

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**TRATAMENTO TÉRMICO DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS: APLICAÇÃO COMO POZOLANA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

JULIANA GAVINI ULIANA

Vitória
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JULIANA GAVINI ULIANA

**TRATAMENTO TÉRMICO DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS: APLICAÇÃO COMO POZOLANA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Engenharia Civil do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil, na área de
concentração Construção Civil.

Vitória
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

U39t Uliana, Juliana Gavini, 1986-
Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais : aplicação como pozolana em matrizes cimentícias / Juliana Gavini Uliana. – 2014.
214 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Coorientadores: Geilma Lima Vieira, Evaristo Nunes Filho.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Rochas ornamentais. 2. Mármore. 3. Granito. 4. Resíduos. 5. Materiais - Tratamento térmico. 6. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 7. Sustentabilidade. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Vieira, Geilma Lima. III. Nunes Filho, Evaristo. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. V. Título.

CDU: 624

JULIANA GAVINI ULIANA

**TRATAMENTO TÉRMICO DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS: APLICAÇÃO COMO POZOLANA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área de Concentração Construção Civil, aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Vitória, 25 de fevereiro de 2014.

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor Orientador

Prof. Dra. Geilma Lima Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Professora Co-orientadora

Prof. Dr. Evaristo Nunes Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor Co-orientador

Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro interno da banca examinadora

Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães
Universidade Federal de Minas Gerais
Membro externo da banca examinadora

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é o resultado de um trabalho coletivo. Muitos participaram e contribuíram efetivamente, o que me faz iniciar esta dissertação tecendo agradecimentos.

João Luiz Calmon, obrigada! Acolheu-me como orientanda e guiou-me nesta jornada com histórias de vida e conhecimento técnico inesgotáveis. Com todas as longas conversas e orientações construímos laços e crescemos em sabedoria. Serei sempre grata.

Agradeço à professora Geilma por sua atenção e incentivo, auxiliando nas tomadas de decisão e fornecendo sugestões valiosas para a pesquisa e para vida.

Ao professor Avancini, por estar sempre por perto com inúmeras contribuições positivas. É para mim, exemplo de força e dedicação.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da UFES. Agradeço pelo carinho, empenho e boa vontade no apoio para a realização de tantos ensaios. Em especial, agradeço a Carlos Izoton, técnico dedicado e uma pessoa excepcional, que com sua humildade e experiência foi fundamental para que eu pudesse realizar este trabalho.

Ao professor Evaristo pelo apoio no delineamento inicial e suas importantíssimas contribuições, abrindo as portas do Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos (LMC/LPT) do Centro de Ciências Exatas (CCE) da UFES onde pude realizar grande parte da pesquisa com o apoio do professor Alfredo e principalmente do Gustavo, que me deu todo o suporte necessário e ensinou-me pacientemente a operar os equipamentos. Obrigada!

Aos colaboradores do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais (LCSM) do Centro Tecnológico da UFES, do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Análises de Petróleos (LabPetro) do CCE da UFES e do Laboratório Químico e de Monitoramento Ambiental da empresa Vale, que contribuíram com competência e dedicação na realização de ensaios para caracterização dos materiais.

Aos professores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES, pelo conhecimento transmitido e pela disposição.

Aos professores José Roberto e Lúcio Flávio do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) que disponibilizaram seu tempo e a estrutura do laboratório de tratamentos térmicos para que fosse possível executar a primeira etapa da pesquisa.

Ao Group Vitória Stone, que disponibilizou o resíduo utilizado no trabalho e gentilmente, abriu as portas da serraria de rochas ornamentais para que fosse possível vivenciar e aprender sobre o processo.

À CAPES pelo apoio financeiro em parte da pesquisa e à UFES pela estrutura disponibilizada.

É preciso agradecer também às pessoas queridas e amigas, que são fundamentais no dia-a-dia da pesquisa, diante de tantas dúvidas, expectativas e dificuldades.

Agradeço imensamente ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI). Em especial ao Ewandro Petrocchi, gerente-pai, que sempre acreditou na profissional que sou e tanto me incentivou a realizar o mestrado. Também ao Giovani Gujansky, por compreender-me nos momentos mais críticos e ser meu gerente-irmão.

A todos os meus alunos, agradeço de coração. Compreenderam as preocupações e tensões e me incentivaram a estudar cada dia mais. Em especial, à Jéssica e Izabel, orientandas que quiseram pesquisar sobre o tema e participaram ativamente de parte dos ensaios sempre com muita dedicação e alegria.

Meus amigos tão especiais do mestrado: Rubielly, Ricardo, Aline Sauer, Lorena, Vanessa, Yustane... Obrigada pelos inúmeros momentos e por dividirem comigo suas experiências, conhecimento e angústias. Agradeço em especial à Ruby, por suas risadas restauradoras e sua amizade incondicional.

Minhas amigas de profissão: Joice, Regiane, Aline Falcão, Ericka, Andreia, Aline Pignaton, Poline... Vocês são incríveis! Agradeço por estarem ao meu lado, sempre incentivando e ajudando. A nossa parceria, firmada na UFES ou no SENAI, é um fato e será sempre muito importante para mim. Especialmente, agradeço à Joice, amiga que caminhou ao meu lado nessa jornada. Aprendemos juntas e crescemos muito nesses últimos tempos. Nossos longos dias de produção só fortaleceram nossa amizade e companheirismo, e sem isso não teria sido possível. Ao Thiago, agradeço pelo incentivo de sempre e principalmente por disponibilizar a sua (minha) mesa e a esposa Joice para as infinitas horas de trabalho.

Minhas amigas da vida toda: Maryelenn, Danusa, Rafaela, Stefania, Mônica... Obrigada por estarem sempre dispostas a ouvir, aconselhar, rir e chorar. A leveza da nossa amizade é o que sustenta na jornada.

Agradeço a Geisa, Lucio e Luciana por todo o carinho e tantas palavras de conforto e incentivo. E ao João Paulo, por me apoiar na preparação dos materiais e principalmente por ter estado ao meu lado.

Agradeço a minha amada família, por ser meu porto-seguro. Elos tão fortes, que nos erguem até mesmo nos momentos mais difíceis. Vovó com o seu colo e sábios conselhos, tios e primos com animação e sorrisos, irmão e cunhada com o presente mais lindo que eu poderia ganhar: meu sobrinho/afilhado Cauã e principalmente, papai e mamãe com o amor e apoio incondicionais.

Obrigada a todos que, de uma forma geral, estiveram por perto e torceram para que eu conseguisse chegar até aqui, com suas piadas, abraços e palavras de motivação.

Finalmente, agradeço a Deus, o que não demanda qualquer explicação ou justificativa.

*“De que valeria a obstinação do saber
se ele assegurasse apenas
a aquisição dos conhecimentos e não,
de certa maneira, e tanto quanto possível
o descaminho daquele que conhece?”*

*Existem momentos na vida onde a questão de
saber se se pode pensar diferente do que se pensa,
e perceber diferentemente do que se vê,
é indispensável para continuar a olhar ou a refletir.”*

Michel Foucault (1987)

RESUMO

ULIANA, Juliana Gavini. **TRATAMENTO TÉRMICO DA LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS: APLICAÇÃO COMO POZOLANA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**. 2014. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

São inúmeras as pesquisas fundamentadas nas possibilidades de utilização de subprodutos industriais como materiais alternativos de construção, objetivando assim o desenvolvimento sustentável na construção civil e em outros setores da indústria.

O Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial de rochas ornamentais, de forma que este setor contribui de forma positiva para o desenvolvimento econômico do país. Em contrapartida, o processo de beneficiamento de rochas ornamentais gera um volume significativo de resíduo, principalmente na etapa do beneficiamento, com a transformação dos blocos em chapas. O desdobramento dos blocos de rocha pode ser feito usando teares tradicionais, (que usam lâminas metálicas regadas por uma polpa abrasiva composta de água, cal, pó de rocha e granalha de aço) ou usando teares multifios (onde fios diamantados cortam os blocos com aspensão de água). A lama gerada nestes dois processos de desdobramento é separada em duas categorias, tais como resíduo com granalha e resíduo sem granalha de aço, sendo somado a este último o resíduo de polimento que são destinados a aterros, demandando métodos de reciclagem dado seu impacto ambiental.

Esta pesquisa trata da aplicação de tratamento térmico à lama do beneficiamento de rochas ornamentais sob sua condição com granalha (LBRO G) e sem granalha (LBRO D), objetivando a produção de material pozolânico, como mais uma alternativa para reinserção deste resíduo na cadeia produtiva. Para isto, foram caracterizados e submetidos aos testes para identificação dos métodos necessários para obtenção de material vítreo, realizado por tratamento térmico e moagem.

Estes materiais produzidos foram também caracterizados e o seu comportamento mecânico foi avaliado em argamassas com substituição de material cimento em teores de 5, 10, 15 e 20% em volume para verificação da atividade pozolânica, comparando também com os resultados para argamassas produzidas com os resíduos sem tratamento térmico.

Pode-se concluir que os valores encontrados de resistência à compressão axial das argamassas estudadas foram promissores, tendo sido possível verificar que após tratamento térmico, o resíduo tratado se apresentou como um material com características de pozolanicidade.

Palavras-chave: tratamento térmico, resíduo de rochas ornamentais, mármore e granito, material cimentício, atividade pozolânica, propriedades mecânicas, microscopia eletrônica de varredura.

ABSTRACT

There are many researches grounded in the possibility of the use of industrial by-products as an alternative building materials which promotes the sustainable development of civil construction and other sectors of the industry.

Brazil has a highlighted position worldwide regarding the ornamental rock production, such that this sector contributes in a positive manner to the development of the country. However, the processes involved in the ornamental rock fabrication generate a significant volume of waste, especially in the stage of processing, with the transformation of rock blocks in plates. The sawing of the rock blocks can be done using traditional looms (using metal blades watered by an abrasive pulp composed of water, lime, rock dust and steel grit) or using multiwire looms (where diamond coated wires cut the blocks with water spray). The waste sludge generated in those two different process is separated into two categories, residue with steel shot and residue without steel shot, being to the latter one added the polishing residue which are destined to landfills, requiring recycling methods due their environmental impact.

This research aims to verify the application of heat treating procedure on the slurry residue from the processing of ornamental rocks in their condition with steel grit (LBRO G) and without steel grit (LBRO D), to produce pozzolanic material, as an alternative to the reinsertion of this waste in the supply chain. To this end, the wastes are characterized and subjected to tests to identify the necessary methods to obtaining glassy material, created by heat treatment and grinding.

These produced materials were characterized and their mechanical behavior were evaluated in mortars with cement replacement in amounts of 5, 10, 15 and 20% by volume for verification of pozzolanic activity, comparing the results with mortars produced with waste without heat treatment.

It can be concluded that the results of compressive strength for the studied mortars were promising, which was possible to verify that after heat treatment, the residue treated presented pozzolanic characteristics.

Keywords: heat treatment, residue of ornamental rocks, marble and granite, cementitious material, pozzolanic activity, mechanical properties, scanning electron microscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Difratoograma de raios X obtido para amostra de terra diatomácea.	37
Figura 2: Difratoograma de raios X obtido para uma amostra de sílica ativa.	38
Figura 3: Difratoograma de raios X obtido para uma amostra de metacaulim.	38
Figura 4: Principais estados produtores de rochas ornamentais no Brasil.	43
Figura 5: Esquema do processo produtivo típico de rochas ornamentais.	43
Figura 6: (a) estrutura do tear tradicional e (b) detalhe das lâminas durante o corte.	44
Figura 7: Detalhe da aspersão de polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional.	45
Figura 8: Hidrociclone - equipamento que recircula a lama no sistema.	46
Figura 9: Tear multifios iniciando o processo de corte.	46
Figura 10: (a) Polimento de chapa e (b) detalhe de sapatas já utilizadas e suporte para encaixe na politriz.	48
Figura 11: Quadro descritivo do resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais.	49
Figura 12: Esquema de descarte e recirculação do lbro g em um tear tradicional. ...	49
Figura 13: Poço de coleta e destinação de (a) LBRO G e (b) LBRO D para os tanques de decantação.	50
Figura 14: Silos de decantação ao lado do filtro prensa e área de estogagem.	50
Figura 15: Difratoograma de raios X do resíduo de granito fundido a 1500° c.	54
Figura 16: Microscopia do resíduo de rochas ornamentais.	58
Figura 17: Esquemas bidimensionais da estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e (b) dióxido de silício não-cristalino.	61
Figura 18: Funções relativas dos óxidos nos vidros.	63
Figura 19: Gráfico do comportamento volume específico x temperatura no processo de solidificação para materiais vítreos e cristalinos.	63
Figura 20: Gráficos de viscosidade x temperatura para os tipos de vidro.	64
Figura 21: Desenvolvimento do índice de atividade pozolânica segundo a norma ASTM C311.	67
Figura 22: Microestrutura do cimento produzido com vidro verde aos (a) 7 dias e aos (b) 28 dias.	69
Figura 23: Programa experimental – esquema geral.	74
Figura 24: Programa experimental – fluxograma da pesquisa.	75
Figura 25: Programa experimental – ensaios nas argamassas.	80
Figura 26: Programa experimental – quadro geral.	81
Figura 27: Programa experimental – caracterização dos resíduos.	82
Figura 28: Ensaio de massa específica do resíduo.	83

