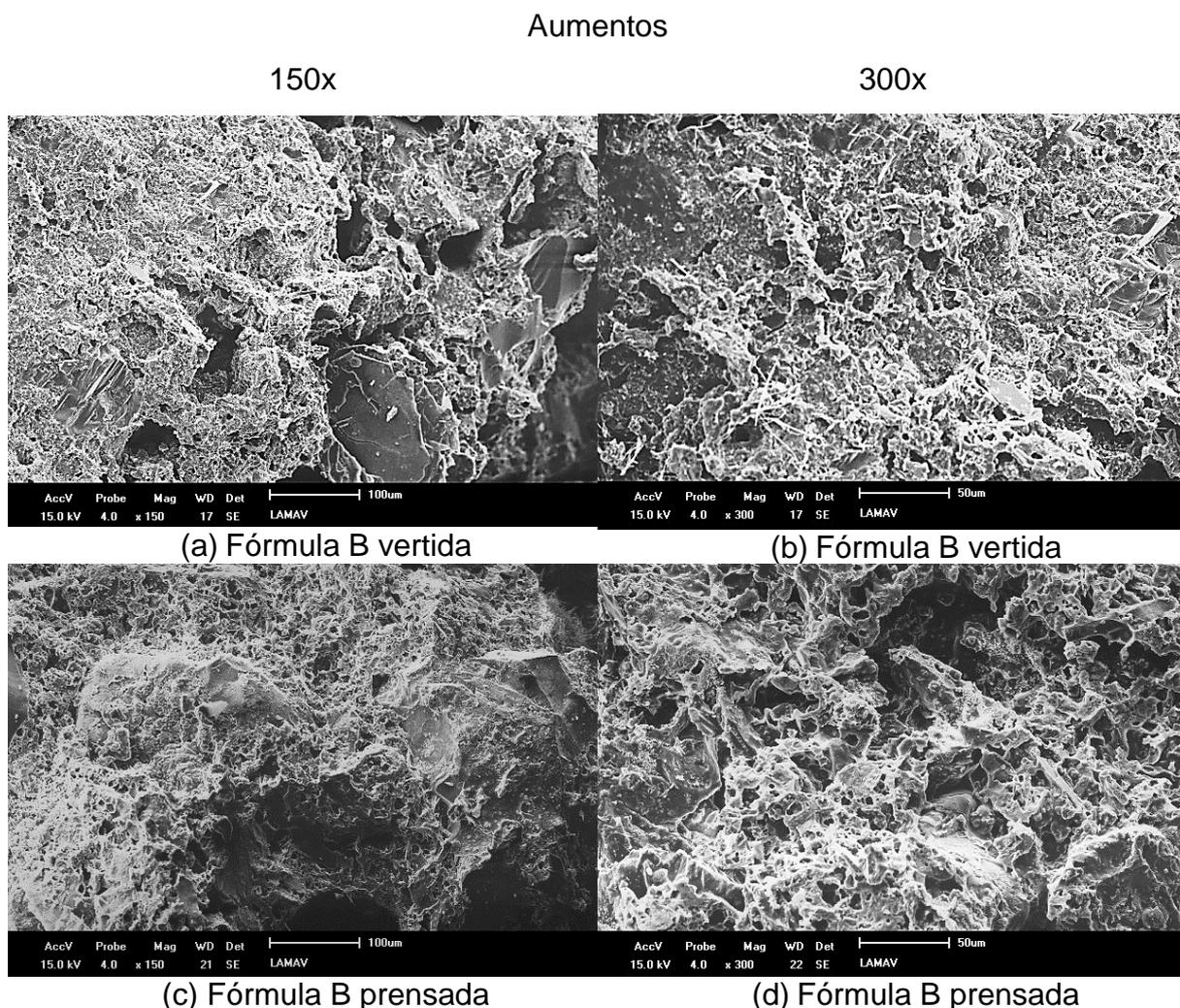


Figura 4.13: MEV dos suportes de formulação B: (a) vertido em molde, no aumento de 150x, (b) vertido em molde, no aumento de 300x, (c) prensado, no aumento de 150x, (d) prensado, no aumento de 300x.

Finalmente, a Figura 4.14 mostra as micrografias dos suportes da formulação “C”, na qual é possível observar morfologia amorfa a semicristalina, e também elevada presença de poros. A amostra que foi vertida em molde (Figuras 4.14a e 4.14b) apresenta-se mais amorfa do que a que foi prensada (Figuras 4.14c e 4.14d). A amostra que foi prensada possui cristais aciculares no interior dos poros, possivelmente silicato de magnésio hidratado, $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$, também conhecido por crisotila.

