



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



ANA LUIZA BORGES MARINHO

**AGLOMERANTE ECOLÓGICO PARA ARGAMASSA – RECICLAGEM
DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA**

Ouro Preto

2015



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



**AGLOMERANTE ECOLÓGICO PARA ARGAMASSA – RECICLAGEM
DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA**

Autora: Ana Luiza Borges Marinho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção metálica, linha de pesquisa: Engenharia Estrutural e de Materiais.

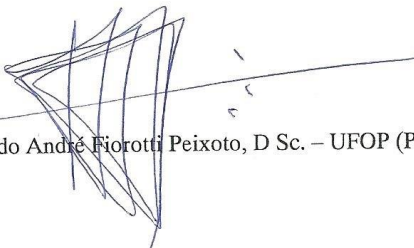
Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto
Co-orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Ouro Preto, novembro de 2015.

**AGLOMERANTE ECOLÓGICO PARA ARGAMASSA – RECICLAGEM
DA ESCÓRIA DE FORNO PANELA**

AUTORA: ANA LUIZA BORGES MARINHO

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 06 de novembro de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, D Sc. – UFOP (Presidente)



Profa. Gabriela Cordeiro Silva, D. Sc. – UFOP



Profa. Maria Teresa Paulino Aguilar, D. Sc. – UFMG

DEDICATÓRIA

A Deus,
aos meus pais, meus irmãos e ao Felipe.

AGRADECIMENTOS

A Deus, essência das nossas vidas, por me sustentar nesta caminhada, com garra e perseverança.

Aos meus pais e irmãos que sempre estiveram presentes nas minhas conquistas, a minha profunda e eterna gratidão.

Ao Felipe, não só pelos conselhos durante a realização do presente trabalho, mas por toda a paciência e companheirismo demonstrados nos momentos de incerteza e nervosismo. Pelo seu carinho, amor, compreensão e confiança ao longo de todo este tempo.

A toda a minha família e amigos pelas orações, apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

Ao Prof. Ricardo Fiorotti, orientador científico da presente dissertação, pela disponibilidade e auxílio durante a elaboração do mesmo, pelo apoio, conselhos, críticas e ensinamentos transmitidos, durante a execução do trabalho. Ao Prof. Guilherme Brigolini, co-orientador deste trabalho, pelas fundamentais contribuições. Ao Prof. José Roberto pelas recomendações no exame de qualificação.

Ao grupo de Pesquisas em Resíduos Sólidos Industriais (RECICLOS) e seus membros pelo auxílio e aprendizado. Em especial à Marina e à Barbara por serem verdadeiras companheiras nesta jornada. À Carina pela incansável ajuda durante a realização dos ensaios e também aos colegas Keoma e Júnio pela ajuda, companhia e disponibilidade demonstrada.

Agradeço à ArcelorMittal representada pelo Eng. Sandro Almada, pela disponibilidade de recursos materiais e operacionais. Recursos imprescindíveis e essenciais ao desenvolvimento deste projeto de pesquisas, bem como pela oportunidade de trabalho. Às empresas Votorantim Cimentos, Cerro Branco e Ical pelo auxílio em colaboração.

Ao Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP, Laboratório NanoLab do Departamento de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP; e seus coordenadores, técnicos e bolsistas pelo apoio na realização dos ensaios.

Aos amigos Murillo e Caio pela companhia nos momentos de estudo e trabalho e, não menos importante, de convívio, diversão e espírito acadêmico durante este percurso.

À UFOP e ao PROPEC pela dedicação e pelos conhecimentos transmitidos e à CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

A gestão e manejo dos resíduos industriais no que se refere a aspectos ambientais é premente. A reciclagem desses resíduos pela construção civil vem se tornando uma prática comum na busca pela sustentabilidade. De um lado, devido a crescente preocupação com o meio ambiente e por outro, devido ao esgotamento dos recursos naturais. Tendo em vista o panorama atual, o presente trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de novas possibilidades para fabricação de produtos de base tecnológica para aplicação na construção civil, a partir da obtenção de um aglomerante para argamassas utilizando escória de forno panela (EFP) em substituição à cal hidratada e à cal hidráulica. A EFP é um subproduto oriundo do refino secundário de aço, constituída principalmente de silicatos de cálcio e de magnésio. Esse resíduo foi processado em laboratório e suas características físicas, químicas e mineralógicas foram determinadas. Todas as exigências químicas e físicas de uma cal para argamassa, conforme prescrições normativas, foram ensaiadas no resíduo siderúrgico. Foram ainda produzidas argamassas mistas de cimento Portland, cal e EFP, de diferentes traços, em que se observou o comportamento mecânico, bem como todos os requisitos necessários para uma argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Os resultados alcançados indicam a viabilidade e adoção deste material como um tipo de aglomerante ecológico em substituição às cales e que seu uso poderá não só ajudar na diminuição do impacto ambiental, mas também possibilitará a utilização deste material para uso na construção civil.

Palavra-Chave: materiais de construção, aglomerantes, argamassa, reciclagem, sustentabilidade.

ABSTRACT

Management and handling of industry's residues in regards to environmental aspects is a pressing issue. Civil construction's recycling of these residues has been a common practice. On one side, due to the growing concern with the environmental and on the other side, due to the exhaustion of the natural resources. Considering the actual panorama, the present work aims to contribute to the development of new possibilities in technological based products for civil construction application, starting with the production of mortars using ladle furnace slag (LFS) in substitution to hydrated lime and hydraulic lime. The LFS is a by-product arising from the secondary refinement of steel, constituted mainly by calcium silicates and magnesium. The residue was processed in laboratory and the physical, chemical and mineralogical characteristics were determined. All the chemical and physical requirements of a lime mortar, according to standard prescriptions, were tested in the steel mill residue. Moreover, mixed mortars of Portland cement, lime and LFS, with different dosages, were produced and the mechanical behavior was observed, as well as all the requirements to use settlement and coating mortars in walls and roofs. The achieved results indicate the feasibility of adopting this material as an ecological binder in substitution to limes. Their use will not only decrease the environmental impact, but also allow the application of this material for use in civil construction.

Key words: construction materials, binders, mortar, recycling, sustainability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
	Objetivo geral.....	3
	Objetivos específicos	3
3	JUSTIFICATIVA	4
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	6
4.1	Produção de aço no Brasil	6
4.2	Escória de forno panela	6
4.3	Aglomerantes.....	8
4.4	Cal.....	9
4.4.1	Cal Aérea.....	9
4.4.1.1	Propriedades da cal aérea nos compósitos cimentícios	11
4.4.1.2	Normalização para a cal aérea	12
4.4.2	Cal Hidráulica	14
4.4.2.1	Influência das propriedades da cal hidráulica nos compósitos cimentícios	16
4.4.2.2	Normalização para cal hidráulica	17
4.5	Argamassas	19
4.5.1	Classificação das argamassas.....	19
4.5.2	Função das Argamassas	19
4.5.2.1	Argamassa de assentamento	20
4.5.2.2	Argamassa de revestimento	21
4.5.3	Propriedades das argamassas.....	21
4.5.3.1	Trabalhabilidade	21
4.5.3.2	Retenção de água.....	22
4.5.3.3	Plasticidade	22
4.5.3.4	Consistência	22
4.5.3.5	Teor de Ar Incorporado.....	23
4.5.3.6	Aderência Inicial.....	23
4.5.3.7	Resistência Mecânica	23
4.5.3.8	Aderência ao Substrato no estado endurecido.....	24
4.5.3.9	Elasticidade	25
4.5.3.10	Retração	26

4.5.3.11	Durabilidade.....	26
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
5.1	Materiais.....	27
5.1.1	Cal Hidratada	27
5.1.2	Cal Hidráulica	28
5.1.3	Cimento.....	29
5.1.4	Areia.....	30
5.1.5	Aglomerante ecológico	30
5.2	Metodologia.....	32
5.2.1	PROCESSAMENTO do aglomerante ecológico	32
5.2.1.1	Teor de constituintes metálicos ferrosos.....	32
5.2.1.2	Distribuição Granulométrica	33
5.2.1.3	Moagem	33
5.2.2	Caracterização física dos aglomerantes.....	34
5.2.2.1	Distribuição Granulométrica	34
5.2.2.2	Teor de Umidade.....	35
5.2.2.3	Massa Específica	35
5.2.2.4	Massa Unitária	36
5.2.3	Caracterização química e mineralógica das amostras	36
5.2.3.1	Fluorescência de Raios X	36
5.2.3.2	Índice de hidráulidade	37
5.2.3.3	Difração de Raios X	37
5.2.4	Caracterização morfológica das amostras	38
5.2.4.1	Lupa Estereoscópica.....	38
5.2.4.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	38
5.2.5	Caracterização da cal hidratada para argamassas (NBR 7175/2003)	39
5.2.5.1	Ensaio da determinação da consistência normal.....	39
5.2.5.2	Ensaio da determinação da plasticidade.....	40
5.2.5.3	Ensaio de determinação da retenção de água.....	40
5.2.5.4	Ensaio de determinação da capacidade de incorporação de areia.....	41
5.2.5.5	Ensaio de determinação da estabilidade	42
5.2.5.6	Ensaio de determinação da finura	42
5.2.6	Caracterização da cal hidráulica para argamassas (EN 459-1/2011)	43
5.2.6.1	Ensaio de determinação da resistência à compressão	43
5.2.6.2	Ensaio de determinação da finura	44
5.2.6.3	Ensaio de determinação da expansibilidade.....	44

5.2.6.4	Ensaio de determinação da penetração	44
5.2.6.5	Ensaio de determinação do teor de ar incorporado	45
5.2.6.6	Ensaio de determinação do tempo de pega	45
5.2.7	Produção das argamassas	45
5.2.7.1	Conversão de traço em volume para massa	46
5.2.7.2	Condições de Cura.....	47
5.2.7.3	Caracterização física da argamassa no estado fresco	48
5.2.7.3.1	Ensaio de determinação do índice de consistência.....	48
5.2.7.3.2	Ensaio de determinação de retenção de água	48
5.2.7.3.3	Ensaio de determinação da densidade de massa no estado fresco	49
5.2.7.3.4	Ensaio de determinação do teor de ar incorporado	50
5.2.7.4	Caracterização física e mecânica da argamassa no estado endurecido.....	51
5.2.7.4.1	Ensaio de determinação da densidade de massa no estado endurecido	51
5.2.7.4.2	Ensaio de determinação da absorção de água e coeficiente de capilaridade.....	51
5.2.7.4.3	Ensaio de determinação da resistência à compressão.....	52
5.2.7.4.4	Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão	53
5.2.7.4.5	Ensaio de determinação da resistência à tração na compressão diametral	54
5.2.7.4.6	Ensaio de determinação da resistência potencial de aderência à tração	54
5.2.7.4.7	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	55
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	57
6.1	PROCESSAMENTO DO AGLOMERANTE ECOLÓGICO	57
6.2	Caracterização Física dos aglomerantes.....	57
6.2.1	Distribuição Granulométrica.....	57
6.2.2	Teor de Umidade	58
6.2.3	Massa Unitária	59
6.2.4	Massa Específica	60
6.3	Caracterização química e mineralógica	60
6.3.1	Fluorescência de Raios X.....	60
6.3.2	Índice de hidráulidade.....	61
6.3.3	Difração de Raios X	62
6.4	Caracterização morfológica das amostras.....	65
6.4.1	Lupa Estereoscópica	66
6.4.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	66
6.5	CAL HIDRATADA PARA ARGAMASSAS	69
6.5.1	Consistência normal das pastas	69

6.5.2	Plasticidade.....	69
6.5.3	Retenção de água	71
6.5.4	Incorporação de areia	72
6.5.5	Estabilidade.....	73
6.5.6	Finura	74
6.6	CAL HIDRÁULICA PARA ARGAMASSAS	75
6.6.1	Resistência à compressão	75
6.6.2	Finura	76
6.6.3	Expansibilidade	78
6.6.4	Teor de ar incorporado	79
6.6.5	Penetração	80
6.6.6	Tempo de pega	81
6.7	Caracterização da argamassa no estado fresco	82
6.7.1	Índice de consistência	82
6.7.2	Retenção de água	83
6.7.3	Densidade de massa no estado fresco.....	84
6.7.4	Teor de ar incorporado	85
6.8	Caracterização da argamassa no estado endurecido	86
6.8.1	Densidade de massa no estado endurecido	86
6.8.2	Absorção de água e coeficiente de capilaridade	87
6.8.3	Resistência à compressão	90
6.8.4	Resistência à tração na flexão.....	91
6.8.5	Resistência à tração na compressão diametral	93
6.8.6	Resistência potencial de aderência à tração.....	94
6.8.7	Módulo de elasticidade dinâmico.....	96
7	CONCLUSÃO.....	98
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
9	APÊNDICE	111
10	ANEXO.....	113

Lista de Figuras

<i>Figura 1: Fluxo simplificado de produção do aço (MASUERO, 2001).</i>	7
<i>Figura 2: Organograma da metodologia.</i>	27
<i>Figura 3: Frações granulométricas da EFP^P.</i>	31
<i>Figura 4: Fluxo simplificado para obtenção do Ag^E.</i>	32
<i>Figura 5: Rolo magnético INBRAS utilizado.</i>	33
<i>Figura 6: Moinhos (a) de baixa eficiência MARCONI MA500 e (b) de alta eficiência RETSCH PM100.</i>	34
<i>Figura 7: Frasco de Le Chatelier.</i>	36
<i>Figura 8: Aparelho de Vicat modificado.</i>	39
<i>Figura 9: Medida de consistência.</i>	40
<i>Figura 10: Determinação da retenção de água das argamassas pelo funil de Buchner.</i>	41
<i>Figura 11: Medida do índice de consistência.</i>	42
<i>Figura 12: Determinação da resistência à compressão, aos 28 dias.</i>	43
<i>Figura 13: Determinação da penetração.</i>	44
<i>Figura 14: Determinação do teor de ar incorporado.</i>	45
<i>Figura 15: Câmara úmida utilizada.</i>	48
<i>Figura 16: Determinação da retenção de água.</i>	49
<i>Figura 17: Determinação da densidade de massa no estado fresco.</i>	50
<i>Figura 18: Determinação da absorção de água por capilaridade.</i>	52
<i>Figura 19: Determinação da resistência à compressão.</i>	52
<i>Figura 20: Determinação da resistência à tração na flexão.</i>	53
<i>Figura 21: Determinação da resistência à tração na compressão diametral.</i>	54
<i>Figura 22: Determinação da resistência potencial de aderência à tração.</i>	55
<i>Figura 23: Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.</i>	56
<i>Figura 24: Distribuição granulométrica dos aglomerantes.</i>	58
<i>Figura 25: Teor de umidade dos aglomerantes.</i>	59
<i>Figura 26: Massa unitária dos materiais.</i>	59
<i>Figura 27: Massa específica dos aglomerantes.</i>	60
<i>Figura 28: Difratoograma do EFP^P.</i>	63
<i>Figura 29: Difratoograma do Ag^H.</i>	63
<i>Figura 30: Difratoograma do Ag^A.</i>	64
<i>Figura 31: Imagens de microscopia óptica (lupa estereoscópica).</i>	66
<i>Figura 32: Morfologia dos materiais – (500x).</i>	67
<i>Figura 33: MEV com EDS dos materiais – (250x).</i>	68
<i>Figura 34: Resultados do ensaio de determinação de plasticidade.</i>	70
<i>Figura 35: Morfologia dos materiais – (1500x).</i>	70

<i>Figura 36: Resultados do ensaio de retenção de água</i>	71
<i>Figura 37: Resultados do ensaio de incorporação de areia</i>	72
<i>Figura 38: Observações da EFP^P à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente.</i>	73
<i>Figura 39: Observações do aglomerante Ag^A à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente.</i>	73
<i>Figura 40: Resultados do ensaio de finura para peneira n° 30</i>	74
<i>Figura 41: Resultados do ensaio de finura para peneira n° 200</i>	75
<i>Figura 42: Resistência à compressão</i>	76
<i>Figura 43: Resultados do ensaio para determinação da finura para peneira n° 70.</i>	77
<i>Figura 44: Resultados do ensaio para determinação da finura para peneira n° 170.</i>	77
<i>Figura 45: Observações do aglomerante EFP^P à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente</i>	78
<i>Figura 46: Observações do aglomerante Ag^H à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente.</i>	79
<i>Figura 48: Resultados do ensaio para determinação do teor de ar</i>	80
<i>Figura 47: Penetração</i>	80
<i>Figura 49: Índice de consistência</i>	82
<i>Figura 50: Retenção de água</i>	83
<i>Figura 51: Densidade de massa no estado fresco.</i>	84
<i>Figura 52: Teor de ar incorporado</i>	85
<i>Figura 53: Densidade de massa no estado endurecido.</i>	86
<i>Figura 54: Absorção de água por capilaridade – traço 1:1:6.</i>	88
<i>Figura 55: Absorção de água por capilaridade – traço 1:2:9.</i>	88
<i>Figura 56: coeficiente de capilaridade das argamassas.</i>	89
<i>Figura 57: Resistência de compressão</i>	90
<i>Figura 58: Resistência à tração na flexão</i>	92
<i>Figura 59: Resultados da ductilidade das argamassas</i>	93
<i>Figura 60: Resistência à tração na compressão diametral</i>	94
<i>Figura 61: Resistência potencial de aderência à tração.</i>	95
<i>Figura 62: módulo de elasticidade dinâmico</i>	96

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Análises químicas da EFP</i>	8
<i>Tabela 2: Classificação das cales – exigências químicas (NBR 7175/2003)</i>	13
<i>Tabela 3: Classificação das cales – exigências físicas (NBR 7175/2003)</i>	13
<i>Tabela 4: Classificação das cales (IPQ, 2011)</i>	18
<i>Tabela 5: Classificação das cales – exigências químicas (EN 459-1/2011)</i>	18
<i>Tabela 6: Classificação das cales – exigências físicas (EN 459-1/2011)</i>	18
<i>Tabela 7: Propriedades físicas da cal hidratada CHI (ICAL, 2015)</i>	28
<i>Tabela 8: Propriedades químicas da cal hidratada CHI (ICAL, 2015)</i>	28
<i>Tabela 9: Propriedades Químicas e físicas da cal hidráulica (cerro branco, 2015)</i>	28
<i>Tabela 10: Propriedades químicas do cimento (votorantim,2015)</i>	29
<i>Tabela 11: Propriedades físicas e mecânicas do cimento (votorantim,2015)</i>	29
<i>Tabela 12: Distribuição granulométrica do efpp.</i>	30
<i>Tabela 13: Relação de hidráulicidade (adaptado de coutinho, 1988)</i>	37
<i>Tabela 14: Dosagem das argamassas (em volume)</i>	46
<i>Tabela 15: Dosagem das argamassas (em massa)</i>	47
<i>Tabela 16: Resultado de FRX.</i>	61
<i>Tabela 17: Resultado do índice de hidráulicidade.</i>	62
<i>Tabela 18: Legenda dos difratogramas</i>	62
<i>Tabela 19: Legenda das imagens de MEV com EDS</i>	68
<i>Tabela 20: Dados do índice de consistência normal das pastas</i>	69
<i>Tabela 21: Classificação da norma em função da resistência</i>	75
<i>Tabela 22: Dados do índice de consistência normal das pastas</i>	81
<i>Tabela 23: Dados do tempo de pega dos aglomerantes</i>	81

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental diz respeito, entre outras coisas, ao consumo excessivo ou ineficiente de recursos naturais não renováveis (LEITE, 2001). Nesse contexto, a indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de matérias primas naturais, contribuindo assim, de maneira relevante, para uma grande degradação do meio ambiente. Pelo simples fato de que a siderurgia lida diariamente com quantidades imensas de matérias-primas e energia, o seu impacto ambiental também sempre foi expressivo.

A reciclagem, que pode ser definida como sendo um reaproveitamento de material como matéria prima para um novo produto, começou a se difundir nas últimas décadas. Um fator importante, que faz com que as pesquisas na área de reciclagem se desenvolvam a cada dia é o fato que muitos rejeitos, sejam industriais ou urbanos, acabam por poluir o meio-ambiente, causando problemas de armazenagem.

O desenvolvimento da reciclagem vem buscando assiduamente uma melhoria na qualidade de vida do ponto de vista ambiental, reduzindo assim, resíduos gerados pela atividade industrial. Na indústria iniciou-se a conscientização de que a geração de resíduos gera custos, já que necessita de um local apropriado para sua disposição ou requer tratamento no seu reuso. Sendo assim, o meio empresarial vem buscando opções para diminuir os custos visando à redução dos impactos ambientais e o aumento da credibilidade perante o mercado consumidor (SILVA et. al., 2005).

A construção civil no Brasil apresenta crescimento acelerado ocasionando aumento na demanda por materiais de construção e técnicas/práticas mais eficientes. Muitos resíduos têm sido estudados com o intuito de contribuir com a redução dos impactos ambientais associados à produção de matrizes cimentícias, como argamassas e concretos. Bons exemplos de utilização de resíduos são encontrados na indústria de cimento, como matéria-prima para a fabricação de clínquer, ou até mesmo dentro das fábricas de aço, na estabilização do solo, ou como um substituto para frações mais finas da areia na fabricação de argamassa de cimento (KANAGAWA, 1997; DIPPENAAR, 2005; PRIETO, 2013).

No Brasil, são frequentes os processos construtivos de edifícios que empregam paredes de alvenaria revestidas com argamassas, tanto no sistema de vedação interna, como externa. Isto

ocorre, principalmente, em habitações de média e baixa renda, onde os conglomerados à base de cimento e agregados minerais perfazem 20% do custo médio das obras (SANTIN, 1996; FARIA,2012).

Segundo CINCOTTO et al. (1995), as propriedades das argamassas, tanto de assentamento quanto de revestimentos de alvenarias, são essenciais para a vida útil das obras em que são utilizadas. Uma argamassa de qualidade deve ser elaborada e produzida para obter o melhor desempenho e durabilidade. Deve-se ter como enfoque algumas propriedades, tais como: plasticidade, aderência no estado fresco e endurecido, ausência de fissuras, resistência à abrasão e compressão, entre outras. São inúmeros os exemplos de falências das estruturas, causadas tanto pelas características dos materiais, como pelo preparo e manuseio inadequados (tempo de mistura, tempo de utilização, aplicação e acabamento).

A cal aérea apesar de ser o ligante histórico nas formulações clássicas das argamassas utilizadas, dado que apresenta melhor compatibilidade com edifícios antigos, tem a inconveniência de apresentar uma pega exclusivamente aérea, impossibilitando o seu uso em determinadas obras de reabilitação (SEQUEIRA et al., 2012).As argamassas de cal hidráulica combinam a pega aérea e a hidráulica, desenvolvendo características adaptadas a vários tipos de substratos (SEQUEIRA et al., 2007). Proporcionam também uma boa trabalhabilidade, um bom acabamento e uma maior rentabilidade de mão-de-obra, melhorando consideravelmente a qualidade da construção (MIRANDA, 2009).

Tendo em vista o panorama atual, o presente trabalho pretende contribuir de maneira significativa, para o desenvolvimento de novas possibilidades na fabricação de produtos de base tecnológica para aplicação na construção civil, através da fabricação de um aglomerante para argamassa de assentamento e revestimento a partir da reutilização da escória de forno panela.

Capítulo 2

2 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Produzir um aglomerante ecológico (Ag^E) para argamassas de assentamento e revestimento a partir da substituição da cal hidratada (Ag^A) ou da cal hidráulica (Ag^H) pela escória siderúrgica de forno panela (EFP).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma metodologia para processamento de EFP com vistas à produção de aglomerantes para argamassas.
- Caracterizar (física, química, mineralógica) a escória de forno panela processada (EFP^P).
- Caracterizar (física, química, mineralógica) os aglomerantes para produção de argamassa.
- Avaliar e realizar os ensaios relacionados às exigências físicas e químicas estabelecidas nas normas NBR 7175 e EN 459-1, com os materiais convencionais e com a EFP^P.
- Produzir argamassas mistas utilizando como aglomerante, a cal hidratada, a cal hidráulica e a EFP^P.
- Avaliar as propriedades e desempenho mecânico das argamassas constituídas com a EFP^P e materiais convencionais conforme requisitos estabelecidos pela NBR 13281/2005.

Capítulo 3

3 JUSTIFICATIVA

Uma grande quantidade de subprodutos é gerada durante o processo produtivo do aço. No Brasil, em 2013, foram gerados 17,7 milhões de toneladas de resíduos. Parte destes resíduos é constituída pela escória de forno panela (EFP). Segundo o Instituto de Aço Brasil (2014), a atividade siderúrgica gera anualmente o equivalente a 0,7 a 1,3 milhões de toneladas de EFP. Essa produção equivale, para cada tonelada de aço, a uma geração de 0,17 toneladas de EFP. O grande volume de resíduos gerados, o pequeno percentual de reaproveitamento e a inadequada destinação destes causam um expressivo impacto ambiental, que pode ser observado através da poluição visual dos pátios de estocagem, da esterilidade provocada nas áreas desses pátios, da contaminação dos rios em virtude do carregamento de partículas finas para os cursos de água, dentre outros.

A construção civil, setor de grande importância econômica, e também responsável por grande parte dos recursos naturais extraídos e pela produção de resíduos degrada de forma incisiva o meio ambiente. Segundo estimativa de JOHN (2003), a construção utiliza aproximadamente 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade, além de ser uma voraz consumidora de água e energia, no processo construtivo, na produção dos materiais, criando um ciclo que eleva a geração dos resíduos e a extinção gradativa dos recursos naturais. Dentre os produtos da construção civil, a argamassa possui um expressivo consumo mundial. Só no Brasil, o consumo de argamassas para assentamento de blocos e revestimento gira em torno de 100 milhões de toneladas por ano (ABAI, 2009). Ultimamente, muitas empresas estão substituindo as argamassas preparadas em obra pelas pré-fabricadas, devido à implementação de políticas de industrialização dos canteiros de obras, dificuldade de estoque de materiais e sua dosagem no canteiro de obras, aliada às imprecisões encontradas.

O desenvolvimento tecnológico de forma sustentável é um dos maiores desafios técnico-científicos atual e, dentro deste contexto, a reciclagem de resíduos, tais como a EFP, é uma prática que deve ser incorporada como alternativa quando não há como minimizar sua geração, o que está se tornando cada vez mais frequente na construção civil (MARTÍNEZ, et. al.,2014). SILVA et. al. (2005) ressalta que é importante observar que a reciclagem vem alcançando resultados relevantes no aspecto econômico, social e ambiental. Como suas principais vantagens, pode-se citar:

- Redução da quantidade de resíduos enviados para aterros industriais, economizando o custo com o transporte e redução de áreas degradadas;
- Economia de diversos recursos naturais;
- Melhoria da imagem da empresa perante os seus clientes;
- Redução dos custos industriais mediante a incorporação de resíduos em vários de seus processos produtivos;
- Proporcionar a produção de novos materiais de base tecnológica, implicando em redução do custo de obras civis.

Dessa forma, a reciclagem é, sem dúvida, uma das melhores alternativas para reduzir o impacto que o meio ambiente pode sofrer com o consumo de matérias primas, renováveis ou não, e a geração desordenada de resíduos (LEITE, 2001).

Considerando a geração de rejeitos pela indústria siderúrgica e o consumo excessivo de materiais naturais pela construção civil, este trabalho pretende contribuir para a sustentabilidade destes setores, no desenvolvimento de novas possibilidades para fabricação de produtos de base tecnológica para aplicação na construção civil, a partir da fabricação de um aglomerante para argamassa através da reciclagem da EFP.

Capítulo 4

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 PRODUÇÃO DE AÇO NO BRASIL

O Brasil possui atualmente 29 usinas siderúrgicas, sendo 14 integradas e 15 semi-integradas, pertencentes a 11 grupos empresariais. O parque produtor de aço no Brasil está instalado em 10 estados, havendo maior concentração na região Sudeste, região que responde por 94% da produção de aço do país. O setor possui, atualmente, capacidade instalada para fabricar mais de 48,9 milhões de toneladas de aço bruto por ano (IABr, 2014).

A indústria brasileira do aço foi responsável, em 2013, por 2,1% da produção mundial e de 52,2% na produção latino-americana do setor, ocupando a nona posição no ranking mundial no setor (IABr, 2014).

Em 2013, a geração de resíduos e coprodutos na indústria siderúrgica foi de 594 kg por tonelada de aço produzida, o que representa um total de 17,7 milhões de toneladas, sendo 12% deste volume não reaproveitado e estocado em pátios (IABr, 2014).

4.2 ESCÓRIA DE FORNO PANELA

Segundo o IABr (2014) as usinas de aço são classificadas de acordo com o processo produtivo em integradas, semi-integradas e não integradas.

- As usinas integradas são aquelas que produzem aço a partir do minério de ferro, carvão e materiais fundentes, e operam basicamente por três fases: redução, refino e laminação. Neste tipo de produção o processo de refino é feito através do convertedor a oxigênio Linz Donowitz (LD).
- As usinas semi-integradas não têm a etapa de redução e usam sucata de aço e ferro gusa como matéria prima; neste processo, o refino é feito a arco elétrico (FEA).
- Existem ainda unidades produtoras chamadas de não integradas, que operam apenas uma fase do processo: processamento (laminação ou trefilas) ou redução.

A Figura 1 ilustra o processo de produção de aço via elétrica e LD.

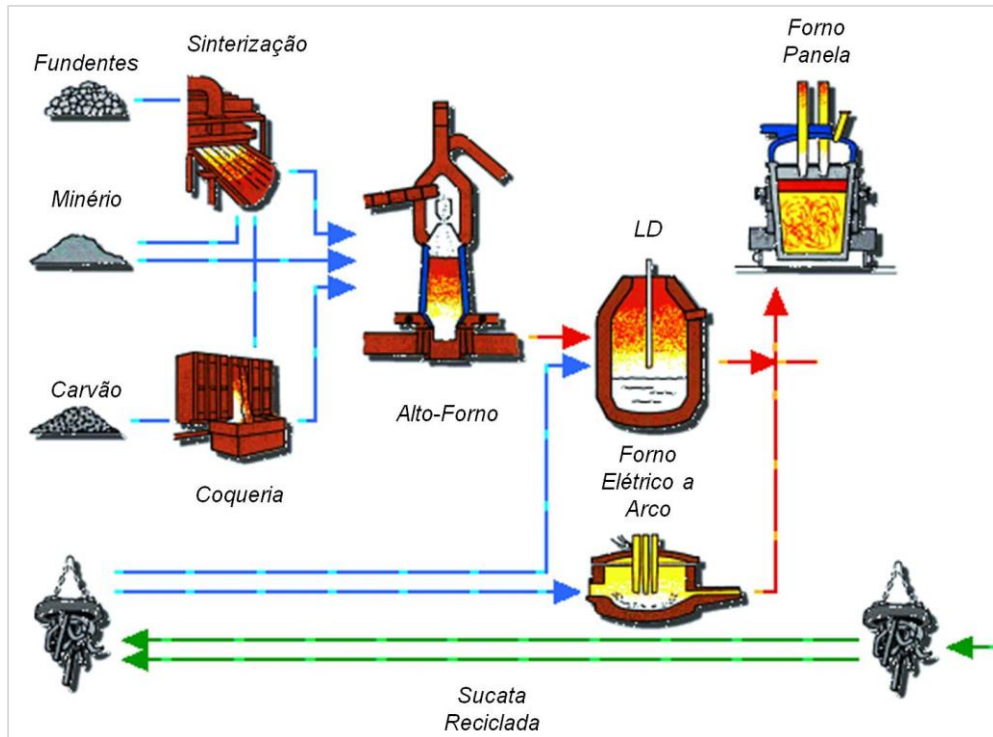


Figura 1: Fluxo simplificado de produção do aço (MASUERO, 2001).

No início da década de 1950, as maiores exigências em relação à qualidade do aço e consistência em relação às suas propriedades mecânicas começaram a exigir um nível de controle de parâmetros do processo que estavam além da capacidade dos fornos até então utilizados.

Tal exigência motivou, ao longo do tempo, o desenvolvimento de vários tipos de tratamentos de aço líquido em painéis. Este processo é conhecido atualmente como refino secundário e, ocorre no forno painel (ROCHA, 2011).

Após a elaboração do aço no forno primário de fusão ocorre o refino secundário ou metalurgia secundária. O refino secundário é uma continuação do processo de obtenção do aço onde a composição química, temperatura e limpidez são ajustadas (RIZZO, 2006).

A escória de forno painel é um subproduto da indústria siderúrgica obtida a partir do refino secundário no forno painel de aços carbono e baixa liga. A escória é produzida nas etapas finais de produção do aço oriundo do conversor LD ou do FEA (MANSO et al, 2005).

Apesar da composição química da escória estar diretamente relacionada ao tipo de aço produzido, o tipo de revestimento refratário utilizado na panela e composição química da sucata utilizada como matéria prima, estatisticamente influenciam em sua composição, conforme apresentado a seguir na Tabela 1.

TABELA 1: ANÁLISES QUÍMICAS DA EFP

	Concentração (%)		
	(SETIEN et al, 2009)	(MANSO et. al., 2005)	(SHI, 2001)
<i>CaO</i>	50,5 -57,5	58	55,9-57
<i>MgO</i>	7,5-11,9	10	3,2-3,9
<i>SiO₂</i>	12,6-19,8	17	26,4-26,8
<i>Al₂O₃</i>	4,3-18,6	12	4,3-5,2
<i>SO₃</i>		1	1,7-2,4
<i>P₂O₅</i>	0,0001-0,01	Σ=1,5 (outros)	
<i>TiO₂</i>	0,18-0,89		0,3
<i>ZrO₂</i>			0,2-0,3
<i>Cr₂O₃</i>	0,01-0,1		
<i>MnO</i>	0,36-0,52		0,5-1
<i>Fe₂O₃</i>	1,6-3,3		1-1,6

A EFP possui uma razão de CaO/SiO₂ próxima a 2 e é constituída, principalmente, de C₂S (Ca₂SiO₄). Uma vez que o principal mineral de escória é C₂S, a EFP obtida de um processo lento de arrefecimento tem uma quantidade muito elevada de pó fino, o que torna mais difícil a movimentação destes materiais, ao passo que a porcentagem de finos inferiores à peneira de malha 200 (0,075 mm) pode ser de até 20-35% (SHI, 2001).

A composição mineralógica singular da EFP favorece o desenvolvimento de propriedades cimentícias e hidráulicas muito apreciadas na construção civil (SÉTIEN et. al., 2009).

A EFP utilizada na pesquisa é gerada por um processo de fabricação do aço realizado em forno a arco elétrico, no qual sucata ferrosa e o ferro gusa são as principais fontes de matéria-prima.

4.3 AGLOMERANTES

Os aglomerantes, também chamados de ligantes, são materiais pulverulentos que se hidratam na presença de água formando uma pasta resistente capaz de aglutinar agregados dando origem a concretos e argamassas (RIBEIRO et al. 2002).