Figura 29: Ensaio de massa unitária do resíduo.	84
Figura 30: Ensaio de finura por meio da (a) peneira nº 200, (b) peneira nº 325 e pelo (b) método da permeabilidade de Blaine.	84
Figura 31: Ensaio de difração de raios X - (a) difratômetro e (b) computador com software.	86
Figura 32: Microscópio eletrônico de varredura.	87
Figura 33: Forno tipo mufla utilizado na pesquisa.	90
Figura 34: Forno tubular adaptado (a) parte de controle separado da caixa do forno e (b) processo de retirada da amostra.	91
Figura 35: Cadinho de grafite com tinta refratária.	92
Figura 36: Aparato experimental para o ensaio de pozolanicidade pelo método de Lúxan.	93
Figura 37: Misturador planetário utilizado para produção das argamassas.	95
Figura 38: Ensaio no estado fresco (a) índice de consistência na mesa e (b) massa específica.	96
Figura 39: Preparação dos corpos de prova (a) 24 horas em câmara úmida e (b) cura imersa.	96
Figura 40: Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.	97
Figura 41: Prensa universal adotada para realização dos ensaios de resistência à compressão.	98
Figura 42: Curva de distribuição granulométrica do CP V ARI utilizado na pesquisa.	102
Figura 43: Processo de preparação dos resíduos para aplicação na pesquisa.	103
Figura 44: Processo de secagem dos resíduos.	103
Figura 45: Resíduos utilizados na pesquisa (a) LBRO G e (b) LBRO D.	104
Figura 46: Curva de distribuição granulométrica dos resíduos (a) LBRO G e (b) LBRO D.	106
Figura 47: Difratogramas de raios X dos resíduos LBRO G e LBRO D.	107
Figura 48: Micrografias com ampliação de 1000 x do (a) LBRO G e (b) LBRO D.	108
Figura 49: Pontos e região analisados no EDS para o LBRO G.	108
Figura 50: Pontos e região analisados no EDS para o LBRO D.	109
Figura 51: Simulação computacional de aquecimento utilizando a composição química do LBRO G.	110
Figura 52: Simulação computacional de aquecimento utilizando a composição química do LBRO D.	110
Figura 53: Simulação computacional da viscosidade da escória proveniente da fusão do (a) LBRO G e (b) LBRO D.	111
Figura 54: Curvas de TG e TGA de amostra de LBRO G.	113
Figura 55: Curvas de TG e TGA de amostra de LBRO D.	113

Figura 56: Resultado do aquecimento do LBRO D no TTpilotoA.	117
Figura 57: Resultado do aquecimento do LBRO D no TTpilotoB.	117
Figura 58: Difratoograma de raios X da amostra de lbro d após o ttpilotob.	118
Figura 59: Difratoograma de raios X do LBRO D sem tratamento térmico.	118
Figura 60: Retirada do cadinho do forno tubular, (a) rotação do cadinho, (b) impossibilidade de verter e (c) resfriamento da amostra diretamente no cadinho em água.	120
Figura 61: Difratoograma de raios X do LBRO Gf.	122
Figura 62: Difratoograma de raios X do LBRO Df.	122
Figura 63: Difratoograma de raios X da amostra de LBRO D após o TTII.	123
Figura 64: Difratoograma de raios X da amostra de LBRO D após o TTIII.	123
Figura 65: Difratoograma de raios X da amostra de LBRO D após o TTIV.	124
Figura 66: Difratoograma de raios X da amostra de LBRO G após o TTIV.	124
Figura 67: TTselecionado aplicado aos resíduos LBRO G e LBRO D, (a) início e (b) término.	127
Figura 68: Moinho de argolas utilizado na moagem dos resíduos após fusão.	128
Figura 69: Micrografias com aumento de 2000x do (a) cimento CP V ARI, do (b) LBRO Gf e do (c) LBRO Df.	130
Figura 70: Curvas de distribuição granulométrica do (a) cimento CP V ARI, do (b) LBRO Gf e do (c) LBRO Df.	132
Figura 71: Resultados da resistência à compressão axial média para identificação do IAP-cim.	133
Figura 72: Índice de consistência das argamassas.	135
Figura 73: Massa específica das argamassas.	136
Figura 74: Resistência à compressão axial média das argamassas aos 28, 63 e 91 dias.	138
Figura 75: Efeito isolado do teor de substituição na resistência à compressão axial.	141
Figura 76: Efeito isolado da idade na resistência à compressão axial.	141
Figura 77: Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição sobre a resistência à compressão.	142
Figura 78: Efeito da interação entre os fatores tipo de resíduo, idade e teor de substituição sobre a resistência à compressão axial.	143
Figura 79: Efeito isolado do tipo de resíduo na resistência à compressão.	144
Figura 80: Efeito isolado da idade na resistência à compressão axial.	145
Figura 81: Efeito isolado do teor de substituição na resistência à compressão.	146
Figura 82: Efeito da interação entre o tipo de resíduo e o teor de substituição na resistência à compressão axial.	146

Figura 83: Efeito da interação entre a idade e o teor de substituição na resistência à compressão.....	147
Figura 84: Efeito isolado do tipo de tratamento do resíduo na resistência à compressão.....	149
Figura 85: Efeito da interação entre tratamento do resíduo e teor de substituição na resistência à compressão.....	150
Figura 86: Módulo de elasticidade dinâmico médio das argamassas aos 28, 63 e 91 dias.....	152
Figura 87: Efeito isolado do percentual de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.....	154
Figura 88: Efeito isolado da idade no módulo de elasticidade dinâmico.	154
Figura 89: Efeito da interação entre o tipo de resíduo utilizado e a idade no módulo de elasticidade dinâmico.	155
Figura 90: Efeito da interação entre o teor de substituição e a idade no módulo de elasticidade dinâmico.	155
Figura 91: Efeito da interação entre tipo de resíduo utilizado, idade e teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.....	156
Figura 92: Efeito do tipo de resíduo utilizado no módulo de elasticidade dinâmico.	158
Figura 93: Efeito isolado do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.	158
Figura 94: Efeito isolado da idade no módulo de elasticidade dinâmico.	159
Figura 95: Efeito da interação entre o tipo de resíduo e o teor de substituição no módulo de elasticidade.....	160
Figura 96: Efeito da interação entre o tipo de resíduo e a idade no módulo de elasticidade dinâmico.	160
Figura 97: Efeito do teor de substituição e da idade no módulo de elasticidade dinâmico.....	161
Figura 98: Efeito da interação entre tipo de resíduo, teor de substituição e idade no módulo de elasticidade.....	162
Figura 99: Efeito isolado do tipo de tratamento do resíduo na resistência à compressão axial.	164
Figura 100: Efeito da interação entre tratamento do resíduo e teor de substituição no módulo de elasticidade.....	165
Figura 101: Imagens obtidas por MEV da AREF (argamassa referência).....	167
Figura 102: Apresentação da análise dos compostos pelo EDS na amostra a argamassa AREF.....	169
Figura 103: Imagens obtidas por MEV da ALG 5.....	170
Figura 104: Imagens obtidas por MEV da ALD 15.	171
Figura 105: Espectro de energia da partícula de aluminato de cálcio hidratado na imagem (c) da figura 104.....	172

Figura 106: Imagens obtidas por mev da argamassa algf 5.....	173
Figura 107: Espectro de energia da partícula de C-S-H na imagem (b) da figura 106.	174
Figura 108: Imagens obtidas por mev da argamassa aldf 20.....	175
Figura 109: Espectro de energia da partícula de portlandita na imagem (b) da figura 108.	176
Figura 110: Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 28 dias.	208
Figura 111: Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 91 dias.	208
Figura 112: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALG 5 aos 91 dias.	209
Figura 113: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALD 15 aos 91 dias.	210
Figura 114: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALGf 5 aos 28 dias.....	211
Figura 115: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALGf 5 aos 91 dias.....	212
Figura 116: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALDf 20 aos 28 dias.	213
Figura 117: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALDf 20 aos 91 dias.	214

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação e composição das adições minerais.....	33
Tabela 2: Requisitos químicos – materiais pozolânicos.	36
Tabela 3: Requisitos físicos – materiais pozolânicos.	36
Tabela 4: Detalhamento da produção brasileira de rochas ornamentais conforme o tipo de rocha.....	42
Tabela 5: Estudos de aplicação de resíduos de rochas ornamentais e materiais cimentícios.	56
Tabela 6: Composição química de diferentes tipos de resíduos utilizados.	57
Tabela 7: Composição de alguns vidros.	62
Tabela 8: Estudos de aplicação de resíduo de vidro como pozolana em materiais cimentícios.	66
Tabela 9: Níveis dos fatores controláveis para a primeira etapa da pesquisa.	77
Tabela 10: Níveis dos fatores controláveis para a segunda etapa da pesquisa.....	77
Tabela 11: Tratamentos aplicados aos resíduos.....	78
Tabela 12: Programa experimental - grupos de argamassas.....	79
Tabela 13: Métodos de ensaios para a caracterização física.....	83
Tabela 14: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade.	93
Tabela 15: Traços das argamassas produzidas (quantidades em massa).	94
Tabela 16: Propriedades físicas e químicas do cimento CP V ARI.....	101
Tabela 17: Caracterização dos resíduos LBRO G e LBRO D.	104
Tabela 18: Resultado da análise química do EDS para o LBRO G.....	108
Tabela 19: Resultado da análise química do EDS para o LBRO D.....	109
Tabela 20: Resultados referentes ao ensaio de pozolanidade pelo método de Lúxan.	125
Tabela 21: Propriedades físicas e composição química dos resíduos após TTI.....	129
Tabela 22: Distribuição granulométrica dos materiais utilizados em percentual.	131
Tabela 23: Resultados do IAP-cim para os resíduos LBRO Gf e LBRO Df.....	133
Tabela 24: Relação entre a massa específica do cimento e dos materiais utilizados na substituição.	136
Tabela 25: Resultados da resistência à compressão axial média das argamassas.	138
Tabela 26: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão.....	140
Tabela 27: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão.....	143
Tabela 28: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão.....	148

Tabela 29: Resultados do módulo de elasticidade dinâmico médio das argamassas.	151
Tabela 30: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no módulo de elasticidade dinâmico.	153
Tabela 31: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no módulo de elasticidade dinâmico.	157
Tabela 32: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no módulo de elasticidade.	163
Tabela 33: Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial das argamassas AREF, ALGs, ALDs, ALGfs E ALDfs aos 28, 63 e 91 dias.	199
Tabela 34: Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas AREF, ALGs, ALDs, ALGfs E ALDfs aos 28, 63 e 91 dias.	203

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio
ALD – Argamassa com substituição de cimento por LBRO D
ALG – Argamassa com substituição de cimento por LBRO G
ALDf – Argamassa com substituição de cimento por LBRO Df
ALGf – Argamassa com substituição de cimento por LBRO Gf
ANOVA – Análise de Variância
 C_3A – Aluminato tricálcico
 C_3S – Silicato tricálcico
 C_4AF – Ferro Aluminato Tetracálcico
CaO – Óxido de cálcio
CH – Hidróxido de cálcio
CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
CV – Coeficiente de variação
DRX – Difração de raios X
 E_c – Módulo de elasticidade dinâmico
EDS – Energia dispersiva de raios X
ES – Espírito Santo
 F_c – Resistência à compressão axial
 F_{cal} – Valor calculado de Fischer
 Fe_2O_3 – Óxido de ferro III
FRX – Fluorescência de raios X
GL – Graus de liberdade
GPa – Giga Pascal
ICDD – *International Centre for Diffraction Data*
IEMA – Instituto Estadual de meio ambiente e recursos hídricos
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo
JCPDS – *Joint Committee for Power Diffraction Standards*
 K_2O – Óxido de potássio
MgO – Óxido de magnésio
LBRO D – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais sem granalha
LBRO G – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais com granalha

LBRO Df – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais sem granalha após TT

LBRO Gf – Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais com granalha após TT