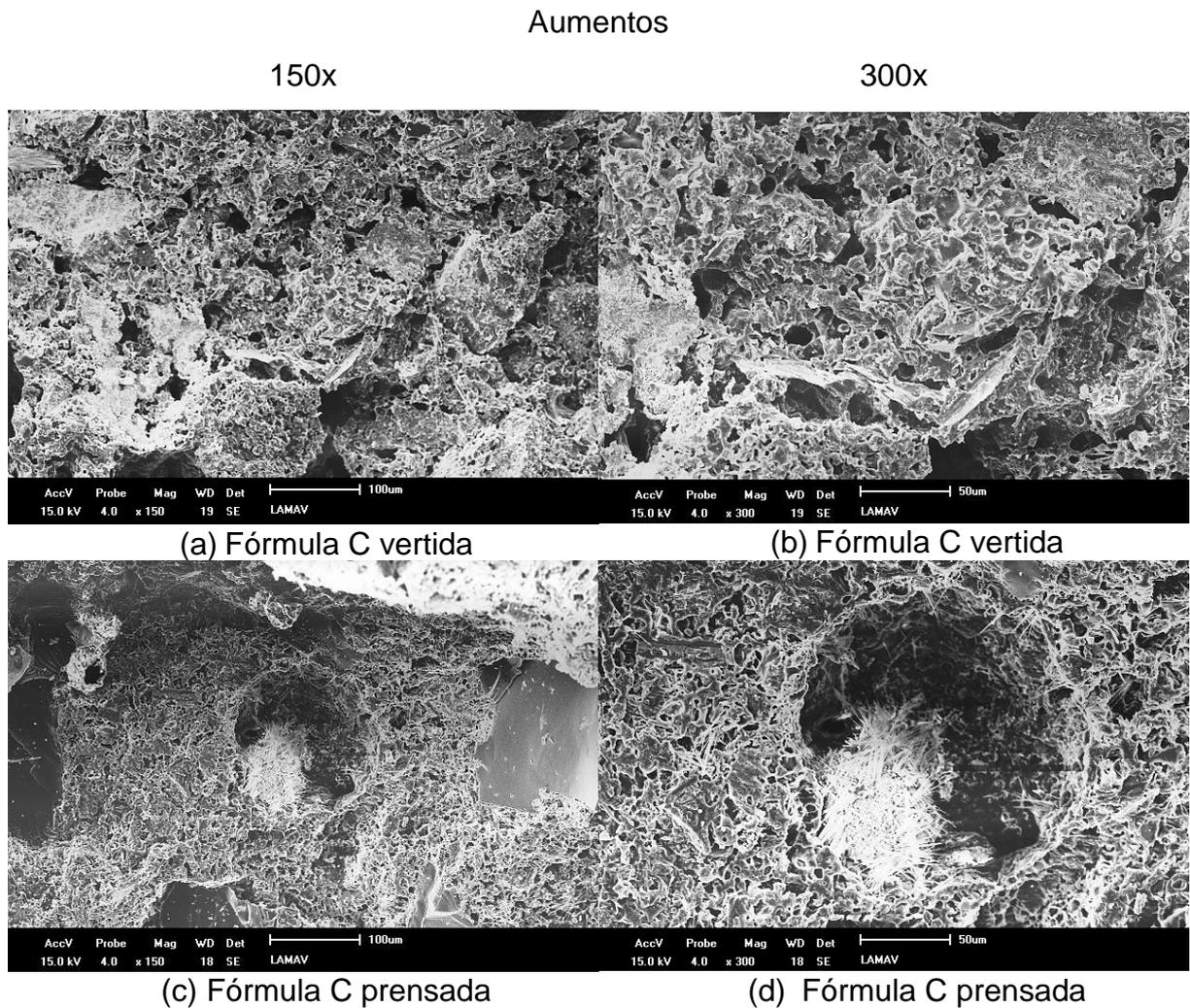


Figura 4.14: MEV dos suportes de formulação C: (a) vertido em molde, no aumento de 150x, (b) vertido em molde, no aumento de 300x, (c) prensado, no aumento de 150x, (d) prensado, no aumento de 300x.

Por meio das imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura foi possível verificar que todas as amostras se apresentaram com morfologia amorfa a semicristalina. Isso evidencia que o material produzido neste estudo pode ser considerado um tipo de geopolímero, visto que os geopolímeros são produtos amorfos a semicristalinos análogos às zeólitas naturais, conforme Rahier *et al.* (2011).

4.2.3 Soldagem do passe de raiz e Avaliação da Junta Soldada

Para avaliação dos novos suportes, com as formulações selecionadas, oito juntas foram preparadas conforme o procedimento experimental descrito no item 3.2.1.3, sendo que as soldas foram realizadas na FAETEC, em Campos dos Goytacazes – RJ.

Antes da aplicação do passe de raiz, os suportes de solda com as formulações selecionadas foram levados em estufa a 110°C por 1h., de modo a eliminar alguma umidade absorvida do meio ambiente, mesmo que os suportes já tenham sido tratados termicamente.

4.2.3.1 Raiz da Solda e Suporte de Solda

O resultado da aparência dos suportes de solda de EFS logo após a operação de soldagem pelo processo MIG-MAG, bem como da raiz da solda após limpeza com escova de aço, são exibidos nas figuras 4.15 e 4.16 respectivamente.

Os suportes permaneceram inteiros após soldagem, resistindo às elevadas temperaturas resultantes do contato com o metal líquido. Exceto o suporte prensado de formulação “A”, este ficou aderido à raiz da solda e quando foi retirado se fragmentou, conforme mostra a figura 4.15 (b).

Todos os suportes tiveram suas aparências irregulares e vitrificadas.

No caso das fórmulas vertidas, a concavidade pode ter ficado torta, devido às adaptações feitas no molde de borracha de silicone. Nesse caso, a fabricação do molde deve ser de material inerte à massa geopolimérica. Uma sugestão para o tipo de material usado para confeccionar o molde, seria o polipropileno, material de que são feitos os copos descartáveis, visto que após a cura da massa, na avaliação de perda de massa (ver item 4.2.1), o material se soltou facilmente. Isso também foi observado com o material da fita adesiva (acetato de celulose) e da transparência de retroprojeto.

Os suportes produzidos por prensagem precisam de melhorias em relação a geometria do suporte, de modo que a concavidade do suporte seja suficiente para oferecer um anteparo adequado para a poça de solda. Supõe-se que se deixar a massa curar por mais tempo antes de prensar, não ocorra o relaxamento da mesma perdendo a concavidade do suporte conseguida na prensagem.