De acordo com a sua origem, os ligantes podem ser classificados como orgânicos ou minerais. Os de natureza orgânica são obtidos a partir de substâncias animais ou vegetais enquanto os de natureza mineral são obtidos a partir de rochas naturais, como calcários ou mármore, com determinados teores de argila (MARGALHA, 2011). No grupo de ligantes minerais inserem-se os ligantes hidráulicos e os aéreos.

A classificação dos ligantes pode também ser realizada de acordo com a sua afinidade com água, dividindo os ligantes em hidrófobos e hidrófilos. Um ligante hidrófobo é um ligante em que a água não tem qualquer papel na produção e endurecimento do aglomerante, como o alcatrão ou resinas sintéticas. Um ligante hidrófilo tem afinidade com a água e misturado com ela forma uma pasta e endurece, como é o caso dos ligantes hidráulicos e aéreos (COUTINHO, 2006).

Os ligantes hidráulicos são constituídos por pós muito finos e têm a propriedade de endurecer em contato com o ar ou com a água, como a cal hidráulica e o cimento. Os ligantes aéreos, pelo contrário, não podem endurecer dentro de água, pois dependem do dióxido de carbono da atmosfera para isso, tal como a cal aérea (FARIA, 2004).

Portanto, é relevante abordar os ligantes hidrófilos de origem mineral uma vez que são os principais materiais utilizados na produção das argamassas.

4.4 CAL

A cal é um aglomerante simples, resultante da calcinação de rochas calcárias, que se apresentam sob diversas variedades, com características resultantes da natureza da matéria-prima empregada e do processamento conduzido.

A cal tem sido utilizada na construção de edificações ao longo de milhares de anos. O homem conheceu a cal provavelmente nos primórdios da Idade da Pedra. Exemplos concretos da utilização da cal como ligante foram encontrados na Palestina e na Turquia e datam de 12000 AC. Os Egípcios ergueram as suas pirâmides, construções ainda intactas e admiradas por todos, recorrendo à cal como ligante nas argamassas de assentamento de blocos e revestimento entre 4000 e 2000 AC. Posteriormente, tanto os Gregos como os Romanos beneficiaram da sabedoria transmitida pelos Egípcios em relação às técnicas construtivas e às especificidades da cal, passando depois para outras regiões mediterrâneas e circunvizinhas, até alcançar a modernidade (ELERT, 2002; GUIMARÃES, 2002; FARIA, 2012).

4.4.1 CAL AÉREA

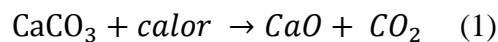
A cal aérea é o ligante que resulta da decomposição de rochas calcárias com um teor de impurezas inferior a 5%. Essas rochas podem ser compostas apenas por carbonato de cálcio ou ter ainda alguma porcentagem de carbonato de magnésio. Esta diferenciação de elementos na sua constituição origina uma denominação distinta. De acordo com CARASEK et al. (2001) as cales podem ser classificadas, segundo a sua composição química em:

- Cálccicas: teor de CaO $\geq 90\%$ em relação aos óxidos totais;
- Magnesianas: $65\% < \text{CaO} < 90\%$;
- Dolomíticas: teor de CaO $\leq 65\%$.

Uma vez que não possuem propriedades hidráulicas, estas não endurecem na água, necessitando da presença do ar para endurecer por secagem e reação com o anidrido carbônico.

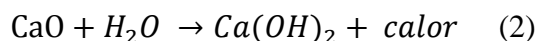
As principais etapas associadas à produção e endurecimento da cal aérea, podem ser divididas em três fases: calcinação, hidratação ou extinção e carbonatação.

A calcinação ocorre num forno cuja temperatura ronda os 900° C, o que possibilita a cozedura dos calcários, que causa a transformação do carbonato de cálcio em dióxido de carbono e óxido de cálcio, composto este vulgarmente conhecido por cal virgem. A equação (1) descreve este processo (CAVACO, 2005; BOTELHO, 2003).



Quando provém de rochas puras, a cal virgem é um produto branco. Quando apresenta colorações creme, amarelada e levemente cinza, é sinal que detém algumas impurezas. Seu odor é equivalente ao “terroso”. Tem uma estrutura cristalina, em cristais isolados ou conglomerados cristalinos, de dimensões e espaços intercristalinos variados, podendo se apresentar sob a forma de grãos de grandes dimensões (10 a 20 cm – pedras ou blocos de cal viva) ou sob a forma de pó. Algumas vezes suas configurações aparecem compactas ou microcristalinas (GUIMARÃES, 2002).

A hidratação da cal é uma fase fundamental, uma vez que a cal virgem não possui características de ligante, necessitando previamente de ser hidratada. A hidratação ou extinção da cal virgem resulta da mistura do óxido de cálcio com água, que desencadeia uma reação muito expansiva e exotérmica, originando a sua desagregação com efervescência transformando o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio. Este produto que se designa por cal apagada, hidratada ou extinta, é utilizado como ligante (CAVACO, 2005; BOTELHO, 2003). A equação química (2) descreve o processo de hidratação.



A extinção da cal viva pode ser realizada por três processos distintos (aspersão, imersão e também através da mistura com areia molhada) dos quais resultam, respectivamente, a cal em pó, a cal

em pasta e uma argamassa de cal e areia, conforme a quantidade de água empregada na reação (FARIA, 2004).

Durante o processo de endurecimento da cal aérea ocorrem dois fenômenos principais, a evaporação da água em excesso e a reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono presente na atmosfera, conhecida por carbonatação. Associadas a estes fenômenos estão a liberação de calor e a formação de carbonato de cálcio. O fenômeno de carbonatação pode ser traduzido pela equação (3) da reação (CAVACO, 2005):



A reação de carbonatação desenvolve-se durante vários meses, ocorrendo do exterior para o interior da argamassa. Como tal, para um adequado desenvolvimento do fenômeno de carbonatação é necessário que a argamassa seja suficientemente porosa de modo a permitir a evaporação da água em excesso, assim como possibilitar a penetração do dióxido de carbono do ar para o seu interior (PINTO et al., 2007).

4.4.1.1 PROPRIEDADES DA CAL AÉREA NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

A cal como aglomerante possui propriedades peculiares que a torna imprescindível na construção civil, especialmente para as argamassas.

Segundo RAGO et. al (1999), a cal no estado fresco propicia maior plasticidade à argamassa, proporcionando uma consistência plástica no momento em que suas partículas finas funcionam como lubrificantes, reduzindo o atrito entre os grãos de areia, permitindo melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade devido à facilidade proporcionada na aplicação, com a redução do custo do m³.

A retenção de água evita a brusca retração por secagem da argamassa, pois esta cede água para a alvenaria de forma gradativa, evitando fissuras, resultando numa melhor aderência e contribuindo para durabilidade (CARASEK, 1996).

A adição de cal hidratada em argamassas de cimento CP I reduz significativamente o módulo de elasticidade, sem afetar na mesma proporção a resistência à tração, que em última análise é a máxima resistência de aderência da argamassa. Assim, as argamassas absorvem melhor as pequenas movimentações das construções evitando, fissuras e até o levantamento (ou queda) dos revestimentos, aumentando a vida útil do revestimento (JOHN, 2003).

Segundo CARASEK et al. (2001), diversos estudos indicam que à medida que se aumenta a porcentagem de hidróxido de magnésio na composição da cal, em relação ao hidróxido de cálcio, há também um aumento na capacidade de aderência da argamassa.

O aumento da durabilidade de argamassas com a utilização de cal ocorre devido a dois fatores. Inicialmente, por ser um aglomerante com menor teor de álcalis (Na_2O e K_2O), comparativamente ao cimento, evitando a geração de reações expansivas álcali-agregado. E também, por apresentar características alcalinas que combatem fungos e bactérias, evitando assim, que se formem manchas e o apodrecimento precoce dos revestimentos; além de proporcionar economia de tinta, pois permite um acabamento mais liso e de cor clara, compatível com qualquer tipo de tinta e outros acabamentos, como fórmica, papéis de parede se respeitado o tempo mínimo de cura de 28 dias (RIBEIRO et. al., 2002).

A cal também é responsável pela capacidade do revestimento em absorver deformações e, por evitar a entrada de água do exterior para o interior da edificação. As moléculas de água adsorvidas pelas moléculas de cal funcionam como lubrificante no interior da massa endurecida, aumentando o poder de acomodação do elemento construtivo às deformações impostas. Quando a cal não atende a esses requisitos, ela não está em conformidade com as normas técnicas, e tem o seu poder aglomerante diminuído, necessitando de quantidades elevadas para obter o mesmo volume de argamassa (COZZA, 1997).

A cal hidratada é utilizada no fabrico de argamassas para assentamento de alvenarias, contudo, se for usada sem outro ligante ou aditivo perde qualidades em presença da água. Dentre os diversos empregos para a cal citam-se pinturas, tijolo ou bloco sílico-calcário, estabilização de solos e argamassa de revestimento e assentamento.

4.4.1.2 NORMALIZAÇÃO PARA A CAL AÉREA

A cal tem importante função como material constituinte da argamassa. Devido às grandes variações na qualidade das cales encontradas no comércio e às exigências dos construtores na qualidade das argamassas, a fim de que o produto adquirido atenda realmente às suas necessidades, torna-se necessária uma melhor fiscalização no processo de fabricação e no controle de qualidade para o consumidor.

A NBR 7175/2003 fixa os requisitos exigíveis no recebimento de cal hidratada destinada a ser empregada em argamassas para a construção civil. Para fins de verificação das exigências

químicas da cal hidratada, devem ser seguidas as normas NBR 6471/1998 e NBR 6473/2003 e deve atender às condições indicadas na Tabela 2.

TABELA 2: CLASSIFICAÇÃO DAS CALES – EXIGÊNCIAS QUÍMICAS (NBR 7175/2003)

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
<i>Anidrido carbônico (CO₂)</i>	<i>(Fábrica)</i>	<5%	<5%	<13%
	<i>(Depósito ou obra)</i>	<7%	<7%	<15%
<i>Óxido não-hidratado calculado</i>		<5%	Não exigido	<5%
<i>Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO + MgO)</i>		>88%	>88%	>88%

Os ensaios químicos têm por objetivo verificar a "pureza" da cal, avaliando o processo de fabricação do produto e a qualidade da sua matéria prima, tendo influência direta sobre o desempenho do produto.

As exigências físicas devem ser verificadas de acordo com os métodos de ensaios indicados nas normas NBR 9289/2000, NBR 9205/2001, NBR 9206/2003, NBR 9207/2003 e na NBR 9290/1996. A cal hidratada deve atender as condições indicadas na Tabela 3.

TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO DAS CALES – EXIGÊNCIAS FÍSICAS (NBR 7175/2003)

Determinações		Limites	
		CH-I e CH-II	CH-III
<i>Finura (% retida acumulada)</i>	<i>Peneira 0,600 mm (n° 30)</i>	<0,5%	<0,5%
	<i>Peneira 0,075 mm (n° 200)</i>	<15%	<15%
<i>Estabilidade</i>		Ausência de cavidades e protuberâncias	Ausência de cavidades e protuberâncias
<i>Retenção de água</i>		>80%	>70%
<i>Plasticidade</i>		>110%	>110%
<i>Incorporação de areia</i>		<2,5%	<2,2%

O mesmo objetivo acontece com os ensaios físicos, que têm como objetivo verificar a qualidade da cal, se esta foi bem moída no processo de fabricação, se é econômica, se é trabalhável e se retém a água da mistura ou a perde para a parede onde a argamassa será assentada.

4.4.2 CAL HIDRÁULICA

A necessidade de se construir em zonas marítimas e fluviais levou o mundo científico a procurar ligantes capazes de endurecer debaixo d'água. Em meados do século XVIII, o fenômeno da hidraulicidade das argamassas foi estudado pelo engenheiro John Smeaton (1724 – 1792), que após uma série de experiências em busca dos fundamentos para conseguir o endurecimento das argamassas dessas obras, na presença de água, afirmava que a presença de argila nos calcários conferia, após a calcinação, notáveis melhorias na argamassa. No ano de 1812 o químico e professor francês Collet-Descotils (1773 - 1815) descobriu que a combinação de cal com a sílica dissolvida após a cozedura de calcários siliciosos, conferia-lhe propriedades hidráulicas (ALVAREZ et al., 2005).

Louis Vicat (1786-1861) engenheiro francês do séc. XIX, baseado nos pressupostos de Smeaton e Collet-Descotils foi, segundo muitos autores, quem primeiramente provou que a queima de calcários com argilas originava novos compostos que conferiam propriedades hidráulicas ao ligante produzido. O nível de hidraulicidade depende, portanto, da quantidade de argila contida nos calcários, da temperatura da cozedura e da duração da cozedura a essa temperatura (FARIA, 2004; CARNEIRO, 2012).

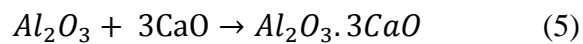
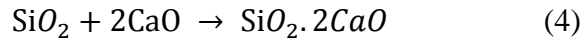
Segundo a NP EN 459-1/2011, as cales hidráulicas são constituídas essencialmente por hidróxido, silicatos e aluminatos de cálcio e são produzidas pela cozedura de rocha calcária argilosa e/ou pela mistura de materiais apropriados. Apresentam a propriedade de fazer pega e endurecer debaixo de água, apesar de o dióxido de carbono da atmosfera contribuir para o endurecimento.

A cal hidráulica é fabricada por processos semelhantes aos da cal aérea. Obtém-se por cozedura de calcários margosos que contenham de 8 a 23% de argilas, a temperaturas entre os 1000 °C e os 1500 °C. Deste processo, obtém-se óxido de cálcio, silicatos e aluminatos de cálcio, capazes de se hidratarem conferindo hidraulicidade à cal.

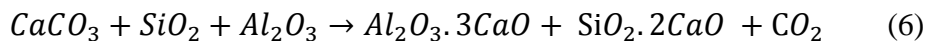
Durante a cozedura do calcário, este passa por diferentes fases observando-se o seguinte:

- Até 110° C ocorre a evaporação da água livre dos materiais, perdendo o calcário entre 5% e 10% de massa durante esta fase;
- Entre 500 °C e 700 °C ocorre a desidratação da argila, verificando-se ainda a decomposição desta argila;

- A cerca de 850 °C a 1100 °C dá-se a decomposição do calcário libertando o anidrido carbônico;
- Entre 1000 °C e 1500 °C acontece a reação da sílica e da alumina da argila com o óxido de cálcio, originando silicatos bicálcicos e aluminatos tricálcicos. As equações químicas (4) e (5) descrevem os processos (SEQUEIRA, 2007).



Ainda, segundo SEQUEIRA (2007), partir dos 850° C, função da calcinação do carbonato de cálcio, obtém-se o dióxido de carbono e o óxido de cálcio. A cozedura de substâncias calcárias e argilosas, em proporções definidas, origina uma estrutura compacta, normalmente designada por pedra cozida, descrita na equação (6) (à saída dos fornos).



Verifica-se que, quanto maior for a temperatura, menor é a quantidade de óxido de cálcio livre e maior é a quantidade de silicatos e aluminatos de cálcio, podendo-se obter um produto semelhante ao obtido no fabrico do cimento.

Após a saída do forno, a cal deve ser extinta para eliminar a cal virgem e para provocar a pulverização de toda a cal hidráulica. O processo de extinção é feito por aspersão, usando-se apenas a quantidade de água estritamente necessária para esta operação, uma vez, que os silicatos e aluminatos também reagem com a água e o seu excesso pode provocar reação, conferindo a pega. A hidratação da cal viva conduz a um aumento de volume provocando a pulverização dos grãos com silicatos e aluminatos. Após a extinção é necessário separar os constituintes incozidos e sobrecozidos (COUTINHO, 1997). Esta é uma reação bastante lenta e, no fim da extinção, é necessário ter a certeza de que apenas permaneceram aluminatos e silicatos de cálcio e cal extinta. Por estes motivos, esta operação deve ser feita em fábrica. Esta operação é que permite distinguir a cal hidráulica do cimento Portland, uma vez que a finura da cal hidráulica é obtida por extinção da cal virgem e não por moagem como no caso do cimento Portland.

Terminada a operação de extinção, a cal hidráulica fica reduzida a pó, contudo, por vezes, aparecem pequenos nódulos escuros ricos em silicatos tricálcicos, designados por grappier, que

são elementos sobreaquecidos que não se reduziram a pó (AGUIAR, 2007). Logo, após a extinção é necessário separar os grappiers do pó e proceder a sua moagem. Finalmente, após a moagem dos grappiers o pó resultante é adicionado ao pó de silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio formando a cal hidráulica. Por vezes pode ser conveniente juntar materiais pozolânicos moídos (AGUIAR, 2007).

O endurecimento da cal hidráulica compreende duas reações. Na primeira reação dá-se a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, quer na água quer no ar. Na segunda reação dá-se a recarbonatação da cal apagada, só ao ar e em presença do dióxido de carbono (COUTINHO, 1997).

4.4.2.1 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA CAL HIDRÁULICA NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Geralmente, as argamassas de cal hidráulica apresentam características intermediárias às argamassas de cimento e às argamassas de cal aérea. Comparativamente ao cimento, a cal hidráulica natural constitui um ligante hidráulico mais sustentável (obtida a temperaturas inferiores), sendo também potencialmente mais compatível com as características de substratos mais antigos.

A retenção de água assume um valor elevado, mesmo quando o substrato é muito absorvente, ou seja, a perda de água durante a pega é muito lenta, possibilitando a hidratação do ligante (GUERREIRO, 2007). O elevado valor de retenção de água associado às suas características viscosas e plásticas, evita a segregação da argamassa, possibilitando a obtenção de superfícies sem macro fendas uma vez que são suficientemente elásticas, com capacidade de suportarem pequenos movimentos do substrato (BOTELHO, 2003).

As argamassas de cal hidráulica apresentam tendencialmente módulos de elasticidade dinâmicos baixos, inferiores às argamassas de cimento. Característica essa que indica que as argamassas de cal hidráulica apresentam grande deformabilidade, indicando boa capacidade de absorver as tensões internas provocadas pela retração e pela interação com o substrato (VEIGA, 1994).

Nas argamassas de cal hidráulica, por serem porosas, a velocidade de absorção de água nos instantes iniciais é bastante elevada, conduzindo a um coeficiente de capilaridade alto (VEIGA, 1994). Normalmente observa-se uma melhoria desta característica ao longo da idade, tanto a nível de velocidade com que se dá a absorção inicial, como relativamente à quantidade total de água absorvida por capilaridade (GUERREIRO, 2007). O calor de hidratação é baixo, libertando-

se lentamente, fazendo com que a evaporação da água seja lenta, limitando assim, as retrações iniciais. As retrações que se registam são moderadas (GUERREIRO, 2007).

As argamassas de cal hidráulica apresentam um comportamento menos dúctil do que as argamassas de cal aérea. A relação entre a resistência à tração e resistência à compressão dá uma indicação da ductilidade da argamassa. Um valor alto sugere um comportamento mais dúctil, permitindo otimizar a resistência às tensões de tração criadas sem que ocorra uma transmissão de esforços muito elevada para o substrato (VEIGA, 1994).

LANAS et. al. (2004) apresenta um estudo que demonstra a evolução da resistência em relação ao tempo de cura e a dosagem de ligante, utilizando cals hidráulicas NHL5. As argamassas mais fortes (traço 1:1 e 1:2), nas idades mais jovens (até aos 28 dias de idade) alcançam cerca de 50% do valor máximo de resistência, enquanto nas argamassas mais fracas (traço 1:3, 1:4 e 1:5) esse valor varia entre 85-90%. Nesse estudo não se verifica nenhum incremento de resistência no último período de cura (165-360 dias). Nas idades mais jovens a argamassa perde a água em excesso, com a exceção da argamassa mais forte em ligante (traço 1:1). Essa argamassa precisa de mais água para hidratar o ligante e ganhar trabalhabilidade, perdendo a água em excesso apenas a partir dos 90 dias de idade.

A cal hidráulica tem vantagens sobre as argamassas à base de cimento devido à sua menor retração. Usa-se também misturada com cimento Portland para o fabrico de argamassas para assentamento de alvenaria. Devido às características referidas, as argamassas com cal hidráulica assumem um papel relevante na reabilitação de edifícios antigos.

Como a cal hidráulica é muito semelhante ao cimento, como, por exemplo, na sua coloração, pode prestar-se a falsificações, o que muitas vezes tem consequências desastrosas, porque a cal hidráulica tem menor resistência que o cimento. Utilizam-se a cal hidráulica em aplicações idênticas às do cimento, mas que não exijam resistências mecânicas elevadas, tais como argamassa de revestimento, argamassas para alvenaria, enchimento e acabamentos, etc. (ORUS, 1977).

4.4.2.2 NORMALIZAÇÃO PARA CAL HIDRÁULICA

Embora no Brasil, a cal hidráulica ainda não seja um produto normalizado, por ser pouco difundido, e comercialmente disponível apenas na região sul, a cal hidráulica utiliza como padrão a norma da Comunidade Europeia - NP EN 459/2011, regularizada em Portugal desde 2002. Esta norma subdivide-se em três partes:

- Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade;
- Parte 2 Métodos de ensaio;
- Parte 3: Avaliação da conformidade.

A NP EN 459-1/2011, faz uma distinção clara entre as cais aéreas e as cais com propriedades hidráulicas. Neste último grupo são estabelecidos três tipos de cais diferentes: as cais hidráulicas naturais (NHL), as cais hidráulicas (HL) e as cais formuladas (FL). A cal hidráulica pode ser classificada em função da sua classe de resistência, tal como pode ser visto na Tabela 4.

TABELA 4: CLASSIFICAÇÃO DAS CALES (IPQ, 2011)

Tipo de cal	Resistencia a compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
HL2, FL2 e NHL2	-	≥ 2 a ≤ 7
HL3,5, FL3,5 e NHL3,5	-	$\geq 3,5$ a ≤ 10
HL5, FL5 e NHL5	≥ 2	≥ 5 a ≤ 15

A NP EN 459-1/2011 fixa as características exigíveis no recebimento de cal hidráulica destinada a ser empregada em argamassas para a construção civil, indicadas nas Tabelas 5 e 6. Para a verificação dessas exigências, a norma NP EN 459-2/2001 apresenta os métodos de ensaios.

TABELA 5: CLASSIFICAÇÃO DAS CALES – EXIGÊNCIAS QUÍMICAS (EN 459-1/2011)

Compostos	Limites		
	HL2	NHL2	FL2
SO_3	$\leq 3\%$	$\leq 2\%$	$\leq 2\%$
$Ca(OH)_2$ disponível	$\geq 10\%$	$\geq 35\%$	≥ 40 a 80%

TABELA 6: CLASSIFICAÇÃO DAS CALES – EXIGÊNCIAS FÍSICAS (EN 459-1/2011)

Determinações		Limites		
		HL2	NHL2	FL2
Resistência a compressão (MPa)	7 dias	Não exigido	Não exigido	Não exigido
	28 dias	≥ 2 a $\leq 7\%$	≥ 2 a $\leq 7\%$	≥ 2 a $\leq 7\%$
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,20 mm (n° 70)	$\leq 5\%$	$\leq 2\%$	$\leq 5\%$
	Peneira 0,09 mm (n° 140)	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$	$\leq 15\%$
Solidez		≤ 2 mm	≤ 2 mm	≤ 2 mm
Penetração		≥ 10 a $\leq 50\%$	≥ 10 a $\leq 50\%$	≥ 10 a $\leq 50\%$
Teor de ar		$\leq 25\%$	$\leq 25\%$	$\leq 25\%$
Tempo de Pega	Inicial	≥ 1 h	≥ 1 h	≥ 1 h
	Final	≤ 15 h	≤ 40 h	≤ 40 h

4.5 ARGAMASSAS

Segundo a NBR 7200/1998, argamassa é a mistura de aglomerantes, agregados e água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência. Já a NBR 13281/2005 define que argamassa é a mistura homogênea de agregado(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos e adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalações próprias (argamassas industrializadas).

4.5.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas, de um modo geral, podem ser empregadas em vários locais com função diferenciada, cada um dos empregos faz jus a uma série de propriedades que correspondem a um tipo de argamassa específica. A NBR 13529/2013 citado por ISAIA (2010) descreve a classificação das argamassas segundo vários critérios:

- Natureza do aglomerante (aérea e hidráulica);
- Número de aglomerantes (simples e mista);
- Tipo de aglomerante (cal, cimento e mista);
- Função do revestimento (chapisco, emboço e reboco);
- Forma de preparo ou fornecimento (dosada em central, preparada em obra, industrializada e semi-pronta);
- Propriedades especiais (aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, hidrófuga e termo isolante);
- Número de camadas de aplicação (camada única ou de duas camadas);
- Ambiente de exposição (paredes internas, paredes externas, contato com o solo);
- Comportamento à umidade (comum, permeabilidade reduzida, hidrófuga);
- Comportamento à radiação (proteção radiológica);
- Comportamento ao calor (termo isolante);
- Acabamento de superfície (camurçado; chapiscado; desempenado; sarrafeado; imitação travertino; lavado; raspado).

4.5.2 FUNÇÃO DAS ARGAMASSAS

As argamassas mais utilizadas pela construção civil são as empregadas como argamassas de assentamento ou argamassas de revestimento. No ano de 2005 foi publicada pela ABNT uma série de novas normas técnicas para esses dois tipos de argamassas, dentre elas a NBR

13281/2005. Esta Norma especifica os requisitos exigíveis para a argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos, sendo classificadas conforme as características e propriedades que apresentam, sendo elas: resistência à compressão, densidade de massa aparente no estado endurecido, resistência à tração na flexão, coeficiente de capilaridade, densidade de massa no estado fresco, retenção de água e resistência potencial de aderência à tração. O Anexo II explicita e classifica todas as exigências presentes na norma. Abaixo, serão abordadas as principais funções e características de cada uma das argamassas.

4.5.2.1 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO

Segundo YOSHIDA et. al. (1995) em acordo a BS 5628 (1985), quanto ao uso para assentamento de paredes de alvenaria, a argamassa tem a função de:

- Unir solidariamente as unidades de alvenaria e ajudá-las a resistir aos esforços laterais;
- Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos;
- Absorver as deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita;
- Selar as juntas contra a penetração de água de chuva

Para obter um bom desempenho a mesma deve apresentar as seguintes características (SABBATINI, 1986):

- Trabalhabilidade;
- Capacidade de retenção de água;
- Resistência inicial;
- Aderência adequada ao substrato;
- Durabilidade;

A escolha do tipo de argamassa poderá, também, ser baseada no tipo de elemento a ser assentado, ou em normas construtivas ou, ainda, de acordo com os esforços a serem suportados pela alvenaria. Por exemplo, uma argamassa poderá ser correlacionada com o tipo ou característica dos elementos a serem assentados: blocos de concreto; blocos cerâmicos; tijolos maciços; tijolos furados; placas de concreto leve, etc. Assim, um elemento de alvenaria com alta velocidade inicial de absorção de água deverá ser compatível com argamassa de alta retenção de água (FIORITO, 2003).

4.5.2.2 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Segundo CINCOTTO et. al. (1995), quando empregadas como revestimento as argamassas podem simplesmente exercer a função de cobrir as irregularidades da parede e ser parte integrante do acabamento estético da edificação, como pode ainda, contribuir para as exigências de segurança e habitabilidade. Diante disso, as argamassas devem apresentar as seguintes características:

- Estabilidade mecânica e dimensional (resistência à tração, compressão, impacto e abrasão) e resistência ao fogo;
- Contribuir para a estanqueidade da parede, constituindo-se em uma barreira à penetração de água;
- Contribuir para o conforto higrotérmico e acústico do ambiente;
- Deve ser aplicada verificando-se a contribuição da base para o desempenho do conjunto;
- Deve possuir compatibilidade entre seus materiais constituintes e os materiais da base na qual vai ser aplicada.

4.5.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

As argamassas possuem uma série de propriedades que assumem maior ou menor relevância em função da aplicação. Algumas podem ser caracterizadas como sendo determinantes no estado fresco, e outras no endurecido.

4.5.3.1 TRABALHABILIDADE

O documento MR-3 da RILEM (1982) prescreve que trabalhabilidade das argamassas é uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, endurecimento sob sucção e tixotropia. HANLEY (2008) observou que as propriedades, como a retenção de água, força de ligação, a viscosidade e limite de elasticidade do material podem levar a uma melhor correlação com a trabalhabilidade das argamassas. Pode-se considerar que uma argamassa é trabalhável, de um modo geral, quando a mesma se distribui facilmente ao ser assentada, não gruda na ferramenta quando está sendo aplicada, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorvivas e permanece plástica por tempo suficiente para que a operação seja completada (SABBATINI, 1984). Esta propriedade é determinante para o futuro desempenho dos rebocos, pois se por um lado permite e facilita a sua aplicação em obra, na realidade condiciona

a performance do reboco a outros níveis, nomeadamente no que diz respeito à retração e à impermeabilização.

RAGO (1999) estudou a influência no tipo de cal na trabalhabilidade, concluindo que a dimensão das partículas de cal é a característica que mais afeta a trabalhabilidade das pastas de cal. Observaram também que as cales dolomíticas necessitam de menos água de hidratação (70 a 80%) que as cales do tipo cálcico (100 a 130%).

4.5.3.2 RETENÇÃO DE ÁGUA

Segundo MACIEL EL AL. (1998), retenção de água é a capacidade que a argamassa no estado fresco apresenta de reter a água de amassamento quando sujeita a solicitações que provocam perda de água por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal. A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativas, promovendo a adequada hidratação do cimento e conseqüente ganho de resistência.

De acordo com SELMO (1989), as argamassas tendem a conservar a água necessária para molhar as partículas dos aglomerantes e do agregado miúdo e a água em excesso é cedida facilmente, devido à absorção do substrato.

4.5.3.3 PLASTICIDADE

Propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a conservar-se deformada após a redução das tensões a que a mesma foi submetida. De acordo com CINCOTTO et. al. (1995), a plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade, e são influenciadas pelo teor de ar aprisionado, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas.

Segundo CASCUDO et al. (2005), a plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água a qual significa uma consistência ótima, sendo esta função do proporcionamento e da natureza dos materiais. Uma argamassa terá boa plasticidade quando se espalhar facilmente sobre o substrato e aderir à sua superfície ou, no caso de revestimentos, quando proporcionar facilidade no seu acabamento final.

4.5.3.4 CONSISTÊNCIA

Segundo CINCOTTO et al. (1995) é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação. Diversos autores classificam-as, segundo a consistência, em secas (a

pasta preenche os vazios entre os grãos), plásticas (a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados) e fluidas (os grãos ficam imersos na pasta). A quantidade de água existente na argamassa é o principal fator que influencia esta propriedade; além da relação água/aglomerante, aglomerante/agregado, granulometria do agregado, natureza e qualidade do aglomerante.

4.5.3.5 TEOR DE AR INCORPORADO

O teor de ar incorporado é definido como a quantidade de ar presente em certo volume de argamassa, podendo ser determinado conforme a norma NBR 13278/2005 ou por meio de equipamentos e métodos especificados pelos fabricantes.

De acordo com YOSHIDA et al. (1995), o ar incorporado age como lubrificante entre os agregados da argamassa melhorando sua trabalhabilidade e capacidade de retenção de água, porém, em valores elevados, pode prejudicar a consistência e reduzir a resistência de aderência. Pode-se deduzir, então, que quanto maior for o teor de ar incorporado de uma argamassa, maior será o volume de vazios, o que implica em maior porosidade total e, conseqüentemente, em uma redução de sua resistência à compressão.

4.5.3.6 ADERÊNCIA INICIAL

É a capacidade que a argamassa apresenta para ancorar na superfície da base através da penetração da pasta nos poros, reentrâncias e saliências seguidos do endurecimento gradativo da pasta.

A aderência inicial depende basicamente das propriedades da argamassa no estado fresco, das características da base de aplicação, como porosidade, rugosidade, condições de limpeza e da superfície de contato efetivo entre a argamassa e o substrato. Para obter uma adequada aderência inicial, a argamassa deve apresentar trabalhabilidade e retenção de água, adequadas à sucção do substrato no qual será aplicada (BAÍA e SABATTINI, 2000).

4.5.3.7 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência mecânica pode ser definida como a propriedade relacionada à capacidade que as argamassas têm em suportarem as ações mecânicas de diferentes naturezas, devidas à abrasão superficial, ao impacto e às contrações higroscópicas (BAIA e SABATTINI, 2000).

Segundo SELMO (1989), a resistência mecânica pode ser conceituada como a propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços

mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento.

Um elevado módulo de elasticidade permite uma melhor capacidade do reboco às agressões externas, como, por exemplo, o uso. Este permite ainda uma melhor resistência por parte do reboco a tensões geradas entre o reboco e o substrato, que ocorrem durante o processo de secagem e retração do material.

Segundo FIORITO (2003), os revestimentos são submetidos a diferentes solicitações, entre elas estão:

- Movimentação volumétrica da base - a variação dimensional por umedecimento e secagem é a mais comum, que ocorre por ação dos agentes externos, como temperatura e umidade;
- Deformação da base - devido à deformação lenta do concreto da estrutura e recalques das funções;
- Movimentação do revestimento - ligadas às condições climáticas, as variações de temperatura provocam o fenômeno de dilatação e contração do revestimento;
- Retração do revestimento - tensões internas são provocadas pelo movimento de retração em consequência de uma diminuição de volume devido à perda de água para a base, por evaporação, e ainda devido às reações de hidratação do cimento. Quando as tensões internas atuantes no revestimento superam a sua resistência à tração, surge a fissura. A retração pode ocorrer após a secagem do revestimento, por variações no ambiente.

4.5.3.8 ADERÊNCIA AO SUBSTRATO NO ESTADO ENDURECIDO

A aderência ao substrato está entre as principais características das argamassas. Segundo SABBATINI (1984), refere-se à capacidade que a interface substrato/argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se. Refere-se à capacidade da argamassa de manter-se aderida ao substrato, seja no assentamento, com finalidade de unir elementos em uma alvenaria, ou em revestimentos, mesmo diante de movimentações diferenciadas, choques térmicos, impactos e outras solicitações (RECENA, 2008).

TAHA et al. (2001) citados por CARVALHO JR et al. (2005) descrevem que a aderência à alvenaria se desenvolve segundo dois mecanismos:

- Aderência química: a resistência de aderência advém de forças covalentes ou forças de Van der Waals, desenvolvidas entre a unidade de alvenaria e os produtos da hidratação do cimento;
- Aderência mecânica: formada pelo intertravamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros dos blocos de alvenarias devido ao efeito da sucção ou absorção capilar.

A aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e a absorção de água, a resistência mecânica, a textura superficial e pelas condições de execução do revestimento. A capacidade de aderência da interface argamassa/substrato depende, ainda, da capacidade de retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado da argamassa e é, também, influenciada favoravelmente pelo teor de finos do agregado miúdo (BAÍA e SABATTINI, 2000).