LEMAC – Laboratório de ensaios em materiais de construção

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MPa – Mega Pascal

M.Q. – Média quadrática

Na₂O – Óxido de sódio

P.F. – Perda ao fogo

RAS – Reação Álcali-Sílica

RN – Rio Grande do Norte

SC – Santa Catarina

SiO₂ – Óxido de silício

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

S.Q. – Soma quadrática

TT – Tratamento Térmico

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1. Introdução	23
1.1 Hipótese	27
1.2 Objetivo	27
1.2.1 Objetivo geral	27
1.2.2 Objetivos específicos	28
1.3 Estrutura do trabalho	28
2. Revisão Bibliográfica.....	31
2.1 Adições Minerais	32
2.1.1 Adições inertes.....	33
2.1.2 Adições com atividade pozolânica	35
2.2 Rochas ornamentais.....	41
2.2.1 Processo produtivo	43
2.2.2 Resíduo do beneficiamento	48
2.3 Vidro	61
2.3.1 Estudos de aplicação do resíduo de vidro como pozolana	65
3. Programa Experimental	72
3.1 Planejamento geral dos experimentos.....	73
3.1.1 Variáveis de resposta.....	76
3.1.2 Fatores controláveis.....	76
3.1.3 Fatores constantes.....	76
3.1.4 Definição dos níveis dos fatores controláveis	77
3.1.5 Parte I – Tratamento térmico LBRO: execução e avaliação	77
3.1.6 Parte II – Argamassas com LBRO: produção e avaliação	78
3.2 Apresentação geral do programa experimental.....	80
3.3 Métodos.....	82
3.3.1 Caracterização dos materiais.....	82
3.3.2 Aplicação e avaliação dos tratamentos térmicos	89
3.3.3 Produção e avaliação das argamassas	94
3.4 Materiais.....	99
3.4.1 Agregado miúdo.....	100
3.4.2 Cimento.....	100
3.4.3 Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais	102

4.	Resultados e Discussões	115
4.1	Parte I – Resultados dos tratamentos térmicos aplicados	116
4.1.1	Tratamentos Piloto	116
4.1.2	Avaliação dos tratamentos térmicos	118
4.1.3	Tratamento térmico selecionado (TTselecionado)	126
4.2	Parte II – Resultados do estudo das argamassas	127
4.2.1	Caracterização dos resíduos após o TTselecionado	128
4.2.2	Ensaio realizados nas argamassas no estado fresco	134
4.2.3	Ensaio realizados nas argamassas no estado endurecido	137
4.2.4	Análise microestrutural das argamassas	165
5.	Conclusões e considerações finais	178
5.1	Conclusão geral.....	179
5.2	Conclusões específicas	179
5.2.1	Conclusões relativas à Etapa I.....	179
5.2.2	Conclusões relativas à Etapa II.....	181
5.3	Sugestões para pesquisas futuras.....	183
	REFERÊNCIAS.....	186
	Referências normativas.....	186
	Referências bibliográficas	188
	APÊNDICES.....	199
	APÊNDICE A – Resultados individuais - argamassas no estado endurecido.....	199
	A.1 Resistência à compressão axial	199
	A.2 Módulo de elasticidade dinâmico.....	203
	APÊNDICE B – Micrografias das argamassas.....	208
	B.1 Micrografias da argamassa referência	208
	B.2 Micrografias das argamassas com resíduo sem tratamento térmico	209
	B.3 Micrografias das argamassas com resíduo com tratamento térmico.....	211

Capítulo 1

Introdução

“A tarefa não é exatamente ver o que ninguém viu ainda, mas pensar o que ninguém ainda pensou, sobre o que todo mundo vê.”

Erwin Schrödinger

1. Introdução

Dentro do contexto da preocupação mundial com o meio ambiente e com o desenvolvimento sustentável, as inovações tecnológicas representam possibilidades de adaptação e melhoria de processos e produtos, promovendo a otimização do uso de recursos naturais e energia.

A indústria da construção civil, cujos produtos e atividades envolvem o uso significativo de materiais, por suas dimensões e peculiaridades, é caracterizada como a maior indústria consumidora de recursos naturais (MEHTA; MONTEIRO, 2008). No entanto, vem buscando aprimorar-se para minimizar seus impactos no planeta, fazendo uso tanto de técnicas de planejamento e gestão, o que evita os retrabalhos e desperdícios, como também de reaproveitamento de resíduos e reciclagem de produtos.

O desenvolvimento industrial e o processo mundial de urbanização contribuem significativamente para a crescente demanda por construções e conseqüentemente pelos materiais componentes das construções. Demanda já apontada há anos por profissionais da área, como previsto em uma publicação no ano de 1980: “O concreto, como material de construção, foi importante no passado, é prático e o mais utilizado hoje, e com certeza, será indispensável no futuro” (KESLER *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 655).

Entretanto, é inerente afirmar que se qualquer material continuasse a ser fabricado e empregado exatamente da mesma maneira desde a sua criação, acabaria ficando obsoleto com o aparecimento de outro que o possa substituir com menor custo e maior produtividade. Melhores materiais possibilitam melhores resultados e o emprego de melhores técnicas. Fato que gera o ciclo de melhorias, buscando a ampliação da tecnicidade, segurança e desempenho dos produtos (BAUER, 2005).

Além da busca pelo aumento do desempenho e viabilidade econômica destes materiais em suas diversas aplicações, há que se validar o compromisso do setor da construção com o desenvolvimento sustentável, o que envolve o uso e fabricação de materiais de elevado desempenho a custos razoáveis, com o menor impacto ambiental possível (BILODEAU; MALHOTRA, 2000).

A reciclagem de resíduos industriais para aplicação na construção civil é uma prática estabelecida há anos. A partir de transformações, os resíduos podem se tornar subprodutos e contribuir para o desenvolvimento sustentável, poupando recursos naturais e minimizando o impacto ambiental que estes materiais poderiam provocar. São exemplos pozolanas como a cinza volante, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz (JOHN, 2000).

Dentre os setores industriais com ampla geração de resíduos pode-se citar o setor de rochas ornamentais. Este setor é considerado uma das mais importantes áreas de negócios mínero-industriais, destacando-se o Brasil como um dos cinco principais países produtores de blocos e chapas de mármore e granito (BRASIL, 2009).

O beneficiamento dos blocos de rochas ornamentais envolve o desdobramento em chapas e o tratamento das superfícies. Para realização da serragem, as empresas utilizam teares de lâminas metálicas e polpa abrasiva (pó de rocha, gralha e cal)

ou de fios diamantados com aspersão de água para evitar suspensão de pó (CALMON, 2007).

Cerca de 25% de cada um dos blocos serrados são convertidos em resíduo e o volume gerado no Brasil por ano é aproximadamente 1,8 milhão de toneladas (CHIODI, 2004), sendo denominado Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO) e separada para descarte conforme sua composição: resíduo com granalha, proveniente do corte em teares tradicionais – neste trabalho denominado LBRO G – e resíduo sem granalha proveniente do corte por fios diamantados e também dos rejeitos de polimento – o LBRO D. Esta denominação foi adotada por se tratar da abordagem utilizada pelo setor de mineração do Instituto Estadual de Meio Ambiente do Espírito Santo (IEMA ES) que faz o controle e monitoramento do resíduo gerado pelas indústrias de beneficiamento.

No Espírito Santo, as indústrias que atuam no beneficiamento de rochas ornamentais necessitam estar em conformidade com os requisitos estabelecidos na instrução normativa nº 019/2005 do IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2005) para obter a licença ambiental de funcionamento, visando o controle preventivo da degradação potencial e efetiva desta atividade. Esta instrução estabelece que fica vedada a disposição indiscriminada dos resíduos gerados e é preciso haver uma comprovação da destinação final por meio de recibos e notas fiscais. Sendo assim, em geral, as serrarias transportam as toneladas de lama gerada no processo para aterros regulamentados de empresas de gerenciamento de resíduos. A instrução normativa ainda define no artigo 6º: “compete aos estabelecimentos de beneficiamento de rochas ornamentais a responsabilidade e os custos relativos ao sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos e efluentes líquidos desde sua geração até a destinação final” (ESPÍRITO SANTO, 2005).

Desta forma, inúmeras pesquisas são realizadas buscando reaproveitamento do resíduo diante do custo para esta correta destinação e do impacto provocado na paisagem ambiental (CHIODI, 2004). Tem sido alvo de estudos quanto ao seu potencial de utilização incorporado a matrizes cerâmicas, betuminosas e cimentícias, buscando melhoria do comportamento mecânico, aumento da durabilidade e redução do uso de agregados ou aglomerantes (ver itens de 2.2.2.1. a 2.2.2.5). Estas aplicações baseiam-se no desempenho físico que materiais finos exercem,

atuando como fíler, ou seja, preenchendo poros e melhorando o empacotamento do sistema.

A composição química do resíduo indica ainda um elevado potencial para sua utilização na fabricação de vidros, devido à significativa presença de óxido formador de rede vítrea (SiO_2) e de outros óxidos componentes (Al_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O e MgO) a partir da aplicação de tratamento térmico após a adequação da composição química (BABISK, 2009; MARÇAL, 2011). E, dada a atividade pozolânica dos vidros quando finamente moídos, estes tem sido avaliados em matrizes cimentícias como substituição parcial do cimento (ver item 2.3.1).

Neste contexto, apesar das possibilidades de utilização já identificadas, mas considerando o grande volume de resíduo gerado e ainda não consumido, esta pesquisa busca aproveitar o potencial vítreo da LBRO para desenvolver uma pozolana, visando os benefícios deste tipo de adição em materiais cimentícios como uma economia de aglomerantes e a melhoria das propriedades mecânicas.

A intenção não é obter um vidro de composição e propriedades tipicamente comerciais a partir de LBRO. Esta pesquisa propõe uma verificação preliminar da possibilidade de utilização de um material com características vítreas, obtido de LBRO após tratamento e moagem, em matrizes cimentícias.

Do ponto de vista econômico parece hoje que transformar LBRO em vidro/pozolana é uma decisão ruim, pelo consumo de energia e geração de CO_2 decorrentes da realização de tratamento térmico. No entanto, este não é o raciocínio científico que se pensou neste trabalho (CALMON, 2014).

Esta pesquisa objetiva uma análise inicial para o desenvolvimento de futuras aplicações. Pode-se, por exemplo, utilizar o LBRO como parte da composição para produção de vidro, economizando areia natural das jazidas. Possivelmente, o vidro será utilizado pela sociedade por muitos anos, demandando que seja produzido e necessitando, de qualquer maneira, do processo de fusão. Os resíduos deste vidro produzido com LBRO poderiam ser moídos e aproveitados como pozolana em matrizes cimentícias (CALMON, 2014).

Além disso, pode-se vislumbrar também a possibilidade de desenvolvimento de cimento, com a inclusão de LBRO na farinha para produção do clínquer (GOBBO;

MELLO, 2005). Com a composição adequada desta farinha, incluindo teores significativos de resíduo, as altas temperaturas poderiam transformá-lo em material vítreo que, moído na etapa seguinte, atuaria como pozolana na matriz.

Assim, não se trata simplesmente de fundir LBRO para produzir uma pozolana e utilizar em argamassas. Este trabalho buscou averiguar o potencial deste material para o futuro, em matrizes cimentícias de forma geral. E é este o interesse científico desta pesquisa.

Vale ressaltar que todas as possíveis aplicações futuras demandam de estudos específicos e desenvolvimento da engenharia relacionada ao processo.

Sendo assim, o tema proposto e o estudo desenvolvido fundamentam-se na prerrogativa que as instituições científicas devem trabalhar na vanguarda e em assuntos desafiantes, esperando a longo prazo que se alcance um equilíbrio no tripé econômico, ambiental e social, concernente ao desenvolvimento sustentável.

1.1 Hipótese

É possível obter material pozolânico a partir da aplicação de tratamento térmico e moagem na lama do beneficiamento de rochas ornamentais.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar o desempenho da lama do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico e moagem baseado no seu potencial de aplicação como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos da pesquisa, podem ser relacionados:

- Identificar os parâmetros para aplicação dos resíduos a partir das suas principais propriedades físicas, químicas, mineralógicas e térmicas;
- Avaliar o efeito de diferentes tratamentos térmicos aplicados ao resíduo de rochas ornamentais para a produção de material com características de vidro;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de rochas ornamentais com e sem tratamento térmico nas propriedades de argamassas no estado fresco, através do ensaio de massa específica, comparando-as com as amostras sem substituição;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de rochas ornamentais com e sem tratamento térmico, nas idades de 28, 63 e 91 dias, sobre as propriedades mecânicas de argamassas, resistência à compressão axial e no módulo de elasticidade dinâmico, comparando-as com as amostras sem substituição;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de rochas ornamentais com e sem tratamento térmico do ponto de vista microestrutural da argamassa através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), comparando-as com as amostras sem substituição.

1.3 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices. A seguir é apresentada uma descrição sucinta do conteúdo de cada um dos capítulos.

O capítulo 1 é introdutório, contendo a justificativa e a importância do tema escolhido para a pesquisa, além dos objetivos do estudo e também a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 é destinado à revisão bibliográfica, apresentando o contexto e as propriedades das adições minerais, principalmente das pozolanas, a origem e os processos de obtenção dos resíduos utilizados nesta pesquisa bem como suas características, os resultados alcançados por algumas pesquisas já realizadas

utilizando o resíduo em matrizes cimentícias e o potencial dos vidros para aplicação como substituto do cimento.

O capítulo 3 explica a metodologia inerente ao programa experimental, descrevendo as variáveis envolvidas na pesquisa, os materiais empregados e sua caracterização, incluindo o método de preparo do resíduo e os procedimentos adotados para tratamento térmico e moagem. Também constam neste capítulo as dosagens e os teores de substituição adotados para as argamassas estudadas, além do método de moldagem dos corpos de prova, dos ensaios em estado fresco e endurecido, e da obtenção das imagens para análise microestrutural das argamassas.

O capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios explicitados na matriz experimental, analisados estatisticamente e discutidos com base na revisão bibliográfica e nos comparativos de acordo com os requisitos de cada propriedade estudada. As imagens da microscopia também são apresentadas para uma análise microestrutural das argamassas, buscando identificar elementos para corroborar alguns destes resultados.

O capítulo 5 contém as principais conclusões obtidas com esta pesquisa quanto aos aspectos estudados e ainda algumas sugestões para trabalhos futuros baseadas nas lacunas encontradas.

Por fim, são relacionadas as referências normativas e bibliográficas que fundamentaram a elaboração deste trabalho e ao final do volume, constam os apêndices pertinentes.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

“O homem nada pode aprender senão em virtude daquilo que já sabe.”

Aristóteles

2. Revisão Bibliográfica

O capítulo anterior contempla a descrição geral do tema e a justificativa desta pesquisa, bem como seus objetivos e a estrutura deste trabalho, possibilitando assim um entendimento do processo.

Este capítulo que agora se inicia possui o embasamento teórico que deu origem a esta pesquisa realizado com base nas publicações que fundamentam o tema e auxiliaram no entendimento das principais questões envolvidas. Desenvolvido por meio de revisão bibliográfica em fontes nacionais e internacionais, este referencial teórico aborda os conceitos fundamentais utilizados nesta pesquisa bem como o estado da arte com os principais estudos sobre a aplicação do LBRO e do vidro em materiais de construção, principalmente no que se refere às aplicações em matrizes cimentícias.

2.1 Adições Minerais

A indústria da construção civil tem uma grande demanda por recursos naturais, citando, por exemplo, a água, os agregados, a argila e o calcário que são importantes para produção de seus principais insumos de produção, como o concreto, a argamassa, os tijolos etc.

Vale ressaltar a importância e amplitude da aplicação dos materiais cimentícios, que são utilizados desde a etapa de estrutura até o acabamento, com argamassas e concretos de diferentes dosagens, sendo o concreto um dos materiais mais utilizados no planeta (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As adições minerais caracterizam-se por serem materiais finos cuja inclusão na matriz cimentícia proporciona benefícios ao desempenho mecânico e nos aspectos de durabilidade e são, portanto, uma alternativa de grande relevância no contexto do uso de materiais cimentícios dada à necessidade de melhorias e desenvolvimento constante dos materiais (NEVILLE, 1997).

No mercado da indústria da construção, incluir adições minerais nos concretos e argamassas produzidos pode acarretar redução de custos ora pela substituição do cimento por materiais residuais com função de adição, ora pela redução das dimensões dos elementos estruturais devido ao maior desempenho mecânico proporcionado por elas, paralelamente ao aumento da vida útil das construções e ao desenvolvimento sustentável do setor, com uma significativa redução na extração de minerais para fabricação de cimento e conseqüente menor degradação ambiental, contribuindo inclusive com a reciclagem de resíduos industriais de outros setores produtivos.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, podendo ser classificadas quanto ao tipo de reação que provocam como pozolânicas (por exemplo a cinza volante de baixo teor de cálcio), cimentantes (por exemplo a escória granulada de alto-forno), pozolânicas e cimentantes simultaneamente (por exemplo a cinza volante de alto teor de cálcio) ou como fíler (quando não há nenhum tipo de reação). Ainda podem ser classificadas quanto a sua origem, sendo materiais naturais (por exemplo os vidros vulcânicos) ou

materiais de subprodutos industriais (por exemplo a cinza volante, a escória de alto-forno, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz).

Está apresentada na Tabela 1 a classificação das adições minerais conforme suas características e composição mineralógica, o que vai indicar o efeito destes materiais nas matrizes que o contenham.

Tabela 1: Classificação e composição das adições minerais.

Classificação	Efeito predominante	Exemplo	Composição mineralógica
Cimentantes	Efeito cimentante	Escória de alto forno	Maior parte de silicato vítreo contendo cálcio, magnésio, alumínio e sílica
Superpozolanas	Efeito pozolânico potencializado	Sílica ativa, cinza de casca de arroz	Essencialmente sílica pura na forma não-cristalina
Pozolanas comuns	Efeito pozolânico	Cinza volante, pozolanas naturais	Na maior parte silicato vítreo contendo alumínio, ferro e álcalis. A quantidade de matéria cristalina consiste em quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita
Pozolanas pouco reativas	Efeito pozolânico	Cinzas de forno, escória de alto-forno resfriada lentamente	Essencialmente compostas de materiais de silicato cristalino contendo pequena quantidade de matéria não-cristalina
Adições inertes	Efeito fíler	Pó de pedra	Independe (composição varia conforme o material)

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

2.1.1 Adições inertes

Podem ser consideradas adições sem reatividade, as que não interagem com a água ou com os compostos presentes no cimento, ou seja, não possuem atividade química entre seus elementos e os constituintes da matriz.

São chamadas de filers porque tem finura elevada se comparadas aos outros materiais da mistura. Vale ressaltar a diferença entre o agregado fino e a adição, o primeiro também chamado de agregado fíler, geralmente tem diâmetro médio entre 50 e 150 μm e preenche os vazios deixados pela descontinuidade do agregado miúdo, enquanto que o segundo, a adição com efeito fíler tem diâmetro médio menor

que 50 µm e atua no preenchimento dos poros deixados pelos produtos de hidratação ou não hidratação do cimento (GONÇALVES, 2000).

Exemplos de fílers utilizados frequentemente são: material carbonático, pó de pedra e pó de quartzo.

2.1.1.1 Efeito de adições inertes em matrizes cimentícias no estado fresco

Como os fílers não participam das reações de aglomeração, não influenciam no tipo de produtos da hidratação bem como no tempo de pega e cura, porém, em alguns casos podem apresentar aceleração do processo de hidratação do cimento pela atuação como pontos de nucleação¹ (NEVILLE, 1997).

A finura, a forma dos grãos e a massa específica da adição são as propriedades que determinam os efeitos na trabalhabilidade e consistência dos materiais, visto que indicam um maior ou menor preenchimento de poros na mistura o que afeta na demanda de água para obtenção da fluidez desejada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.1.2 Efeito de adições inertes em matrizes cimentícias no estado endurecido

Tanto a durabilidade quanto as propriedades mecânicas são influenciadas pela presença de adição fíler em materiais cimentícios.

Nas primeiras idades, a finura da adição sem atividade pozolânica, influencia na aceleração do processo de hidratação por estar difundido em toda a mistura, e conseqüentemente influencia no ganho de resistência, por formar os pontos de nucleação, auxiliando no processo de hidratação.

Esta adição, apesar de não reagir juntamente com o cimento, tem uma contribuição na diminuição da permeabilidade e refinamento da estrutura dos poros na matriz, aumentando significativamente a resistência à compressão.

¹ **Nucleação:** fenômeno dinâmico que ocorre ao longo do processo de hidratação do cimento. As ligações entre as moléculas na solução ocorrem aleatoriamente e são rompidas se não houver estabilidade, sendo assim, quando o tempo de ligação é maior que o tempo médio, outras moléculas ligam-se ao conjunto, formando núcleos estáveis que crescem continuamente e desenvolvem-se para os produtos de hidratação ocorrendo a precipitação (GARCIA; OLIVEIRA; PANDOLFELLI, 2007).

No que se refere aos fatores de resistência a ataques químicos, por preencher os poros da matriz cimentícia, pode-se considerar que utilizando o fíler a tendência é uma maior durabilidade dos concretos e argamassas.

2.1.2 Adições com atividade pozolânica

Pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que isolados possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, porém quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes, sendo esta a definição da NBR 12653 – Materiais Pozolânicos – Requisitos (ABNT, 2012).

A hidratação do cimento Portland produz hidróxido de cálcio (CH), denominada portlandita. Tomando-se a alita (C_3S) como exemplo, a reação de hidratação se dá conforme a equação (1).



onde C = CaO, S = SiO₂ e H = H₂O.

O principal produto da hidratação é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) composto que influencia diretamente as propriedades físicas e mecânicas das matrizes cimentícias.

A reação pozolânica ocorre combinando-se o hidróxido de cálcio (CH) disponível com os elementos reativos do material pozolânico. Como a sílica é o principal componente ativo de um material pozolânico, a reação está ilustrada na equação (2).



Pode-se observar que o hidróxido de cálcio (CH) é produzido na reação de hidratação do cimento Portland e, em contrapartida, é consumido pela reação pozolânica, formando um silicato de cálcio hidratado (C-S-H) com a presença de umidade.

Na realidade, a reação pozolânica se desencadeia, porque a sílica e a alumina são vulneráveis ao hidróxido de cálcio, pela fraqueza e instabilidade de suas ligações estruturais no material original, como é o caso do vidro vulcânico ou das argilas calcinadas (MALQUORI *apud* MONTANHEIRO; YAMAMOTO; KIHARA, 2003).

As pozolanas são classificadas conforme a sua origem, sendo pozolanas naturais aquelas que já podem ser consideradas capazes de provocar a reação pozolânica, bastando apenas preparo básico após extração e moagem, geralmente de origem vulcânica ou sedimentar; e pozolanas artificiais aquelas que provêm de tratamentos térmicos ou são resultado de um processo industrial (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A norma brasileira que determina as especificações para materiais pozolânicos é a NBR 12653 (ABNT, 2012) criada em 1992 e atualizada em 2012. Nela estão definidas as exigências químicas conforme Tabela 2 e físicas descritas na Tabela 3, estabelecendo assim os requisitos para classificar um material como pozolânico, sendo classe N de pozolanas naturais, classe C de pozolanas artificiais e classe E de outras que não se enquadram nas primeiras condições.

Tabela 2: Requisitos químicos – materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3	≤ 4,0	≤ 5,0	≤ 5,0
Teor de umidade	≤ 3,0	≤ 3,0	≤ 3,0
Perda ao fogo	≤ 10,0	≤ 6,0	≤ 6,0
Álcalis disponíveis em Na_2O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2012).

Tabela 3: Requisitos físicos – materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 μm (% máx.)	≤ 34 %	≤ 34 %	≤ 34 %
IAP-cim (a) aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 75 %	≥ 75 %	≥ 75 %
IAP-cal (b) aos 7 dias, em MPa	≥ 6,0 MPa	≥ 6,0 MPa	≥ 6,0 MPa
Água requerida (% máx.)	≤ 115 %	≤ 110 %	≤ 110 %

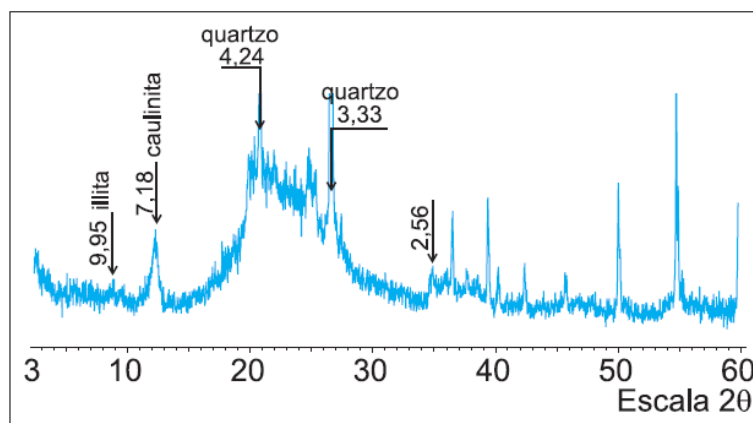
Notas: (a) IAP-cim – Índice de atividade pozolânica com o cimento.
(b) IAP-cal – Índice de atividade pozolânica com a cal.

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2012).

A identificação da pozolanicidade de um material ocorre em duas etapas. A pré-qualificação pozolânica se processa geralmente mediante as análises químicas, petrográficas e as difrações de raios X. A confirmação da atividade pozolânica depende dos ensaios de preparação do material (finura, massa e área específicas) para, em seguida, ser efetuado o teste de pozolanicidade propriamente dito, mediante preparação de argamassas para verificar a atividade com a cal ou com o cimento do material em estudo.

Nos estudos de pré-qualificação da atividade pozolânica de um material, a difração de raios X é uma técnica de grande relevância, visto que os componentes reativos das pozolanas destacam-se como uma banda amorfa no difratograma, no intervalo 2θ , entre 18° e 32° . A Figura 1 apresenta o difratograma de raios X de uma terra diatomácea, pozolana natural, em que as fases cristalinas são formadas, predominantemente, por quartzo e caulinita. O difratograma mostra também que a rocha estudada contém material amorfo delineado por um abaulamento da linha difratométrica, no intervalo 2θ , entre 18° e 32° .