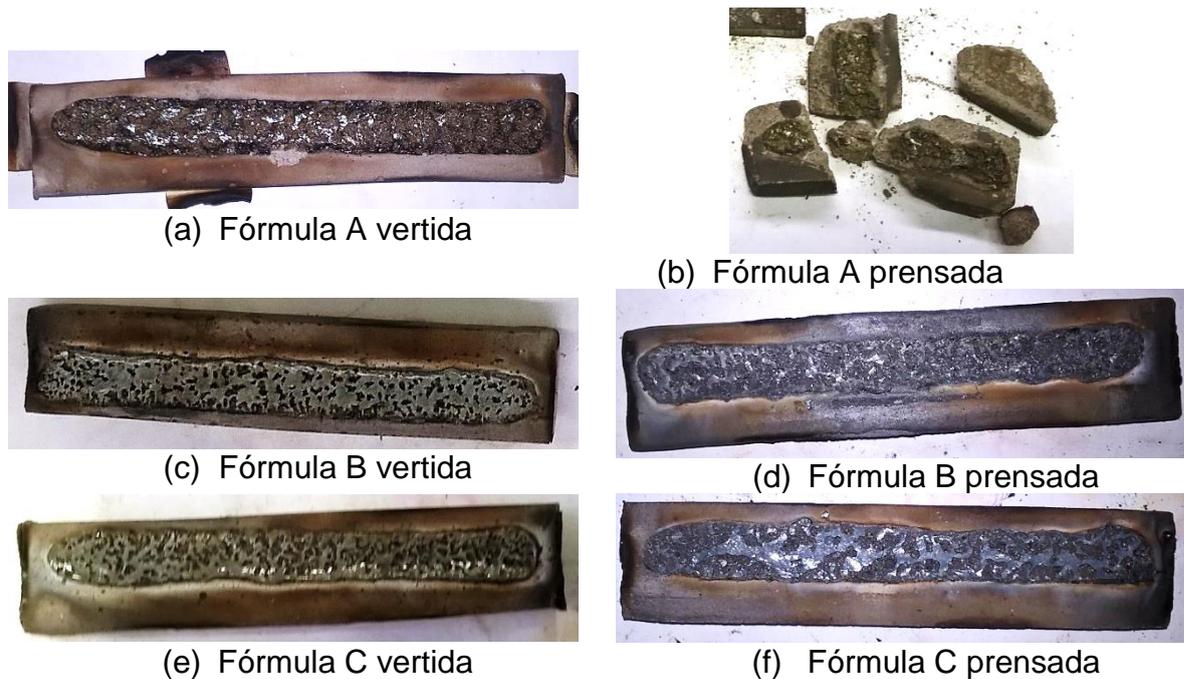


Figura 4.15: Aparência dos suportes, após o processo de soldagem, de formulação (a) A, vertido em molde; (b) A, prensado; (c) B, vertido em molde; (d) B, prensado; (e) C, vertido em molde; e (f) C, prensado.

As figuras 4.16a, 4.16c e 4.16e, apresentam os resultados dos cordões de solda produzidos com suportes vertidos. Já as figuras 4.16b, 4.16d e 4.16f, mostram os resultados dos cordões de solda obtidos com suportes prensados.

A aparência dos cordões de solda que foram produzidos com suportes vertidos, se mostrou um pouco irregular, com descontinuidades no formato de depressões, e poucos e pequenos respingos. Com exceção do cordão de solda produzido com o suporte de fórmula “C” vertido, que não apresentou descontinuidades no formato de depressões e nem respingos. Assim sendo, este cordão de solda foi o que apresentou melhor aparência.

Os cordões de solda que foram produzidos com as formulações que foram moldadas por prensagem, se mostraram com formatos irregulares, com descontinuidades no formato de depressões, e sem respingos. Essas descontinuidades se devem à concavidade dos suportes rasa, sendo inadequado para amparar a poça de solda.

Para efeito comparativo, ainda que os suportes produzidos nessa etapa tenham apresentado aparência irregular, estes ficaram melhores que os produzidos na etapa 1. Além disso, o resultado das aparências dos cordões de solda também apresentou melhorias. Exceto os suportes produzidos por prensagem, esses apresentaram

resultados muito parecidos com os da etapa 1, assim, precisa de mais estudos para alcançar os resultados desejados.

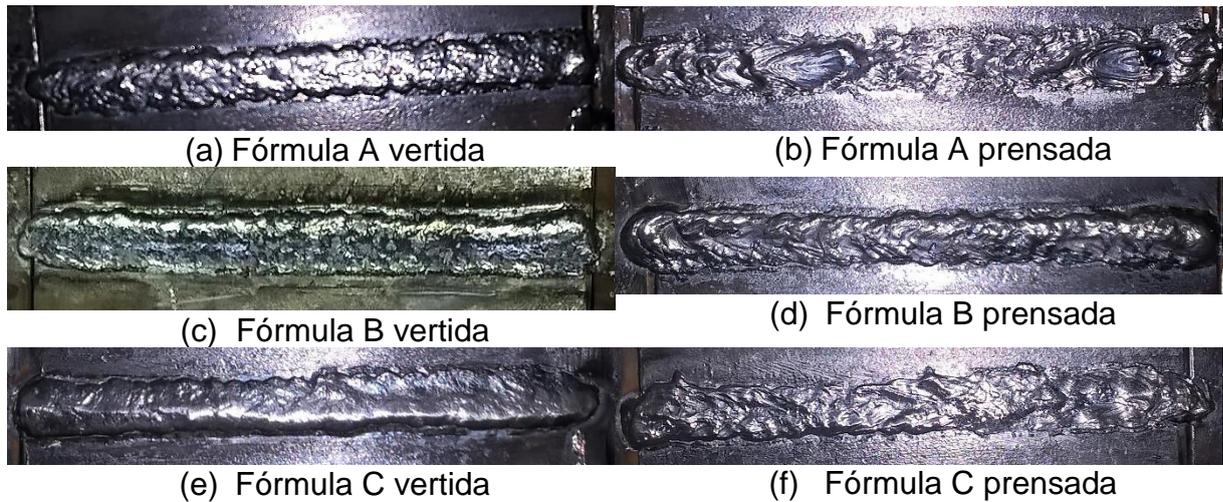


Figura 4.16: Aparência dos cordões de solda após o processo de soldagem, na qual foi usado suporte de formulação (a) A, vertido em molde; (b) A, prensado; (c) B, vertido em molde; (d) B, prensado; (e) C, vertido em molde; e (f) C, prensado.

4.2.3.2 Macrografia da Junta Soldada

Após a limpeza dos cordões de solda, foram cortadas seções transversais para preparação das macrografias de acordo com o item 3.2.2.2.1.

Através da análise macroscópica foi possível identificar as regiões da junta soldada como: a zona fundida (ZF), a zona termicamente afetada (ZTA), metal de base (MB) reforço da raiz (RR) e face da solda (FS). A figura 4.17 ilustra essas regiões.