4.5.3.9 ELASTICIDADE

Segundo SABBATINI (1984), elasticidade ou resiliência é a capacidade que a argamassa no estado endurecido apresenta em se deformar sem apresentar ruptura quando sujeita a solicitações diversas, e de retornar à dimensão original inicial quando cessam estas solicitações. De acordo com CINCOTTO et. al. (1995), a elasticidade é, portanto, uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento e, dessa forma, influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa à base e, conseqüentemente, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade.

SILVA (2006) justifica que o módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez da argamassa no estado endurecido, proporcionado pelo cimento hidratado, dependente da relação água/cimento e da disposição/espacos entre as partículas dos agregados devido à forma, à rugosidade dos grãos e teor de material pulverulento. O autor constatou que à medida que aumenta a relação cal/cimento, diminui a densidade de massa causada pelo aumento do teor de cal, que produz um aumento no consumo de água. Esta água excedente na mistura não hidrata com o cimento, não participa das reações químicas com os componentes da cal, o que promove o aumento do índice de vazios e a queda do módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena, e é dado por aproximação pelo módulo tangente inicial. Geralmente é de 20 a 40 % mais alto que o módulo de elasticidade estático. É utilizado para avaliar estruturas sujeitas a terremotos e impactos. Pode ser obtido com maior precisão por ensaio ultrassônico (YAMAN et al, 2001).

4.5.3.10 RETRAÇÃO

A retração é um fenômeno que ocorre pela redução do volume da argamassa devido à perda de água para o substrato por sucção, evaporação ou pela reação química dos componentes do cimento e da cal (SILVA, 2006).

Segundo BASTOS (2001), quanto ao estado físico da argamassa a retração pode ser classificada em:

- Retração plástica: caracterizada pela perda de água da argamassa que ocorre antes da pega do cimento, quando a fração sólida da mistura dispõe de mobilidade de umas partículas em relação às outras. A diminuição do volume do sistema corresponde ao volume de água perdida;
- Retração no estado endurecido: ocorre após a pega do cimento. É conhecida por retração por secagem causada pela perda de água. Depende do tamanho e do tipo de vazios que perde água e da forma como a água está ligada às superfícies sólidas da pasta endurecida: se livre, se adsorvida nas paredes internas de sua estrutura, se entre as camadas do silicato de cálcio hidratado (CSH) ou se combinada quimicamente. Considera-se que a magnitude da retração total da pasta endurecida depende diretamente do grau de dificuldade encontrado para a remoção da água e das propriedades mecânicas do compósito.

Vários são os fatores que influenciam na retração tais como: tipos de aglomerantes, temperatura, incidência do sol, umidade relativa do ar, velocidade do vento, etc.

4.5.3.11 DURABILIDADE

É a propriedade que a argamassa apresenta para resistir ao ataque de meios e agentes agressivos, mantendo suas características físicas e mecânicas inalteradas com o decorrer do tempo e de sua utilização. De acordo com MACIEL et. al. (1998), durabilidade é uma propriedade do período de uso do revestimento no estado endurecido e que reflete o desempenho do revestimento frente às ações do meio externo ao longo do tempo. Alguns fatores prejudicam a durabilidade dos revestimentos, tais como: fissuração, espessura excessiva, cultura e proliferação de microrganismos, qualidade das argamassas, a falta de manutenção, clima, localização e topografia.

Capítulo 5

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, foram especificados os materiais utilizados na produção das argamassas bem como os procedimentos de ensaios realizados para caracterização dos aglomerantes e das argamassas, nos estados, fresco e endurecido. A metodologia, de forma simplificada e esquemática, pode ser visualizada na Figura 2.

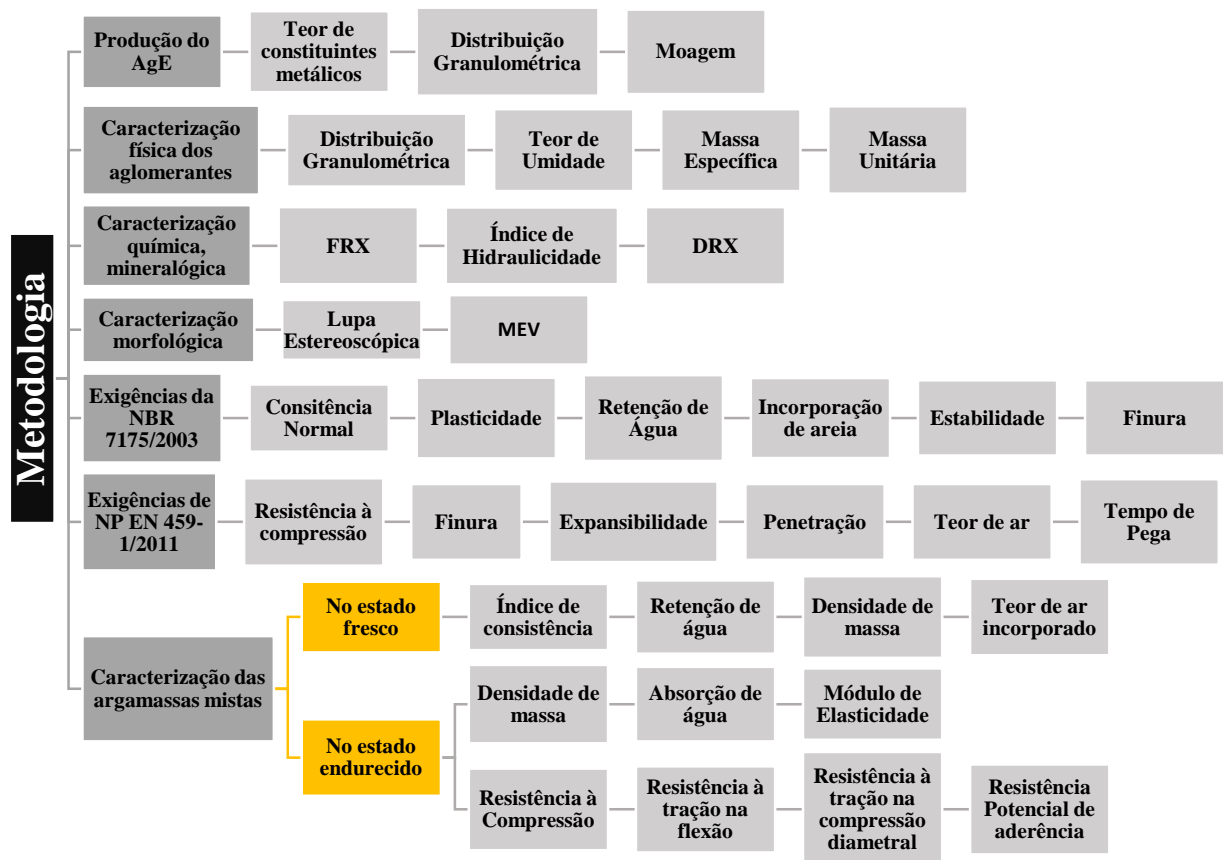


Figura 2: Organograma da metodologia.

5.1 MATERIAIS

5.1.1 CAL HIDRATADA

A cal hidratada ou aérea (Ag^A) utilizada no experimento foi a cal hidratada CHI, tipo cálcica, fabricada pela empresa ICAL segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 7175/2003 e disponível na região a custos acessíveis. Após sua aquisição, a cal foi armazenada em recipientes

plásticos de modo a preservar suas características, evitando alterações de umidade ou contaminações.

As propriedades físicas da cal utilizada, disponível pelo fabricante, podem ser visualizadas na Tabela 7, apresentada a seguir.

TABELA 7: PROPRIEDADES FÍSICAS DA CAL HIDRATADA CHI (ICAL, 2015)

<i>Aspecto</i>	Pó seco branco
<i>Umidade (%)</i>	0,76
<i>Plasticidade (%)</i>	123,75
<i>Densidade (g/cm³)</i>	0,48
<i>Poder de incorporação de areia (%)</i>	> 4,0
<i>Massa unitária (g/cm³)</i>	0,55
<i>Retenção de água (%)</i>	> 80
<i>Retido na peneira 0,600mm (%)</i>	< 0,5
<i>Retido na peneira 0,075mm (%)</i>	< 7,0

As propriedades químicas da cal utilizada, disponível pelo fabricante, podem ser visualizadas, na Tabela 8, apresentada a seguir.

TABELA 8: PROPRIEDADES QUÍMICAS DA CAL HIDRATADA CHI (ICAL, 2015)

<i>Componentes</i>	%
<i>P.P.C. (perda por calcinação)</i>	24,51
<i>CaO</i>	72,37
<i>MgO</i>	0,39
<i>SiO₂ + RI (resíduo insolúvel)</i>	1,77
<i>Fe₂O₃</i>	0,16
<i>Al₂O₃</i>	0,36
<i>SO₃</i>	0,21
<i>S</i>	0,084
<i>CO₂</i>	4,16
<i>CaO disponível (método da sacarose)</i>	65,92

5.1.2 CAL HIDRÁULICA

A cal hidráulica (Ag^H) utilizada no experimento foi a cal hidráulica HL2, fabricada pela empresa CERRO BRANCO segundo prescrições normativas estabelecidas à EN 459-1/2011 e disponível apenas na região sul do Brasil. Após sua aquisição, a cal foi armazenada em recipientes plásticos de modo a preservar suas características, evitando alterações de umidade ou contaminações.

As propriedades físicas e químicas da cal utilizada, disponível pelo fabricante, podem ser visualizadas, na Tabela 9.

TABELA 9: PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DA CAL HIDRÁULICA (CERRO BRANCO, 2015)

<i>Óxidos não hidratados</i>	≤10%
<i>Umidade</i>	≤1%

<i>SO₃</i>	≤3%	
<i>CO₂</i>	≤5%	
<i>Resíduo Insolúvel</i>	≥35%	
<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	7 dias	-
	28 dias	≥2 a ≤7
<i>Retido em peneira #70 (0,2 mm)</i>	≤5%	
<i>Retido em peneira #140 (0,1 mm)</i>	≤15%	

5.1.3 CIMENTO

O cimento utilizado como um dos aglomerantes na produção das argamassas foi o cimento Portland CP II Z-32 Itaú, produzido pela empresa Votorantim Cimentos, segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 11578/1997, com disponibilidade e custo acessíveis.

O cimento Portland composto tem diversas possibilidades de aplicação sendo um dos cimentos mais utilizados no Brasil. Suas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos. O CP II-Z-32 leva, em sua composição, de 6 a 14% de pozolana, material que proporciona uma maior impermeabilidade ao concreto e à argamassa, o que garante uma maior durabilidade, e até 10% de material carbonático. Recomenda-se não utilizar na necessidade de desforma rápida, sem cura térmica, e concreto protendido pré-tensionado.

As propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento, disponível pelo fabricante, podem ser visualizadas nas Tabelas 10 e 11.

TABELA 10: PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CIMENTO (VOTORANTIM,2015)

Componentes	%
<i>MgO</i>	4,74
<i>SO₃</i>	3,24
<i>Resíduo Insolúvel</i>	4,97

TABELA 11: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO (VOTORANTIM,2015)

<i>Água de consistência (%)</i>		28,44
<i>Tempo de Pega</i>	<i>Início (min)</i>	280,29
	<i>Fim (min)</i>	376,18
<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	3 dias	22,89

	7 dias	29,39
	28 dias	34,94
<i>Finura</i>	<i>Retido em peneira #200 (%)</i>	0,64
	<i>Retido em peneira #325(%)</i>	6,28

5.1.4 AREIA

A areia utilizada como agregado miúdo para produção das argamassas experimentais é proveniente do Rio Piranga, extraída no município de Ponte Nova, Minas Gerais. A amostra utilizada possui partículas com diâmetro inferior a 4,80 mm, obtidas por processo de peneiramento.

Para garantir a qualidade das argamassas no experimento e evitar o processo de inchamento do agregado miúdo, a areia foi seca em estufa, em seguida peneirada e armazenada em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados.

5.1.5 AGLOMERANTE ECOLÓGICO

O aglomerante ecológico (Ag^E) utilizado no experimento foi a escória de forno panela processada (EFP^P), obtida da escória de forno panela bruta (EFP^B), proveniente de usinas siderúrgicas da região sudeste do país.

As amostras foram coletadas de forma representativa, segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 10007/2004, e enviadas ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas/UFOP em bombonas plásticas, hermeticamente lacradas e devidamente identificadas.

A EFP^P foi separada granulometricamente em frações de interesse, peneirando e utilizando o material retido nas peneiras de n° 30, 50, 100, 200 e o material moído passante na peneira de n° 200. A percentagem de cada fração utilizada na EFP^P encontra-se detalhada na Tabela 12.

TABELA 12: DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO EFPP.

Peneira	Porcentagem (%)
<i>Retida na 30</i>	0,5
<i>Retida na 50</i>	0,5

<i>Retida na 100</i>	1,0
<i>Retida na 200</i>	13
<i>Passante na 200</i>	85

Para garantir a qualidade das argamassas no experimento, as amostras de EFP^P foram previamente secas em estufas e acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e devidamente identificados. A Figura 3 ilustra as frações de interesse empregadas na EFP^P.



(a) Retida na peneira nº 30

(b) Retida na peneira nº 50

(c) Retida na peneira nº 100



(a) Retida na peneira nº 200

(b) Passante na peneira nº 200

Figura 3: Frações granulométricas da EFP^P.

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 PROCESSAMENTO DO AGLOMERANTE ECOLÓGICO

A produção do aglomerante ecológico, de forma simplificada e esquemática, pode ser visualizada na Figura 4. As rotas de processamento utilizada para produção do Ag^E foram estabelecidas e conduzidas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (Imc²) da Escola de Minas/UFOP.

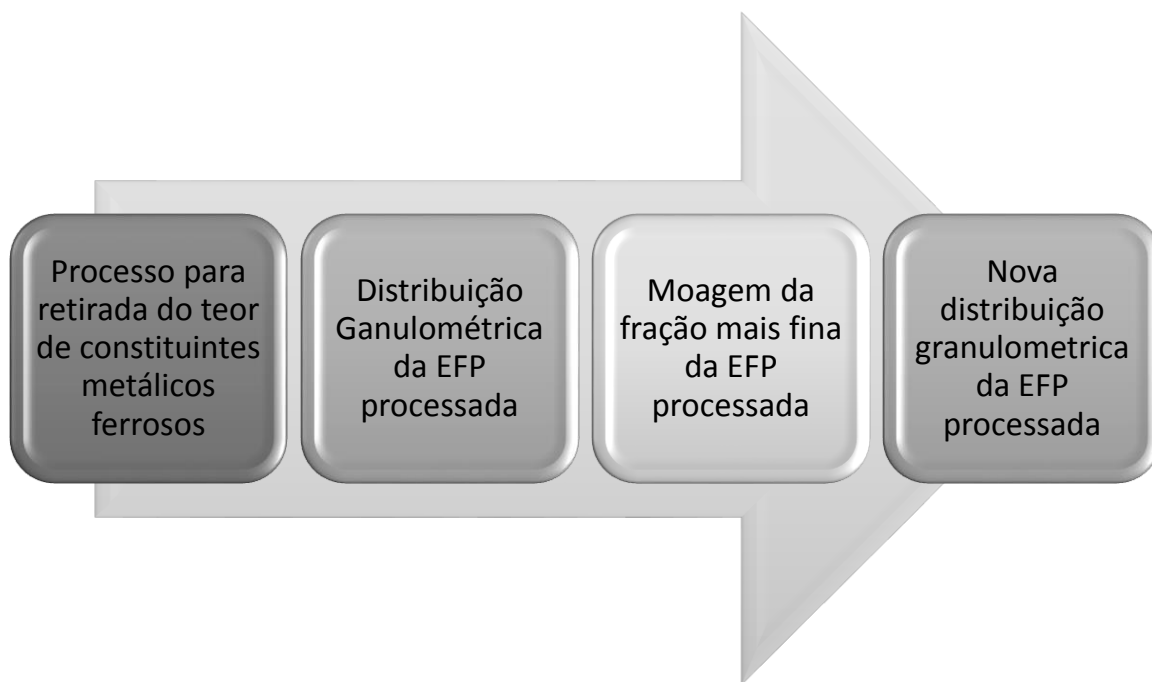


Figura 4: Fluxo simplificado para obtenção do Ag^E.

5.2.1.1 TEOR DE CONSTITUINTES METÁLICOS FERROSOS

Em escala piloto, a EFP foi processada em laboratório para segregação das frações metálicas (materiais magnéticos) em rolo magnético INBRAS (HF CC $\phi 12'' \times 12''$) com intensidade de campo 950 GAUSS, frequência de vibração 60 HERTZ, ilustrado na Figura 5. O material utilizado para a determinação do teor de metálicos foi seco em estufa, a 105 °C até constância de massa. A amostra foi então circulada pelo dispositivo de recuperação de metálico. O material retido, que é a fração metálica da amostra, foi completamente removido e determinado seu peso. O processo de circulação da amostra repetiu-se até que a fração metálica (materiais magnéticos) retida no cone fosse inferior a 1,0% da massa da amostra inicial.



Figura 5: Rolo magnético INBRAS utilizado.

O teor metálico é calculado pela equação (7):

$$T_{met} = \left[1 - \left(\frac{m_0 - \sum m_i}{m_0} \right) \right] \times 100 \quad (7)$$

- T_{met} = teor de metálicos, em %
- m_0 = massa inicial da amostra, em g
- $\sum m_i$ = somatório da massa retida no rolo, em g.

5.2.1.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Com o objetivo de produzir um aglomerante que substitua as cales nas argamassas mistas, e, a fim de produzir materiais fisicamente idênticos granulometricamente aos aglomerantes convencionais, a EFP processada, o Ag^A e Ag^H foram submetidos a processo de peneiramento para a fração de material retida na peneira n° 200 (diâmetro de 0,075 mm) e granulometria à laser (BETTERSIZE 2000, que atende faixas de diâmetros de 0,02 μm a 2000 μm) para a fração de material passante na peneira n° 200 (diâmetro de 0,075 mm).

5.2.1.3 MOAGEM

A fim de que se produzissem aglomerantes com tamanhos médios de partículas idênticos, processou-se a fração com o diâmetro menor do que 0,075 mm EFP, segundo processos de moagem em dois tipos de moinhos de bola diferentes, em tempos diferentes, a fim de que se

pudesse definir parâmetros mais adequados para moagem. Para os testes de moagem foram utilizados jarros e corpos moedores em aço inox.

Para otimização do processo de moagem, foram adotados tempos diferentes de processamento para obtenção do material. Para moagem de alta eficiência (RETSCH PM100), os tempos de moagem foram de 1, 2 e 5 minutos. Para moagem de baixa eficiência (MARCONI MA500), os tempos de moagem foram de 2, 5 e 10 minutos.

A eficiência para produção da escória processada (EFP^P) foi determinada pelo diâmetro médio das partículas de cada uma destas amostras processadas, através da granulometria a laser (Anexo I). A Figura 6 ilustra os moinhos utilizados na moagem para obtenção da EFP^P.



Figura 6: Moinhos (a) de baixa eficiência MARCONI MA500 e (b) de alta eficiência RETSCH PM100.

5.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGLOMERANTES

Os materiais utilizados como aglomerantes (EFP^P, Ag^H e Ag^A) na produção das argamassas foram submetidos aos ensaios de caracterização física segundo sua distribuição granulométrica, umidade (NBR 9939/2001), massa específica (NBR NM 23/2000), massa unitária (NBR NM 45/2006). Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas/UFOP.

5.2.2.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para a caracterização granulométrica dos aglomerantes, os materiais foram secos em estufa, e submetidos a processo de peneiramento para partículas com diâmetro superior a 0,075mm. Para material com diâmetro inferior a 0,075mm, utilizou-se analisador de partículas por difração laser BETTERSIZÉ, modelo 2000.

5.2.2.2 TEOR DE UMIDADE

O ensaio para determinação do teor de umidade total realizado com os aglomerantes foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9939/2001, submetidos às mesmas condições.

O teor de umidade do material é dado em percentual e é obtido pela equação (8) a seguir.

$$TU = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad (8)$$

Sendo:

- TU é o teor de umidade da amostra em porcentagem
- P_u é o peso úmido da amostra em gramas
- P_s é o peso da amostra seco em estufa em gramas

Este ensaio tem a finalidade de determinar a quantidade de água absorvida do ambiente pelo aglomerante para correção da relação água/cimento utilizado em traços realizados em obras.

5.2.2.3 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica de um material pode ser definida como a relação entre a massa do material seco em estufa até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos apenas os poros impermeáveis. O ensaio para determinação da massa específica realizado com os aglomerantes foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR NM 23/2000.

Este ensaio consistiu em adicionar uma quantidade de querosene com auxílio do funil de haste longa no frasco de Le Chatelier, representado na Figura 7, de forma que o líquido ficasse na marca de 0 ml visível na graduação do tubo. O frasco foi colocado no banho termorregulador durante 30 minutos, para equalização das temperaturas e assim foi registrada a primeira leitura do volume. Uma amostra conhecida de material foi pesada e assim, colocada dentro do frasco e a leitura do novo volume foi realizada. De posse dos dados, a massa específica foi determinada conforme equação (9):

$$\rho = \frac{m}{(V_2 - V_1)} \quad (9)$$

Sendo:

- m : massa da amostra medida
- ρ : massa específica da amostra
- V_1 : Primeira leitura do volume realizado após ter sido colocada no banho termorregulador
- V_2 : Segunda leitura do volume realizada após a colocação da amostra de massa conhecida do material



Figura 7: Frasco de Le Chatelier.

5.2.2.4 MASSA UNITÁRIA

A massa unitária pode ser definida como a relação entre a massa do material e o volume ocupado considerando os vazios entre os grãos e poros permeáveis. O ensaio para determinação da massa unitária realizado com os materiais foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR NM 45/2006. As matérias-primas em estudo foram os ligantes (cimento CII - Z, Ag^A, Ag^H e EFP^P) e o agregado miúdo. Em todos os ensaios realizaram-se seis determinações diferentes.

5.2.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS

Para a caracterização química e mineralógica de todos os aglomerantes analisados foram necessárias pequenas quantidades, em estado sólido, com frações granulométricas abaixo de 1 mm, conforme recomendações dos equipamentos.

5.2.3.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Para determinação das composições químicas das amostras de EFP^P, Ag^H e Ag^A foram realizados ensaios de fluorescência de raios X (FRX). O equipamento utilizado foi o modelo Rayny EDX

720, da marca Shimadzu. As análises de FRX foram realizadas pelo Laboratório NanoLab no Departamento de Metalurgia da Escola de Minas/UFOP.

As amostras de Ag^H, Ag^A foram tomadas diretamente da embalagem comercial, secas em estufa, acondicionadas no molde e cobertas com um filme PVC e inseridas no porta-amostras, para realização da análise. A amostra EFP^P utilizada não continha materiais magnéticos e também estava seca em estufa.

5.2.3.2 ÍNDICE DE HIDRAULICIDADE

O índice de hidraulicidade (COUTINHO, 1988) foi definido pela correlação entre os percentuais de óxidos presentes nos materiais analisados, obtidos da FRX dado pela equação (10).

$$i = \frac{\%SiO_2 + \%Fe_2O_3 + \%Al_2O_3}{\%CaO + \%MgO} \quad (10)$$

A análise dessa correlação foi avaliada conforme a Tabela 13 apresentada a seguir.

TABELA 13: RELAÇÃO DE HIDRAULICIDADE (ADAPTADO DE COUTINHO, 1988)

Aglomerantes	i
<i>Cal aérea (Gorda ou magra)</i>	0,0 < i < 0,10
<i>Fracamente hidráulica</i>	0,10 < i < 0,16
<i>Medianamente hidráulica</i>	0,16 < i < 0,31
<i>Hidráulica padrão</i>	0,31 < i < 0,42
<i>Muito hidráulica</i>	0,42 < i < 0,50

5.2.3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Para determinação das composições mineralógicas das amostras EFP^P, Ag^H e Ag^A, foram realizados ensaios de difração de raios X (DRX). O equipamento utilizado foi o modelo Empyrean, da marca Panalytical com radiação CuK α , tensão de 45 KV, corrente de 40 mA, com passo angular de 0,02 e tempo por passo de 20 segundos, com ângulo 2 θ percorrido entre 4 – 80°. As análises de DRX foram realizadas pelo Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP.

As amostras de Ag^H, Ag^A foram tomadas diretamente da embalagem comercial, secas em estufa, acondicionadas no molde, para realização da análise. A amostra EFP^P utilizada não continha materiais magnéticos e também estava seca em estufa.

5.2.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS AMOSTRAS

As análises da microestrutura dos materiais (EFP^P, Ag^H e Ag^A) foram realizadas por microscópio óptico (lupa estereoscópica) e através do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

5.2.4.1 LUPA ESTEREOSCÓPICA

A análise da microestrutura por microscópio óptico (lupa estereoscópica) foi realizada através do equipamento da marca Oleman, modelo 26600, com ampliação de até 45 vezes, que permitiu visualizar a forma dos grãos dos materiais em três dimensões.

5.2.4.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise da microestrutura através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi realizada no equipamento da marca TESCAN, modelo Vega3_{SEM}, com ampliação de até 15000 vezes em cada amostra, acoplado com espectrômetro de energia dispersiva de raios X (EDS), para determinação da composição elementar nas regiões analisadas.

Para as análises com aumento de 500 vezes, as amostras de Ag^H, Ag^A foram tomadas diretamente da embalagem comercial, secas em estufa, acondicionadas no molde e cobertas com um filme PVC e inseridas no porta-amostras, para realização da análise. A amostra EFP^P utilizada não continha materiais magnéticos e também estava seca em estufa. Assim, as amostras foram recobertas por uma fina camada de ouro, através do metalizador da marca Quorum- modelo Q150R ES.

Para as análises no espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDS), acoplado ao MEV, com aumento de 250 vezes, as amostras de Ag^H, Ag^A foram tomadas diretamente da embalagem comercial, secas em estufa, acondicionadas no molde e cobertas com um filme PVC e inseridas no porta-amostras, para realização da análise. A amostra EFP^P utilizada não continha materiais magnéticos e também estava seca em estufa. Posteriormente, essas amostras foram embutidas em resina epóxi e recobertas com carbono.

5.2.5 CARACTERIZAÇÃO DA CAL HIDRATADA PARA ARGAMASSAS (NBR 7175/2003)

Para que um material seja considerado uma cal hidratada, deve ser fabricado de acordo com as normas técnicas aplicáveis, tal como a NBR 7175/2003. Esta norma especifica as características exigíveis de cal hidratada a ser empregada em argamassas para a construção civil. Assim, a fim de verificar a conformidade dos aglomerantes utilizados em relação à normalização vigente e também como forma de comparação entre os materiais, a EFP^P e o Ag^A foram submetidos a ensaios especificados a seguir.

5.2.5.1 ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA NORMAL

O ensaio para a determinação da água que confere consistência normal à pasta foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 14399/1999. Para essa determinação, utilizou-se aparelho de Vicat modificado, ilustrado na Figura 8. Este ensaio consistiu na preparação de uma pasta com 500 g de massa de aglomerante e uma quantidade de água determinada por meio de tentativas, até que se atinja o valor de consistência que é considerado normal quando seu índice de consistência for igual a (20 ± 2) mm.



Figura 8: Aparelho de Vicat modificado.

5.2.5.2 ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DA PLASTICIDADE

O ensaio para a determinação da plasticidade, empregando-se o plasticímetro de Emley, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9206/2003. Esta análise foi adaptada para mesa de consistência, em função da disponibilidade de equipamentos do laboratório.

Este ensaio consistiu na preparação de uma pasta de aglomerante com a qual foi obtida uma penetração de (20 ± 2) mm do aparelho de Vicat modificado, de acordo com a NBR 14399/1999. A pasta argamassa permaneceu em repouso, por um período, e coberta por um tecido umedecido, a fim de que fosse evitada evaporação, por um período de (20 ± 2) h. Após esse tempo, a pasta foi remisturada e a sua quantidade de água foi ajustada para que se obtivesse novamente o índice de consistência desejado. O índice de consistência foi medido antes e depois da água adicionada, e monitorado por um período de 5 minutos em intervalos de 1 em 1 minuto. A Figura 9 ilustra parte do procedimento descrito.



Figura 9: Medida de consistência.

5.2.5.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RETENÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de retenção de água, através de funil de Buchner modificado, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9290/1996.

O valor do índice de retenção de água foi calculado conforme a equação (11):

$$RA = \frac{A - 125}{B - 125} \times 100 \quad (11)$$

Sendo:

- RA = índice de retenção de água de cada determinação, em %.

- A = consistência após a sucção no funil de Buchner modificado, em mm.
- B = consistência antes da sucção no funil de Buchner modificado, em mm.

A Figura 10 ilustra todos os instrumentos e materiais utilizados no ensaio.



Figura 10: Determinação da retenção de água das argamassas pelo funil de Buchner.

5.2.5.4 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE INCORPORAÇÃO DE AREIA

O ensaio para a determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9207/2000, que permite determinar a quantidade máxima de areia-padrão que pode ser misturada a um ligante para argamassas, sem prejudicar as características de trabalho da mistura resultante. Esta análise foi adaptada, para mesa de consistência, em função da disponibilidade de equipamentos do laboratório.

O ensaio consistiu na preparação inicial de uma argamassa composta de 500 g de aglomerante e 500 g de areia normal padrão composta de partes iguais em peso das três frações, conforme a NBR 7214/2012. A quantidade de água no recipiente foi ajustada para o índice de consistência normal de (240 ± 5) mm. Repetiu-se a operação, aumentando a proporção areia/aglomerante até que não fosse possível determinar o índice de consistência, devido ao cisalhamento da argamassa. A Figura 11 ilustra parte do procedimento realizado no ensaio.



Figura 11: Medida do índice de consistência.

5.2.5.5 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE

O ensaio para a determinação da estabilidade, mediante observação visual, foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9205/2001. O ensaio consistiu na preparação de uma argamassa composta de 500 g de aglomerante e 2000 g de areia normal padrão, conforme a NBR 7214/2012. A quantidade de água no recipiente foi ajustada para o índice de consistência normal de (280 ± 5) mm. Imediatamente após a preparação da massa, espalhou-se uma camada com aproximadamente 5 mm de espessura da argamassa em placas de vidro, com um acabamento liso. Essas placas permaneceram em repouso por (18 ± 2) h à temperatura de $(40 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Após esse período, procedeu-se a primeira observação de ocorrências relativas ao surgimento de protuberâncias e/ou pipocamentos. Logo após esta observação, as placas de vidro foram mantidas em ambiente saturado, a temperatura 100°C , constante durante 5 h. Em seguida, procedeu-se à segunda observação, relativa ao surgimento de protuberâncias e/ou pipocamentos.

5.2.5.6 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA FINURA

O ensaio para a determinação da finura foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 9289/2000. O ensaio consiste basicamente na lavagem do material sobre o jogo de peneiras com abertura de malha de 0,075 mm e 1,18 mm até que a água esteja clara. A finura do material é correlativa à massa dissipada em cada peneira durante a lavagem comparativamente à massa inicial seca em estufa.

5.2.6 CARACTERIZAÇÃO DA CAL HIDRÁULICA PARA ARGAMASSAS (EN 459-1/2011)

Para que um material seja considerado uma cal hidráulica deve ser fabricada de acordo com as normas técnicas aplicáveis à EN 459-1/2011. Esta norma especifica as características exigíveis de cal hidráulica a ser empregada em argamassas para a construção civil. Assim, a fim de verificar a conformidade dos aglomerantes utilizados em relação à normalização vigente e também como forma de comparação entre os materiais, a EFP^P e o Ag^H foram submetidas a ensaios especificados a seguir

5.2.6.1 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio para a determinação da resistência à compressão foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à EN 459-2/2001. Para cada tipo de material foram rompidos 3 corpos de prova, aos 28 dias de idade.

O equipamento utilizado foi a prensa EMIC, modelo DL 20000, e a célula de carga de capacidade de 200 KN. A Figura 12 ilustra a execução do ensaio.



Figura 12: Determinação da resistência à compressão, aos 28 dias.

5.2.6.2 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA FINURA

O ensaio para a determinação da finura foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à EN 459-2/2001. A finura dos materiais é medida por segregação em peneiras padrões com abertura de malha de 0,02 mm (n° 70) e 0,09 mm (n° 170).

5.2.6.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE

O ensaio para a determinação da expansibilidade, conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à EN 459-2/2001, foi adaptado em função da disponibilidade de equipamentos do laboratório. Utilizaram-se como parâmetros prescrições normativas estabelecidas à NBR 9205/2001 que determina estabilidade da argamassa mediante observação visual.

5.2.6.4 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO

O ensaio para a determinação de penetração foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à EN 459-2/2001. O ensaio consistiu em preparar uma argamassa padrão, descrita na norma NP EN 196-1/1994, e ajustada para um diâmetro de índice de consistência de (185 ± 3) mm, medido na mesa de fluxo. Para medir o valor de penetração, colocou-se a argamassa no recipiente, em duas camadas, exatamente 2 min após a conclusão da operação de mistura e, em seguida, colocou-se o recipiente de argamassa na placa de base com o êmbolo na sua posição inicial, soltando o parafuso de fixação para liberar o dispositivo de queda. A Figura 13 ilustra o instrumento utilizado no ensaio.



Figura 13: Determinação da penetração.

5.2.6.5 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE AR INCORPORADO

O ensaio para a determinação do teor de ar incorporado foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à EN 459-2/2001. Assim como no ensaio de penetração, este ensaio consistiu em preparar uma argamassa padrão, descrita na norma EN 196-1/1994. O teor de ar da argamassa no estado fresco foi obtido pelo método de pressão utilizando um aparelho de teste, utilizando o equipamento específico para este fim fabricado pela Solotest, modelo 1.150.001. O ensaio consistiu no preenchimento do molde com a argamassa preparada, acoplando, posteriormente, um dispositivo de vedação e leitura. Todas as válvulas foram então fechadas e o ar foi injetado por meio de uma bomba até que atinja a marca inicial de leitura registrada no relógio. Um gatilho foi disparado, liberando o ar pressurizado, e mantido pressionado até a estabilização do ponteiro que apresenta o resultado do teor de ar incorporado da argamassa. A Figura 14 ilustra parte do procedimento realizado no ensaio.



Figura 14: Determinação do teor de ar incorporado.

5.2.6.6 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PEGA

O ensaio para a determinação do tempo de pega foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à EN 196-3/2005. Para a determinação do início e fim de pega, utilizou-se aparelho de Vicat.

5.2.7 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

O planejamento experimental proposto estabeleceu para argamassas de revestimento e assentamento os seguintes traços de dosagem; 1:1:6 e 1:2:9, em volume, respectivamente. Dosagem escolhida, pois segundo SABBATINI (1986), a proporção 1:3 (aglomerante/agregado)

garante que os vazios do agregado miúdo sejam preenchidos pela pasta aglomerante e, assim, a trabalhabilidade fica mais bem assegurada.