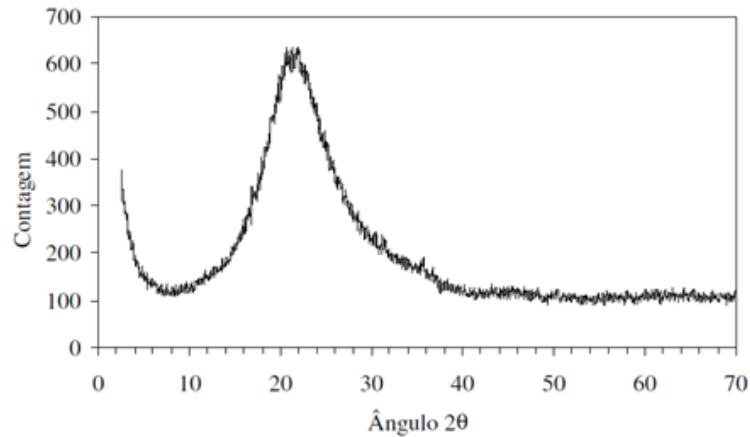
Figura 1: Difratograma de raios X obtido para amostra de terra diatomácea.



Fonte: Montanheiro, Yamamoto e Kihara (2003, p.5).

A sílica ativa, pozolana artificial, subproduto de fornos de indução do processo de obtenção do silício metálico e ligas de ferro-silício, apresenta-se no estado vítreo, desorganizado quimicamente, com um halo de amorfização, como pode ser observado na Figura 2 o que demonstra o seu potencial pozolânico (NITA, 2006).

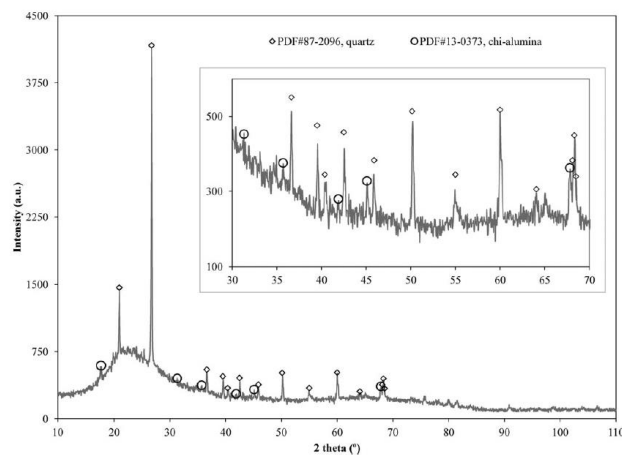
Figura 2: Difratoograma de raios X obtido para uma amostra de sílica ativa.



Fonte: Nita (2006, p.37).

O metacaulim é um material pozolânico artificial obtido do argilomineral caulinita, através do processo de calcinação em temperaturas entre 500 °C e 800 °C, e posteriormente a moagem, visando diminuição da sua granulometria (SOUZA; DAL MOLIN, 2002) sendo possível assim provocar a desidroxilação da estrutura cristalina de seus minerais formando uma fase de transição com alta atividade. Na Figura 3 verifica-se a presença de picos cristalinos difusos, principalmente de quartzo, e o material apresenta-se amorfo, predominantemente (TRUSILEWICZ *et al.*, 2012).

Figura 3: Difratoograma de raios X obtido para uma amostra de metacaulim.



Fonte: Trusilewicz *et al.* (2012, p. 2992).

O uso de pozolanas além de impactar nas propriedades físicas, químicas e mecânicas de concretos e argamassas, também implica em uma economia no aspecto da redução do uso de cimento, considerando a possibilidade de substituição

parcial. Assim, as jazidas de argila e calcário sendo menos exploradas permanecem ativas por mais tempo, garantindo a permanência da fábrica no mercado, economizando ainda energia no processo de fabricação e ampliando a produção com a inserção do material pozolânico (SANTOS, 2006).

A reciclagem de subprodutos industriais para aplicação na construção civil é uma prática estabelecida há anos, podendo-se aproveitar resíduos poluidores como materiais com contribuição significativa, como é o caso de pozolanas artificiais como as cinzas volantes, as escórias, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, todas provenientes de rejeitos de processos industriais que seriam destinados a aterros, mas que, entretanto, após a preparação adequada são benéficas aos materiais cimentícios, deixam de ser material ambientalmente nocivo e diminuem o descarte de resíduos no meio ambiente (NETTO, 2006).

Dentre as vantagens da utilização das pozolanas, é preciso citar também as desvantagens que incluem geralmente a necessidade do uso de aditivos, por aumento da demanda de água nas misturas, menores resistências iniciais por serem as reações pozolânicas um pouco mais lentas que as reações de hidratação do cimento (NETTO, 2006).

Adições minerais com ação pozolânica implicam um conjunto de efeitos de acordo com as suas características e seu teor nas propriedades dos materiais compósitos de matriz cimentícia.

De modo geral, podem ser avaliadas no material em seu estado fresco e em seu estado endurecido.

2.1.2.1 Efeito de adições pozolânicas em matrizes cimentícias no estado fresco

O uso de pozolanas confere ao concreto e à argamassa com este tipo de adição diversas características diferenciadas em relação àqueles que não as possuem, fatores associados aos efeitos físicos devido à presença do particulado e fatores químicos devido à ocorrência das reações pozolânicas.

Pode-se afirmar que uma mistura cimentícia com pozolanas possui um menor calor de hidratação, devido à substituição de parte das reações de hidratação do cimento

Portland que são exotérmicas por reações pozolânicas que são atérmicas, diminuindo, assim, os riscos de fissuração nas primeiras idades. Por outro lado, pode acelerar o processo de hidratação, pois as partículas de adições servem como pontos de nucleação dentro da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No que se refere à trabalhabilidade, ou seja, a fluidez do material, a utilização de adições pozolânicas que possuem finura elevada reduz o tamanho e o volume de vazios no estado fresco, diminuindo a exsudação e segregação e conseqüentemente melhorando a coesão e a plasticidade. Além disso, resulta no retardo do tempo de pega principalmente devido ao efeito de diluição do cimento Portland e ainda por uma maior necessidade de água na pasta de cimento para se atingir a consistência desejada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.2.2 Efeito de adições pozolânicas em matrizes cimentícias no estado endurecido

As propriedades no estado endurecido são influenciadas desde a adequada proporção dos materiais até o cuidado com o lançamento e a cura, considerando o controle tecnológico de todo o processo.

A resistência à compressão axial é considerada uma das principais características que determinam o desempenho do material visto que o termo resistência, de modo geral, indica o limite de tensão para causar fratura. Porém, há também uma preocupação com as propriedades relacionadas à durabilidade, indicando uma tendência à produção de materiais específicos para ambientes específicos de acordo com classe de agressividade do meio, buscando ampliar a vida útil das construções.

As pozolanas substituem parte do cimento Portland na mistura e, conseqüentemente, comparada a uma mistura de referência, sem incorporação de pozolana, apresenta diferenças significativas já comprovadas em diversos estudos.

Devido à formação de uma maior quantidade de silicato de cálcio hidratado, produto da reação pozolânica, o uso de adições minerais deste tipo em materiais cimentícios reduz a porosidade da matriz e da zona de transição, no caso do concreto, influenciando, assim, em sua resistência final. Apesar disto, a velocidade de

desenvolvimento da resistência pode ser menor, pois as reações ocorrem de forma mais lenta (MEHTA; MONTEIRO, 2008) o que nem sempre é verificado, pois, inicialmente as pozolanas acabam atuando como fíler, contribuindo na dispersão das partículas de cimento, auxiliando no processo de hidratação, como com os estudos da incorporação de metacaulim ao concreto (BARATA; DAL MOLIN, 2002).

Pode-se afirmar também que matrizes cimentícias com pozolanas têm maior durabilidade, pela estabilização do hidróxido de cálcio (CH) oriundo da hidratação do clínquer Portland que poderia participar das reações de carbonatação e ainda pela diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas (NETTO, 2006).

2.2 Rochas ornamentais

As rochas ornamentais são produto da extração de blocos de maciços rochosos e mactações transformados em placas, cortadas, beneficiadas e polidas conforme a necessidade de aplicação (MORAES, 2006).

Produtos de grande aceitação comercial, as rochas ornamentais são materiais rochosos aproveitados pela sua aparência estética e utilizados como elemento decorativo, em trabalhos artísticos e como materiais de construção para revestimentos e bancadas (FRASCÁ *apud* REIS, 2008).

As rochas ornamentais são classificadas em geral como rochas carbonáticas, que incluem os mármore e travertinos cuja composição é principalmente de calcita e dolomita e rochas silicáticas, que englobam os granitos e quartzitos constituídos de feldspato, quartzo, mica e minerais portadores de ferro, apresentando uma estrutura de sílica cristalizada (MARÇAL, 2011).

Estima-se, considerando as informações internacionais datadas de 2007, que o setor de rochas movimente transações comerciais da ordem de US\$ 80 a US\$ 100 bilhões/ano no mundo e que esta produção mundial evoluiu de 1,8 milhão t/ano, na década de 1920, para um patamar estimado de 100 milhões t/ano, sendo China, Índia, Turquia, Itália e Brasil os maiores produtores mundiais de rochas ornamentais. (BRASIL, 2009).

O Brasil é mundialmente reconhecido por sua geodiversidade mineral. No ano de 2012, o setor de rochas ornamentais caracterizou-se pelo crescimento da sua produção industrial, pelo incremento tanto do volume físico quanto do faturamento das suas exportações, pelo aumento da participação de rochas processadas no total exportado e pela expansão dos investimentos industriais. Considerando-se estes fatores e ainda alguns indicadores indiretos baseados no crescimento do PIB, no desempenho da construção civil e em informações de mineradores e beneficiadores, estima-se que a produção brasileira de rochas tenha sido de 9,3 milhões de toneladas em 2012, com um aumento de 3,3% em relação a 2011. Esta produção detalhada por tipo de rocha está descrita na Tabela 4 (ABIROCHAS, 2013).

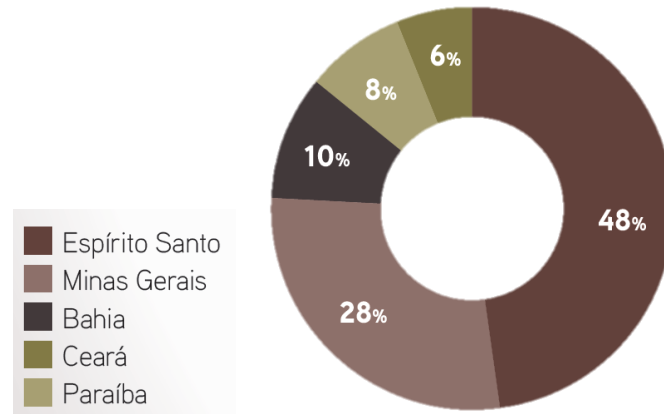
Tabela 4: Detalhamento da produção brasileira de rochas ornamentais conforme o tipo de rocha.

PERFIL DA PRODUÇÃO BRASILEIRA POR TIPO DE ROCHA – 2012		
Tipo de Rocha	Produção (Milhão t)	Participação Percentual
Granito e similares	4,6	49,5
Mármore e Travertino	1,7	18,2
Ardósia	0,6	6,5
Quartzito Foliado	0,6	6,5
Quartzito Maciço	0,6	6,5
Pedra Miracema	0,2	2,1
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão, Pedra Morisca, etc.)	1,0	10,7
Total Estimado	9,3	100,0

Fonte: ABIROCHAS (2013, p.07).

O Espírito Santo é considerado como o principal estado brasileiro minerador de rochas ornamentais como pode ser observado na Figura 4, respondendo por cerca de 48% da produção brasileira e concentrando 60% da capacidade industrial instalada para beneficiamento de blocos. Destaca-se paralelamente o estado de Minas Gerais como importante pólo de lavra e produção diversificada (BRASIL, 2009).

Figura 4: Principais estados produtores de rochas ornamentais no Brasil.

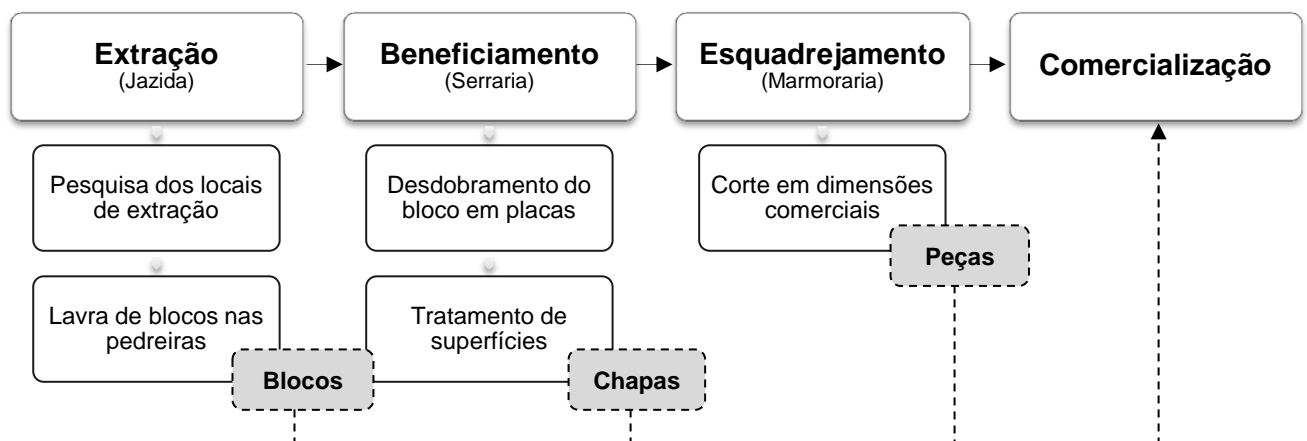


Fonte: Bahia (2012, p. 01).