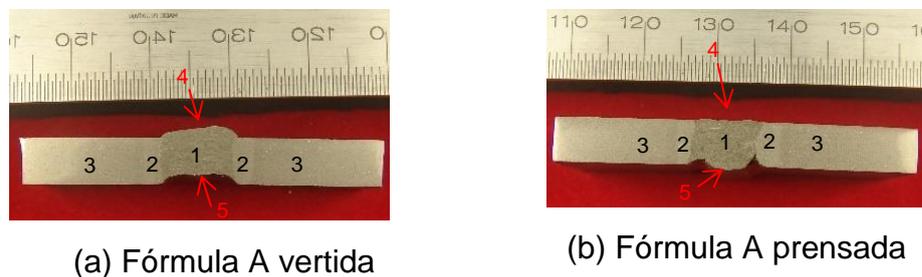


Figura 4.17: Macrografias das juntas produzidas, com suporte vertido e suporte prensado, mostrando as seguintes regiões: 1 – ZF, 2 – ZTA, 3 – MB, 4 – RR e 5 – FS.

As macrografias de todas as juntas produzidas com os novos suportes são apresentadas na figura 4.18.

Os resultados das macrografias são satisfatórios, pois não foram observadas descontinuidades internas no passe de raiz, da junta soldada com os novos suportes de solda produzidos com as fórmulas “A”, “B” e “C”, e foi obtida penetração nas laterais do chanfro.

O reforço da raiz mostrou-se apropriado para as juntas produzidas com os suportes de fórmulas vertidas (ver figuras 4.18a, 4.18c e 4.18e). Já o reforço de solda das juntas produzidas com as fórmulas prensadas (ver figuras 4.18d, 4.18d e 4.18f), apresentaram geometria achatada, devido a concavidade presente no protótipo ter sido rasa de mais.

Devido ter sido feito somente o passe de raiz, não houve enchimento suficiente das juntas soldadas na face da solda, ou seja, enchimento de toda a espessura da chapa. Inclusive, observa-se falta de fusão nas laterais do chanfro, na face da solda, para as fórmulas “A” e “B” prensadas. Torna-se necessário plicar mais passes de solda para preencher toda a espessura da chapa.



(a) Fórmula A vertida



(b) Fórmula A prensada



(c) Fórmula B vertida



(d) Fórmula B prensada



(e) Fórmula C vertida



(f) Fórmula C prensada

Figura 4.18: Macrografias das juntas produzidas com suporte de: (a) fórmula A vertido, (b) fórmula A prensado, (c) fórmula B vertido, (d) fórmula B prensado, (e) fórmula C vertido, e (f) fórmula C prensado.

Os resultados indicam que os cordões de solda, produzidos com suportes vertidos, apresentaram aparências melhores do que os obtidos na primeira etapa. Logo, é viável a produção de suportes de solda a partir da geopolimerização da EFS, com posterior queima dos mesmos em temperaturas mais baixas que as aplicadas na produção de suportes cerâmicos convencionais.

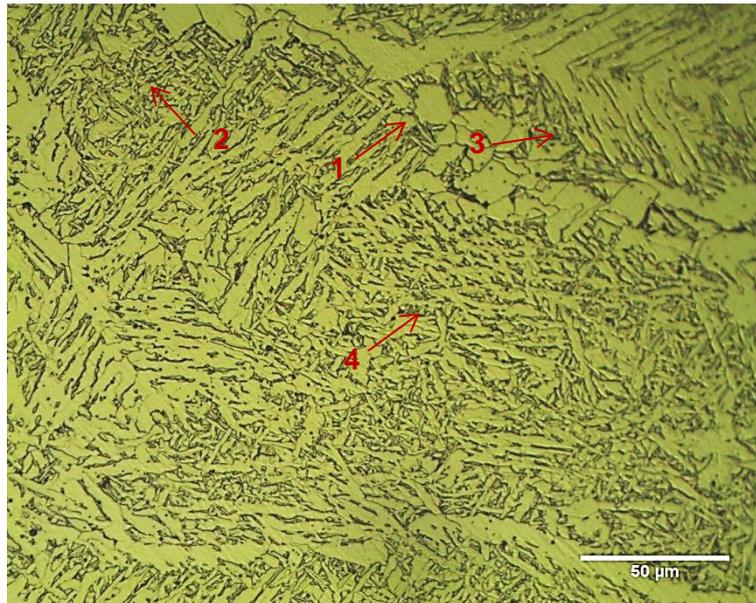
4.2.3.3 Microscopia Ótica

Nesse item são apresentados os resultados da análise qualitativa feita por microscopia ótica. As amostras foram preparadas de acordo com o item 3.2.2.2.2.

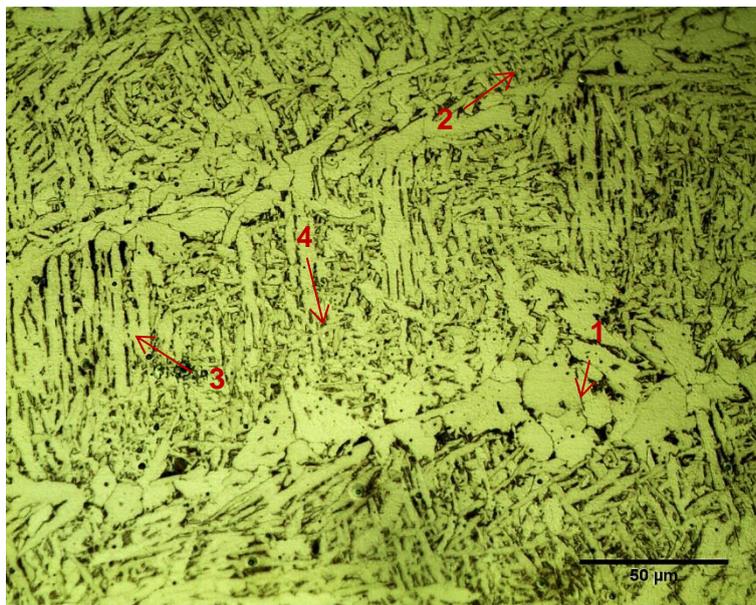
A figura 4.19a exibe a microestrutura da raiz da solda com aumentos de 500x, produzida com o suporte de solda de fórmula “C” vertido (figura 4.19a) e de fórmula “B” prensado (figura 4.19b). Pode ser observado uma quantidade significativa de ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)), ferrita de segunda fase não alinhada (FS(NA)) e ferrita acicular (AF). Não foi verificada a presença de martensita (M), nem de agregado ferro-carbeto (FC).