Em relação ao aglomerante foram estabelecidos três tipos de argamassas mistas distintas:

- Argamassa A: constituída de cimento Portland, cal hidratada CHI (Ag^A) e areia.
- Argamassa H: constituída de cimento Portland, cal hidráulica HL2 (Ag^H) e areia.
- Argamassa E: constituída de cimento Portland, EFP (EFP^P) em substituição as cales e areia.

As argamassas naturais, isto é, sem a presença do resíduo siderúrgico, foram executadas a fim de servirem como referência em análises comparativas entre seus dados e os das argamassas compostas pelo EFP^P.

O planejamento da dosagem das argamassas encontra-se detalhado na Tabela 14.

TABELA 14: DOSAGEM DAS ARGAMASSAS (EM VOLUME)

Tipo	Sigla	Traço	Materiais
Argamassa A	AgA1	1:1:6	cimento: Ag ^A : areia
	AgA2	1:2:9	cimento: Ag ^A : areia
Argamassa H	AgH1	1:1:6	cimento: Ag ^H : areia
	AgH2	1:2:9	cimento: Ag ^H : areia
Argamassa E	EFPP1	1:1:6	cimento: EFP ^P : areia
	EFPP2	1:2:9	cimento: EFP ^P : areia

5.2.7.1 CONVERSÃO DE TRAÇO EM VOLUME PARA MASSA

Pode-se afirmar que a proporção dos materiais constituintes das argamassas tem influência significativa nas propriedades das mesmas. Desta forma, torna-se relevante a metodologia utilizada para medição dos materiais, inicialmente medidos em volume, e posteriormente convertidos em massa, após a determinação das massas unitárias (aparente) do cimento, do resíduo, da cal e do agregado miúdo (CALHAU, 2000).

Para conversão dos traços, utilizou-se a equação (12).

$$1: \frac{P_{Paglo} * \delta_{aglo}}{\delta_{cim}} : \frac{P_{Pagr} * \delta_{agr}}{\delta_{cim}} \quad (12)$$

Sendo:

- $P_{p_{aglo}}$ = proporção de aglomerante (EFP^P, Ag^A ou Ag^H) no traço da argamassa, em volume aparente (dm³)
- $P_{p_{agr}}$ = proporção de agregado miúdo no traço da argamassa, em volume aparente (dm³)
- δ_{cim} = massa unitária do cimento, no estado solto (kg/dm³)
- δ_{aglo} = massa unitária do aglomerante (EFP^P, Ag^A ou Ag^H), no estado solto (kg/dm³)
- δ_{agr} = massa unitária do agregado miúdo, no estado solto (kg/dm³)

Convertendo os traços utilizados, de volume para massa, foram obtidas as seguintes proporções entre os materiais, representadas na Tabela 15.

TABELA 15: DOSAGEM DAS ARGAMASSAS (EM MASSA)

Tipo	Sigla	Traço	Materiais
Argamassa A	AgA1	1:0,44:8,66	cimento: Ag ^A : areia
	AgA2	1:0,89:12,99	cimento: Ag ^A : areia
Argamassa H	AgH1	1:0,56:8,66	cimento: Ag ^H : areia
	AgH2	1:1,11:12,99	cimento: Ag ^H : areia
Argamassa E	EFPP1	1:0,91:8,66	cimento: EFP ^P : areia
	EFPP2	1:1,81:12,99	cimento: EFP ^P : areia

5.2.7.2 CONDIÇÕES DE CURA

A fim de se estudar o comportamento das diversas argamassas, em diferentes ambientes de cura, foram escolhidos dois ambientes que diferem nas suas condições de temperatura e umidade relativa: cura ao ar e cura úmida, realizados em laboratório. Para a realização dos ensaios com as argamassas no estado endurecido, quando do término da moldagem, os corpos de prova de cada composição permaneceram nessas condições durante um período de 28 dias.

- Cura ao ar

De forma a avaliar o efeito de uma cura em condições consideradas de referência, os corpos de prova foram submetidos a condições de umidade relativa de 65±5% e temperatura de 20±5°C numa sala fechada e climatizada no laboratório de Materiais de Construções, da UFOP.

- Cura úmida

De forma a avaliar o efeito de condições de umidade elevada, os corpos de prova foram submetidos em uma câmara de cura, modelo SS600UM da marca Equilam, ilustrada na Figura 15, mantendo o ambiente saturado ($98\pm 2\%$) e em temperatura ambiente de $25\text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 15: Câmara úmida utilizada.

5.2.7.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Todos os traços de argamassa produzidos foram caracterizados no estado fresco conforme prescrições normativas ABNT. Os procedimentos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP (1m^2).

5.2.7.3.1 Ensaio de determinação do índice de consistência

O ensaio para a determinação do índice de consistência foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 13276/2005. O índice de consistência recomendado, com uma abertura de $(260 + 5)$ mm, corresponde à média das medidas de 3 diâmetros uniformemente distribuídos ao longo do perímetro, expressa em milímetros.

5.2.7.3.2 Ensaio de determinação de retenção de água

O ensaio para a determinação de retenção de água foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 13277/2005. Este ensaio teve como objetivo estimar a quantidade de água que as diferentes argamassas são capazes de reter. O valor do índice de retenção de água foi calculado conforme a equação (13):

$$Ra = \left[1 - \left(\frac{M_f - M_{se}}{AF \times (M_{ma} - M_{se})} \right) \right] \times 100 \quad (13)$$

Sendo:

- $AF = \frac{M_w}{M+M_w}$ Fator água/argamassa fresca, onde M_w = massa total de água acrescentada à mistura (g) e M = massa de argamassa industrializada ou soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra (g);
- M_f = massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro (g);
- M_{se} = massa do conjunto de discos secos (g);
- M_{ma} = massa do molde com argamassa (g);
- Ra = Retenção de água (%).

A Figura 16 ilustra os instrumentos utilizados no ensaio.



Figura 16: Determinação da retenção de água.

5.2.7.3.3 Ensaio de determinação da densidade de massa no estado fresco

O ensaio para a determinação da densidade de massa no estado fresco foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 13278/2005. Este ensaio teve como objetivo mostrar o estado de agregação dos constituintes da mistura. O valor da densidade de massa no estado fresco foi calculado conforme a equação (14):

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad (14)$$

Sendo:

- m_c = massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio (g);
- m_v = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);
- V_r = volume do recipiente cilíndrico (cm³);

A Figura 17 ilustra parte do procedimento realizado no ensaio.



Figura 17: Determinação da densidade de massa no estado fresco

5.2.7.3.4 Ensaio de determinação do teor de ar incorporado

O ensaio para a determinação do teor de ar incorporado no estado fresco foi conduzido utilizando o equipamento específico para este fim fabricado pela Solotest de modelo 1.150.001. O ensaio consistiu no preenchimento do molde com as argamassas preparadas, seguindo os mesmos procedimentos da NBR 13276/2005 para cada traço, acoplando, posteriormente, um dispositivo de vedação e leitura. Todas as válvulas foram então fechadas e o ar foi injetado por meio de uma bomba até que atinja a marca inicial de leitura registrada no relógio. Um gatilho foi disparado, liberando o ar pressurizado, e mantido pressionado até a estabilização do ponteiro que apresenta o resultado do teor de ar incorporado da argamassa.

5.2.7.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

Todos os traços de argamassa produzidos foram caracterizados no estado endurecido conforme prescrições normativas ABNT. Os procedimentos descritos foram realizados no laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP (lmc2).

5.2.7.4.1 Ensaio de determinação da densidade de massa no estado endurecido

O ensaio para a determinação da densidade de massa das argamassas no estado endurecido foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 13280/2005.

5.2.7.4.2 Ensaio de determinação da absorção de água e coeficiente de capilaridade

O ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade das argamassas foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 15259/2005. A absorção de água foi determinada conforme a equação (15) e o coeficiente de capilaridade conforme a equação (16), ambas apresentadas a seguir.

$$A_t = \frac{m_t - m_o}{16} \quad (15)$$

Sendo:

- A_t = absorção de água por capilaridade (g/cm^2)
- m_t = massa do corpo de prova em cada tempo (g)
- m_o = massa inicial do corpo de prova
- t = tempos de 10 e 90 min (seg.)
- 16= área do corpo de prova (cm^2)

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (16)$$

Sendo:

- C =coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)

A Figura 18 ilustra os procedimentos realizados no ensaio.

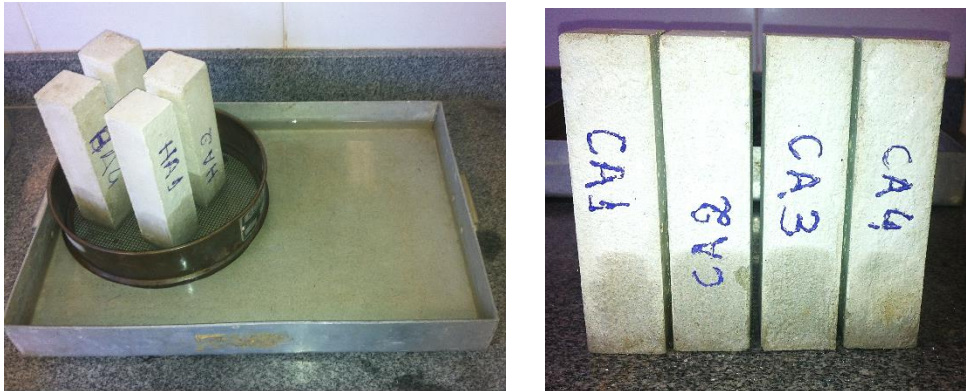


Figura 18: Determinação da absorção de água por capilaridade.

5.2.7.4.3 Ensaio de determinação da resistência à compressão

O ensaio para a determinação da resistência à compressão foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 13279/1995. A resistência à compressão foi obtida pelo cálculo da média das resistências individuais obtidas, em MPa, dos corpos-de-prova ensaiados. Para cada tipo de traços foram rompidos 4 corpos de prova, aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi a prensa EMIC, modelo DL 20000, e a célula de carga de capacidade de 200 KN. A Figura 19 ilustra a execução do ensaio.



Figura 19: Determinação da resistência à compressão.

5.2.7.4.4 Ensaio de determinação da resistência à tração na flexão

O ensaio para a determinação da resistência à tração na flexão foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 13279/2005. Para cada tipo de traços foram rompidos 4 corpos de prova, aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi a prensa EMIC, modelo DL 20000, e a célula de carga com capacidade de 20 KN que permite maior sensibilidade na aplicação de cargas e obtenção dos resultados. A Figura 20 ilustra a execução do ensaio e a resistência à tração na flexão pode ser calculada conforme equação (17).

$$R_f = \frac{1,5 * F_t * L}{40^3} \quad (17)$$

Sendo:

- R_f = resistência à tração na flexão (MPa);
- F_t = carga aplicada verticalmente no centro do prisma obtida, (N);
- L = distância entre os apoios, (mm);
- 40^3 = volume do corpo de prova, (mm^3).



Figura 20: Determinação da resistência à tração na flexão.

5.2.7.4.5 Ensaio de determinação da resistência à tração na compressão diametral

O ensaio para a determinação da resistência à tração na compressão diametral foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 7222/1994. Para cada tipo de traço foram rompidos 4 corpos de prova, aos 28 dias de idade.

O equipamento utilizado foi a prensa EMIC, modelo DL 20000, e a célula de carga de capacidade de 200 KN. A Figura 21 ilustra a execução do ensaio e a resistência à tração na compressão diametral pode ser calculada conforme equação (18) apresentada a seguir.

$$f_{t,D} = \frac{2 * F}{\pi * d * L} \quad (18)$$

Sendo:

- $f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;
- F = carga máxima obtida no ensaio (kN);
- d = diâmetro do corpo-de-prova (mm);
- L = altura do corpo-de-prova (mm).



Figura 21: Determinação da resistência à tração na compressão diametral

5.2.7.4.6 Ensaio de determinação da resistência potencial de aderência à tração

O ensaio para a determinação da resistência de aderência à tração foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas à NBR 15258/2005.

O ensaio consistiu em acoplar o equipamento de tração às pastilhas metálicas e aplicar um esforço de tração perpendicular aos corpos de prova com a taxa de carregamento constante de (250 ± 50) N/s, até a ruptura dos corpos de prova. Para cada tipo de traço foram rompidos 10 corpos de prova distribuídos no substrato de concreto prescrito na norma, aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi o Aderímetro Contenco, modelo N1500. A Figura 22 ilustra a execução do ensaio e a resistência de aderência à tração pode ser calculada conforme equação (19).

$$R_a = \frac{P}{A} \quad (19)$$

Sendo:

- R_a = resistência de aderência à tração, em MPa;
- P = carga de ruptura, em N;
- A = área da pastilha, em mm².



Figura 22: Determinação da resistência potencial de aderência à tração.

5.2.7.4.7 Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi conduzido pelo método ultrassônico, segundo prescrições normativas estabelecidas à BS-1881 Part. 203 e NBR NM 58/1996. O ensaio foi realizado utilizando 4 corpos de prova cilíndricos para cada tipo de argamassa, aos 28 dias de idade. O equipamento utilizado foi o modelo Tico da fabricante PROCEQ, de 54 kHz de frequência. A velocidade de propagação de ondas foi determinada, no equipamento, em km/s, e o módulo de elasticidade foi calculado conforme a equação (20).

$$E_d = \gamma * V^2 * \frac{(1 + \nu) * (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (20)$$

Sendo:

- E_d = módulo de elasticidade dinâmico
- γ = densidade de massa no estado endurecido (kg/m^3);
- V = velocidade com que a onda ultrassônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal (km/s);
- ν = coeficiente de Poisson (tabelado)

A Figura 23 ilustra os instrumentos utilizados e o procedimento realizado no ensaio.



Figura 23: Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Capítulo 6

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos do programa experimental utilizado no estudo. A apresentação de resultados encontra-se sob a forma de tabelas, auxílio de gráficos ou figuras para uma melhor análise e interpretação.

6.1 PROCESSAMENTO DO AGLOMERANTE ECOLÓGICO

O resultado obtido do processamento de EFP^P no que se refere ao teor de constituintes metálicos (materiais magnéticos) foi de 17% para a escória bruta. Para sua aplicação como aglomerante, o teor de metálicos, presente na EFP, teve seu limite máximo fixado em 3%.

Em relação ao processo de moagem, do ponto de vista da granulometria do material e econômico, relacionado ao menor tempo de moagem possível e ao tipo de moinho utilizado (custo-benefício) ficou definido o tempo de moagem de 10 minutos no moinho de baixa eficiência.

6.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGLOMERANTES

6.2.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A curva granulométrica obtida na análise dos materiais é apresentada na Figura 24, sendo observada a EFP em seu estado bruto (EFP^B) e processado (EFP^P), bem como a cal hidráulica (Ag^H) e a cal aérea (Ag^A).

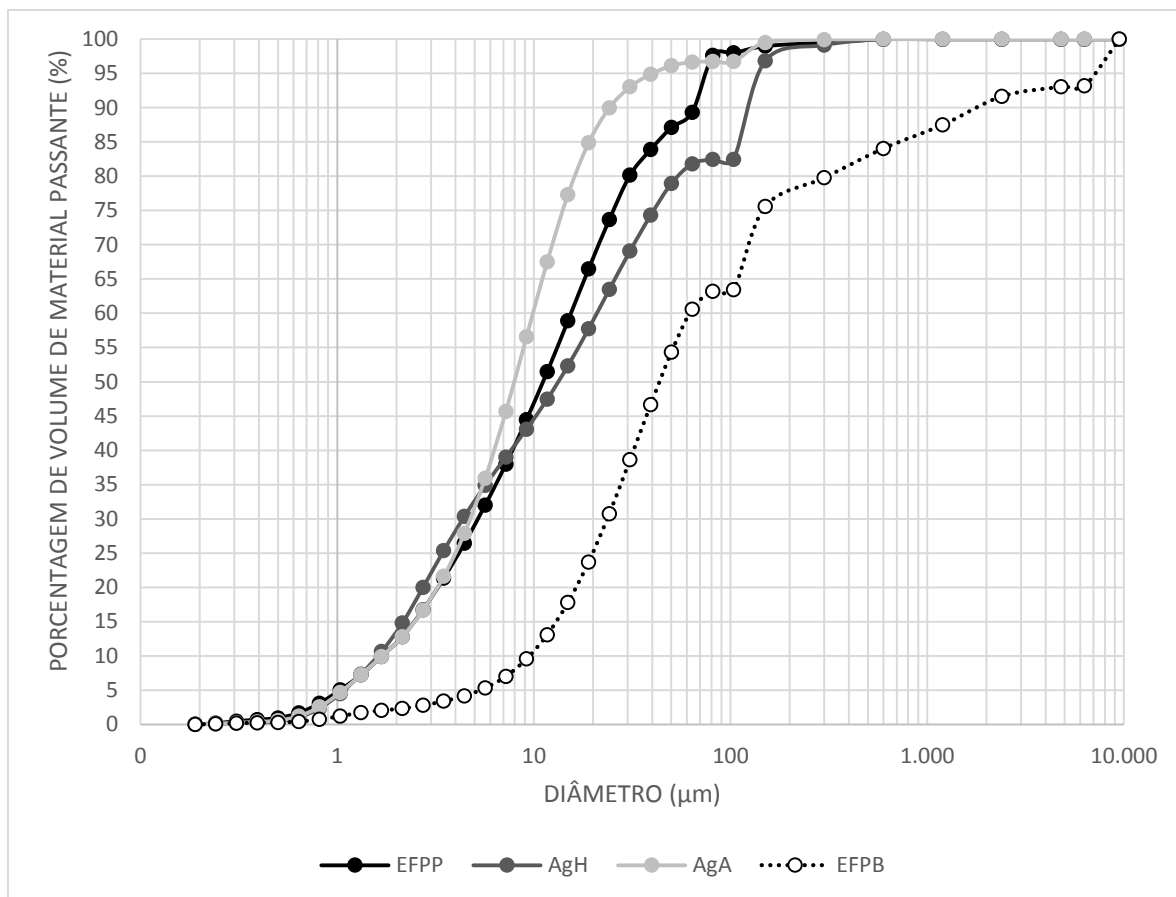


Figura 24: Distribuição granulométrica dos aglomerantes.

Nota-se que o tamanho das partículas para distribuição granulométrica da EFP^B é muito superior ao tamanho das partículas dos aglomerantes convencionais. Um processo de cominuição foi necessário para obtenção de uma EFP^P com características físicas idênticas aos aglomerantes convencionais, aumentando sua superfície específica, melhorando sua distribuição granulométrica e sua reatividade, o que concorda com achados de PAPAYIANNI et al. (2012).

6.2.2 TEOR DE UMIDADE

As amostras de aglomerantes foram devidamente preparadas e homogeneizadas, em seguida submetidas a ensaios realizados de acordo com os parâmetros da NBR 9939/2001. A Figura 25 a seguir ilustra os resultados para o teor de umidade total dos materiais.

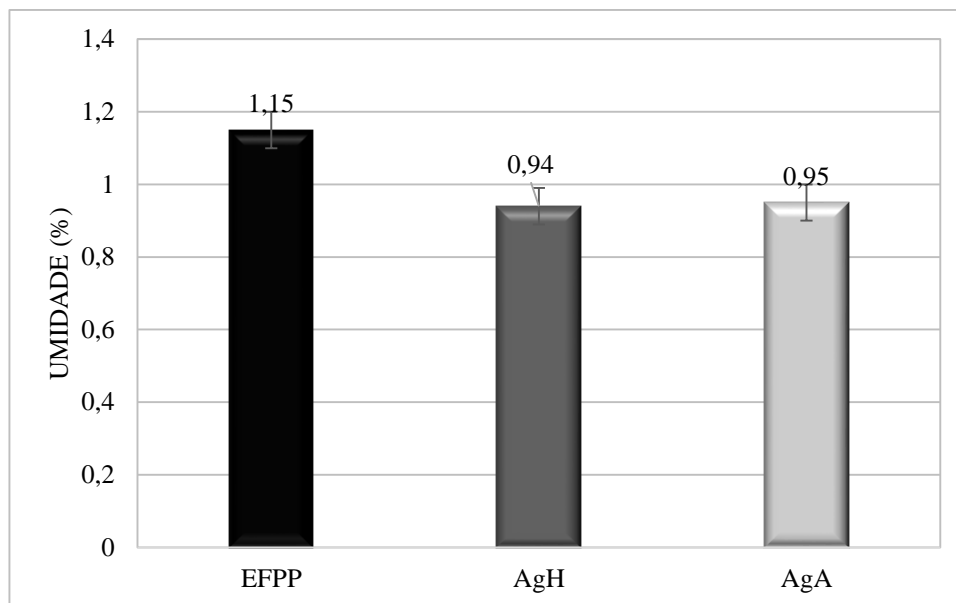


Figura 25: Teor de umidade dos aglomerantes.

Pela análise desses dados é possível verificar que o teor de umidade obtido para a EFP^P apresenta valor superior ao Ag^H e ao Ag^A.

6.2.3 MASSA UNITÁRIA

O resultado deste ensaio é necessário para traduzir o traço volumétrico preestabelecido da argamassa num traço em massa, o que permite reproduzir exatamente as dosagens dos materiais que foram usados no laboratório. Os valores evidenciados correspondem aos valores médios e seus respectivos desvios padrão, ilustrados na Figura 26.

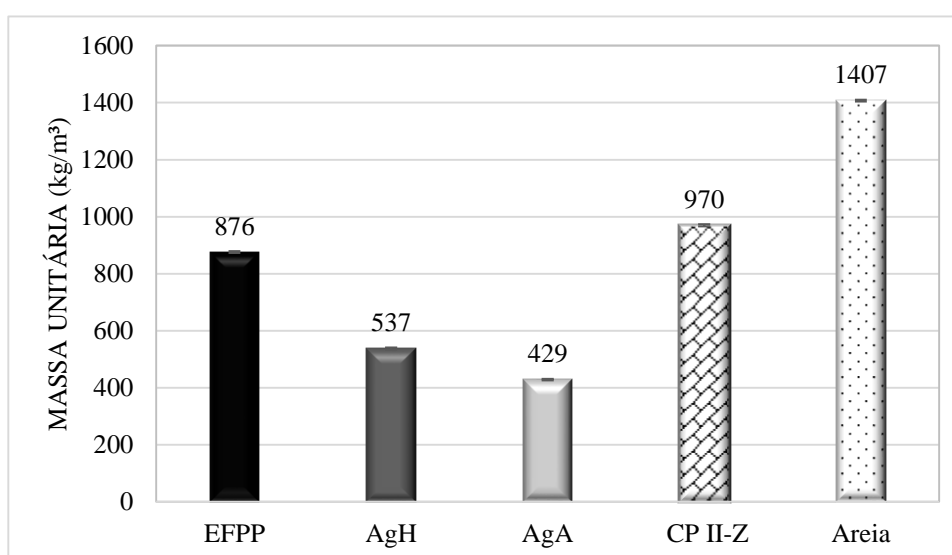


Figura 26: Massa unitária dos materiais.

O valor obtido para massa unitária da areia foi de 1400 kg/m^3 (1400 e 1500 kg/m^3 , VEIGA, 1997). O resultado da massa unitária para EFP^P é superior em relação aos demais tratamentos, o que pode estar relacionado com os minerais que constituem cada um destes materiais assim como os vazios e poros permeáveis desses materiais.

6.2.4 MASSA ESPECÍFICA

A Figura 27 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica realizados nas amostras, de acordo com os parâmetros da NBR NM 23/2000.

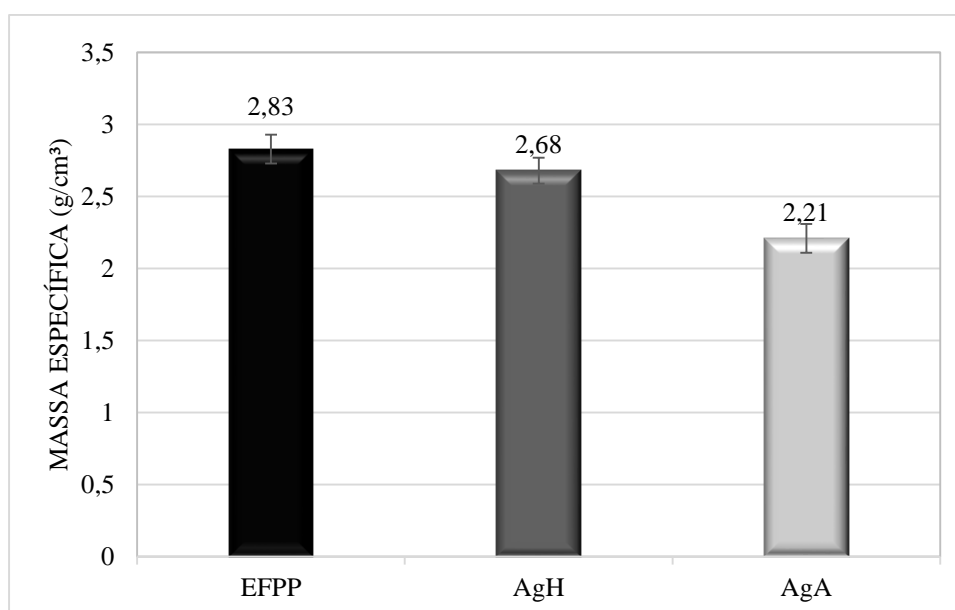


Figura 27: Massa específica dos aglomerantes.

Verifica-se que o resultado obtido para a massa específica EFP^P é idêntica à da cal hidráulica e superior à da cal aérea. De acordo com SILVA et. al. (2005), a massa específica está diretamente relacionada à distribuição granulométrica, superfície específica e materiais constituintes.

6.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

6.3.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Resultados obtidos das análises de fluorescência de raios X (FRX) apresentam-se na Tabela 16 a seguir.

TABELA 16: RESULTADO DE FRX.

	EFP^{B*}	EFP^{**}	EFP^P	Ag^H	Ag^A
CaO	57,3-64,4%	61,4%	60,0%	36,5%	96,0%
SiO₂	24,5-36,8%	24,4%	26,9%	21,5%	1,9%
SrO		0,2%	0,2%	0,1%	0,6%
SO₃		5,2%	5,2%	0,6%	0,6%
K₂O		0,3%		1,8%	0,5%
Fe₂O₃	0,7-4,6%	1,2%	1,2%	1,0%	0,2%
MgO	6,2-8,4%	6,2%	6,2%	30,7%	
Al₂O₃	1,0-3,9%			7,3%	
ZrO₂				0,2%	
TiO₂		0,4%	0,4%	0,2%	
MnO	0,2-1,6%	0,6%	0,5%		
P₂O₅	0,2-0,3%				
Cr₂O₃	0,4-1,4%				

**resultados médios para um ano de coletas*

*** material segregado magneticamente*

Para verificar o efeito da moagem no material, a escória foi analisada antes (EFP^{**}) e após ter sido moída. Os resultados obtidos da FRX mostram que a EFP utilizada nesse experimento constitui-se basicamente por óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂) e óxido de magnésio (MgO). Observa-se ainda, que a cominuição da EFP^P não representou grandes modificações a amostra, aumentando o teor de sílica em apenas 2,5% e diminuindo o teor de óxido de cálcio em 1,4%, fato também observado por PAPAYIANNI et al. (2012).

Em um estudo realizado por SHI et. al. (2003), a EFP utilizada em seu experimento apresentou basicamente óxidos de cálcio e sílica em sua composição, com uma proporção média de 56,5% de CaO e 26,6% de SiO₂. Embora tenham sido identificados apenas CaO e SiO₂ nas escórias estudadas por SHI et al. (2003) e PAPAYIANNI et al. (2012), foram identificados nas escórias deste trabalho teores de SO₃ de 5,2%; esse achado pode estar relacionado a alguma imprecisão do método de determinação, uma vez que as escórias são geradas em fornos a arco elétrico.

A Ag^H apresenta em sua composição, basicamente, óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂) e óxido de magnésio (MgO), enquanto Ag^A possui em quase sua totalidade óxido de cálcio (CaO).

6.3.2 ÍNDICE DE HIDRAULICIDADE

Os resultados obtidos da FRX, compõem o índice de hidraulicidade para as EFP^P, Ag^H e Ag^A, conforme apresentado na Tabela 17, a seguir.

TABELA 17: RESULTADO DO ÍNDICE DE HIDRAULICIDADE.

Aglomerantes	(i)
EFP^P	0,42 (muito hidráulica)
Ag^H	0,44 (muito hidráulica)
Ag^A	0,03 (cal aérea)

O processo de endurecimento das argamassas pode ser definido como função da hidraulicidade do ligante. O índice de hidraulicidade correlaciona teores de sílica, ferro e alumina em relação aos teores de cálcio e magnésio, o que classifica a EFP^P como uma cal hidráulica. Cales hidráulicas podem apresentar hidraulicidade entre $0,1 < I < 0,5$; variando de fracamente hidráulica a muito hidráulica, conforme demonstrado por COUTINHO (1988). A hidraulicidade para Ag^A, como era de se esperar, reafirma características de cal aérea para o material.

6.3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A Tabela 18 apresentada a seguir, indica os principais compostos cristalinos identificados por DRX nas amostras, por meio da técnica de refinamento de Rietveld.

TABELA 18: LEGENDA DOS DIFRATOGRAMAS

Componentes	Fórmulas	Sigla	Quantidade (%)		
			EFP^P	Ag^H	Ag^A
Anatase	TiO ₂	A	5,0*		
Brucita	Mg(OH) ₂	B		16,6	
Cálcio-olivina	Ca ₂ SiO ₄	Ca	43,2		
Calcita	CaCO ₃	C		2,5	7,9
Fluorita	CaF ₂	F	1,0	10,0*	10,0*
Larnita	βCa ₂ SiO ₄	L	4,0		
Mayenita	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	Ma	1,7		
Merwinita	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	Me	10,9		
Montmorilonita	(Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .nH ₂ O	Mo	2,6		
Muscovita	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	M		5,6	
Periclásio	MgO	Pe	3,6	6,3	
Piroxênio	Si ₂ O ₆ CaMg	Pi	8,2		
Portlandita	Ca(OH) ₂	P		33,5	65,4
Quartzo	SiO ₂	Q		10,8	
Wolastonita	CaSiO ₃	W	2,5		
Fase amorfa			17,3	14,7	16,7

*padrão interno

As análises obtidas utilizaram como padrão interno a Fluorita (Ag^A , Ag^H) e Anatase (EFP^P). Esses compostos foram designados com uma letra específica, notação que foi utilizada nos difratogramas. Os resultados obtidos pela DRX, expressos pelos difratogramas apresentam picos característicos dos compostos cristalinos existentes. As Figuras 28, 29 e 30 ilustram a composição mineralógica das amostras de EFP^P , Ag^H e Ag^A , respectivamente.

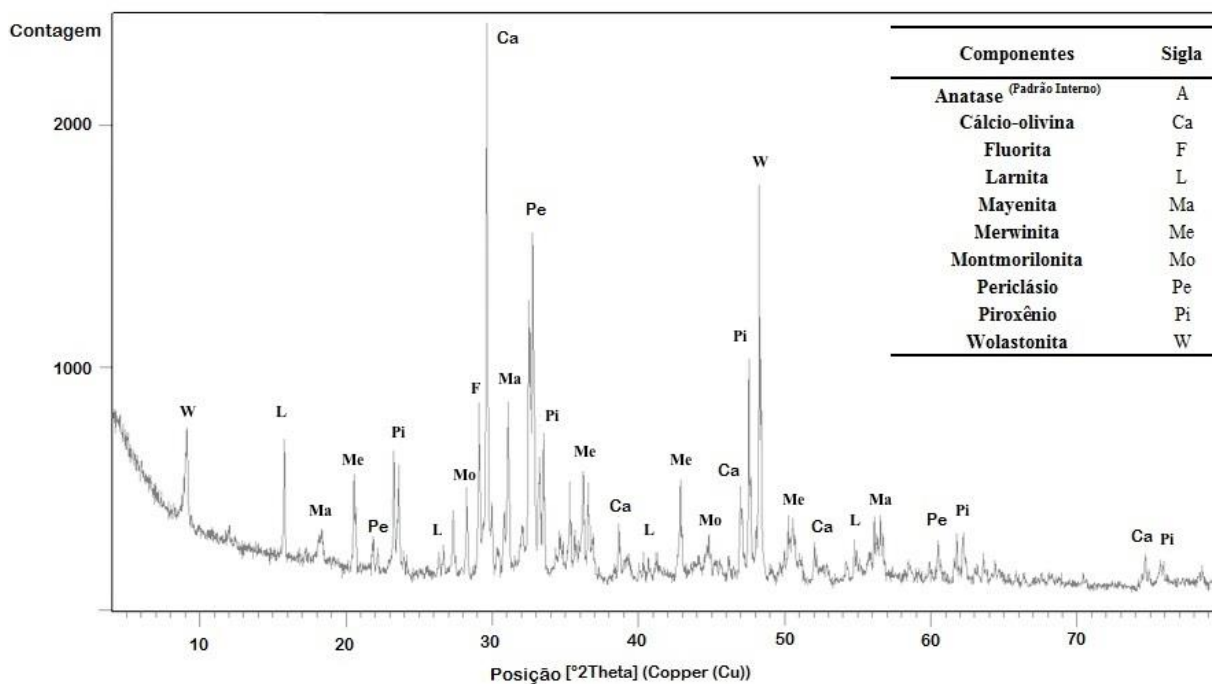


Figura 28: Difratograma do EFP^P .

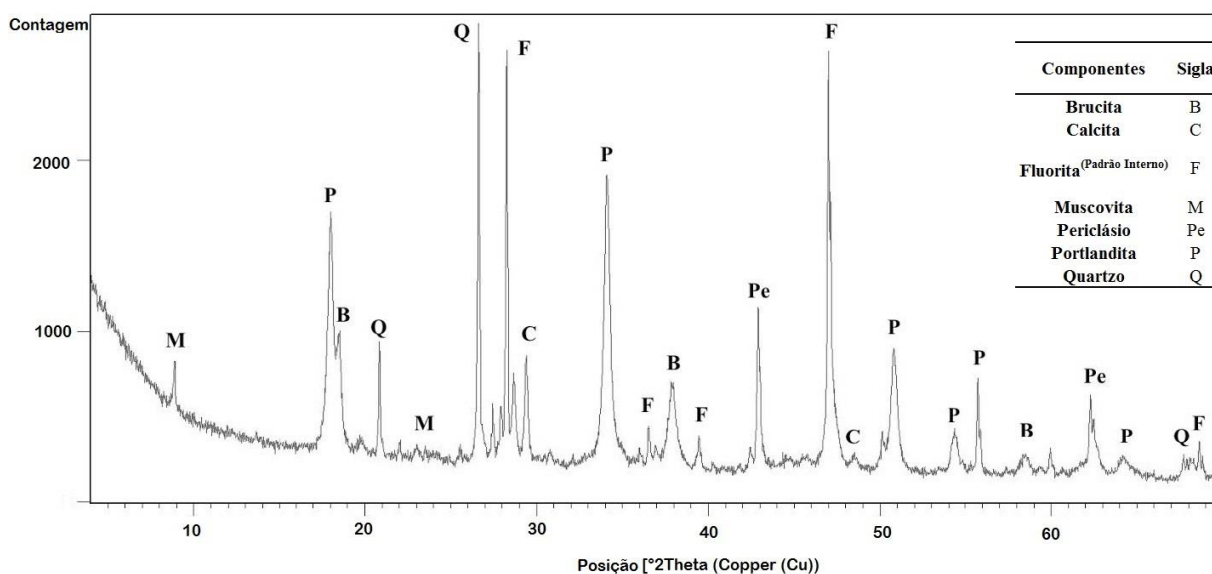


Figura 29: Difratograma do Ag^H .