2.2.1 Processo produtivo

Para rochas ornamentais, o processo produtivo é caracterizado pela extração e beneficiamento do produto e não envolve efetivamente a geração, pois as rochas são extraídas de forma bruta nas jazidas e transformadas em peças aplicáveis como revestimento ou decoração. A Figura 5 traz um esquema simplificado do processo produtivo, sendo que paralelamente a estas etapas encontram-se também as áreas de apoio, como por exemplo, o transporte dos materiais (CALMON; SILVA, 2006).

Figura 5: Esquema do processo produtivo típico de rochas ornamentais.



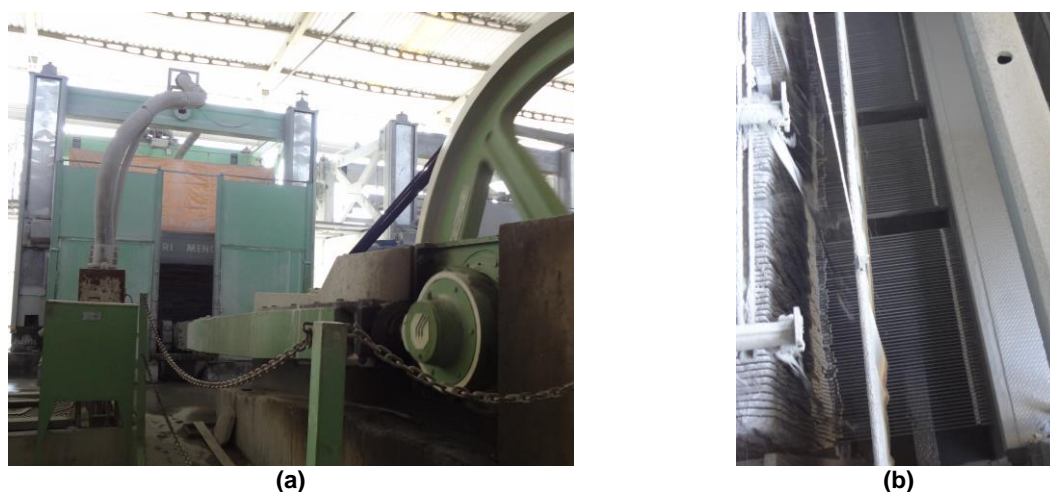
Fonte: Adaptado de Gonçalves (2000).

A extração é a primeira fase da produção de rochas ornamentais e consiste em remover material útil ou economicamente aproveitável de maciços rochosos ou matacões. Uma pesquisa deve ser feita inicialmente para determinar o planejamento de lavra que, quando bem elaborado identificará desde os custos da operação como os aspectos técnicos de procedimentos a serem adotados. Na lavra, são obtidos blocos prismáticos de dimensões diversas, com volume variando de 5 m³ a 10 m³ (REIS; SOUZA, 2003).

O sistema de beneficiamento dos blocos de rochas ornamentais inicia-se com o desdobramento que é o processo de transformação dos blocos em chapas ou placas semi-acabadas, com espessuras que variam de 1 a 3 cm utilizando máquinas denominadas teares que, em geral, podem ser de dois tipos: de lâminas metálicas ou de fios diamantados.

Os teares de lâminas metálicas, conhecidos como teares tradicionais, são equipamentos robustos com um quadro que realiza movimento pendular. Neste quadro são dispostas lâminas de aço no sentido longitudinal do equipamento, umas paralelas às outras, como pode ser visto na Figura 6. Essas lâminas são de aço carbono de alta dureza e resistência mecânica, para melhor resistir aos esforços de tração e abrasão (SENAI *apud* CALMON; SILVA, 2006).

Figura 6: (a) Estrutura do tear tradicional e (b) detalhe das lâminas durante o corte.



Fonte: Cortesia Group Vitoria Stone (2012).

Para iniciar o processo de serragem, após o posicionamento dos blocos no tear, chuveiros banham o conjunto constantemente com uma mistura abrasiva, denominada polpa abrasiva, composta por água, granalha de aço, cal e resíduo de rocha proveniente do corte de outros blocos, como na Figura 7. As principais funções desta polpa são lubrificar, esfriar as lâminas de serragem, evitar a oxidação, limpar os canais entre as chapas e fazer com que os fragmentos metálicos e a mistura sirvam como abrasivo (CALMON *et al.*, 1997).

Figura 7: Detalhe da aspersão de polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional.



Fonte: Cortesia Group Vitoria Stone (2012).

O movimento pendular do tear faz com que as lâminas de aço e a mistura abrasiva imprimam a ação de corte, executada pelo atrito e pelo choque das lâminas contra o bloco. Tal movimento é acionado por motor elétrico, através de sistema biela-manivela (CALMON; SILVA, 2006).

O processo de alimentação e dosagem da mistura abrasiva é mantido por um circuito hidráulico permanente movimentado por uma bomba de polpa, conforme a Figura 8, sendo inclusive responsável por adicionar água ou descartar uma parcela mais fina da polpa com a elevação da viscosidade após certo tempo de operação, devido ao incremento contínuo de rocha moída (CALMON *et al.*, 1997).

Figura 8: Hidrociclone - equipamento que recircula a lama no sistema.



Fonte: Cortesia Group Vitoria Stone (2012).

O tear tradicional tem esta nomenclatura, pois justamente ainda é o mais comum, apesar de ser mais lento, devido ao custo para o investimento nos teares cuja tecnologia não faz uso de lâminas e polpa abrasiva.

Os teares de fios diamantados, também conhecidos como multifios, são mais compactos que os teares tradicionais e, em geral, possuem uma maior produtividade. São formados por uma estrutura de base para colocação do bloco, colunas laterais para apoio do conjunto de fios, sistemas de tensionamento e movimentação horizontal e vertical dos fios possibilitando o corte em chapas, além de um conjunto de chuveiros para aspergir água para resfriamento e diminuição da suspensão de pó de rocha, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Tear multifios iniciando o processo de corte.



Fonte: Cortesia Group Vitoria Stone (2012).

Até o ano de 2005, apenas no Espírito Santo, contabilizavam-se 800 teares tradicionais de 70-75 lâminas de corte (PREZOTTI *apud* CALMON; SILVA, 2006). Porém, buscando uma produção mais eficaz, limpa e que reduza o espaço físico industrial ocupado, há uma tendência à instalação e substituição destes por teares do tipo multifios. Estima-se que até o final de 2012 tenham sido instalados cerca de 100 teares de fios diamantados, a maior parte dos quais no Espírito Santo. O Brasil possui atualmente o maior parque mundial de teares multifio diamantado, bem como o melhor grau de especialização para a sua utilização. O mesmo pode ser referido para a lavra de maciços rochosos com o uso da tecnologia de fio diamantado (ABIROCHAS, 2013).

Concluída a serragem, a carga é retirada do tear, sendo as chapas lavadas para eliminar o resíduo impregnado em sua superfície. No caso dos teares tradicionais, há um maior consumo de água visto que a mistura abrasiva aspergida é espessa e precisa ser retirada, sendo importante remover resquícios de granalha para evitar o surgimento de oxidação superficial.

A finalização do beneficiamento das rochas ornamentais nas serrarias é o tratamento das superfícies, feito por levigamento, polimento e lustro. O levigamento cria superfícies planas e paralelas por meio de desbaste grosseiro. O polimento, por sua vez, utilizando um desbaste fino, gera uma superfície lisa, opaca e mais impermeável do que uma face natural da mesma rocha, sendo aplicada uma resina para selar os poros e corrigir defeitos permitindo o acabamento. O lustro é, então, responsável pelo brilho à superfície da chapa. (MARÇAL, 2011). A seqüência destas operações de acabamento é realizada com aplicações sucessivas de politrizes que trabalham com abrasivos sucessivamente mais finos em rebolos ou sapatas de polimento como pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10: (a) Polimento de chapa e (b) detalhe de sapatas já utilizadas e suporte para encaixe na politriz.



Fonte: Cortesia Group Vitoria Stone (2012).

Uma vez conferido o aspecto final da superfície das chapas, resta dar-lhes a forma e as dimensões almejadas. Nesta fase, as operações são normalmente executadas nas marmorarias, a partir dos projetos e solicitações dos clientes com o emprego de serras rotativas com discos diamantados para em seguida, o produto acabado ser utilizado na construção civil, em revestimentos, arte funerária ou ornamentos diversos.

2.2.2 Resíduo do beneficiamento

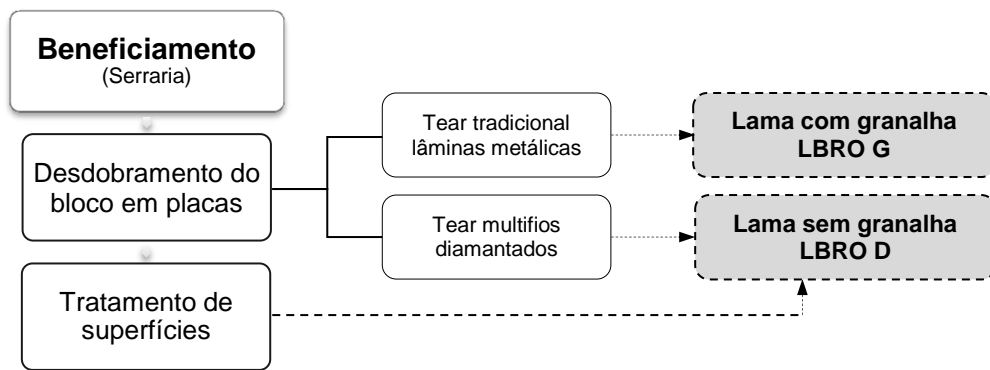
O processo produtivo das rochas ornamentais envolve complexidade desde a exploração das jazidas, passando pelo beneficiamento (serragem e polimento) até o armazenamento e o transporte. Em todos os subsistemas sempre existem causas e impactos sobre o meio ambiente (água, ar e solo) (CALMON, 2007).

O processo de beneficiamento, no que se refere ao desdobramento dos blocos e polimento superficial das chapas, gera uma quantidade significativa de rejeito sob a forma de lama, denominado pelo IEMA ES como Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO).

A etapa de beneficiamento produz também resíduos em forma de pedaços de chapas que se rompem ao longo do processo e limites dos blocos cujas dimensões e irregularidades não permitem que sejam aproveitados como placas, estes são chamados de cascalhos e não foram objeto deste estudo.

Na Figura 11 pode-se identificar a procedência do resíduo em forma de lama conforme o processo produtivo, sendo separado, considerando a presença ou não de granalha, o que define o tratamento e destinação diferenciada em aterros.

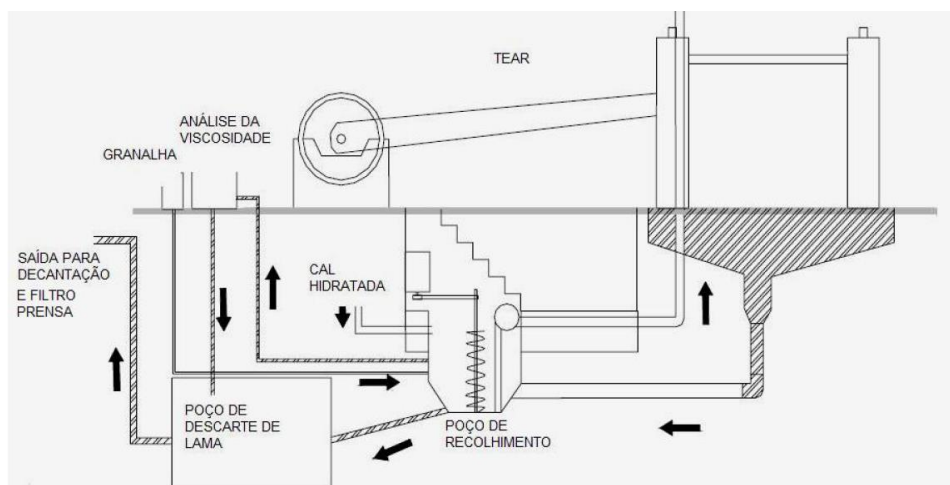
Figura 11: Quadro descritivo do resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais.



Fonte: Acervo pessoal.

O resíduo LBRO G (com granalha) é, portanto a lama abrasiva utilizada no processo de corte em um tear tradicional que já perdeu sua aplicabilidade no corte em decorrência da alta viscosidade e deve ser descartada, sendo composta basicamente por água, cal, granalha, fragmentos do desgaste das lâminas e pó de rocha moída. Este descarte é feito automaticamente por uma central que controla todas as condições de atividade do tear; o sistema está demonstrado na Figura 12.

Figura 12: Esquema de descarte e recirculação do LBRO G em um tear tradicional.



Fonte: Peyneau; Pereira citado por Reis (2008, p. 33).