Os resultados mostram que as microestruturas obtidas são típicas do metal de solda de aços ferríticos baixo carbono, e estão de acordo com os resultados obtidos por Araújo et al. (2006) e Silva et al. (2003), que trabalharam o aço A36.

Os resultados aqui apresentados mostram microestrutura ligeiramente mais refinada que os encontrados no trabalho de Almeida (2009) e Júnior (2014), que utilizaram suportes de cordierita e EFS, respectivamente, e os mesmos insumos e processo desse trabalho. Essa ligeira diferença se justifica no fato de que, em seus trabalhos, além do passe de raiz foi feito preenchimento do chanfro com passes de solda subsequentes. Logo, o passe de raiz sofreu ciclos de reaquecimento, o que provoca a modificação da estrutura bruta de fusão, e modifica as propriedades mecânicas (Modenesi, 2004).



(a) Fórmula C vertido 500x



(b) Fórmula B prensado 500x

Figura 4.19: Micrografias da seção transversal do passe de raiz, produzido com suporte de fórmula: (a) C vertido, (b) B prensado. Aumento de 500X. Ataque: nital 2%, Sendo: 1- PF(G), 2- AF, 3-FS(A) e 4- FS(NA).

4.2.3.4 Dureza Vickers

Para a medição de dureza, as regiões analisadas no ensaio de microdureza Vickers estão de acordo com o item 3.2.2.2.3. A Tabela 4.3 apresenta os resultados

da dureza das três regiões da solda produzida com o suporte de solda de fórmula “C” vertido (tabela 4.3a) e “B” prensado (tabela 4.3b), a figura 4.20 mostra esses resultados plotados em gráficos.

Para o suporte de fórmula “B” prensado, a dureza medida foi igual a 169,5 HV para a região do MB, 208,9 HV para a região da ZF e 185,4 HV para a região da ZTA. Já o suporte de fórmula “C” vertido, o valor médio de dureza medido foi igual a 173,7 HV para a região do MB; 222,6 HV para a região da ZF; e 194,0 HV para a região da ZTA. As medidas de dureza encontradas estão compatíveis com o aço A-36 soldado com ER-70S6 que foi utilizado nessas juntas, e estão em conformidade com os resultados das microestruturas apresentadas.

Da mesma forma que os resultados microestruturais encontrados são ligeiramente diferentes do que os encontrados por Almeida (2009) e Júnior (2014), os valores de medidas de dureza Vickers, aqui apresentados, são ligeiramente maiores. Pois, nos trabalhos de Almeida (2009) e Júnior (2014), o aporte térmico devidos aos passes de solda subsequentes causaram relaxamento das tensões e, por isso, apresentaram valores de dureza ligeiramente menores.

Tabela 4.3: Dureza Vickers das três regiões da solda produzida com o suporte de solda de fórmula (a) “B” prensado e (b) “C” vertido.

Fórmula B prensada			
Medida	ZTA	ZF	MB
1	170	212	190
2	184	192	149
3	169	198	168
4	181	194	184
5	189	206	169
6	171	214	186
7	209	209	163
8	190	214	190
9	184	204	154
10	201	225	144
11	186	225	177
12	191	214	160
MÉDIA	185,42	208,92	169,5

(a)

Fórmula C vertido			
	ZTA	ZF	MB
1	191	238	183
2	184	235	183
3	192	238	180
4	204	235	181
5	202	230	167
6	185	212	181
7	195	182	170
8	197	213	186
9	213	208	150
10	185	230	171
11	189	222	179
12	191	228	153
MÉDIA	194,0	222,6	173,7

(b)

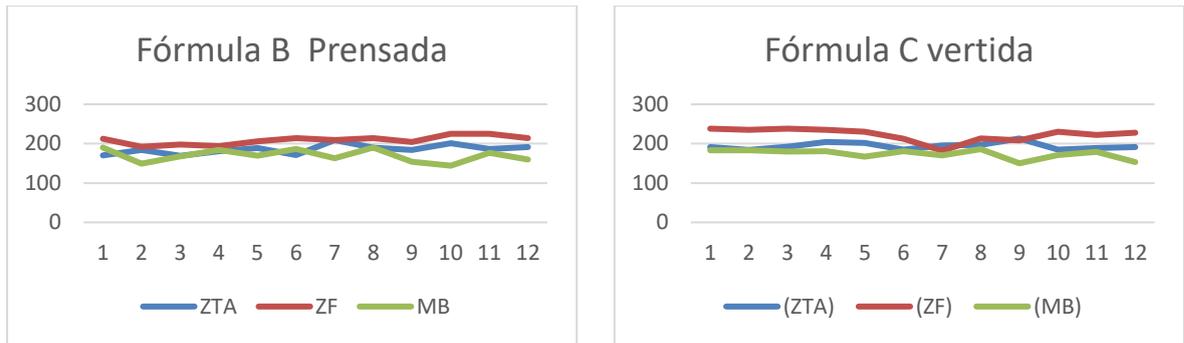


Figura 4.20: Gráficos de Dureza Vickers das três regiões da solda produzida com o suporte de solda de fórmula (a) “B” prensado e (b) “C” vertido

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesse estudo, sobre o desenvolvimento de suporte de solda a partir de geopolimerização de escória de fluxo de soldagem, se obteve as seguintes conclusões:

1. Os resultados mostram a viabilidade técnica de uma nova rota de confecção de suportes para soldagem unilateral e uma alternativa sustentável para uso de EFS, além de reduzir os custos do processo de soldagem e combater a poluição ambiental
2. As fórmulas A, B e C à base de EFS básica apresentaram bons resultados de geopolimerização e bons resultados de soldabilidade.
3. Fórmulas à base de EFS semi-básica necessitam de aprimoramento para ocorrência de geopolimerização.
4. As fórmulas produzidas por geopolimerização precisam ser queimadas na temperatura mínima de 700°C para atuar com suporte de solda, em razão da evolução de água durante o aquecimento gerado pela operação de soldagem.
5. Os resultados das micrografias e de dureza mostraram que a aplicação do suporte geopolimérico à base de EFS básica, não afetou o comportamento da junta soldada do Aço A.36 e ER70S-6 no passe de raiz e estão de acordo com resultados de outros trabalhos.