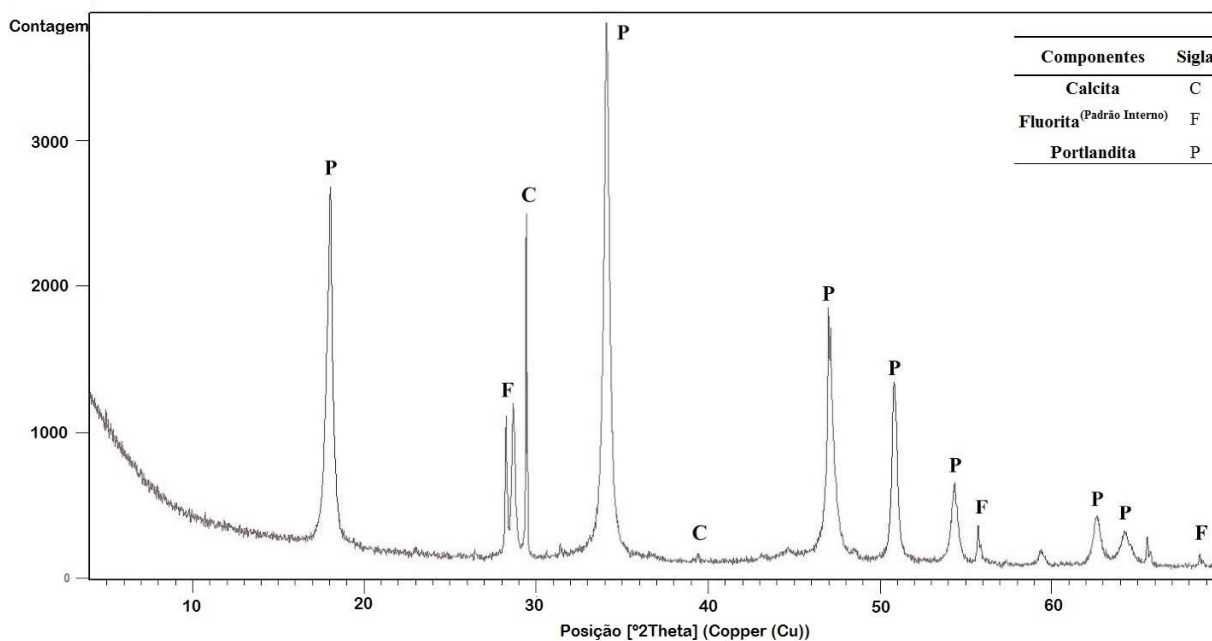


Figura 30: Difratograma do Ag^A.

Pela análise dos picos difratados da amostra de EFP^P é possível identificar a presença principalmente dos seguintes minerais: Cálcio Olivina, Merwinita e a fase amorfa. Os resultados obtidos desta análise assemelham-se com os resultados obtidos por SÉTIEN et al (2009), na qual mostra um estudo realizado com três tipos de EFP de diferentes fontes geradoras onde silicatos de cálcio sob suas diversas formas alotrópicas (Diopsida, Merwinita, Wollastonita, Larnita ou Cálcio-olivina) são os principais compostos em todos os três casos (55% na amostra 1, 65% na amostra 2 e 50% na amostra 3).

Verifica-se que os compostos cristalinos presentes em maior proporção no aglomerante Ag^A são a Calcita e Portlandita. Esse achado era esperado devido à porcentagem de cálcio verificada na fluorescência de raios-X. Na amostra de Ag^H observa-se a presença das estruturas de Portlandita, Quartzo e Brucita, que tem relação com a porcentagem alta de cálcio e magnésio presentes em sua composição, dada pela FRX. A presença de um argilomineral, Muscovita, também se relaciona com a presença dos elementos potássio, alumínio e silício, indicados na FRX.

A EFP^P apresenta compostos capazes de se aglomerar, constituindo um tipo de ligante, características evidenciadas pela presença considerável de silicatos e aluminatos de cálcio, os quais favorecem surgimento de propriedades cimentícias para as EFP, conforme relacionado por SÉTIEN et. al. (2009).

Por outro lado, expansões volumétricas das matrizes de cimento, geralmente indesejáveis, são resultado da hidratação da cal (CaO) e da magnésia (MgO) livres nele presentes. Esses óxidos, ao se hidratar posteriormente ao endurecimento, aumentam de volume, criando tensões internas que podem levar a microfissuração (BAUER, 1979), para o concreto. Os resultados obtidos da DRX, permitem considerar como estáveis, os aglomerantes EFP^P, Ag^H e Ag^A, uma vez que os elementos potencialmente reativos encontram-se associados como silicatos e hidratos. Ainda como observado por MIRANDA (2009) para uma argamassa que contenha apreciáveis proporções de cal ou magnésio livres, esses óxidos, ao se hidratarem provocam aumento de volume nas matrizes, criando tensões internas que conduzem à microfissuração, e pode terminar na desagregação, deslocamento ou descolamento, prejudicando aderência das argamassas aos substratos. No entanto, nas matrizes mistas (cimento e cal) essas reações são desejáveis e contribuem para a consolidação de fissuras que possam surgir em função dos processos de cura ou mesmo de aplicação, sendo o desenvolvimento tardio e controlado dessas pequenas expansões, positivo. Dessa forma, as argamassas de cal têm versatilidade para refazer pequenas fissuras que ocorrem ao longo do tempo, graças à sua atividade química, que só se extingue após muito tempo. Há uma reconstituição autógena de fissuras enquanto houver hidróxido de cálcio e/ou de magnésio não silicatados / não associados à sílica disponível na massa das argamassas, pois a água que circula pelos espaços intergranulares provoca reações químicas, preenchendo as discontinuidades, mas grandes porcentagens de cal livre, determinadas pela NBR 7175 (2003) em um valor máximo de 15%, podem gerar a fissuração (GUIMARÃES, 2002).

O processo de geração da EFP^P, em fornos siderúrgicos a uma temperatura de cozedura mais alta, proporciona a recombinação do cálcio com sílica e magnésio sob a forma de silicatos, além de uma exposição prolongada ao tempo dificultando, portanto, presença de cálcio hidratado livre (ROCHA, 2011). Tipicamente, as escórias produzidas em convertedores a oxigênio (escórias LD) possuem maiores teores de óxidos hidratáveis, em comparação com as escórias de aciaria elétrica. Conseqüentemente as escórias de aciaria elétrica apresentam menor expansão e maior estabilidade volumétrica, tipo de escória estudada neste trabalho (SSTC, 1996).

6.4 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS AMOSTRAS

As análises da morfologia dos materiais (EFP^P, Ag^H e Ag^A) foram realizadas por microscópio óptico (lupa estereoscópica) e por microscópio eletrônico de varredura (MEV).

6.4.1 LUPA ESTEREOSCÓPICA

As imagens capturadas por estereoscopia, permitiram visualizar a morfologia dos materiais EFP^P, Ag^H e Ag^A, a fim de que pudessem ser analisadas sua forma e textura, como balizador inclusive dos processos de cominuição para obtenção de materiais com características físicas idênticas. A Figura 31 apresenta as imagens da morfologia dos aglomerantes utilizados com ampliações de 45 vezes.

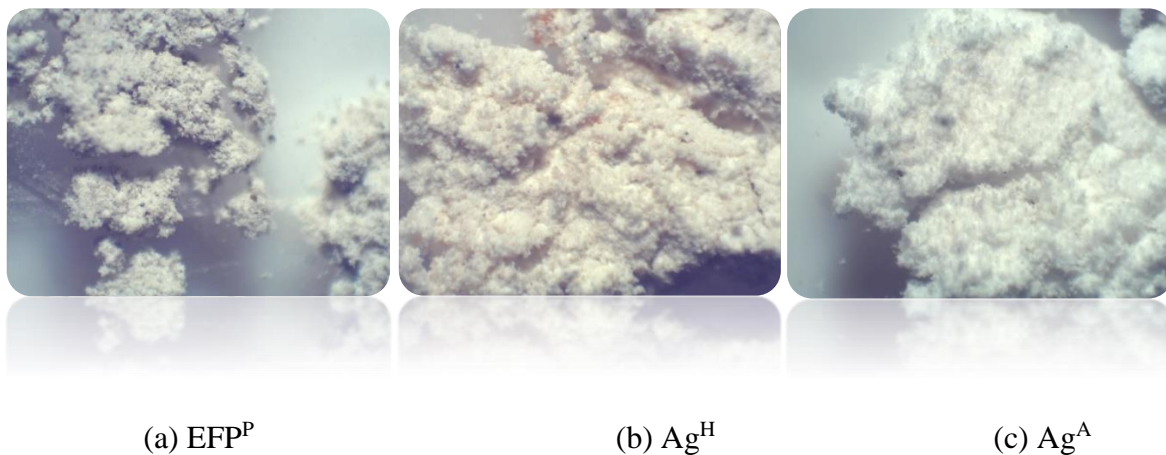
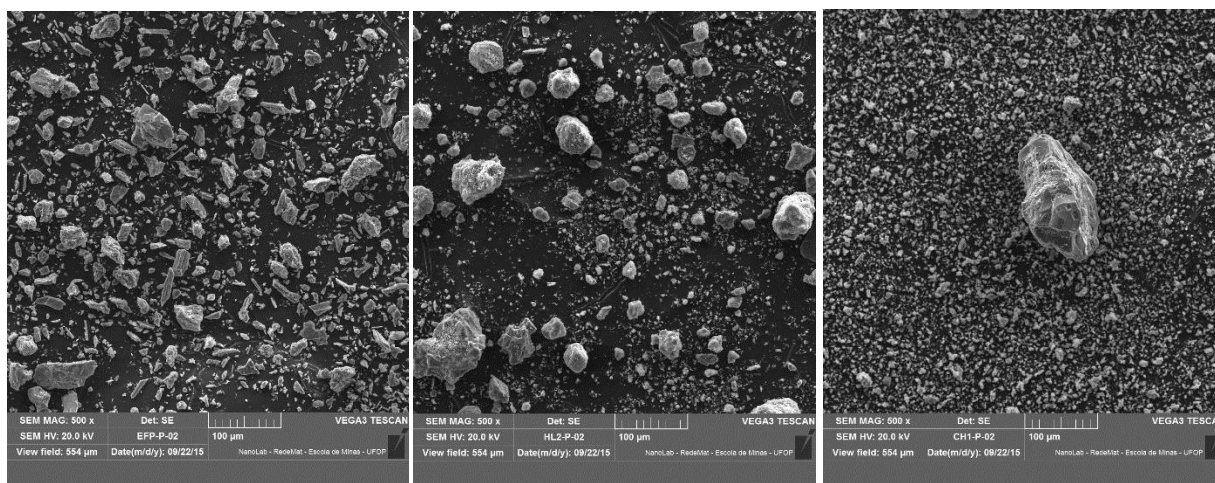


Figura 31: Imagens de microscopia óptica (lupa estereoscópica).

Do ponto de vista da aplicabilidade dos rejeitos como material de construção civil, a morfologia, forma e textura (aspectos físicos) são de extrema importância para sua viabilidade e aceitação. Adicionalmente, as EFP^P obtidas do processamento possuem características físicas, propriedades de hidraulicidade e constituição química idênticas aos dos aglomerantes convencionais.

6.4.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Uma análise morfológica mais detalhada foi realizada com auxílio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), com aumentos de 500 vezes, conforme apresentado à Figura 32, apresentada a seguir.



(a) EFP^P

(b) Ag^H

(c) Ag^A

Figura 32: Morfologia dos materiais – (500x)

Os materiais EFP^P, Ag^H e Ag^A apresentam-se sob a forma de um sistema particulado composto por unidades de tamanhos variados e formas predominantemente volumétricas em todas as amostras.

O processo de moagem da EFP^P contribuiu para produção de partículas predominantemente volumétricas e angulosas, com uma distribuição mais homogênea de tamanho de grãos (PAPAYIANNI et al.,2012).

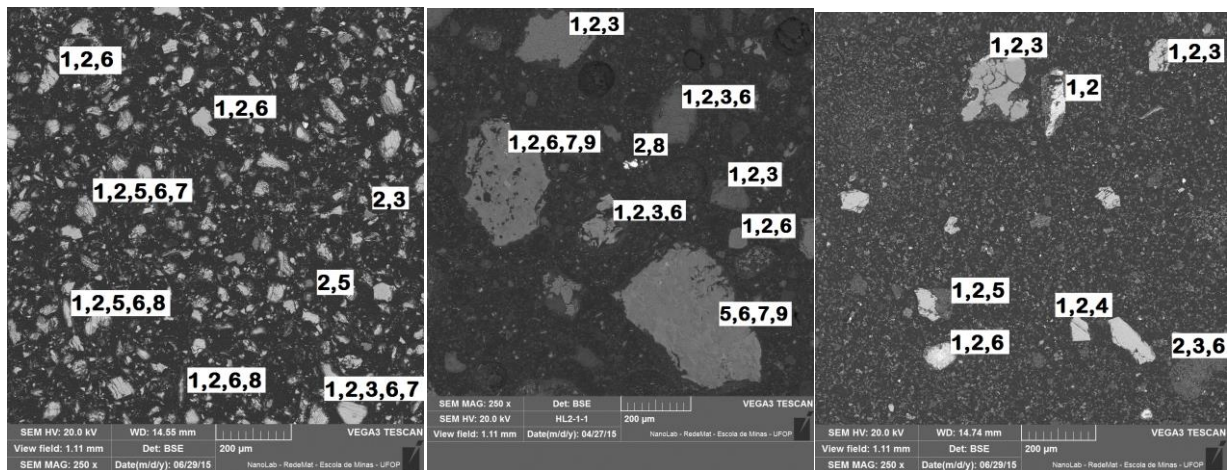
A amostra de Ag^H é mais arredondada, com grãos de dimensão característica maiores e distribuídos de forma heterogênea. A amostra de Ag^A apresenta forma irregular, mais angular com uma distribuição de tamanho de grãos descontínua.

Adicionalmente, foram realizadas análises no espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDS), acoplado ao MEV, com aumento de 250 vezes, para identificação da composição química elementar pontual das amostras, como parâmetro auxiliar. As imagens utilizadas são representativas para cada uma das amostras, conforme apresentado na Figura 33, a seguir.

Na Tabela 19 apresentam-se os principais elementos identificados no MEV com EDS nas amostras. Esses elementos foram designados com um número, notação que foi utilizada nas imagens.

TABELA 19: LEGENDA DAS IMAGENS DE MEV COM EDS

Elementos	Fórmulas	Legenda
Cálcio	Ca	1
Oxigênio	O	2
Magnésio	Mg	3
Estrôncio	Sr	4
Ferro	Fe	5
Silício	Si	6
Alumínio	Al	7
Enxofre	S	8
Potássio	K	9



(a) EFP^P

(b) Ag^H

(c) Ag^A

Figura 33: MEV com EDS dos materiais – (250x)

Os resultados pontuais obtidos desta técnica, permitem afirmar, em consonância com achados da FRX, que a amostra Ag^A apresentou grandes proporções de partículas contendo cálcio; Ag^H apresentou partículas contendo cálcio, magnésio, silício, alumínio, potássio, que podem ser identificadas como possíveis portlanditas e muscovitas encontradas na análise de DRX; e, para EFP^P verificou-se a presença de cálcio, silício, alumínio e ferro que podem ser identificadas como silicatos encontrados na análise de DRX. Esses resultados ainda auxiliam os achados obtidos das técnicas de DRX e de refinamento aplicadas às amostras.

6.5 CAL HIDRATADA PARA ARGAMASSAS

6.5.1 CONSISTÊNCIA NORMAL DAS PASTAS

Os resultados obtidos dos ensaios de determinação do índice de consistência normal das pastas são mostrados na Tabela 20.

TABELA 20: DADOS DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA NORMAL DAS PASTAS

Argamassa	(%)
EFP^P	45%
Ag^A	94%

A argamassa com o aglomerante EFP^P apresentou um percentual de água da pasta normal de 45%. A argamassa produzida com Ag^A apresentou um índice bastante superior, num valor de 94%. Resultado próximo ao encontrado no estudo experimental de TRISTÃO et. al. (2009), no qual para determinação da água da pasta de consistência normal, o percentual de água necessário foi de 91,0% (em massa). Tal como observou SÉBAIBI et al, (2004) em estudo de pastas de cimento que a utilização de cal exige uma porcentagem mais elevada de água durante a produção de argamassa.

Significa dizer que as argamassas produzidas com Ag^A possuem maior viscosidade, que sugere melhores propriedades de aplicação (menor rebote, melhor fixação quando do lançamento), que as EFP^P. Ainda segundo CINCOTTO (1997) a viscosidade está ligada à pasta, isto é, ao teor de água e geometria, dimensão e forma dos grãos, alterando-se também com seu estado de superfície e o efeito lubrificante das partículas finas, sendo a relação entre viscosidade e consistência invertida, isto é, quanto maior a viscosidade, maior a coesão e menor o espalhamento na mesa de consistência.

6.5.2 PLASTICIDADE

Os resultados obtidos para análise de plasticidade das argamassas estão indicados na Figura 34, apresentada a seguir.

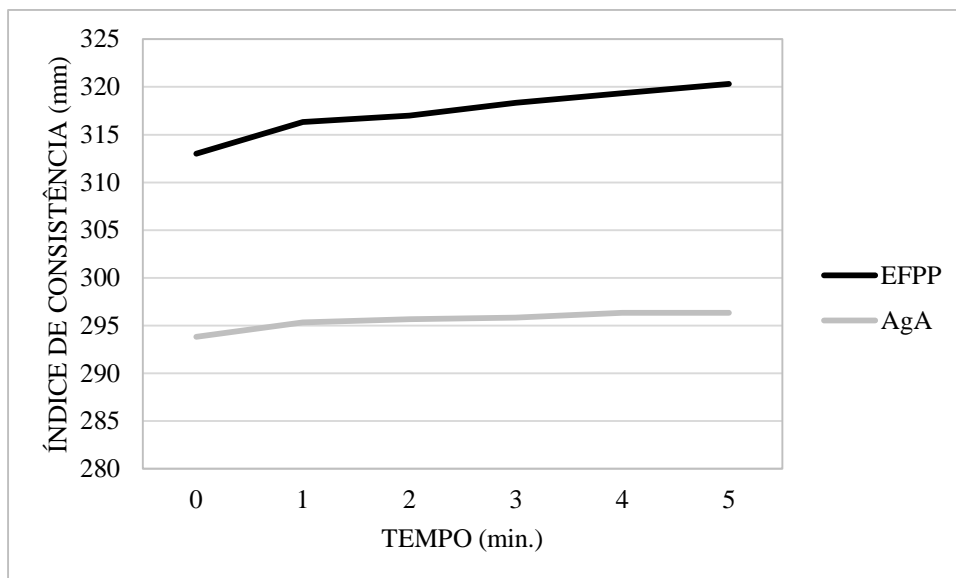
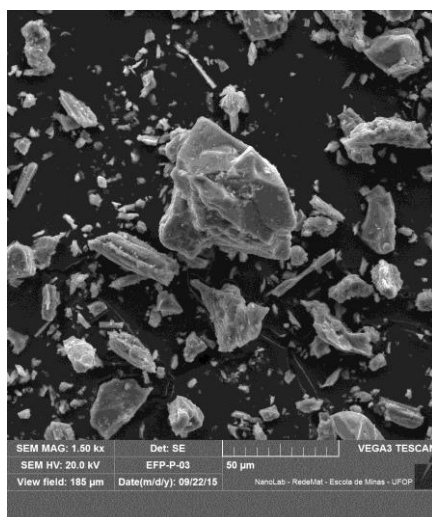
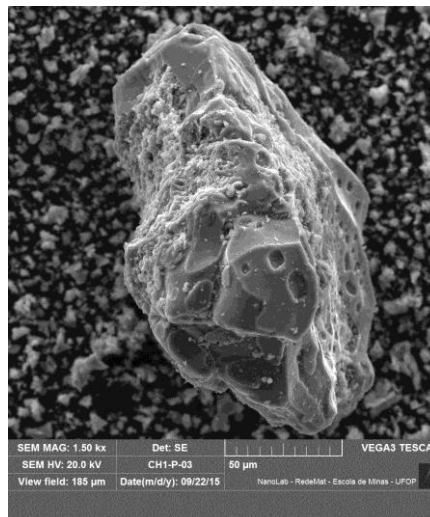


Figura 34: Resultados do ensaio de determinação de plasticidade.

As argamassas de escória apresentam maior plasticidade que as argamassas de cal hidratada. A forma mais angulosa e volumétrica das partículas de EFP e uma distribuição mais homogênea de grãos (Figura 35), bem como maior área superficial definida pelo tamanho das partículas, conforme imagens obtidas com auxílio do MEV, permite melhor dispersão e distribuição dos grãos pela massa. Resultados que concordam com observações propostas por JALALI et al. (2009) que afirma que esse atributo é consequência dos teores de finura e da própria natureza da matéria-prima.



(a) EFP^P



(b) Ag^A

Figura 35: Morfologia dos materiais – (1500x)

Por outro lado, é preciso observar que a plasticidade deve também estar relacionada com a capacidade de reter água, de se manter estável, de não exsudar e de não segregar; fatos que devem estar relacionados para a caracterização dessa propriedade, conforme observado por CARASEK (2007).

6.5.3 RETENÇÃO DE ÁGUA

Os resultados obtidos pela análise da determinação de retenção de água indicaram ser o aglomerante EFP^P capaz de produzir argamassas que retêm 82,20% de água em média e o aglomerante Ag^A capaz de produzir argamassas que retêm 89,23% de água em média, valores superiores aos limites normativos da NBR 7175/2003, que são de 80% para a cal hidratada tipo CHI. A Figura 36 apresentada a seguir ilustra os resultados obtidos pelas argamassas produzidas bem como seus desvios padrão.

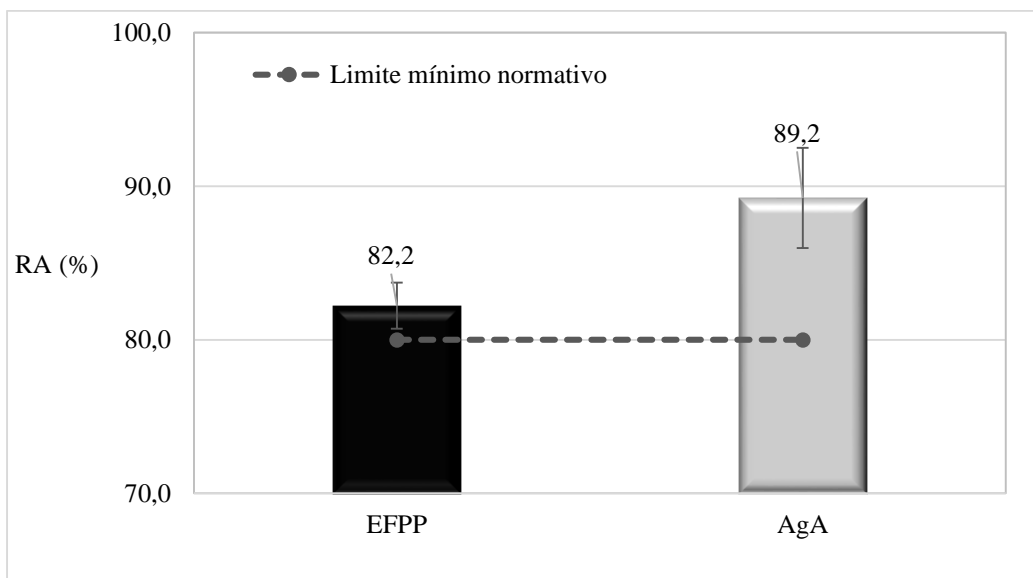


Figura 36: Resultados do ensaio de retenção de água

A forma e a distribuição granulométrica descontínua da cal garante uma maior porosidade e, portanto, uma capacidade maior de reter água nesses poros. De acordo com SABBATINI (1986), adicionalmente, a cal apresenta boas características de retenção de água, não só em razão de sua elevada superfície específica, mas também devido à grande capacidade adsortiva de seus cristais.

6.5.4 INCORPORAÇÃO DE AREIA

Os resultados obtidos para análise de incorporação de areia indicam redução do índice de consistência médio para incrementos percentuais de areia, conforme ilustrado a seguir na Figura 37.

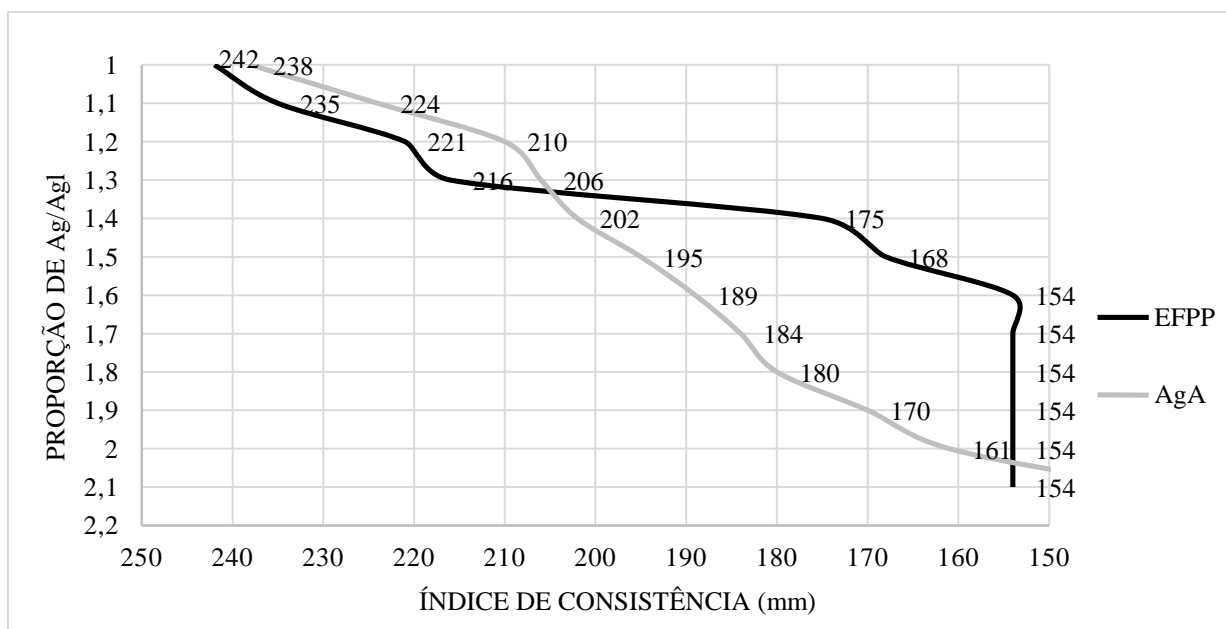


Figura 37: Resultados do ensaio de incorporação de areia

Para a argamassa composta pelo Ag^A verifica-se capacidade de incorporação da areia até a proporção de 2,1 (IC=161) enquanto para EFP^P observa-se capacidade de incorporação da areia até a proporção de 1,6 (IC=154), que sugere melhor capacidade de incorporação de areia pela cal (Ag^A) que para escória de forno panela (EFP^P), neste ensaio. Fato este, relacionado à maior retenção de água pela cal, e conseqüentemente maior viscosidade do material, permitindo, assim, incorporar mais areia. O que também pode ser observado do ensaio do índice de consistência, em que se verificou menor tensão de escoamento para as argamassas EFP^P , que exibiram maior espalhamento, com menor teor de água.

A incorporação de areia é a propriedade que expressa facilidade da pasta de cal hidratada envolver e recobrir os grãos do agregado e, conseqüentemente, agregar os mesmos. Cales com alta retenção de água têm maior capacidade de incorporar areia. Comparativamente, o poder de incorporação de areia da cal hidratada é de 1:3 a 1:4, enquanto no cimento é de 1:2 a 1:2.5. (JALALI et. al., 2009).

6.5.5 ESTABILIDADE

Os resultados obtidos para análise de estabilidade das argamassas estão indicados nas Figuras 37 e 38, apresentadas a seguir. Os resultados obtidos indicaram surgimento de fissuras para os corpos de prova das argamassas Ag^A, tanto para o tratamento a 40 °C quanto para o tratamento a 100 °C (Figura 39). Já a argamassa EFP^P não apresentou nenhuma alteração para os dois tratamentos (Figura 38).

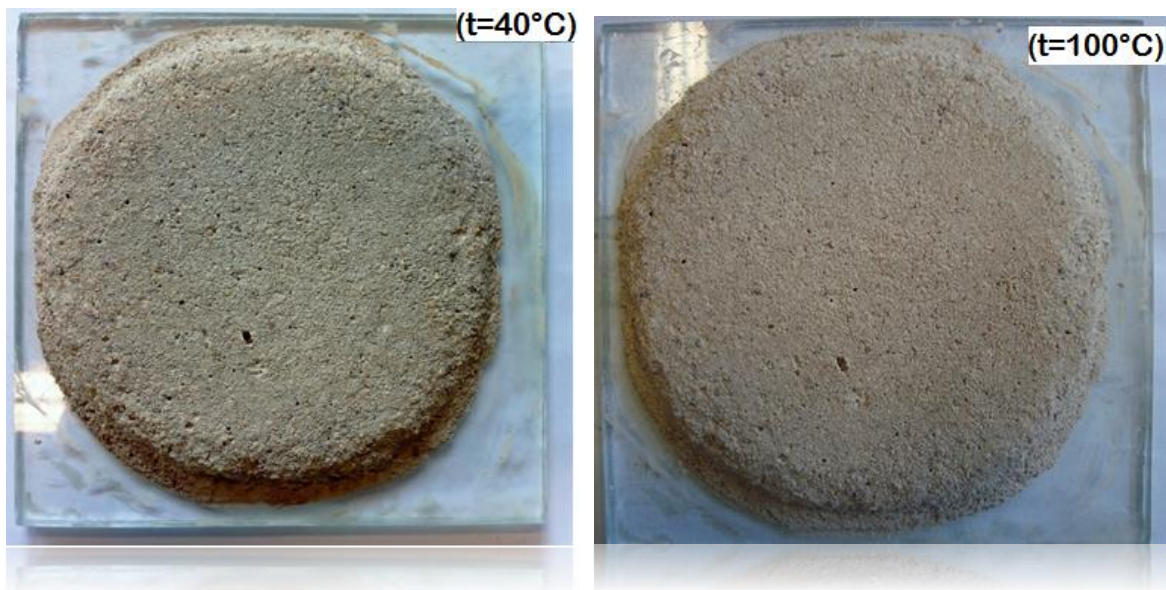


Figura 38: Observações da EFP^P à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente.

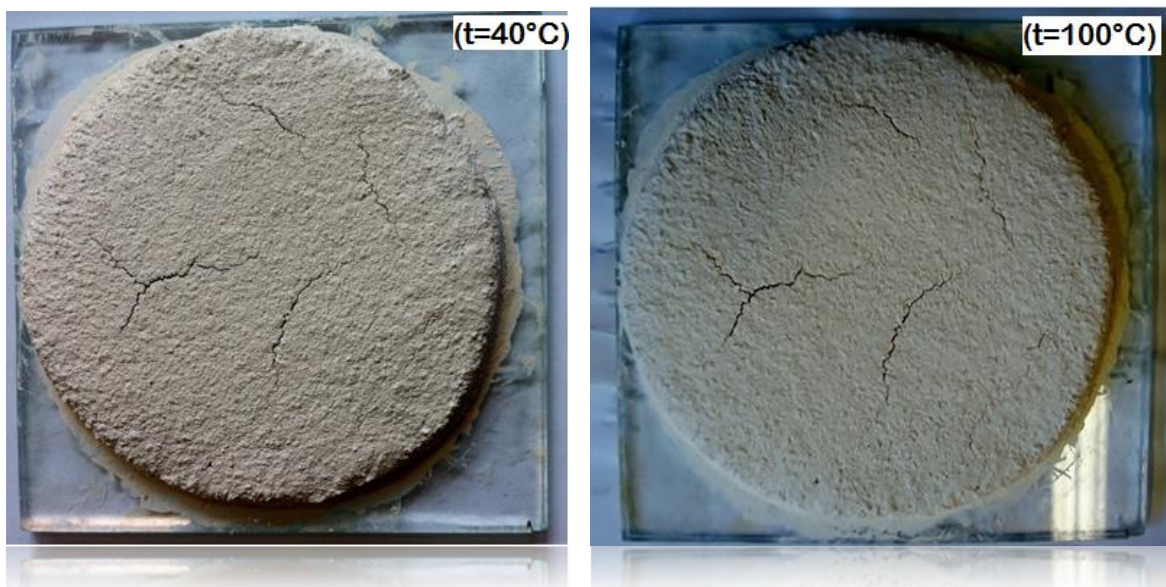


Figura 39: Observações do aglomerante Ag^A à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente.

Portanto, a argamassa EFP^P atendeu às condições especificadas pela NBR 7175/2003, entretanto, o mesmo não aconteceu com a argamassa produzida com Ag^A. As fissuras apresentadas pela Ag^A podem ser justificadas pela perda de água inicial, visto que não ocorreu nenhuma expansão volumétrica ou deslocamento do corpo de prova, características decorrentes da hidratação retardada da fração de óxidos não hidratados. Segundo CARNEIRO (1999) a retenção de água influencia na retração por secagem, que é uma das principais causas de fissuração das argamassas no estado endurecido. O estado de fissuração surge como função da velocidade de evaporação da água de amassamento, prejudicando a estanqueidade e a durabilidade do revestimento. Ainda ao reagir com o CO₂ a cal libera a água retida em torno de suas partículas e assim colabora também na cura do cimento (RAGO, 1999).

6.5.6 FINURA

Atualmente, o ensaio de finura é o mais executado, pois é um método de controle rápido para a fábrica, mas não caracteriza a curva granulométrica como um todo. Dessa maneira, a determinação do tamanho das partículas por difração laser é importante para caracterizar de maneira eficiente os aglomerantes e melhor descrever seu comportamento.