O resíduo LBRO D (sem granalha) é toda a lama residual que não possui vestígios de granalha em sua composição, sendo proveniente do corte com fios diamantados, que gera uma lama de água com pó de rocha, e do polimento cuja lama contém água, pó de rocha, resíduo das lixas de polimento e traços da resina utilizada para acabamento.

Por muitos anos, esta lama ficava depositada em lagoas de sedimentação diretamente sob o solo, o que representava um impacto ambiental significativo, porém, atualmente as empresas coletam estes resíduos por canaletas e tubulações direcionando a poços de coleta apresentados na Figura 13 e, em geral, já adotam o sistema de filtro prensa para redução da umidade do material antes de direcionar a destinação, buscando o reaproveitamento da água utilizada no sistema como pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 13: Poço de coleta e destinação de (a) LBRO G e (b) LBRO D para os tanques de decantação.



Fonte: Cortesia Group Vitoria Stone (2012).

Figura 14: Silos de decantação ao lado do filtro prensa e área de estocagem.



Fonte: Cortesia Group Vitoria Stone (2012).

Após a secagem parcial do resíduo, o transporte e a disposição dele nos aterros industriais condicionam à necessidade de gastos consideráveis por parte das serrarias, dadas as devidas proporções.

O volume de resíduo gerado pelo beneficiamento de rochas ornamentais é bastante significativo, porém, existe uma oscilação neste quantitativo, pois dependem da demanda do mercado consumidor. Segundo Calmon e Silva (2006), durante o processo de serragem em teares convencionais, 25% a 30% do bloco são transformados em pó, sabendo que a diminuição dessa perda depende diretamente da melhoria da tecnologia de corte, sendo este percentual reduzido a 20% nos teares de fios diamantados.

Dados da ABIROCHAS (2013) apontam um montante relativo aos rejeitos de processamento de 41% da produção de rochas ornamentais, totalizando em 2012 para a produção brasileira de 9,3 milhões de toneladas de rochas, um total de 3,35 milhões de toneladas de resíduo, considerando aqui os resíduos desde a extração até o esquadrejamento das peças.

Os pedaços de rochas residuais podem ser britados e utilizados como pó-de-pedra e agregados, porém, especificamente o material proveniente da serragem por sua condição física não é aplicado diretamente.

Estimando uma geração de resíduo de 800.000 toneladas por ano no ES e considerando 40 anos de atuação do setor, as 32.000.000 toneladas de resíduo produzidas gerariam um volume de aproximadamente 12.800.000 m³ (considerando uma massa específica média do resíduo de 2500 kg/m³). Sendo assim, para um aterro de 5 m de altura, a área total necessária seria de 2,56 km², o que corresponde a aproximadamente 238 campos de futebol ou ainda a 50% do bairro Praia do Canto da cidade de Vitória, ES.

Assim, o tratamento do referido resíduo deve ser uma grande prioridade do setor, enfatizando-se que sua disposição final sob a forma de aterros industriais determina a formação de grandes ambientes desérticos, não sendo a melhor solução para o problema.

2.2.2.1 Estudos e aplicações em matrizes cerâmicas

As possibilidades de utilização de LBRO na indústria cerâmica já foram comprovadas em diversas pesquisas devido às suas características de material fino que pode ser incorporado na matriz.

A incorporação de LBRO traz efeitos positivos em relação à redução da absorção de água em matrizes de cerâmica vermelha (SEGADÃES; CARVALHO; ACCHAR, 2005; ACCHAR; VIEIRA; HOTZA, 2006), mas valores superiores da LBRO aumentam os índices de absorção de água e somente os diminuem se a temperatura de sinterização se eleva (SILVA *et al.*, 2005), além disso a incorporação de resíduo reduz a retração e aumenta o módulo de ruptura (MELLO; AGOSTINHO, 2005; COCHI, 2006).

Quanto à resistência à compressão axial, há uma tendência de diminuição com o aumento do teor de resíduo utilizado, sendo essa queda significativa quando a proporção está acima de 50% de adição (CALMON *et al.*, 1998; LIMA, 2010). Vale ressaltar que a redução da resistência pode ser atribuída à maior porosidade da matriz (SILVA, *et al.* 2005).

A temperatura de sinterização e a quantidade de resíduo afetam diretamente as propriedades mecânicas do material produzido (MOREIRA, FREIRE e HOLANDA, 2003) e modificam também a microestrutura das peças cerâmicas, que tem uma significativa redução da porosidade e maior densificação (MANHÃES; MOREIRA; HOLANDA, 2009).

Além da produção de tijolos (ELICHE-QUESADA *et al.*, 2012; BILGIN *et al.*, 2013), telhas (TORRES *et al.*, 2008), tijolo de solo cimento, existe também a possibilidade de aplicação da LBRO para produção de cerâmica vitrificada (DANTAS, 2008; SOUZA; PINHEIRO; HOLANDA, 2011), onde o resíduo contribui para um maior grau de vitrificação e as propriedades mecânicas são melhoradas.

De maneira geral a incorporação do resíduo em matrizes cerâmicas não prejudica as propriedades tecnológicas desses produtos, pelo contrário, até certos teores limites amplia o desempenho das matrizes. Diante disso, vale considerar os custos financeiros envolvidos e a sua compensação quanto aos ganhos com a preservação ambiental.

2.2.2.2 Estudos e aplicações em matrizes betuminosas

Misturas asfálticas necessitam de finos para melhoria de seu desempenho mecânico, térmico, reológico e de absorção de água, sendo assim, verifica-se um potencial de aplicação da LBRO nestas matrizes, visto que se trata de material fino e sem reatividade.

É viável tecnicamente a utilização do resíduo como filer em concreto betuminoso, preenchendo vazios entre os agregados e melhorando o desempenho sem aumento no teor de asfalto (SOUZA; RODRIGUES; NETO, 2005; KARASBAHIN; TERZI, 2007; RUBIO *et al.*, 2010; AKBULUT *et al.*, 2012; GOTTARDI; CALMON; TEIXEIRA, 2013) e também como substituto de agregados naturais na mistura betuminosa (MORENO; RUBIO; ECHEVARRIA, 2011).

2.2.2.3 Estudos e aplicações na produção de cimento

Tratando-se das aplicações relacionadas à fabricação de cimento, há a viabilidade técnica de formular farinhas para a produção do clínquer com 1% de resíduo LBRO em sua composição sem afetar os módulos químicos indicados pela indústria cimenteira e facilitando o processo de moagem dada a finura do material (GOBBO; MELLO, 2005).

Há também a possibilidade de substituição parcial do clínquer por resíduo de mármore na fabricação de cimento, com melhores resultados para o teor de 10%, sem alterações significativas no tempo de pega (ARUNTAS *et al.*, 2010). Além disso, estudos indicam ainda viabilidade técnica na produção de cimento composto com a utilização do resíduo associado à escória de aciaria (ARRIVABENE, 2012).

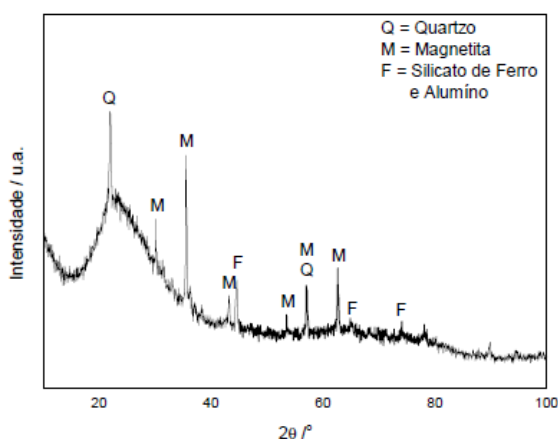
2.2.2.4 Estudos e aplicações na produção de vidros

Observada a composição química do resíduo, é possível identificar um elevado potencial para sua utilização na fabricação de vidros, devido à presença de óxido formador de rede vítrea (SiO_2) e de outros óxidos componentes (Al_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O e MgO).

Pesquisas apontam a viabilidade técnica da produção de vidro sodo-cálcico (BABISK, 2009) e de vidro borossilicato (MARÇAL, 2011), utilizando resíduo de granito, de mármore e areia com aplicação de tratamento térmico após com a inserção de óxidos para complementação dos teores e adequação química, objetivando a composição similar a vidros comerciais.

Babisk (2009) realizou também um teste de produção de vidro sem adequação química obtido pela fusão apenas do resíduo de granito com granalha de aço. A Figura 15 apresenta o difratograma do material obtido, onde é possível observar uma banda amorfa e também picos característicos das fases cristalinas referentes ao quartzo (SiO_2), a magnetita (Fe_3O_4), e ao silicato de ferro e alumínio ($\text{Al}_{0,7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0,3}$) foram identificados.

Figura 15: Difratograma de raios X do resíduo de granito fundido a 1500° C.



Fonte: Babisk (2009, p.71).

Para produção de lã mineral e lã de vidro, visando o mercado de isolamento térmico e acústico, foi realizada uma caracterização completa do resíduo e uma comparação da composição química típica dos materiais (RODRIGUES *et al.*, 2011). A partir daí, com a inclusão de escória de ferro silício manganês, foi possível obter misturas capazes de produzir com tratamento térmico uma lã mineral que atende os parâmetros exigidos e cujos resultados de difração de raios X está similar ao encontrado na literatura (RODRIGUES, 2009).

2.2.2.5 Estudos e aplicações em matrizes cimentícias

Com a crescente consciência da importância dos conceitos de sustentabilidade e do modelo cíclico de produção e consumo, vem-se buscando a otimização dos recursos naturais empregados e a redução da geração de resíduos. Esta redução é resultado de uma gestão baseada na prevenção dos resíduos, reciclagem e reuso, e na melhoria da disposição final, evitando os aterros (JOHN, 2000).

Para que seja possível a utilização de um rejeito industrial, é preciso fazer sua completa caracterização, de modo que se possam avaliar suas reais condições de utilização. Neste contexto, diversos pesquisadores já estudaram o LBRO, identificando suas características típicas e verificando as possíveis aplicações como materiais de construção buscando mitigar seus impactos ambientais.

As primeiras publicações relacionadas datam da década de 1990 e o Brasil foi um dos pioneiros neste estudo com um importante desenvolvimento de pesquisas no Espírito Santo, que também ocorreram posteriormente no Rio Grande do Sul, Minas Gerais e também em Estados produtores de rochas da região nordeste.

As pesquisas brasileiras dos últimos dez anos referentes às aplicações deste resíduo em materiais de construção é apresentada por Bastos *et al.* (2013), enfatizando a viabilidade técnica do uso do material em sua condição de pó inerte em matrizes betuminosas, cerâmicas e cimentícias, adicionado como incorporação tipo fíler, como substituto de agregado miúdo e até mesmo de aglomerante, considerando os baixos teores.

Estas aplicações são diversas para produtos como blocos, telhas, placas de revestimento, tijolos solo-cimento, ladrilhos, argamassas e concretos. Pelas características que o resíduo possui, em geral, sua aplicação está baseada no efeito fíler, sendo incluído em sua condição de material fino, buscando melhoria do comportamento mecânico, elevação da durabilidade e redução no uso de agregados ou aglomerantes

De acordo com o foco deste estudo, foi realizado um levantamento atual das pesquisas utilizando o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais em matrizes cimentícias e está apresentada na Tabela 5 uma relação dos estudos

publicados internacionalmente sobre este tema nos últimos anos, separados conforme o tipo de aplicação.

Tabela 5: Estudos de aplicação de resíduos de rochas ornamentais e materiais cimentícios.

Autores	Produto final da pesquisa
Concreto	
Calmon <i>et al.</i> (2005)	Concreto auto-adensável com LBRO como adição tipo fíler
Almeida <i>et al.</i> (2007)	Concreto com substituição parcial de agregado miúdo por LBRO
Bicini, Kablan e Yilmaz (2007)	Concreto com substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de mármore
Almeida, Branco e Santos (2007)	Concreto branco com substituição parcial de agregado miúdo por LBRO
Alyamaç e Ince (2009)	Concreto auto-adensável com resíduo de mármore de diferentes origens de rochas como adição tipo fíler
Alzboon e Mahasneh (2009)	Concreto com substituição parcial da água pela lama fluida do processo de corte de rochas
Topçu, Bilir e Uygunog (2009)	Concreto auto-adensável com substituição parcial de aglomerante (cimento+cinza volante) por resíduo de mármore
Hameed e Sekar (2009)	Concreto com substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de mármore
Ambarish <i>et al.</i> (2011)	Bloco de concreto com substituição de agregado miúdo por resíduo de granito
Gencel <i>et al.</i> (2012)	Bloco de concreto para pavimentação com substituição de agregado miúdo por resíduo de mármore
Argamassa	
Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010)	Argamassa com substituição parcial de agregado miúdo e cimento por resíduo de mármore
Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010)	Argamassa de auto nivelamento com substituição parcial de agregado miúdo e cimento por resíduo de mármore
Mármol <i>et al.</i> (2010)	Argamassa de alvenaria coloridas com substituição parcial de cimento e material de enchimento por resíduo de granito
Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010)	Argamassa com substituição parcial de agregado miúdo por LBRO calcinado a 700°C
Cimento	
Aruntas <i>et al.</i> (2010)	Cimento com substituição de parte do clínquer por resíduo de mármore
Jain (2012)	Cimento composto parcialmente por material pozzolânico (cinza de casca de arroz) e por material inerte (resíduo de mármore)
Bdour e Al-Juhani (2013)	Clínquer para produção do cimento com substituição parcial do calcário por resíduo de mármore
Li <i>et al.</i> (2013)	Cimento pozzolânico de cinza volante com resíduo de granito como adição mineral

Fonte: Acervo pessoal.