CAPÍTULO 6: SUGESTÕES

A seguir, nesse capítulo, são apontadas sugestões para trabalhos futuros:

1. Confeccionar novas matrizes, de material inerte ao geopolímero de EFS, e de geometrias diferentes para aplicação em outros tipos de chanfros.
2. Realizar melhorias no processamento de moldagem por prensagem de geopolímeros.
3. Estudar novas formulações com estequiometrias que favoreçam a ativação alcalina de EFS, de modo que tenha máximo aproveitamento desse tipo de resíduo.
4. Realizar análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TGA), de suportes de solda de geopolímeros de EFS, a fim de se obter dados da perda de massa do material com a evolução da temperatura.
5. Realizar outros ensaios, como tenacidade à fratura, ensaios de flexão, compressão e de absorção de água, para fins de outras aplicações, como produção de argamassas geopoliméricas de EFS para a construção civil.
6. Variar os parâmetros da soldagem unilateral com suporte geopolimérico de EFS, como corrente, velocidade de soldagem e abertura de raiz, a fim de delimitar um campo operacional de soldagem mais adequado.
7. Realizar o preenchimento completo do chanfro, utilizando os suportes de geopolímeros de EFS, para avaliar as propriedades mecânicas da junta soldada, por meio de ensaios de dureza, tração e dobramento.

CAPÍTULO 7: REFERÊNCIAS

- ABCERAM (2016) Associação Brasileira de Cerâmica: <http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/> (acessado em 02/ 10/ 2016)
- ABCERAM. (2016). Associação Brasileira de Cerâmica. Fonte: <http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4> (acessado em 23/03/2016)
- ABNT. (2004). Associação Brasileira de Normas Técnicas - Resíduos sólidos - Classificação ABNT.NBR:10004. Rio de Janeiro, RJ.
- Akselrud, L. (2007). *Fundamento da Ciência dos Polímeros*. Barueri, SP: Manole.
- Almeida, L. L. (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.
- Almeida, L., Tatagiba, L., Vieira, C., Ramalho, J., e Paranhos, R. (2009). Estudo de Formulações e das Variáveis de Fabricação de um Suporte de Solda Cerâmico. *Soldagem Inspeção* , Vol. 14, No. 4, pp. p.288-297.
- Andrade, S. (2007). Mapeamento do processo mecanizado de soldagem unilateral FCAW com baching cerâmico aplicável no passe de raiz em aço carbono. *Dissertação de Mestrado*, 106. Belo Horizonte, MG: UFMG.
- Annoni, R. (2011). *Lixiviação de Escória de Soldagem a Arco Submerso Visando à Recuperação dos Óxidos de Alumínio e de Titânio*. Belo Horizonte, MG: UFMG.
- Araújo, M. (2006). Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural. *Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista - UNESP.
- ARCSul (2005). <http://www.arcsul.com.br/pt/produto.asp?prdID=109> (Acessado em 14/ 04/ 2016)
- ASME. (2004). Boiler & Pressure Vessel Code - Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators . *ASME IX*. New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers .
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). Resíduos sólidos – Classificação

- ABNT. *NBR- 10004*. Rio de Janeiro, RJ.
- AWS. (1991). American Welding Society. *Welding Handbook, Vol.2*, 191-231p. Miami.
- AWS SFA 5.18. (2001). Specification for Carbon Steel Electrods and Rods for Gas Shielded Arc Welding.
- Barbosa, V., MacKenzieb, K., e Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials* , 2, pp. 309 –317.
- Batista, J., e Beltran, V. (1986). Arcilas de la província de valência. *Bol. Soc. Esp. Ceram.*, 25 , 231-235.
- Bernardes, L. (2006). A Granulação de Materiais. *GranTec Tecnologias para Homogeneização e Granulação de Materiais* . Piracicaba – SP.
- Bezerra, I. M., Costa, D. L., Vitorino, J. P., Menezes, R. R., & Neves, G. A. (2013). Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.8.2 , pp. 101-105.
- Bigno, I. (2008). Geopolímeros À Base De Resíduos Agrícolas E Agroindustriais. *Tese de Doutorado*, 280p. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia - IME.
- Blissari, E., Spricigo, L., Conte, V., Uggioni, E., e Bernardin, A. (2011). Geopolímeros Obtidos A Partir De Cinzas De Carvão Mineral. *1º Seminário de Pesquisa, Extensão e Inovação do IF-SC-Campus Criciúma*, (pp. 111-112). Criciúma- SC.
- Brito, J., & Paranhos, R. (2005). *Como determinar os custos da soldagem*. Campos dos Goytacazes, RJ.
- Callister, W. (2008). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC.
- Câmara dos Deputados. (2015). *PL 2289/2015*. Acesso em 17 de 10 de 2016, disponível em Projetos de Lei e Outras Proposições: <http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=155533>
- 1
- Cantrell, R. E. (1982). Ceramic weld backing evaluation. *Welding Journal*, vol. 61 , pp.

27-34p.

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

Carvalho, P. (2012). Betões e Argamassas Modificados com Incorporação de PVA. *Dissertação de Mestrado*, 84p. Universidade do Minho - Escola de Engenharia.

Chaves, L., N.C., A., & Tito, G. (1999). Efeito da Aplicação de Betonita nas Propriedades Químicas de um Regossolo Distrófico - Nota Técnica. *Agropecuária Técnica*, v.20 n°1.

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

Cruz, T., Campos, T., e Thim, G. (2008). Estudo Do Comportamento Do Pva Com Aditivos Inorgânicos. *Anais do 14º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIV ENCITA* . São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA.

Daley, H. C., e Gray, G. R. (1988). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (Fifth Edition ed.). Houston-USA: Gulf Publishing Company.

Datta, S., Bandyopadhyay, A., e 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*, 39, 229–238.

Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement, a review; . *Instituti Géopolymère*, p. 11p.