As Figuras 40 e 41 apresentam os resultados da finura segundo a NBR 9289/2000.

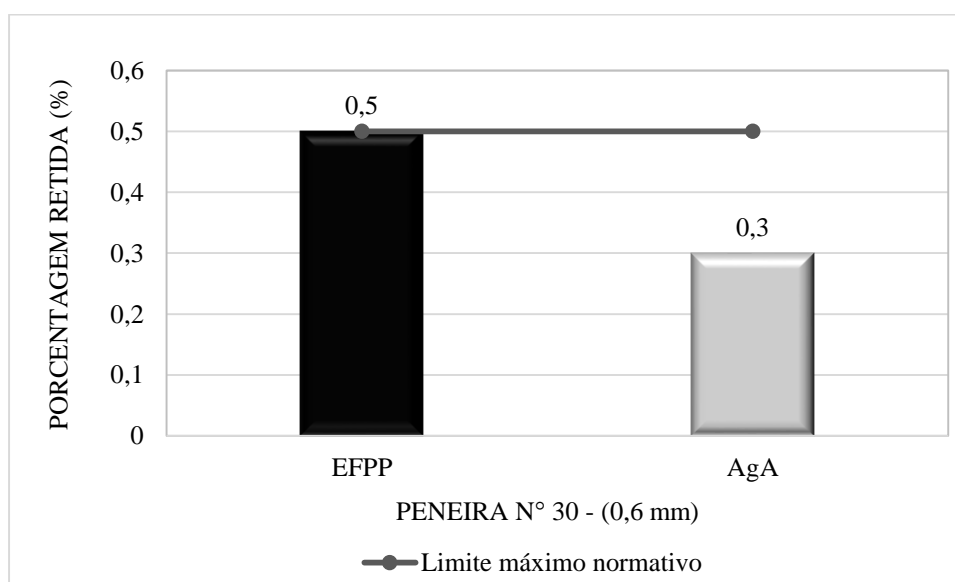


Figura 40: Resultados do ensaio de finura para peneira n° 30

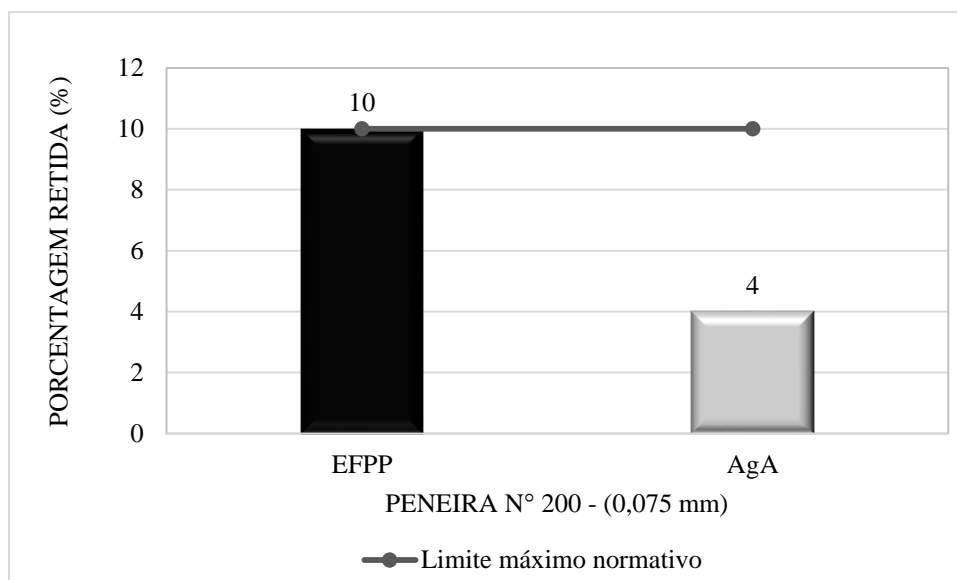


Figura 41: Resultados do ensaio de finura para peneira n° 200

A finura está relacionada com área superficial dos aglomerantes e está diretamente relacionado com os parâmetros das argamassas no estado fresco e endurecido. Aglomerantes com maior superfície específica tendem a requerer maiores teores de água para mesma consistência, conforme observado dos resultados obtidos para consistência da pasta normal da EFP^P e Ag^A. Os valores normativos indicados relacionam-se a etapa de moagem no processo de produção.

A finura deve ser controlada afim de que se obtenham aglomerantes capazes de produzir uma adequada retenção de água e conseqüentemente melhor trabalhabilidade, mas que também sejam capazes de reter essa água, afim de que os revestimentos produzidos possam se manter íntegros e duráveis, conforme observado por BASTOS (2001).

6.6 CAL HIDRÁULICA PARA ARGAMASSAS

6.6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Pela norma, NP EN 459-1/2011, a cal hidráulica pode ser classificada em função da sua classe de resistência, tal como pode ser visto na Tabela 21.

TABELA 21: CLASSIFICAÇÃO DA NORMA EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA

Tipo de Cal	Resistência à Compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
<i>HL2, FL2 e NHL2</i>	-	≥ 2 a ≤ 7
<i>HL3,5, FL3,5 e NHL3,5</i>	-	$\geq 3,5$ a ≤ 10
<i>HL5, FL5 e NHL5</i>	≥ 2	≥ 5 a ≤ 15

A Figura 42 apresenta os resultados médios e os desvios padrão obtidos nos ensaios de resistência à compressão das argamassas Ag^H e argamassas EFP^P, aos 28 dias.

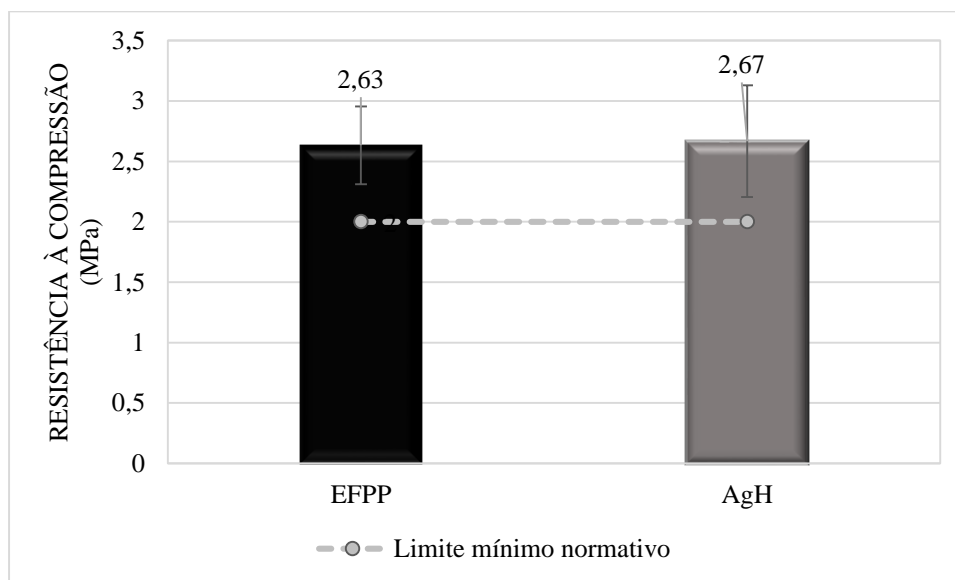


Figura 42: Resistência à compressão.

Os resultados obtidos para análise de resistência à compressão, mostra que as argamassas apresentaram resultados semelhantes e com valores dentro dos limites normativos da EN 459-1/2011, aos 28 dias, de 2 MPa.

Importante observar que a resistência à compressão está relacionada com o módulo de elasticidade das argamassas (WHITE, 2014). E que também o desempenho dos revestimentos relaciona-se à resistência a compressão, dadas compatibilidades que devem existir entre o substrato e o revestimento.

6.6.2 FINURA

Assim como um dos requisitos da NBR 7175/2003, o ensaio para determinação da finura do aglomerante através da NP EN 459-2/2001 ocorre pelo método do peneiramento. Este método demonstra a presença de partículas grosseiras e é adequado principalmente para verificar e controlar processos de produção.

As Figuras 43 e 44 apresentam os resultados do ensaio de finura das amostras de EFP^P e Ag^H, assim como os limites normativos da NP EN 459-1/2011. Verifica-se pequena quantidade de material maior que 0,2 mm para os dois tipos de materiais, com teores inferiores aos limites

normativos. Para quantidade de material retido na peneira de número 170 (diâmetros maiores que 0,09 mm), percentual retido para Ag^H foi de 17,55%, superior que o limite normativo estabelecido pela EN 459-1/2011. Em relação à EFPP^P, a porcentagem de material com frações maiores que 0,09 mm foi de apenas 2,36%.

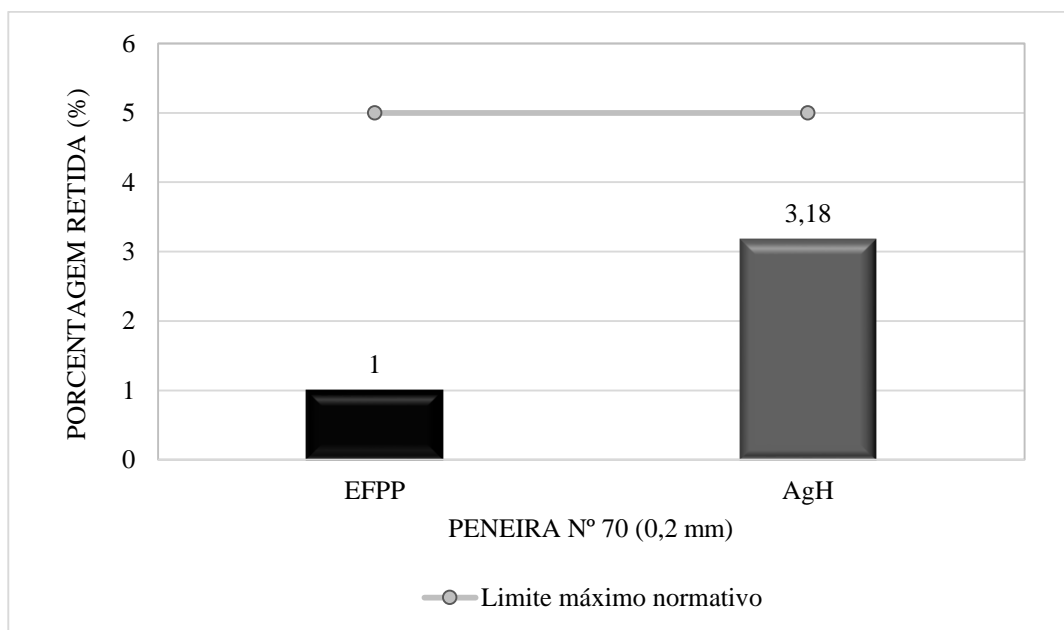


Figura 43: Resultados do ensaio para determinação da finura para peneira n° 70.

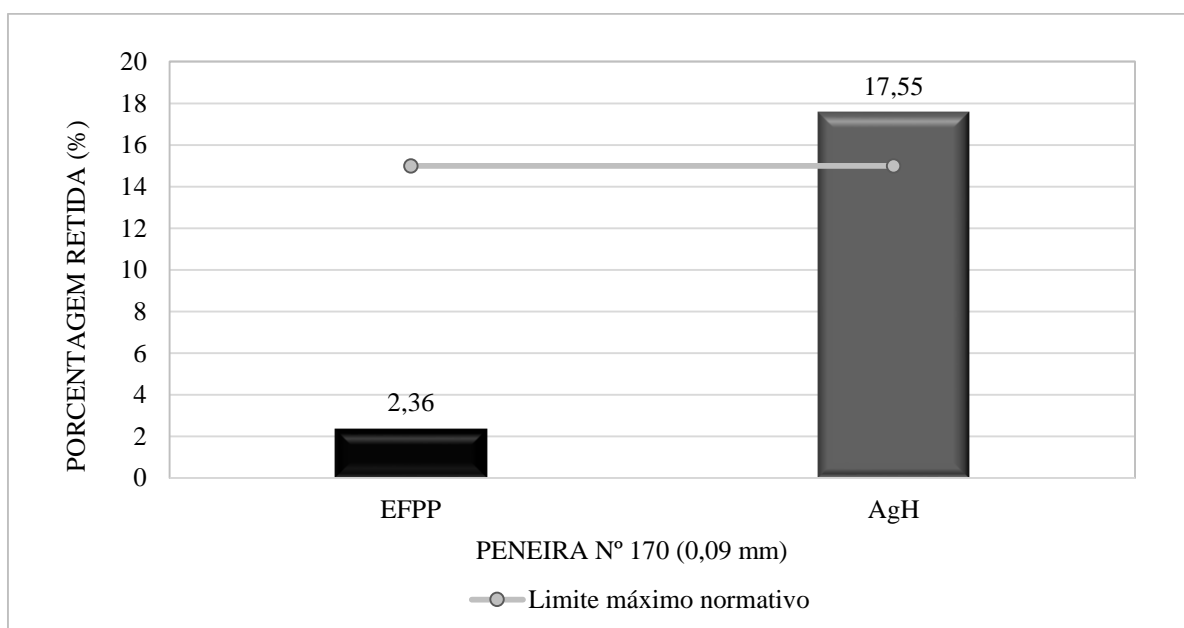


Figura 44: Resultados do ensaio para determinação da finura para peneira n° 170.

Conforme observado para Ag^A , a finura está relacionada com área superficial dos aglomerantes e está diretamente relacionada com os parâmetros das argamassas no estado fresco e endurecido. Os valores normativos indicados, relacionam-se a etapa de moagem no processo de produção.

A finura deve ser controlada afim de que se obtenham aglomerantes capazes de produzir uma adequada retenção de água e conseqüentemente melhor trabalhabilidade, mas que também sejam capazes de reter essa água, afim de que os revestimentos produzidos possam se manter íntegros e duráveis, conforme observado por BASTOS (2001).

6.6.3 EXPANSIBILIDADE

As Figuras 45 e 46 ilustram os resultados obtidos nos ensaios de estabilidade dos aglomerantes Ag^H e EFP^P estudados.

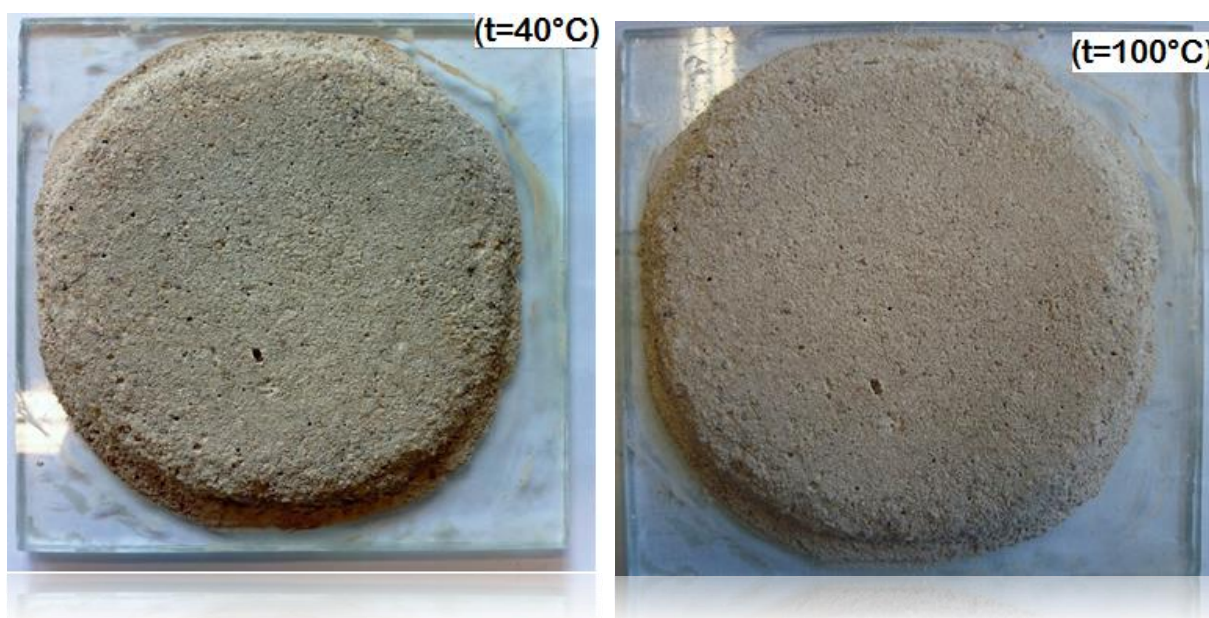


Figura 45: Observações do aglomerante EFP^P à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente.

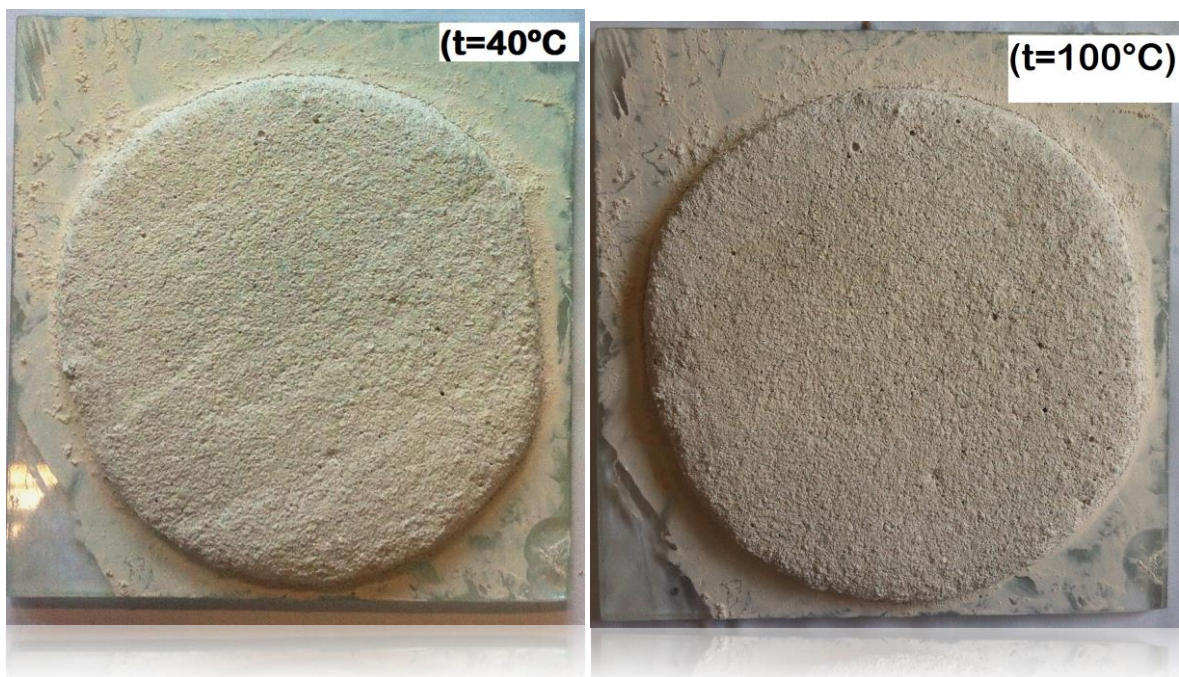


Figura 46: Observações do aglomerante Ag^H à temperatura de 40 °C e 100 °C, respectivamente.

Os resultados obtidos para análise da estabilidade foram assertivos para ambos aglomerantes (EFP^P e Ag^H), indicando a ausência de protuberâncias e pipocamentos para corpos de prova das argamassas, tanto para o tratamento a 40 °C quanto para o tratamento a 100 °C.

Argamassa produzida com EFP^P e argamassa produzida com Ag^H atenderam à condição especificada pela NBR 7175/2003. Esse resultado pode ser explicado pelo menor teor de cal livre presente nas amostras, conforme resultados obtidos da DRX. De acordo com MIRANDA (2009), quando o aglomerante contém apreciáveis proporções de cal livre, esse óxido ao se hidratar posteriormente ao endurecimento, aumenta o volume criando tensões internas que conduzem à microfissuração, e, pode terminar na desagregação mais ou menos completa do material.

6.6.4 TEOR DE AR INCORPORADO

A Figura 48 indica os resultados obtidos no ensaio assim como seus respectivos desvios padrão.

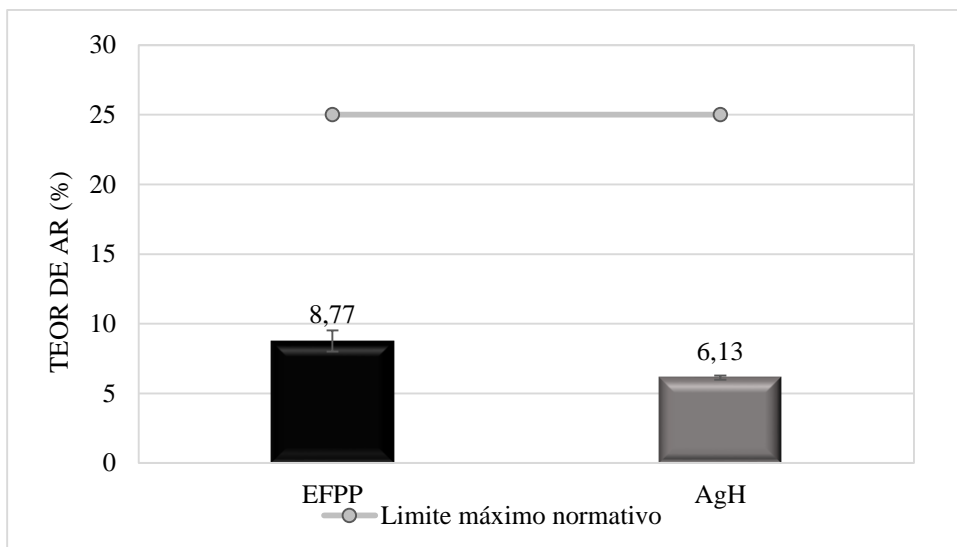


Figura 48: Resultados do ensaio para determinação do teor de ar

Os resultados obtidos para análise de teor de ar incorporado indicam que EFP^P apresentou valor sensivelmente superior ao valor obtido para aglomerante Ag^H e ambos materiais encontram-se dentro do limite normativo.

6.6.5 PENETRAÇÃO

De modo geral, o comportamento da argamassa no estado fresco é medido indiretamente através de uma correlação com a consistência da argamassa. O ensaio de penetração é utilizado para ajudar a determinar a consistência da argamassa padrão, conforme especificado na norma NP EN 459-2/2001. A Figura 47, a seguir, apresenta uma comparação dos resultados médios obtidos pelas argamassas produzidas bem como seus desvios padrão.

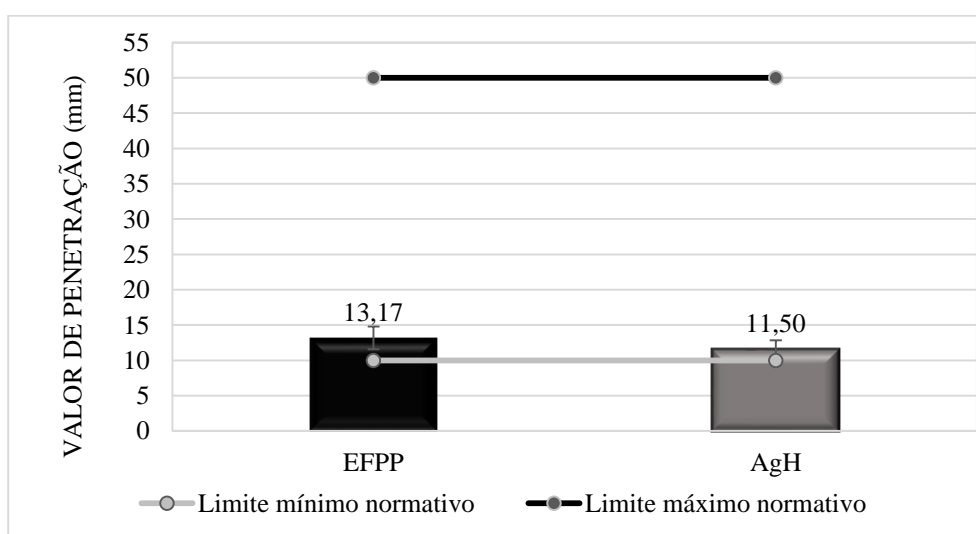


Figura 47: Penetração

Os resultados obtidos para análise de determinação da penetração não apresentaram variações significativas entre os tratamentos, embora EFP^P tenha se afastado mais dos limites indicativos que o aglomerante Ag^H. Embora os resultados expressem valores absolutos compreendidos no limite de significância para os resultados, observa-se que a EFP^P apresenta um valor sensivelmente superior, fato que pode ser justificado pelo maior teor de ar incorporado. VEIGA (1998) menciona que nas argamassas, a aderência processa-se por penetração capilar da água de amassamento nos poros do substrato, arrastando consigo os elementos mais finos da argamassa. Assim, para que a ligação seja boa, é necessário que as partículas finas formem com a água uma pasta capaz de penetrar facilmente no substrato, endurecendo em seguida rapidamente.

6.6.6 TEMPO DE PEGA

Para determinação do tempo de pega, o índice de consistência normal da pasta foi determinado para ambos os aglomerantes. A Tabela 22 indica as porcentagens encontradas para cada tipo de aglomerante.

TABELA 22: DADOS DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA NORMAL DAS PASTAS

Pasta	(%)
<i>EFP^P</i>	37,8%
<i>Ag^H</i>	48,4%

A Tabela 23 apresenta os resultados de início e fim de pega dos dois tipos de aglomerantes.

TABELA 23: DADOS DO TEMPO DE PEGA DOS AGLOMERANTES

Pasta	Tempo de início de pega	Tempo de fim de pega
<i>EFP^P</i>	15:00:00	52:00:00
<i>Ag^H</i>	08:40:00	27:00:00

A produção da pasta com EFP^P teve como consequência o aumento do tempo de pega. Para a EN 459-1/2011, nenhum dos aglomerantes está de acordo com os limites estabelecidos, apresentando um tempo de fim de pega superior a 15 horas. Segundo BAUER (2000) os constituintes fundamentais dos aglomerantes em geral são: a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa proporção de magnésio (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), que é adicionado para retardar o tempo de pega.

O tempo de pega pode também estar relacionado a hidraulicidade dos aglomerantes. A EFP^P apresenta o índice de hidraulicidade um pouco inferior quando comparada a Ag^H, função do menor teor de óxido de magnésio presente na EFP^P, que justifica os resultados encontrados e ainda em consonância com os resultados obtidos por COUTINHO (1988).

Por outro lado, maior tempo de pega significa maior tempo de estabilidade das argamassas no estado fresco, embora também seja prejudicial ao processo de execução para os revestimentos, por requerer maior tempo para enrijecimento e posterior acabamento das superfícies com as argamassas projetadas.

Embora os resultados obtidos estejam fora dos limites normativos, COUTINHO (1988), afirma ser possível às cales muito hidráulicas, tempo de fim de pega de até 96h. Qualificando, portanto, a EFP^P como uma cal muito hidráulica, o que fortalece os achados deste trabalho, quando determinada grande hidraulicidade para EFP^P (0,42), comparativamente a Ag^H (0,44.).

6.7 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

6.7.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

No âmbito do projeto em estudo procuram-se argamassas que apresentem boa trabalhabilidade, tendo-se para isso estipulado um intervalo de valores de espalhamento na ordem dos (260 ± 5) mm, de acordo com NBR 13276/2002. Na Figura 49 são apresentadas as relações “água/mistura de aglomerante” levando em consideração os traços de cada tipo de argamassa produzida.

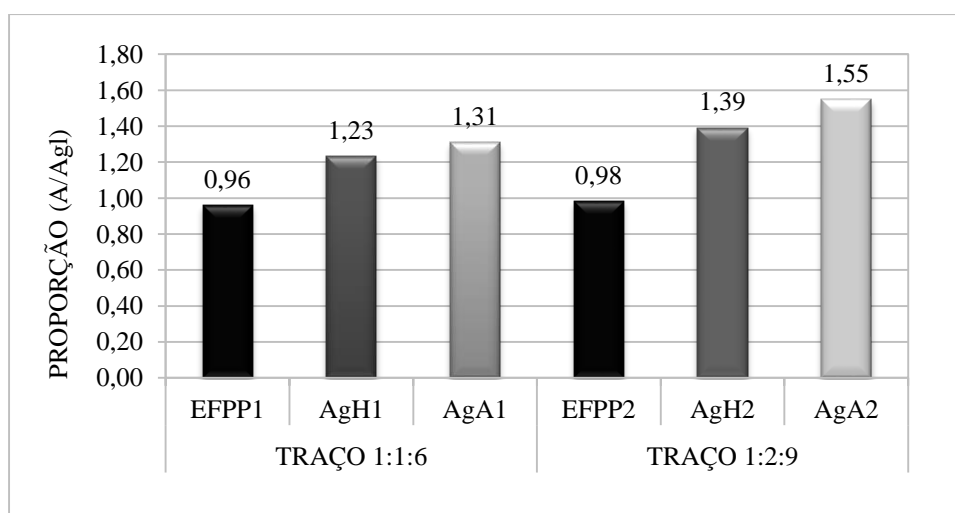


Figura 49: Índice de consistência.

Os resultados obtidos para análise do índice de consistência permitiram considerar que os traços compostos com a EFP^P em substituição às cales naturais, apresentaram menor consumo de água quando comparados aos traços naturais. Além disso, assim como relatou RODRIGUES (2010) as argamassas de cal aérea necessitaram de maior quantidade de água no amassamento para obterem o mesmo espalhamento que as argamassas de cal hidráulica.

Observando os resultados, constata-se também que à medida que aumenta a relação cal/cimento aumenta a quantidade de água para manter o índice de consistência definido, o que não se observa para a relação EFP^P/cimento. Isso se deve ao aumento da área superficial da fração aglomerante das argamassas de cal. Em relação ao aumento do teor de EFP^P, o aumento pouco significativo da proporção A/Ag1 está relacionado com a menor tensão de escoamento induzida pela EFP^P, conforme observados dos resultados de índice de consistência realizado com o aparelho de Vicat.

6.7.2 RETENÇÃO DE ÁGUA

Os resultados obtidos para análise para determinação da retenção de água apresentam-se na Figura 50, a seguir.

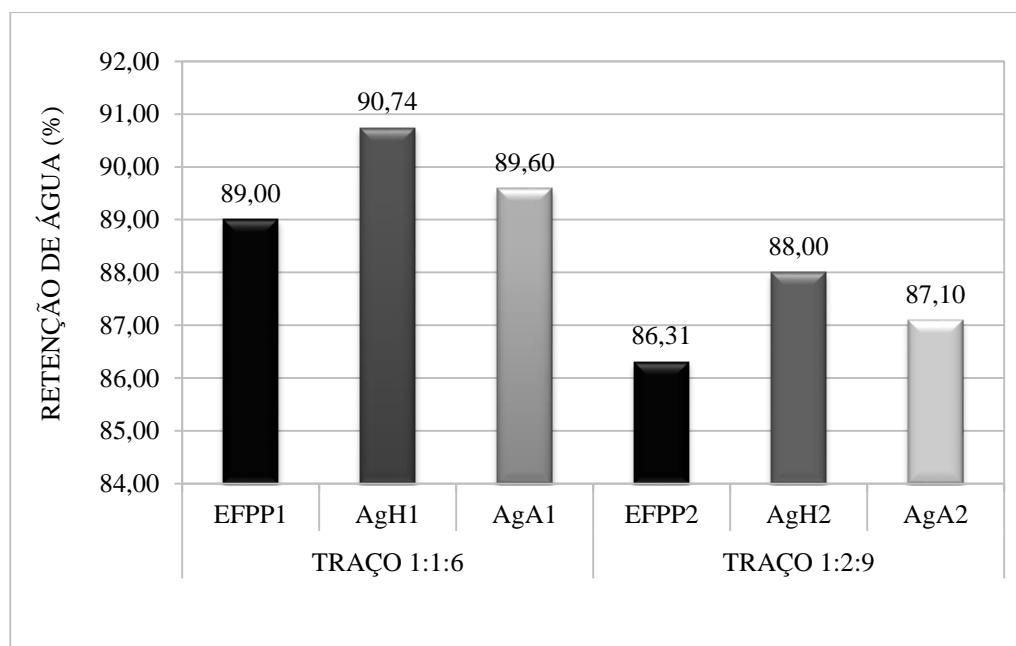


Figura 50: Retenção de água.

Nas argamassas para revestimento, a retenção de água influencia no tempo disponível para sua aplicação, regularização e desempenho das superfícies, conforme observado por CARASEK (2007). O parâmetro retenção de água influencia também algumas propriedades no estado endurecido ao interferir nas reações dos aglomerantes durante a cura. Esta propriedade pode

variar em função das condições do ambiente e das características de absorção da base. A retenção de água está relacionada com a manutenção da consistência, a trabalhabilidade e a plasticidade. Embora a EFP^P tenha apresentado menor teor de água para produção da pasta de consistência normal, o que significa menor tensão de escoamento, quando adicionada a uma matriz mista, produz resultados semelhantes às matrizes produzidas com aglomerantes convencionais, conforme observado dos resultados obtidos. Adicionalmente as argamassas mistas produzidas enquadram-se dentro de uma mesma classe (U4 - 86 a 94%), para todos os traços, nos padrões normativos estabelecidos para retenção de água, fixados pela NBR 13281/2 (Anexo II – Tabela 6).

6.7.3 DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO FRESCO

A Figura 51 apresentada a seguir, ilustra os resultados obtidos para densidade de massa das argamassas no estado fresco.

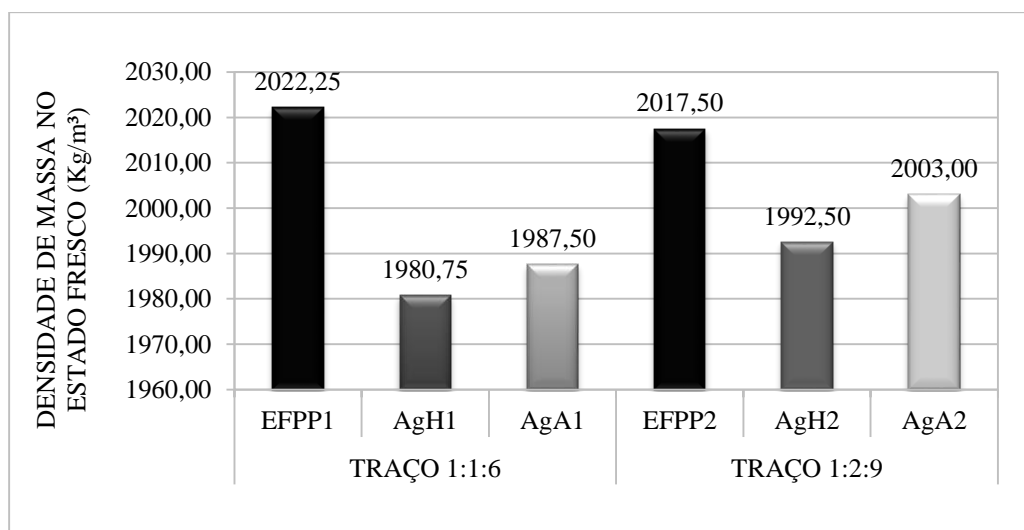


Figura 51: Densidade de massa no estado fresco.