Dias, A. (2008). Estudo da Degradação de Argamassa Geopolimérica por Ácido Acético e Sulfúrico. *Dissertação de Mestrado*, 128p. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G., Palomo, A., e Deventer, J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal Materials Science*, 42, pp. 2917–2933.

EMBRAPA. (2001). Ficha de Informações de Segurança - Hidróxido de Sódio. Fonte: [http://cloud.cnpqg.embrapa.br/wp-content/igu/fispq/laboratorios/Hidr%C3%B3xido%20de%20s%C3%B3dio%20\(sol.%2](http://cloud.cnpqg.embrapa.br/wp-content/igu/fispq/laboratorios/Hidr%C3%B3xido%20de%20s%C3%B3dio%20(sol.%2)

Oaquosa).pdf

Esteves, A., Timmons, A., e Trindade, T. (2004). Nanocompósito de Matriz Polimérica: Estratégias de Síntese de Materiais Híbridos. *Química Nova*, 27(nº5), pp. 798-806.

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

Fortes, C. (2005). Apostila de Soldagem MIGMAG. 68. ESAB.

Fortes, C., e Araújo, W. (2004). *Apostila de Arco Submerso*. ESAB BR.

Garg, J., e Singh, K. (2016). Slag recycling in submerged arc welding and its effects on the quality of stainless steel claddings. *Materials and Design*(108), pp. 689-698.

Geo-Pol (2016) *Geopol-Cimentos Geopoliméricos*. Fonte: <http://www.geopolymer.com.br> (Acessado em 07/ 10/ 2016)

GULLCO (2013). disponível em <http://catalog.gullco.com/viewitems/ceramic-weld-backing/katbak-ceramic-weld-backing?> (Acessado em 10/ 04/ 2016)

Gurgel, R., e Paranhos, R. (2015). The Use of Fiberglass and Ceramic Cylinders to Support the Root Pass in C-Steel Welds with a Double-V Groove. *Soldagem & Inspeção*, V.20(nº3), pp. 359-366p.

Gutiérrez, J., Rubio, J., Faria, P., e Davim, J. (2014). Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. *Polímeros*, 24(6), pp. 711-719.

Haidar, J., e Lowke, J. J. (1996). Predictions of metal droplet formation in arc welding. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, pp. 2951-2960.

John, V. (1995). Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. *Tese de Doutorado*, 200. São Paulo, SP: USP.

Júnior, J. N. (2014). Desenvolvimento De Suporte De Solda Cerâmico A Base De Resíduo De Escória De Soldagem. Campos dos Goytacazes, RJ: UENF.

Júnior, J., e Paranhos, R. (2015). *Patente Nº BR1020150105320*.

Kraemer, M. (2005). *A questão ambiental e os resíduos industriais*. Acesso em 05 de 12 de 2015, disponível em http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo_25.pdf

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, 115p. Curitiba, SC: Universidade Federal do Paraná - UFPR.

LabSolda (2015). *Esquema dos equipamentos para o processo MIG/MAG*. Fonte: http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/imagens/mig_mag_solda.jpg. Acessado em 02/12/ 2015)

Lewin, M., Mey-Marom, e Frank, R. (2005). Surface free energies of polymeric materials, additives and minerals. *Polymers for Advanced Technologies*, 16, pp. 429-441.

Líbano, E., Visconde, L., e E.B.A.V, P. (2012). Thermal properties of polypropylene and organophilic bentonite. *Polímeros*, 22(5^a), pp. 430 - 435.

Lima, A. (2007). Aplicações de Cargas Minerais em Polímeros. *Dissertação de Mestrado*, 75. São Paulo: Universidade do Estado de São Paulo - USP.

Lima, F. T., Silva, F. J., e Thaumaturgo, C. (2005). Xanes na borda-K do Si do sistema caulim-metacaulim-geopolímero. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, V.24(n.2), pp. 90-92 pp.

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

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

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

Luz, A., e Oliveira, C. (2008). Rochas e Minerais Industriais. *CT2008-163-00 Comunicação Técnica elaborada para o Livro: Rochas Minerais Industriais: Usos e Especificações / Parte 2 – Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações, 2^a Edição*, Capítulo 11 – pág. 239 - 253. Rio de Janeiro: CETEM - Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia.

Lyon, R., Balaguru, P., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J., e M., D. (1997). Fire Resistant Aluminosilicate Composites. *Fire and Material*, Vol.21, pp. 67-73.

Mahendran, K., e Arunachalam, N. (2016). Performance of Fly Ash and Copper Slag based Geopolymer Concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, vol.9 (2), p.

6.

Majidi, B. (2009). Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. *Materials Technology: Advanced Performance Materials*, vol. 24(2), pp. 79-87.

Marques, P. V., Modenesi, P. J., e Bracarense, A. Q. (2009). *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia* (3^o ed.). Belo Horizonte: UFMG.

MMA. (2012). Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Versão pós Audiências e Consulta Pública para Conselhos Nacionais. *Governo Federal - Ministério do Meio Ambiente*. Brasília. Acesso em 09 de 12 de 2015, disponível em http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS_consultaspublicas.pdf

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

Modenesi, P. (2004). Soldabilidade dos Aços Transformáveis. *Apostila*. UFMG .

Modenesi, P., e Marques, P. (2006). Soldagem I- Introdução aos Processos de Soldagem. *Apostila*. Belo Horizonte: UFMG.

Morete, G. P. (2006 b). Aproveitamento de Resíduo de Escória de Soldagem em Materiais Cerâmicos para Construção Civil. *Revista Soldagem e Inspeção*, v.11, n.3, pp. p141-146.

Morete, G., Paranhos, R., e Holanda, J. (2006a). Avaliação de Algumas Propriedades Físico-Mecânicas de Corpos Cerâmicos Incorporados com Resíduo de Escória de Soldagem. *Revista Matéria*, v. 11 (n. 3), 232 – 237.

Moura, W. (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*, 651-653.

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

Obsidian Welding Backing Ltda. (2015). *Catálogo de produtos*. *Welding Backing Ltda*.

Fonte: http://www.weldingbacking.com/welding_ceramics.html> página mantida por Obsidian Welding Backing Ltda.

Oliveira, I., e Pandolfelli, V. (2007). Reologia de concretos refratários na presença de diferentes tipos de aditivo e ligante hidráulico. *Cerâmica*, 53, pp. 263-269.

Palomo, A., Grutzeck, M. W., e Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes. A cement for future. *Cement and Concrete research*, v.29, pp. 1323-1329.

Paoli, M. (2008). *Degradação e Estabilização de Polímeros* (2ª ed.). Chemkeys. Fonte: <http://www.chemkeys.com/blog/wp-content/uploads/2008/09/polimeros.pdf>

Paranhos, R. P., e Souza, A. C. (1999). *Soldagem a Arco Submerso – Coleção Soldagem 2000*. Rio de Janeiro: FIRJAN / SENAI.

Paranhos, R., e Souza, A. (1999). *Soldagem a arco submerso*. Rio de Janeiro: SENAI/RJ - CETEC de Solda.

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

Rangan, B. (2014). Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian Concrete Journal*, Vol. 88, (nº 4), pp. pp. 41-48, 50-59.

Rêgo, T.; Verdélio, A./ Agência Brasil. (2016). *Governo federal defende prorrogação do prazo da lei que acaba com os lixões*. Acesso em 17 de 10 de 2016, disponível em EBC Agência Brasil: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-02/governo-federal-espera-pela-prorrogacao-do-prazo-da-lei-que-acaba-com-os>

Rickard, W., Williams, R., Temuujin, J., e Riessen, A. (2011). Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. *Materials Science and Engineering A* 528, 528, pp. 3390–3397.

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

Rowles, M. (2004). The Structural Nature of Aluminosilicate Inorganic Polymers: A

- Macro to Nanoscale Study. *Tese de Doutorado*, 248p. Curtin University of Technology.
- Salomão, R., Bittencourt, L., e Pandolfelli, V. (2008). Aditivos de secagem para concretos refratários: pó de alumínio e fibras poliméricas. *Cerâmica*, 54, pp. 259-267.
- Sant'anna, J. (2007). Subsídios para Seleção de Materiais Poliméricos Termoplásticos. *Dissertação de Mestrado*, 124p. São Paulo, SP: Universidade do Estado de São Paulo.
- Santos, R. (1997). Materiais cimentosos isentos de macro defeitos utilizando álcool polivinílico e silicilato de sódio. *Dissertação de Mestrado*. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas . Instituto de Química.
- Scotti, A., e Ponomarev, V. (2008). *Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, Melhor desempenho*. São Paulo : Artliber Editora.
- Silva, A. R., e Ferreira, H. C. (2008). Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. v.3.2, pp. 26-35. Fonte: <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista>
- Silva, J. (2011). Mecanismo de ação do silicato de sódio como depressor em flotação. *Dissertação de Mestrado*. Recife, PE: UFPE.
- Silva, M. (2011). Ca, Na, K-PSS como revestimento anticorrosivo em aço. *Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais*, 74p. RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF.
- Silva, R. H., Dutra, J. C., e Jr., R. (Out./Dez. de 2007). Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 2 de 3: Formação da Gota Metálica, Gases de Proteção, Mecanismos de Penetração, Aporte Térmico e Aspe. *Soldagem Insp.*, 12, No. 4, p.326-335.
- Singh, K., e Pandey, S. (2009). Recycling of slag to act as a flux in submerged arc welding. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, pp. 552–558.
- Soares, R. A., e Nascimento, R. M. (2007). O processo produtivo e a qualidade do produto cerâmico estrutural. *II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*. CEFET-PI.

- Souza, M. R., e Silva, R. J. (1996). A Geração de Resíduos Industriais e sua Destinação Final. *Departamento de Produção*. MG: Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Tatagiba, L., e Paranhos, R. (2011). Investigação sobre a Eficiência da Fibra de Vidro e da Fibra Cerâmica como Suporte de Solda na Soldagem. *Soldag. Insp.*, Vol.16 (No. 4), pp. p.377-386.
- The Lincoln Electric Company. (2010). Statement Regarding the Use of Crushed Slag as Welding Flux. *A Technical Report by Application Engineering Department*. Cleveland, OH, USA.
- Tomazetti, R. (2003). Análise da produção de cerâmica vermelha da região central do estado do Rio de Grande do Sul. *Dissertação de Mestrado*, 207p. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria - UFSM .
- Tondowski, L. (1998). O cuidado com as soluções. *Revista Saneamento Ambiental*(nº54), 16-24p.
- UNICAMP. (2009). Ficha de informações de segurança de produtos químicos.<https://www.fca.unicamp.br/portal/images/Documentos/FISPQs/FISPQ-Hidroxido de Potassio.pdf> (Acessado em 03/04/2017).
- Van Jaarsveld, J. G., Van Deventer, J. S., e Lorenzen, L. (1997). The potencial use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: part I. Theory and applications . *Minerals Engineering*,, v.10(n.7), pp. 659-669.
- 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.
- Viana, C. E., Dias, D. P., Paranhos, R. P., & Holanda, J. N. (2010). Influência da incorporação de resíduo de escória de fluxo de soldagem nas propriedades tecnológicas de argamassa de múltiplo uso e cerâmica vermelha para construção civil. *Cerâmica 56* , 83-90.
- Vicentini, R. (2013). Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais em ligas de alumínio. *Dissertação de Mestrado*, 119. RJ: UENF.
- Wainer, E., Brandi, S., & Mello, F. (1992). *Soldagem: Processos e Metalurgia* (1º ed.).

São Paulo: Edgard Blucher.

Weil, M., Gasafi, E., Buchwald, A., e Dombrowski, K. (2005). Sustainable Design of Geopolymers - Integration of Economic and Environmental Aspect in the Early Stages of Material Development. *11th Annual International Sustainable Development Research Conference*, (p. 15p). Helsinki, Finland.

Wiemes, L. (2003). Minimização de Resíduos no Processo de Pintura da Indústria Automotiva. *Dissertação de Mestrado*, 102. PR: Universidade Federal do Paraná - UFPR.

Wierbeck, H., e Harada, J. (2005). *Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações*. São Paulo: Artliber Editora LT