Todas as argamassas produzidas podem ser classificadas em uma mesma classe, D5 (1800 a 2200 Kg/m³), de acordo com NBR 13281/2005 (Anexo II – Tabela 5).

A densidade de massa no estado fresco é de extrema importância para a viabilidade da aplicação. Argamassas muito pesadas representam redução nos índices de produtividade e, portanto, pouco atraentes.

A adição dos materiais Ag^A e Ag^H como aglomerantes produzem matrizes mistas mais leves. Fato que está diretamente relacionado à constituição química dos elementos que compõem os

diferentes aglomerantes testados, conforme pode ser observado dos resultados de massa específica e massa unitária apresentados para a caracterização dos materiais utilizados como aglomerantes.

6.7.4 TEOR DE AR INCORPORADO

Os resultados obtidos para análise da determinação do teor de ar incorporado apresentam-se na Figura 52, apresentada a seguir.

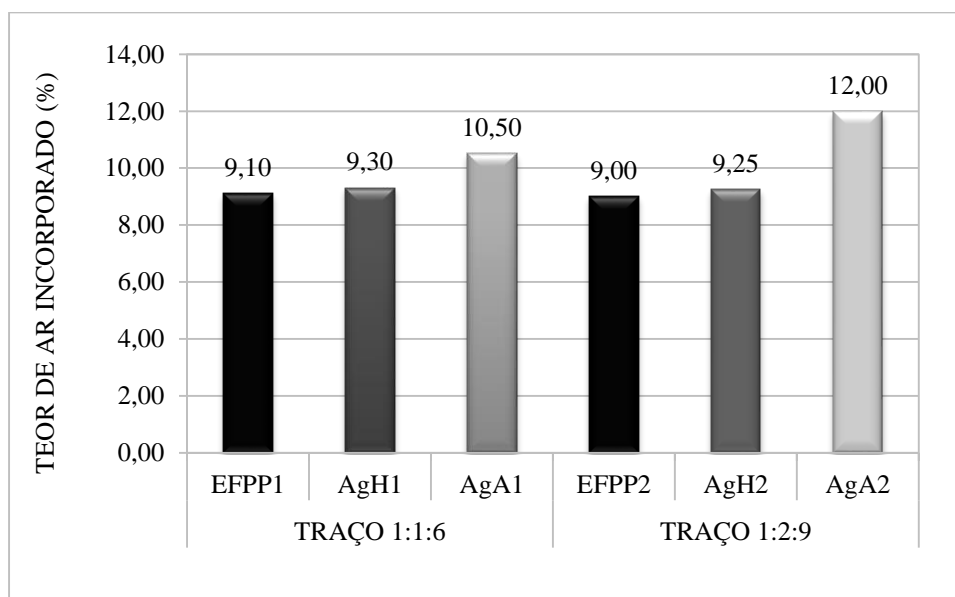


Figura 52: Teor de ar incorporado.

Como resultado da técnica aplicada para a determinação do teor de ar incorporado, os resultados obtidos para EFPP1 e AgH1 podem ser considerados idênticos. A mesma observação pode ser conduzida para EFPP2 e AgH2. Não sendo verificadas ainda, variações nos teores de ar incorporados para as diferentes concentrações nas dosagens produzidas.

De acordo com CARDOSO (2009), a presença de ar no sistema faz com que o enrijecimento das argamassas por deformação seja discreto ou quase inexistente. O que reduz de forma significativa as movimentações relacionadas à variação dimensional quando da cura destas argamassas. Argamassas com mesmo teor de ar incorporado, apresentam mesma plasticidade quando endurecidas e podem ainda apresentar mesma consistência no estado fresco.

Por outro lado, segundo SILVA et. al. (2005), elevados teores de ar incorporado nas argamassas podem ser prejudiciais, pois as bolhas de ar consomem os espaços que seriam ocupados pela

pasta reduzindo os produtos de hidratação e promovendo redução da capacidade mecânica e de aderência. No entanto, argamassas com menores resistências mecânicas podem apresentar melhor desempenho relativamente a fissuração e durabilidade, uma vez que apresentam melhor compatibilidade com o substrato, que pode ainda significar em melhor aderência, conforme observado por WHITE (2014)

As argamassas Ag^A apresentaram maior teor de ar incorporado que os demais tratamentos e ainda aumento do teor de ar incorporado proporcional aos teores de adição.

6.8 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

6.8.1 DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados obtidos para análise da densidade de massa no estado endurecido apresentam-se na Figura 53 a seguir.

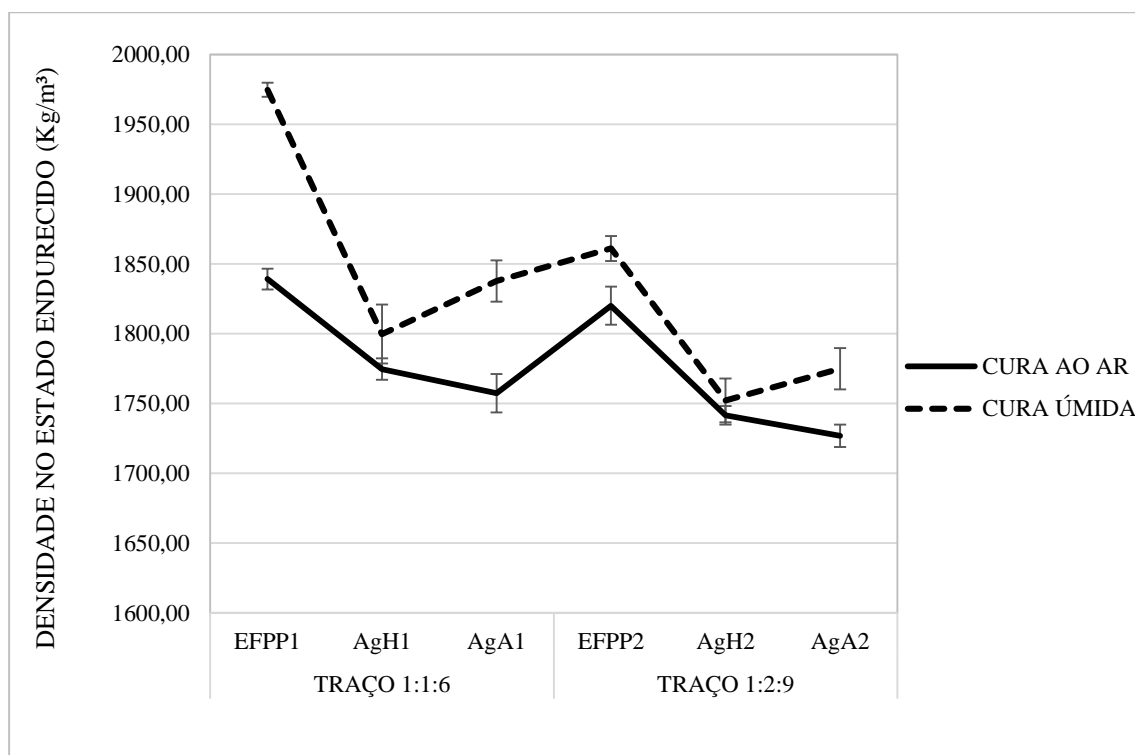


Figura 53: Densidade de massa no estado endurecido.

Os resultados indicam que as argamassas EFP^P são mais densas do que as convencionais, devido à característica dos elementos que compõem esse material, conforme mostrado anteriormente pelas análises FRX, associado ainda a maior superfície específica para os grãos, segundo

resultado obtido da determinação do tamanho das partículas por difração laser e por MEV. Estes resultados também demonstram que, possivelmente, o aumento dos teores de finos na produção da argamassa aumenta o grau de empacotamento do conjunto agregado e aglomerante, conforme observado por PILEGGI (2001), onde o empacotamento está relacionado com a proporção e o tamanho dos materiais, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e, assim, sucessivamente.

Os resultados obtidos do analisador de partículas por difração laser mostra que a EFP^P possui grãos de dimensões inferiores a Ag^H, achado que poderia justificar a diferença encontrada para a densidade de massa no estado endurecido. O efeito filler produzido pela EFP^P na presença de cimento também poderia estar associado ao aumento da densidade.

No entanto, mesmo obtendo resultados diferentes para a densidade de massa, as argamassas EFP^P, Ag^H e Ag^A classificam-se segundo a mesma ordem (M5 – 1600 a 2000 kg/m³), de acordo com NBR 13281/2005 (Anexo II – Tabela 2).

6.8.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE CAPILARIDADE

Os resultados obtidos da análise para absorção de água e coeficiente de capilaridade permitiram traçar as curvas de absorção capilar para avaliação da quantidade total de água absorvida pelas argamassas, bem como a rapidez com que se sucede, dada pelo coeficiente de capilaridade (CC).

As Figuras 54 e 55 ilustram os resultados para absorção de água dos corpos de prova nos tempos de 10 e 90 minutos.

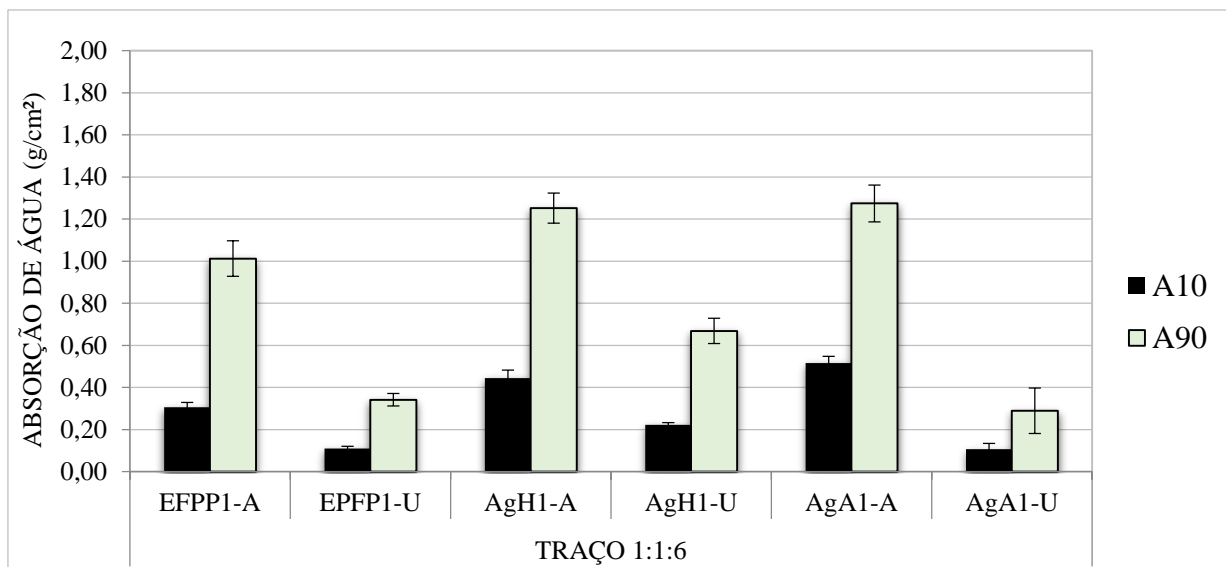


Figura 54: Absorção de água por capilaridade – traço 1:1:6.

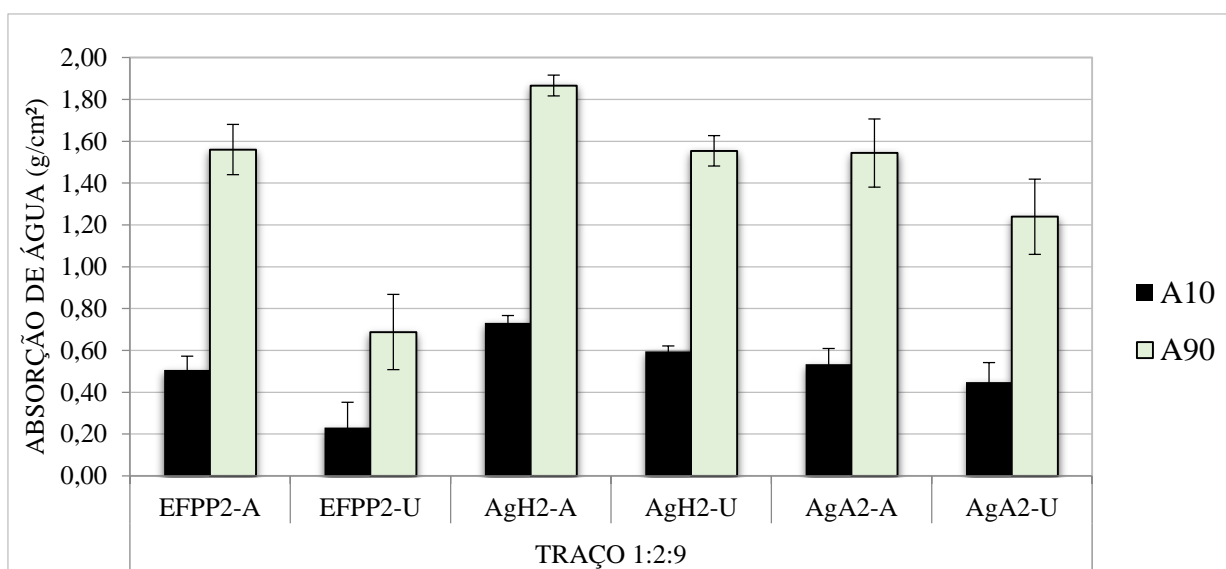


Figura 55: Absorção de água por capilaridade – traço 1:2:9.

Observa-se que para as condições de cura úmida (U), a influência do cimento foi considerável, reduzindo valores para absorção de água para todos os tratamentos. O aumento proporcional da dosagem dos aglomerantes em relação ao cimento induziu aumento na absorção de água para todos os tratamentos, independentemente do tipo de cura.

Para condições de aplicação, as argamassas expõem-se a condições de cura ao ar. Considerando essa realidade, o aumento na concentração de aglomerantes aumenta a absorção de água. As matrizes produzidas com EFP^P, curadas ao ar, demonstraram menor absorção de água quando

comparadas as matrizes Ag^H e Ag^A para todos os tratamentos, exceto para traços 1:2:9, quando as matrizes EFP^P apresentaram-se idênticas as matrizes Ag^A.

Absorção de água pode estar diretamente relacionada à densidade de massa no estado endurecido, fato que confirma-se pelos resultados obtidos para densidade de massa das matrizes no estado endurecido. Assim como afirma MARTÍNEZ et al. (2013) em seu estudo, a menor a densidade de massa significa dizer que a argamassa é mais porosa, obtendo maior capacidade de absorção, sorvidade e retração, devido à maior capacidade de absorção de água dos agregados.

Os resultados obtidos da análise para coeficiente de capilaridade, como função da absorção de água, apresentam-se na Figura 56, a seguir.

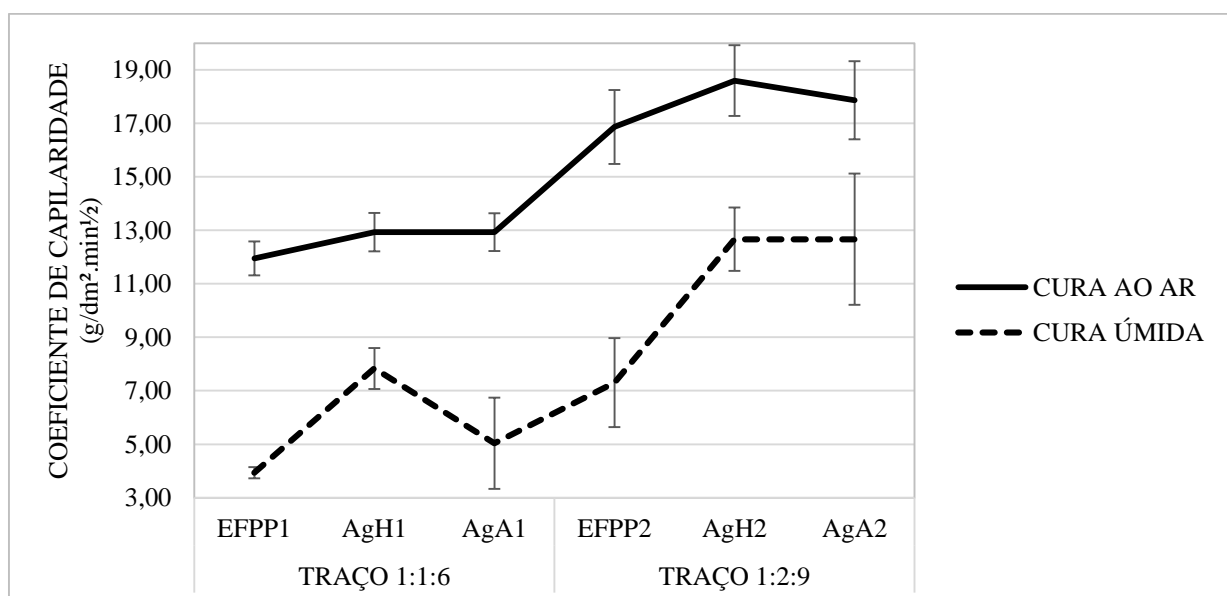


Figura 56: coeficiente de capilaridade das argamassas.

Para cura úmida, verificam-se menores coeficientes de capilaridade, influenciados pela geração dos produtos de hidratação do cimento a despeito da ação dos aglomerantes. O maior teor de ar incorporado pelo Ag^A nas matrizes provocou maior coeficiente de capilaridade.

Para todos os tratamentos, matriz EFP^P apresentou menor índice de capilaridade. Tal fato pode ser justificado por uma estrutura com menos poros formada provavelmente pela contribuição dos finos inertes deste material, resultados que contribuem para o melhor desempenho da matriz EFP^P, principalmente quando aplicadas a revestimentos de fachadas ou mesmo de empenas expostas a intempéries.

As matrizes EFP^P e Ag^H para condição de cura ao ar, enquadram-se segundo mesma classificação C6 (3,0 a 7,0 g/dm².min^{1/2}) - NBR 13281/2005, qualquer que seja dosagem (Anexo II – Tabela 4). A classificação de todas as argamassas produzidas está discriminada na Tabela 1, Apêndice I.

6.8.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos da análise para resistência à compressão dos tratamentos propostos apresentam-se a seguir, na Figura 57.

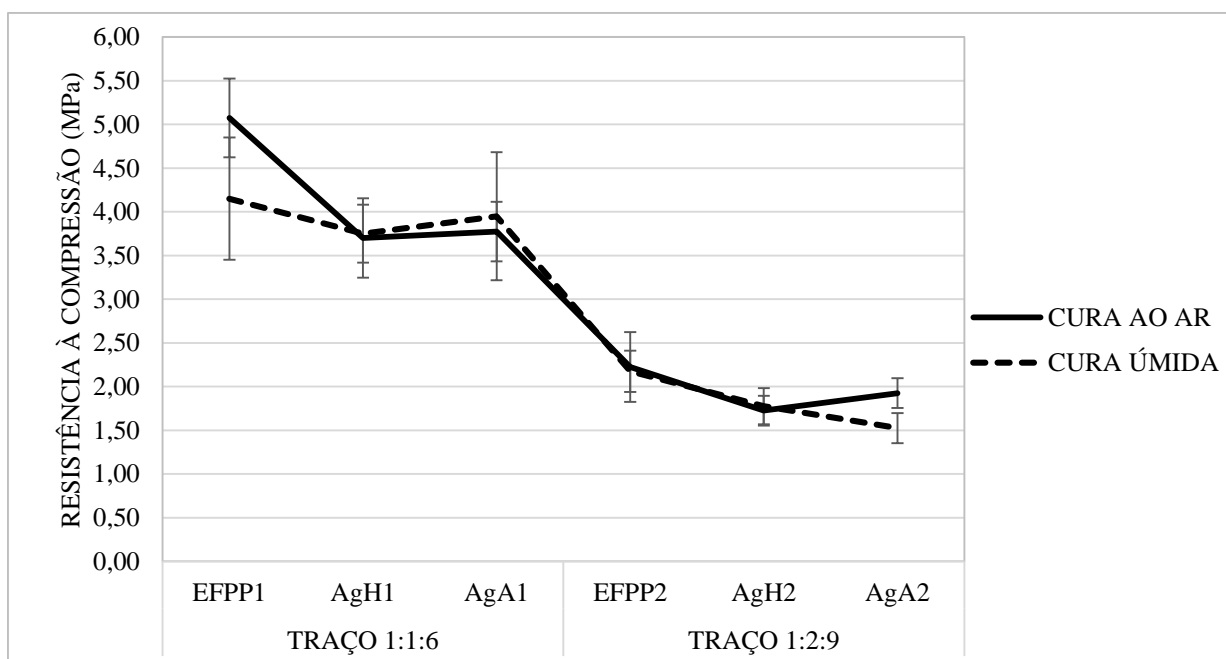


Figura 57: Resistência de compressão.

Do ponto de vista global, os traços compostos com a EFP^P apresentaram melhor comportamento à compressão, tendo um desempenho mecânico ligeiramente superior quando comparados aos tratamentos Ag^A e Ag^H, provavelmente em função do melhor envolvimento dos grãos pelos produtos de hidratação do cimento e da EFP^P, dada a granulometria fina da escória processada, como já observado nos resultados obtidos para densidade de massa no estado fresco.

Segundo MANSO et al. (2011) embora a resistência mecânica de uma argamassa de revestimento e assentamento não é uma propriedade determinante para a sua utilização, isto é uma indicação de qualidade, que pode servir como um guia para avaliar a sua durabilidade. Em seu estudo, assim como no presente trabalho, a resistência de argamassa contendo algumas proporções de EFP é superior a uma argamassa convencional.

Quanto às argamassas mistas compostas por cal, sabe-se que a cal apesar de ser um aglomerante com funções importantes na argamassa, responsável por aumentar a trabalhabilidade, diminuir a absorção de água e o índice de vazios, provoca diminuição da resistência à compressão. E conforme observado em todas as argamassas ensaiadas, os resultados obtidos foram relativamente inferiores.

Observa-se também que o cimento exerce influência sobre o comportamento mecânico das matrizes, quando solicitadas a compressão. Todos os tratamentos em que a relação cimento/cales e cimento/EFP^P foi superior apresentaram melhor desempenho mecânico a compressão.

Aparentemente, o tipo de cura não interferiu significativamente no desempenho das matrizes à compressão, embora EFPP1 e AgH2 tenham apresentado maiores desvios. Observa-se ainda, que os resultados de densidade de massa no estado endurecido são proporcionais à resistência à compressão.

Todos os tratamentos dosados segundo as proporções 1:1:6 podem ser classificados, segundo a NBR 13281/2005 (Anexo II – Tabela 1), como P3 (2,5 a 4,5 MPa), exceto EFP^P que pode ser classificada como P4 (4 a 6 MPa). Todos os tratamentos dosados segundo as proporções 1:2:9 podem ser classificados como P1 (≤ 2 MPa), exceto EFP^P que pode ser classificada como P2 (1,5 a 3 MPa). A classificação de todas as argamassas produzidas está discriminada na Tabela 2, Apêndice I.

6.8.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados obtidos da análise para resistência à tração na flexão para os tratamentos propostos apresentam-se a seguir, na Figura 58.

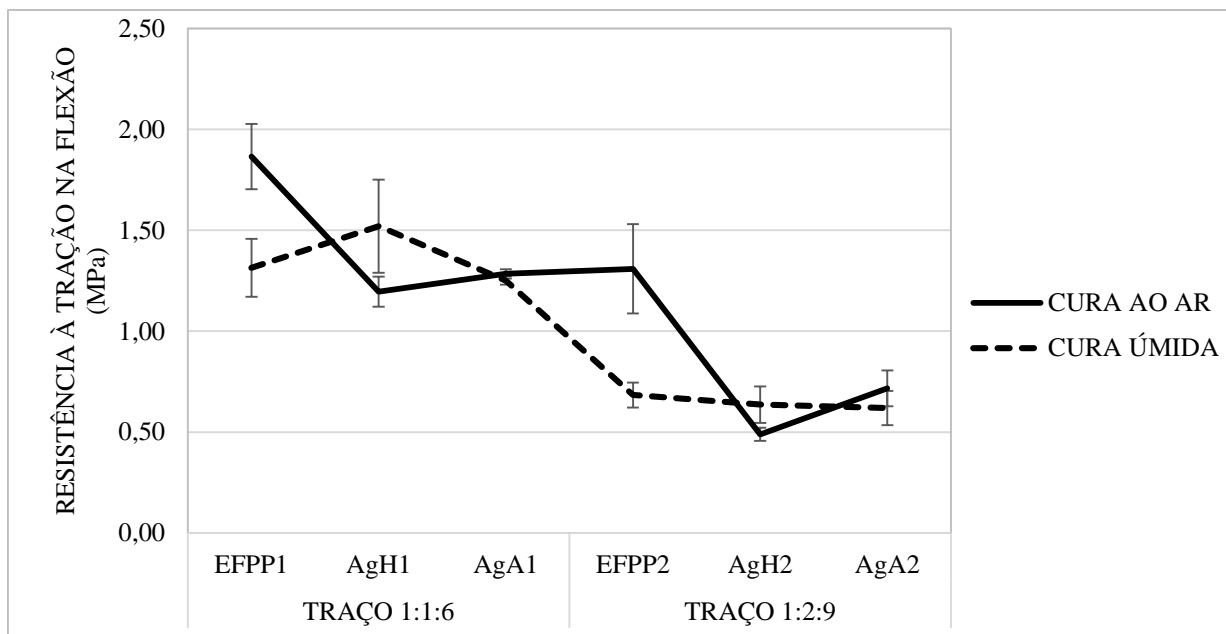


Figura 58: Resistência à tração na flexão.

O tipo de cura interfere nos valores obtidos para a resistência a tração na flexão. Esse achado relaciona-se às propriedades hidráulicas da Ag^H e $EFPP^P$. Os valores para tração na flexão para $EFPP^P$ apresentaram-se superiores, relativamente a Ag^H e Ag^A . A incorporação de ar pela Ag^A pode ter tido influência significativa na redução do valor da resistência a tração na flexão. Por outro lado, o ganho de resistência pela $EFPP^P$ pode estar relacionado ao efeito filler deste material, como função da morfologia de suas partículas, conforme observado dos resultados da determinação do tamanho das partículas por difração a laser. Adicionalmente, é possível também correlacionar esse resultado aos achados para resistência a compressão axial, proporcionalmente.

Tendo em vista que a resistência à tração da argamassa é uma das componentes que define a resistência de aderência à tração, argamassas com melhor desempenho podem representar alternativas mais adequadas à cobertura de substratos, com maiores solicitações, como por exemplo em revestimentos exteriores ou mesmo em fachadas de edifícios, ANTUNES (2005).

Todos os tratamentos dosados segundo as proporções 1:2:9 podem ser classificados, segundo a NBR 13281/2005 (Anexo II – Tabela 3), como R1 ($\leq 1,5$ MPa), exceto $EFPP^P$ que pode ser classificada como R2 (1 a 2 MPa). Os tratamentos dosados segundo as proporções 1:1:6 apresentam certa variação na sua classificação, discriminadas na Tabela 3, Apêndice I.

Os resultados obtidos da análise para resistência à compressão e à tração na flexão para os tratamentos propostos, permitem determinar a ductilidade das argamassas, conforme apresentam-se a seguir, na Figura 59.

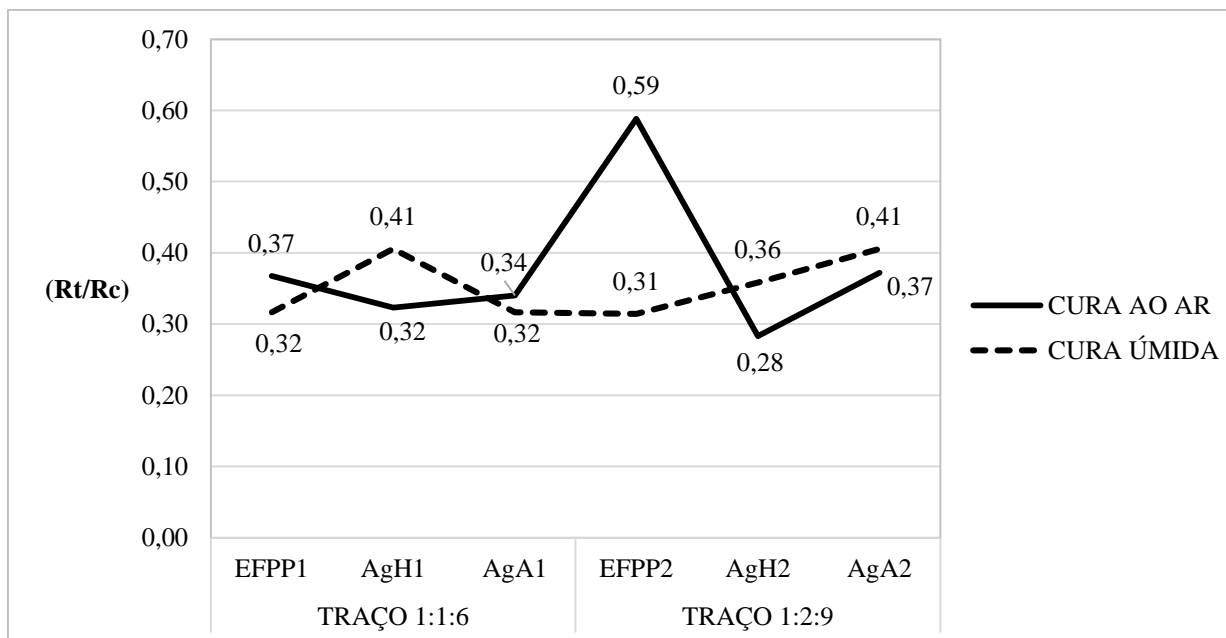


Figura 59: Resultados da ductilidade das argamassas.

A ductilidade (R_t/R_c) fornece parâmetros para qualificar a capacidade da argamassa em se deformar consoante as solicitações mecânicas a que está sujeita. Segundo VEIGA et al. (1994), quanto maior este coeficiente, mais dúctil é a argamassa. Um comportamento mais dúctil permite otimizar as resistências das argamassas às tensões criadas, sem que sejam transmitidos esforços muito elevados para o substrato. Observa-se que o tipo de cura, influencia no desempenho das argamassas EFP^P comparativamente aquelas produzidas com Ag^H e Ag^A. Para cura ao ar, as EFP^P apresentam-se mais dúcteis que Ag^H e Ag^A. Sendo que para cura úmida, as argamassas produzidas com EFP^P apresentam-se menos dúcteis. Considerando que para os revestimentos, o tipo de cura é sempre ao ar, podemos inferir que as argamassas EFP^P apresentam melhor desempenho e durabilidade, relativamente ao seu comportamento em relação ao substrato. JONH (2003) afirma que a ductilidade, possibilitando certas deformações sem aparecimento de fissuras, contribuem para a durabilidade da argamassa.

6.8.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados obtidos da análise para resistência à compressão diametral dos tratamentos propostos apresentam-se a seguir, na Figura 60.

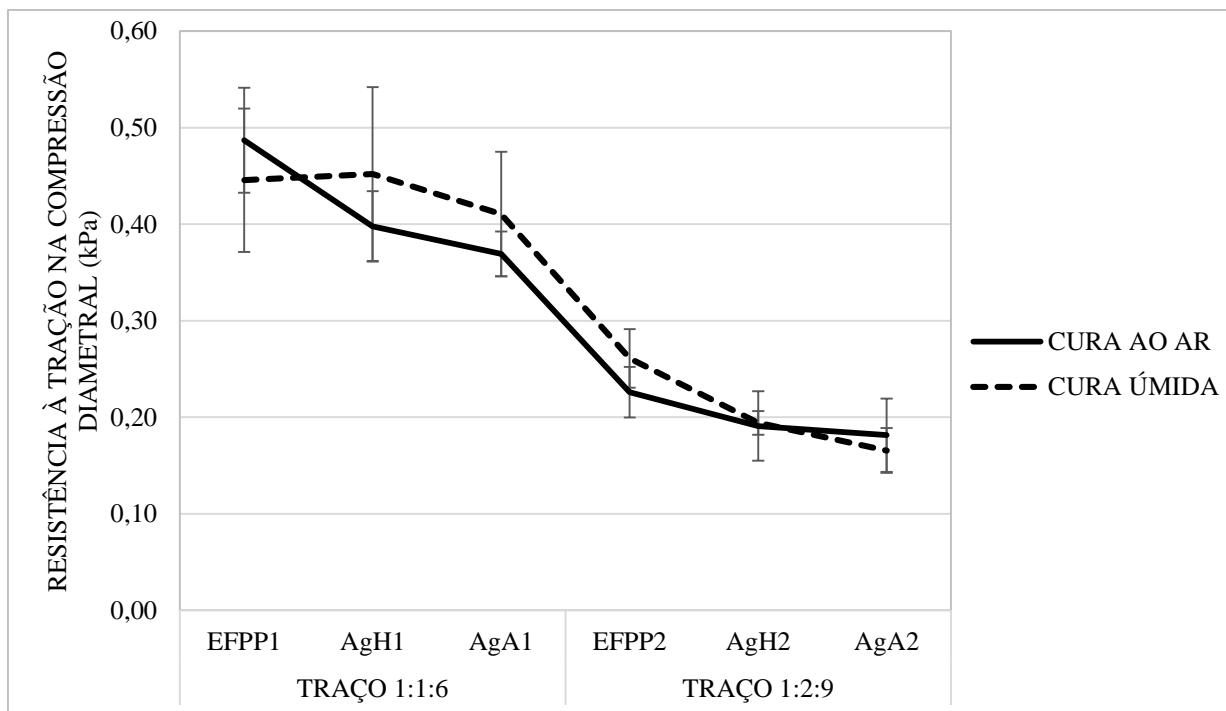


Figura 60: Resistência à tração na compressão diametral.

Do ponto de vista global, os traços compostos com a EFP^P apresentaram melhor comportamento à compressão diametral, apresentando um desempenho mecânico superior quando comparados aos tratamentos Ag^A e Ag^H, provavelmente em função do melhor envolvimento dos grãos pelos produtos de hidratação do cimento e da EFP^P, dada a granulometria fina da escória processada, como já observado nos resultados obtidos para densidade de massa no estado fresco. Exceto para o traço 1:1:6, onde os tratamentos EFPP1 e AgH1 são idênticos.

6.8.6 RESISTÊNCIA POTENCIAL DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

A Figura 61 apresenta os resultados médios e o desvio padrão obtidos nos ensaios de resistência potencial de aderência à tração das argamassas produzidas, permitindo a comparação das diferentes composições em estudo.

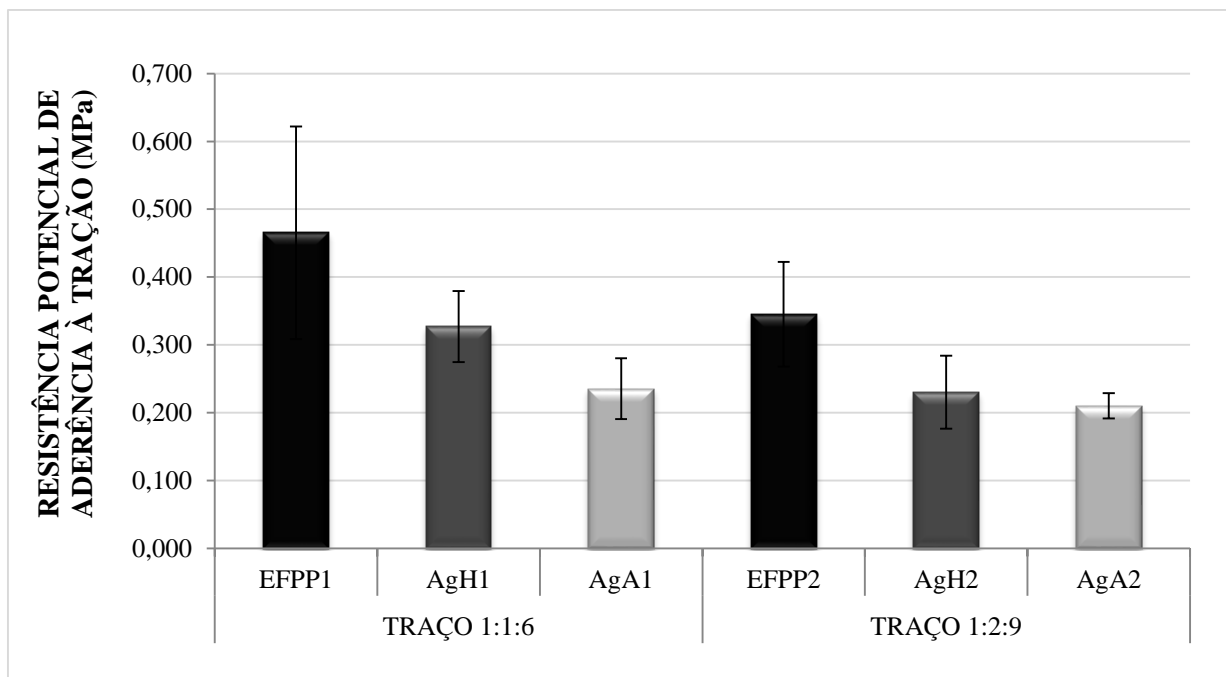


Figura 61: Resistência potencial de aderência à tração.

Todas as argamassas produzidas com EFP^P apresentaram resistência de aderência superiores aquelas produzidas com Ag^H e Ag^A.

Mecanicamente, a aderência potencial à tração está relacionada com os parâmetros de desempenho mecânico como descreve SILVA et al. (2008) e ROMAN et al. (1999), quais confirmam resultados obtidos.

Do ponto de vista da ligação entre as argamassas frescas e o substrato, CINCOTTO et al. (1995) e ROMAN et al. (1999) ainda relatam que aderência está significativamente influenciada pelas características e condições do substrato, porosidade, plasticidade, absorção de água, retenção de água, teor de ar incorporado. Isso porque, de acordo com CARASEK (2007) a argamassa no estado plástico entra em contato com a superfície absorvente do substrato, parte da água de amassamento, que contém em dissolução ou estado coloidal os componentes do aglomerante, penetra pelos poros e cavidade do substrato. No interior dos poros ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, e após algum tempo, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa a base. Com os resultados obtidos no ensaio de densidade de massa e no ter de ar incorporado nas argamassas mistas, observa-se que a EFP^P possui menor porosidade, aumentando seu desempenho mecânico e assim resistência de aderência.

Constatou-se também que à medida que aumentam a relação cal/cimento e EFP^P/cimento, diminui sensivelmente a resistência de aderência à tração. CARASEK (1996) detectou a influência da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão na resistência de aderência à tração, a qual atribuiu às variações nos teores de cimento das argamassas, o que fortalece os achados deste trabalho.

Segundo a NBR 13281/2005 (Anexo II – Tabela 7), todos os tratamentos dosados de EFP^P apresentaram resultados superiores a classificação das cales para ambas dosagens. A classificação de todas as argamassas produzidas encontra-se discriminadas na Tabela 4, Apêndice I.

6.8.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Os resultados obtidos para análise do módulo de elasticidade dinâmico (E_d), para matrizes de EFP^P, Ag^H e Ag^A e respectiva condição de cura, aos 28 dias, apresentam-se na Figura 62, a seguir.

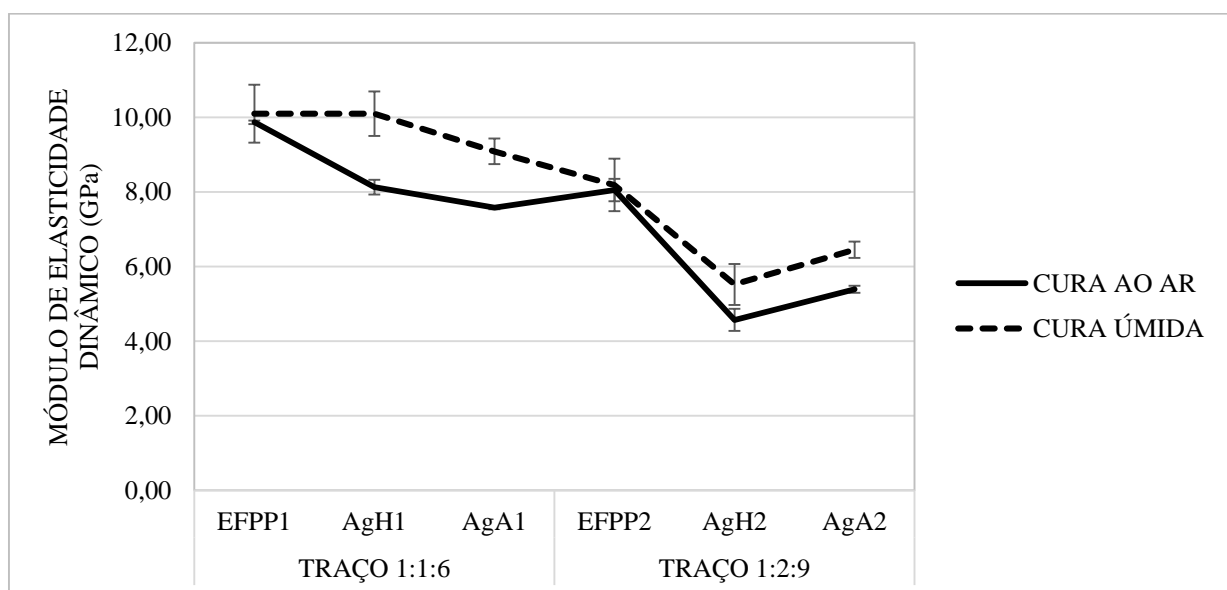


Figura 62: módulo de elasticidade dinâmico.

Do ponto de vista global, os traços compostos com a EFP^P apresentaram módulo de elasticidade superior, fato esperado devido ao desempenho mecânico à compressão, tração na flexão ligeiramente superiores quando comparados aos tratamentos Ag^A e Ag^H. Em concordância como os achados de SILVA et. al. (2008).

Considerando o traço 1:1:6, as matrizes EFP^P apresentam Ed idêntico às matrizes Ag^H, e superiores ao valor de Ed para Ag^A. Esse achado confirma os valores obtidos para densidade de massa no estado endurecido.

Observa-se também que o cimento exerce influência sobre o comportamento mecânico das matrizes, e conseqüentemente ao Ed. Todos os tratamentos em que a relação cimento/cales e cimento/EFP^P foi superior apresentaram superiores em relação ao módulo de elasticidade. Num estudo experimental CAMPITELI et al (2008) constatou que o tempo de propagação da onda ultra-sônica, e conseqüentemente o Ed é diretamente proporcional às relações cal/cimento e areia/aglomerante, com o aumento da compactidade do conjunto aglomerante e areia, aumenta a densidade de massa, devido, principalmente, ao aumento do teor de material pulverulento e diminuição do teor de água. Assim, a velocidade de propagação da onda ultra-sônica é maior e, conseqüentemente, o tempo de propagação da onda é menor, aumentando, assim, o módulo de elasticidade. Constatou ainda que fatores que interferem na resistência de compressão, na resistência à tração na flexão e na resistência de aderência à tração, influenciam também no resultado do módulo de elasticidade e que o tempo de propagação da onda ultra-sônica, através de um revestimento, pode ser utilizado para caracterizar as propriedades mecânicas da argamassa no estado endurecido.

GOMES (1997) desenvolveu uma pesquisa em que utilizou o tempo de propagação de onda ultrasônica para avaliar as condições de revestimentos de argamassas de cimento, cal e areia com relação às resistências mecânicas. Ensaio realizado pelo autor, em diversos tipos de revestimentos e em corpos-de-prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm, constataram que o tempo de propagação da onda em revestimentos com mau estado de conservação é maior do que naqueles em bom estado de conservação.

Capítulo 7

O objetivo geral da pesquisa foi analisar a viabilidade de um novo aglomerante, produzido a partir de resíduos, na mistura de argamassas mistas sem causar danos no desempenho das mesmas. Neste capítulo encontram-se as principais conclusões obtidas no programa experimental, além de sugestões para trabalhos futuros.

7 CONCLUSÃO

Os resultados alcançados permitiram avaliar que a utilização da escória processada (EFP^P), como matéria-prima de compostos cimentícios, consiste de alternativa tecnicamente adequada e viável para a redução dos impactos ambientais da siderurgia, com a produção de um aglomerante ecológico (Ag^E).

A EFP, no estado bruto, não apresenta características desejáveis para utilização como um aglomerante na produção de argamassas, pois apresenta grande porcentagem de materiais ferrosos em sua composição bem como o excesso de partículas grossas (maiores que 0,075 mm), o que evidencia assim a necessidade de um processo de beneficiamento antes de sua aplicação. O método adotado neste trabalho demonstrou-se adequado, produzindo materiais com propriedades semelhantes e dentro dos limites prescritos nas normas.

Quanto a caracterização dos aglomerantes, fisicamente, a EFP^P apresentou resultados superiores de teor de umidade, massa unitária e massa específica em relação às cales, em função da grande presença de finos no rejeito processado.

Quimicamente, a FRX permitiu avaliar que a EFP^P é composta basicamente por cálcio (Ca) e silício (Si) e magnésio (Mg), assim como a amostra de Ag^H, enquanto a Ag^A possui cálcio (Ca) em quase sua totalidade. Observa-se que os níveis de hidraulicidade da EFP^P e do Ag^H apresentam valores similares sendo considerados aglomerantes muito hidráulicos.

Mineralogicamente, observa-se pela análise de DRX que Ag^A apresenta a Calcita e Portlandita como os compostos cristalinos presentes em maior proporção. Na amostra de Ag^H observa-se a presença das estruturas de Portlandita, Quartzo e Brucita, relacionadas com a alta porcentagem de cálcio e magnésio presentes em sua composição, dada pela FRX. A EFP^P apresenta compostos capazes de se aglomerar, características evidenciadas pela presença considerável de silicatos e aluminatos de cálcio, que favorecem surgimento de propriedades cimentícias.

Pela microscopia eletrônica de varredura pode-se verificar o aspecto morfológico irregular das partículas da escória, observando um aspecto lamelar e anguloso. A cal hidráulica exibe um aspecto arredondado, enquanto a cal hidratada expõe um aspecto mais angular.

Em relação às exigências da NBR 7175/2003, a escória atende aos requisitos normativos. A EFP^P apresenta maior plasticidade do que o Ag^A, isso devido a sua superfície específica maior, produz argamassas mais leves e com menor atrito interno contribuindo para o escoamento das argamassas. O aglomerante Ag^A apresenta uma retenção de água de 89,23%, valor superior à EFP^P, que retém 82,20%, mas ambos apresentam valores superiores ao limite normativo de 80%. Pela análise do teor de incorporação de areia, verificou-se uma capacidade maior para o aglomerante Ag^A, com uma proporção de areia sobre aglomerante de até 2,1, enquanto a EFP^P apresentou esta capacidade até a proporção de 1,6. No ensaio de estabilidade, a argamassa produzida com EFP^P atendeu a condição especificada, não indicando aparecimento de protuberância ou pipocamento em seus corpos de prova, entretanto, o mesmo não aconteceu com a argamassa com Ag^A. Os resultados de finura de ambos os materiais apresentaram resultados positivos quanto aos limites normativos estabelecidos pela NBR 7175/2003.

Quanto às exigências da NP EN 459-1/2011, a resistência à compressão para ambas as argamassas, EFP^P e Ag^H, expressaram resultados semelhantes e superiores ao limite normativo. No ensaio de finura o resultado obtido para o EFP^P obedeceu ao limite normativo enquanto o aglomerante Ag^H, apesar de atender a norma em relação a porcentagem de material retido na peneira n° 70, o material retido na peneira n° 170 foi de 17,55%, superior ao limite normativo de 15%. Para a análise de expansibilidade a EFP^P e Ag^H, apresentaram resultados favoráveis, não indicando presença de protuberância ou pipocamento em suas observações. Assim como os resultados para o ensaio de penetração não apresentaram variações significativas, estando dentro do estabelecidos pela norma. Na verificação do teor de ar incorporado em argamassas padrões, a EFP^P apresentou valor superior ao Ag^H. Em relação a determinação do tempo de pega, ambos os aglomerantes, EFP^P e Ag^H, manifestaram resultados desfavoráveis quando comparado com a norma, alcançando valores superiores a 15 horas para o fim do tempo de pega. Fato este, que de acordo com COUTINHO (1988), um aglomerante considerado muito hidráulico possui um tempo de pega de até 96 horas.

Pode se concluir que as argamassas no estado fresco produzidas com EFP^P, Ag^A e Ag^H apresentaram a mesma trabalhabilidade, com um valor de espalhamento estipulado em 260 mm. Embora a EFP^P tenha apresentado menor teor de água para produção da pasta de consistência

normal, produziu resultados semelhantes às argamassas produzidas com aglomerantes convencionais. Para os resultados de densidade de massa, as argamassas com EFP^P apresentam um valor superior que as argamassas naturais, tal fato decorrido, provavelmente da constituição química dos elementos que compõem os diferentes aglomerantes testados. Os teores de ar incorporado das argamassas mistas de EFP^P e Ag^H produzidas foram praticamente idênticos para ambos os traços.

Pode se concluir quanto às propriedades das argamassas no estado endurecido, nos ensaios de densidade de massa no estado endurecido que as argamassas EFP^P são mais densas do que as convencionais, devido à característica dos elementos que compõem esse material. Para todos os tratamentos, matriz EFP^P apresentou menor índice de capilaridade, justificado por uma estrutura com menos poros formada provavelmente pela contribuição dos finos inertes deste material. No ensaio de resistência à compressão das argamassas mistas, os traços compostos com o EFP^P tiveram um desempenho mecânico ligeiramente maior quando comparada aos traços naturais, provavelmente em função do melhor envolvimento dos grãos pelos produtos de hidratação do cimento e do EFP^P, dada granulometria fina da escória processada. Aparentemente, o tipo de cura não interferiu significativamente no desempenho das matrizes à compressão, embora EFPP1 e AgH2 tenham apresentado maiores desvios. Em relação a resistência à tração na flexão, as argamassas produzidas com EFP^P desenvolveram mais resistência em ambos os traços. O tipo de cura interferiu nos valores obtidos para a resistência a tração na flexão. Esse achado relaciona-se às propriedades hidráulicas da Ag^H e EFP^P. Avaliando a resistência à tração na compressão diametral, os traços compostos com a EFP^P apresentaram melhor comportamento quando comparados aos tratamentos Ag^A e Ag^H. Exceto para o traço 1:1:6, onde os tratamentos EFPP1 e AgH1 são idênticos. Nos ensaios de resistência potencial de aderência à tração das argamassas produzidas, as argamassas produzidas com a EFP^P apresentaram resultados superiores aos daquelas produzidas com as cales e à medida que aumentam a relação cal/cimento e EFP^P/cimento, diminui sensivelmente a resistência de aderência à tração, influência direta na resistência à tração na flexão e da resistência à compressão. E, analisando o módulo de elasticidade dinâmico, as argamassas com o aglomerante EFP^P apresentam os maiores valores, exceto em relação ao traço 1:1:6, na qual as argamassas de EFP^P e Ag^H, apresentam valores idênticos.

Capítulo 8

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, B. **Materiais de construção I**. Braga, Portugal: Apontamentos, Universidade do Minho, 2007.

ALVAREZ, J.; SEQUEIRA, C.; COSTA, M. Ensinamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In 1º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, APFAC, 2005, Lisboa.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimento de argamassas**. São Paulo, 2005. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6471 – Cal virgem e cal hidratada - Retirada e preparação de amostra - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6473 – Cal virgem e cal hidratada - Análise química. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7175 – Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7200 – Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas–Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7222 – Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento — Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9205 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da estabilidade. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9206 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da plasticidade. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9207 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da capacidade de incorporação de areia no plastômetro de Voss. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9289 – Cal hidrata para argamassas - Determinação da finura. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9290 – Cal hidrata para argamassas - Determinação de retenção de água - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9939 – Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11578 – Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13529 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas-Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13277 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13280 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14399 – Cal hidratada para argamassas - Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15258 – Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15259 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 23 – Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NM 58 – Concreto endurecido-Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2003.

BAÍÁ, L. L.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras.** 1º ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000. 82p.

BASTOS, P.K.X. **Retração e Desenvolvimento de Propriedades Mecânicas de Argamassas Mistas de Revestimento.** 172p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: LTC S.A., p. 1-80, 1979.

BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção.** Rio de Janeiro: LTC S.A., 5ª Ed, 2000.

BOTELHO, P. C. Argamassas tradicionais em suportes de alvenaria antiga: comportamento em termos de aderência e durabilidade. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2003.

BRITISH STANDARD. BS1881-203. Testing Concrete - Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, 1986.

CALHAU, E. L. Argamassas de revestimento com aditivo incorporador de ar – propriedades e recomendações. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2000.

CAMPITELI, V. C.; SILVA, N. G. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.** v. 8, n. 4, p. 21-35, 2008.

CARASEK, H. Aderência de argamassa à base de cimento portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV. 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2001. p. 43-67.

CARASEK, H. Patologia das argamassas de revestimento. In: Isaia, G.C. (Org.). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2007, v. 1, p. 1-11.

CARDOSO, F. A. Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARNEIRO, A. M. P. Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CARNEIRO, J. Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino. Tese (Mestrado em Engenharia Civil – Perfil Construção) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

CARVALHO JR., A. N.; BRANDÃO, P. R. G.; FREITAS, J. M. C. Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 518-529.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CAVACO, L. G. **Técnicas de aplicação de argamassas em edifícios antigos. Influência no desempenho.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H.C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** Boletim 68, IPT. São Paulo, 1995. p.118.

CINCOTTO, M. A; RAGO, F. Influência do tipo da cal hidratada nas propriedades de pastas cimento-cal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 401p., v.1, 1988.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Vol. 1, 1997

COUTINHO, J. S. **Materiais de Construção 2, 1ª Parte - Ligantes e caldas.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

COZZA, E. Cal à prova. **Revista Técnica.** São Paulo, 1997.

DIPPENAAR R. Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags). **Ironmaking Steelmaking**, v.32 (1) p.35–46, 2005.

ELERT, K.; NAVARRO, C. R.; PARDO E. S.; HALSEN, E. CAZALLA, O. Lime mortars for the conservation of historic buildings. **Studies in Conservation**, vol. 47, p. 62-75, 2002.

FARIA, P. R. **Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2004.

FARIA, P.; FONTES, T; SILVA, V. Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico. In: CONFRESSO CONTRUÇÃO 2012, Coimbra, Portugal. **Anais...** Coimbra, 2012.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimento: estudos e procedimentos de execução.** São Paulo: Editora PINI, 2003. p.223.

GOMES, A. M. A utilização da ultrasonografia na avaliação das propriedades mecânicas dos revestimentos de paredes através de ensaios “in situ”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II. 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997. p. 445–456.

GUERREIRO, C. M. **Estudo e caracterização de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulica e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos.** Tese (Mestrado) – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

HANLEY, R; PAVÍA, S. A study of the workability of natural hydraulic lime mortars and its influence on strength. **Materials and Structures.** vol. 41, p. 373-381, 2008.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IaBr). **Relatório de Sustentabilidade 2014.** Rio de Janeiro, 2013, 49p.

Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria. Lisboa: IPQ, 2002. NP EN 459-1/ 2011.

Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Building lime. Test methods. Lisboa: IPQ, 2002. NP EN 459-2: 2001.

Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Methods of testing cement. Determination of strength. Lisboa: IPQ, 1994. NP EN 196-1/1994

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2ª Edição. São Paulo: Editora IBRACON. 2 volumes, 2010.

JALALI, S., TORRALBA, F. P.; COELHO, A. Z. G. **A cal na construção.** Braga: Ed. TecMinho, Universidade do Minho, 2009.

JOHN, V. M. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 47-63.

KANAGAWA A, KUWAYAMA T. The improvement of soft clayey soil utilizing reducing slag produced from electric arc furnace. **Denki Seiko**, v.68 (4):261-7, 1997.

LANAS, J.; PÉREZ BERNAL, J. L.; BELLO, M. A.; ALVAREZ GALINDO, J.I. – Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. **Cement and Concrete Research** v. 34, p. 2191-2201, 2004.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e de demolição.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MACIEL, L. L.; BARROS, M M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externa e tetos.** São Paulo: EPUSP, 1998.

MANSO, J. M.; LOSAÑEZ, M.; POLANCO, J. A.; GONZALEZ, J. J. Ladle Furnace Slag in Construction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.17, p.513-518, 2005.

MANSO, J. M.; RODRIGUEZ, A.; ARAGÓN, A.; GONZALEZ, J. J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. **Construction and Building Materials**, v.25, 3508-3519, 2011.

MARGALHA, M. **Argamassas - Documento de apoio às aulas de Conservação e Recuperação do Património.** Universidade de Évora, Évora, Portugal, 2011.

MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVÓN, E.; DÍAZ N. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars **Construction and Building Materials**, v.49, 384-392, 2013.

MASUERO, A. B. Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização com substituição ao cimento. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MIRANDA, L. M. C. C. **Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2009.

ORÚS, F. **Materiales de Construcción.** Ed. Dossat, S.A., Madrid, 7ª Edição, 1977.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

PINTO, A. P. F.; GOMES, A. Degradação e Conservação de Materiais I. Argamassas. In: **1º Curso de formação avançada em Recuperação e Conservação do Património Construído.** Lisboa, DECivil, Instituto Superior Técnico – IST, 2007.

PRIETO M.I.; COBO A.; RODRÍGUEZ A.; CALDERÓN V. Corrosion behavior of reinforcement bars embedded in mortar specimens containing ladle furnace slag in partial substitution of aggregate and cement. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 188-194, 2013.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas.** Boletim Técnico n. 233. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX. RILEM Recommendations MR 1-21: Testing methods of mortars and rendering, 1 st. ed. France, RILEM, 1982

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. D.S., STARLING, T. **Materiais de Construção Civil.** Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2002. 102p.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, p. 99.102, 2006.

RODRIGUES, D. A. **Influência dos métodos de ensaio nas características de argamassas de cal aérea e hidráulica.** Lisboa, 2010. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

ROCHA, B. P. **Estudo da viabilidade da reutilização da escória do refino secundário no forno elétrico a arco.** Dissertação (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ROMAN, H.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. de. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: UFSC, 83 p., 1999.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico calcária. São Paulo**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1984.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**. Boletim Técnico. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 26, 1986.

SANTIN, E. Tijolo por tijolo, num desenho mágico. **Revista Técnica**. São Paulo, v. 4, n. 23, p. 18-24, 1996.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SEQUEIRA, A. C.; FRADE, D.; GONÇALVES, P. Cal hidráulica – Um ligante para a reabilitação. In: 2.º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO. **Anais...**Lisboa, 2007.

SEQUEIRA, C.; SANTOS A. S.; FRADE D.; GONÇALVES P. Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação. In: 4º CONGRESSO PORTUGUÊS DE ARGAMASSAS, APFAC, Auditório da Reitoria da Universidade de Coimbra, Coimbra (CD), 2012.

SETIÉN J.; HERNÁNDEZ D.; GONZÁLEZ, J.J. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. **Construction and Building Materials**, Espanha, v. 23, p. 1788–1794, 2009.

SHI, C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. **Cement and Concrete Research**, Burlington, Ontario, Canadá, v. 32, p. 459-462, 2002.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, Brasil, v. 8, p. 21-35, 2008.

SSTC - STEEL SLAG TECHNICAL COMMITTEE. **Steel slag aggregates for hot-mix asphalt concrete**. Ontario Ministry of Transportation, Pavement Advisory Committee. Ontario, Canadá, 1996.

TRISTÃO, F. A.; CALDERÓN, B. R. S.; REMBISKI, F. D. Utilização das conchas de mexilhão na fabricação da cal para produção de argamassas históricas. In: V ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADE SUSTENTÁVEIS. Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

VEIGA, M. R. **Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Lisboa, LNEC, 1997.

VEIGA, M. R.; CARVALHO, F. R. Argamassas de revestimento na reabilitação do património urbano. In: 2.º ENCORE, ENCONTRO SOBRE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS, COMUNICAÇÕES. **Anais...** Vol. I p. 195-206. Lisboa, LNEC, 1994

YAMAN, I. O.; INCI, G.; YESILLER, N.; AKTAN, H. M. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. **ACI Materials Journal**, p. 450-457, 2001.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridades na análise de argamassas industrializadas. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS. **Anais...** p. 53-62, Goiânia, 1995.

9 APÊNDICE

Apêndice I: Classificação das argamassas mistas produzidas obtida segundo prescrições normativas estabelecidas à ABNT NBR 13281/2005.

Tabela1: Classificação das argamassas produzidas no requisito coeficiente de capilaridade

Traço	Argamassa	Classe
1:1:6	<i>AgA1-A</i>	C6
1:1:6	<i>AgA1-U</i>	C4
1:1:6	<i>AgH1-A</i>	C6
1:1:6	<i>AgH1-U</i>	C5
1:1:6	<i>EFPP1-A</i>	C6
1:1:6	<i>EFPP 1-U</i>	C4
1:2:9	<i>AgA2-A</i>	C6
1:2:9	<i>AgA2-U</i>	C6
1:2:9	<i>AgH2-A</i>	C6
1:2:9	<i>AgH2-U</i>	C6
1:2:9	<i>EFPP 2-A</i>	C6
1:2:9	<i>EFPP 2-U</i>	C5

Tabela 2: Classificação das argamassas produzidas no requisito resistência à compressão

Traço	Argamassa	Resistencia à Compressão	Classe
1:1:6	<i>AgA1-A</i>	2,5 a 4,5 MPa	P3
1:1:6	<i>AgA1-U</i>	2,5 a 4,5 MPa	P3
1:1:6	<i>AgH1-A</i>	2,5 a 4,5 MPa	P3
1:1:6	<i>AgH1-U</i>	2,5 a 4,5 MPa	P3
1:1:6	<i>EFPP1-A</i>	4 a 6 MPa	P4
1:1:6	<i>EFPP1-U</i>	4 a 6 MPa	P4
1:2:9	<i>AgA2-A</i>	≤ 2 MPa	P1
1:2:9	<i>AgA2-U</i>	≤ 2 MPa	P1
1:2:9	<i>AgH2-A</i>	≤ 2 MPa	P1
1:2:9	<i>AgH2-U</i>	≤ 2 MPa	P1
1:2:9	<i>EFPP2-A</i>	1,5 a 3 MPa	P2

1:2:9	<i>EFPP2-U</i>	1,5 a 3 MPa	P2
--------------	----------------	-------------	-----------

Tabela 3: Classificação das argamassas produzidas no requisito resistência à tração na flexão

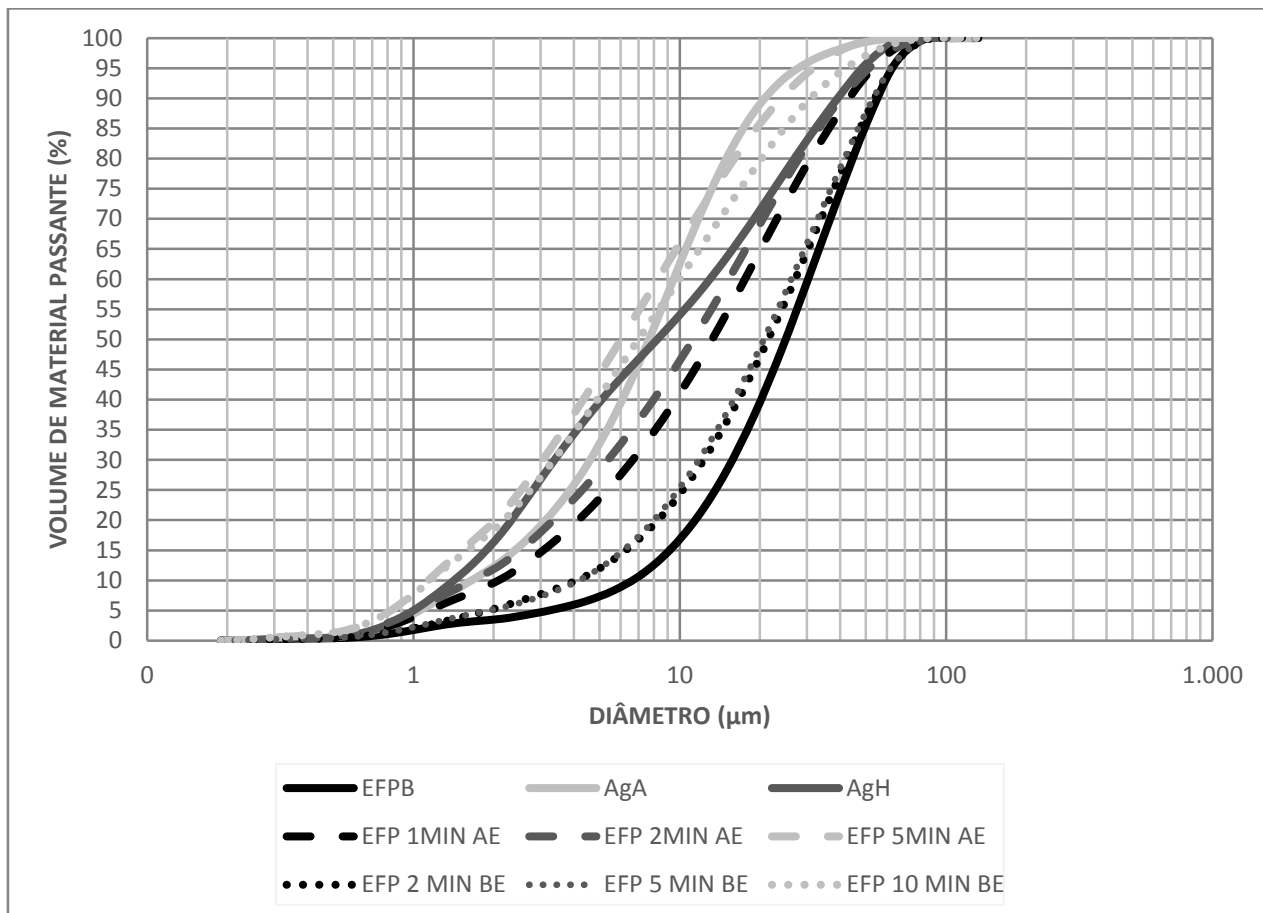
Traço	Argamassa	Resistencia à tração	Classe
1:1:6	<i>AgA1-A</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1
1:1:6	<i>AgA1-U</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1
1:1:6	<i>AgH1-A</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1
1:1:6	<i>AgH1-U</i>	1 a 2 MPa	R2
1:1:6	<i>EFPP1-A</i>	1,5 a 2,7 MPa	R3
1:1:6	<i>EFPP1-U</i>	1 a 2 MPa	R2
1:2:9	<i>AgA2-A</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1
1:2:9	<i>AgA2-U</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1
1:2:9	<i>AgH2-A</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1
1:2:9	<i>AgH2-U</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1
1:2:9	<i>EFPP2-A</i>	1 a 2 MPa	R2
1:2:9	<i>EFPP2-U</i>	$\leq 1,5$ MPa	R1

Tabela 4: Classificação das argamassas produzidas no requisito resistência potencial de aderência à tração

Traço	Argamassa	Resistencia à Compressão	Classe
1:1:6	<i>AgA1</i>	$\geq 0,2$ MPa	A2
1:1:6	<i>AgH1</i>	$\geq 0,3$ MPa	A3
1:1:6	<i>EFPP1</i>	$\geq 0,3$ MPa	A3
1:2:9	<i>AgA2</i>	$\geq 0,2$ MPa	A2
1:2:9	<i>AgH2</i>	$\geq 0,2$ MPa	A2
1:2:9	<i>EFPP2</i>	$\geq 0,3$ MPa	A3

10 ANEXO

Anexo I: Granulometria das partículas de cada uma destas amostras processadas nos moinhos de alta eficiência (AE) e de baixa eficiência (BE), através do analisador de partículas por difração laser.



Anexo II: Classificação das argamassas conforme as características e propriedades que apresentam (NBR 13281/2005).

TABELA 1: Resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Método de ensaio
P1	$\leq 2,0$	NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9	
P6	$\geq 8,0$	

TABELA 2: Densidade de massa aparente no estado endurecido

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)	Método de ensaio
M1	≤ 1200	NBR 13280
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 2000	
M6	≥ 1800	

TABELA 3: Resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	≥ 3,5	

TABELA 4: Coeficiente de Capilaridade

Classe	Coeficiente de Capilaridade (g/dm².min^{1/2})	Método de ensaio
C1	≤ 1,5	NBR 15259
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 112,0	
C6	≥ 10	

TABELA 5: Densidade de massa no estado fresco

Classe	Densidade de massa no estado	Método de ensaio
	fresco (kg/m ³)	
D1	≤ 1400	NBR 13278
D2	1200 a 1600	
D3	1400 a 1800	
D4	1600 a 2000	
D5	1800 a 2200	
D6	≥ 2000	

TABELA 6: Retenção de água

Classe	Retenção de água (%)	Método de ensaio
U1	≤ 78	NBR 13277
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

TABELA 7: Resistência potencial de aderência à tração

Classe	Resistência potencial de aderência à	Método de ensaio
	tração (MPa)	
A1	≤ 0,20	NBR 15258
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	