Características químicas, físicas e mineralógicas

As pesquisas analisadas fizeram uso do resíduo de beneficiamento de blocos de rochas ornamentais com diferentes especificações, sendo utilizado para a maioria das publicações o resíduo de mármore, que são rochas comuns em regiões

européias e asiáticas, depois o resíduo de granito e o resíduo de rochas ornamentais, quando não há definição da rocha de origem.

Esta diferenciação ocorre principalmente dada à composição química de granitos e mármore, que possuem formações geológicas variadas, o que pode ser visualizado nos exemplos conforme Tabela 6.

Tabela 6: Composição química de diferentes tipos de resíduos utilizados.

Óxidos	Teores (%)			
	Resíduo de mármore		Resíduo de granito	
	Alyamaç e Ince (2009)	Alzboon e Mahasneh (2009)	Mármol <i>et al.</i> (2010)	Calmon <i>et al.</i> (2005)
SiO ₂	0,14	0,83	61,76	59,95
Al ₂ O ₃	-	0,21	13,38	10,28
Fe ₂ O ₃	0,32	0,11	6,85	6,05
CaO	54,55	54,22	5,90	6,51
MgO	4,17	0,91	1,87	3,25
K ₂ O	-	0,00	3,45	4,48
Na ₂ O	-	-	2,35	3,39

Fonte: adaptado de Alyamaç e Ince (2009); Alzboon e Mahasneh (2009); Mármol *et al.* (2010) e Calmon *et al.* (2005).

Os mármore tem predominância de CaO e os granitos de SiO₂, quartzo. Porém, vale ressaltar que principalmente para as aplicações que contenham pó de rocha granítica em sua formação, indica-se a avaliação das possíveis formações expansivas decorrentes da ação de álcalis como o K₂O e o Na₂O, mesmo que o resíduo seja material rochoso, aparentemente inerte.

Portanto, a composição química do resíduo utilizado é decorrente do perfil de produção das empresas de onde o material é coletado. No Espírito Santo, em geral, as empresas atuam com blocos de origens diversas, descartando o resíduo sem separação quanto à classificação do tipo de rocha.

A separação realizada atualmente nas indústrias capixabas é quanto à presença ou não de granalha de aço, sendo que esta característica não foi apontada pelas pesquisas analisadas.

Uliana *et al.* (2013) apresentam um comparativo quanto às principais diferenças do resíduo de rocha provenientes do processo com granalha e sem granalha,

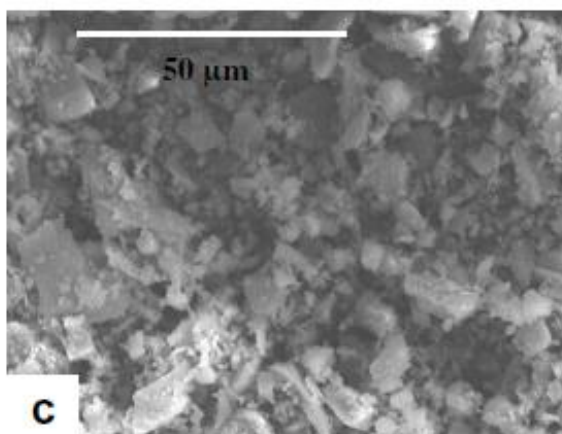
demonstrando que os materiais são bastante similares quanto às propriedades físicas e químicas, a não ser pelas micro fagulhas de aço que precisam ser analisadas em especial para cada aplicação, principalmente nos aspectos de durabilidade.

Quanto às propriedades físicas dos resíduos utilizados, Calmon *et al.* (2005), Alyamaç e Ince (2009), Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009), Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010), Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) e Mármol *et al.* (2010) enfatizam que a baixa granulometria e a área específica são as propriedades mais importantes para a aplicação em matrizes cimentícias quando atuando como fíler, incorporado ou substituindo o cimento, pois preenche poros e com os efeitos de nucleação podem melhorar o desempenho mecânico do material.

Para as aplicações do resíduo como substituto de agregado miúdo, as faixas granulométricas são ligeiramente mais amplas sendo inclusive que para o caso da pesquisa proposta por Binici, Kaplan e Yilmaz (2007) foram utilizadas partículas de dimensões superiores de até 1 mm de diâmetro.

Alyamaç e Ince (2009), Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) e Mármol *et al.* (2010) apresentam imagens microscópicas do resíduo utilizado e afirmam que a alta superfície específica pode ser justificada não somente pela baixa granulometria, mas também pela irregularidade dos grãos, conforme a Figura 16 publicada por Mármol *et al.* (2010).

Figura 16: Microscopia do resíduo de rochas ornamentais.



Fonte: Mármol *et al.* (2010, p.619).

Influência nas matrizes – estado fresco

Matrizes cimentícias são diretamente influenciadas no estado fresco pela ação de adições minerais. Aquelas com baixa granulometria tendem a aumentar o consumo de água à medida que são adicionadas, fazendo com que para maiores teores de incorporação/substituição da adição resultem menores trabalhabilidades. Tratando-se de material de alta finura, os resíduos de rochas tendem a diminuir a trabalhabilidade e necessitar de uma maior demanda de água.

Alzboon e Mahasneh (2009) realizaram em sua pesquisa a substituição da água do traço do concreto pela lama produzida no corte dos blocos, em seu estado úmido, logo após a utilização nos teares. Concluíram que esta substituição a partir de 25% não obtém resultados satisfatórios quanto à trabalhabilidade justamente pela grande quantidade de finos que dificultam a fluidez das misturas sendo esta questão a principal diferença entre os concretos referência e com substituição.

A redução da trabalhabilidade, ou a maior demanda de água para manter o mesmo abatimento foi confirmada por Almeida *et al.* (2007), Topçu, Bilir e Uygunoglu (2009), Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010) e Gencil *et al.* (2012). Já para Calmon *et al.* (2005) e Alyamaç e Ince (2009) não foi observada uma variação significativa nos materiais produzidos com o resíduo e, em contrapartida, Hameed e Sekar (2009), Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) e Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) que trabalharam especificamente com argamassas observaram uma melhora na trabalhabilidade das matrizes, principalmente com a redução da demanda por aditivos, justificado por uma maior resistência à segregação.

Influência nas matrizes – estado endurecido

As propriedades avaliadas no estado endurecido, como a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade, têm papel importante na definição da possibilidade de aplicação de materiais residuais para a construção civil, pois mesmo que haja uma intenção de aplicação, se estes não puderem cumprir o desempenho necessário, pode inviabilizar a efetiva utilização.

Matrizes cimentícias com adição de materiais finos tem maior preenchimento de poros, o que podem melhorar a resistência à compressão e diminuir a porosidade, por exemplo. No caso da pesquisa de Alzboon e Mahasneh (2009) pode-se afirmar que o percentual de água substituído por lama do corte de rochas não influenciou na resistência à compressão.

Para concretos auto-adensáveis, com o resíduo utilizado como fíler, que é tipicamente necessário nesse tipo de mistura, Calmon *et al.* (2005) obtiveram resultados de resistência à compressão axial similares e satisfatórios, já Alyamaç e Ince (2009) encontraram resultados superiores nas amostras preparadas com o uso do resíduo.

Quando aplicado como substituto parcial de agregado miúdo foram identificados dois comportamentos contraditórios: Almeida *et al.* (2007), Almeida, Branco e Santos (2007), Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) e Gencel *et al.* (2012) alcançaram os resultados mínimos de resistência à compressão esperados, mas identificaram uma redução desta resistência nas misturas com a utilização de resíduo, já Bicini, Kablan e Yilmaz (2007), Hameed e Sekar (2009), Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010), Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010), Ambarish *et al.* (2011) afirmam que a substituição de percentuais de agregado miúdo por resíduo de rochas tende a melhorar os resultados de resistência mecânica, e os teores de melhores resultados são de aproximadamente 25%.

As aplicações do resíduo como substituto do cimento mostraram que, para maiores percentuais, o efeito fíler não é suficiente para suprir a ação aglomerante, ou seja, as substituições acima de 10% apresentaram redução significativa da resistência à compressão como afirmam Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010), Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) e Mármol *et al.* (2010), exceto para a aplicação da pesquisa de Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010), que identificou uma tendência de aumento da resistência à compressão em teores de até 15% de substituição de cimento por resíduo, o que é justificado pelos autores dada a queima realizada no material antes da aplicação (temperatura de 700° C). Independente dos resultados gerais, os autores das pesquisas analisadas indicam que a substituição de cimento por resíduo obtém valores similares aos de referência quando em teores de 5%.

O módulo de elasticidade é uma importante propriedade que indica a rigidez de um material, desta forma, quando os valores são altos, demonstram dificuldade de deformação. Almeida *et al.* (2007), Almeida, Branco e Santos (2007), e Gencil *et al.* (2012) observaram uma tendência de diminuição do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com o aumento do teor de resíduo utilizado na substituição de agregado miúdo, visto que são materiais com granulometrias diferentes.

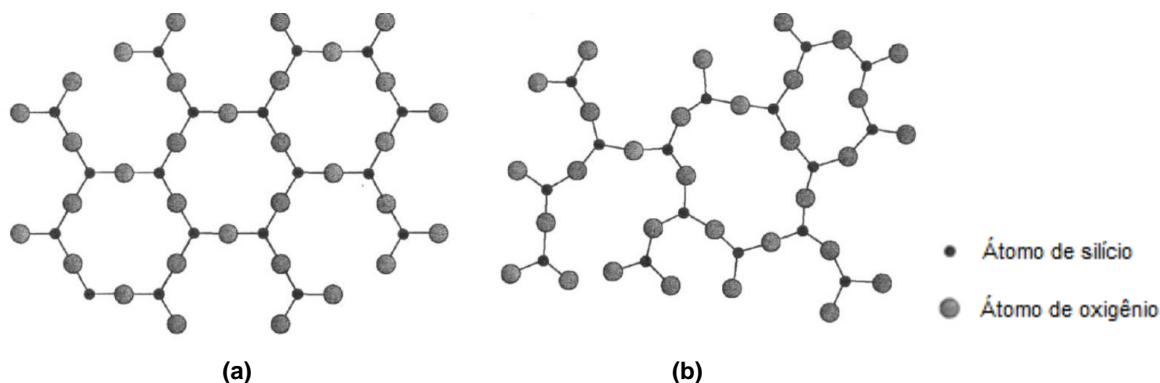
Em geral, os resultados apresentados pelos pesquisadores demonstram que com o devido controle dos parâmetros, o resíduo é uma alternativa eficiente quanto ao desempenho mecânico dos materiais quando aplicado à matrizes cimentícias.

2.3 Vidro

Os vidros são um grupo familiar de materiais cerâmicos que consistem em silicatos não-cristalinos compostos também por outros óxidos, os quais influenciam as suas propriedades de acordo com a composição geral (CALLISTER, 2000).

Os silicatos são materiais compostos principalmente por silício e oxigênio, os dois elementos mais abundantes na crosta terrestre e podem se organizar no aspecto molecular de formas diferentes. A sílica (SiO_2) quando arranjada de maneira regular e ordenada, forma uma estrutura cristalina geralmente de temperatura de fusão elevada. Porém a sílica também pode ser constituída na forma de um sólido não-cristalino ou vidro, com um elevado grau de aleatoriedade atômica, o que é uma característica dos líquidos. A organização molecular destes materiais está comparada na Figura 17 (CALLISTER, 2000).

Figura 17: Esquemas bidimensionais da estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e (b) dióxido de silício não-cristalino, por exemplo, areia e vidro respectivamente.



Fonte: Callister (2000, p.39).

Como todo material, as propriedades dos vidros dependem de sua estrutura, que por sua vez, resulta de sua composição química. Os vidros são basicamente compostos de areia (SiO_2), calcário (CaO), barrilha (Na_2O), alumina (Al_2O_3) e corantes ou descorantes (óxidos como aditivos).

A composição dos diferentes tipos de vidros varia de acordo com as propriedades necessárias para as diferentes aplicações. A inserção de outros óxidos na matriz formadora de rede vítrea (em geral, SiO_2), pode variar a cor, o índice de refração e ainda diminuir o ponto de fusão e a viscosidade² do vidro tornando mais fácil a sua conformação a temperaturas mais baixas, sendo estes óxidos classificados como modificadores de rede vítrea e intermediários (CALLISTER, 2000). São apresentadas na Tabela 7 as composições químicas de alguns dos tipos de vidros.

Tabela 7: Composição de alguns vidros.

Tipos	Composição (%)					
	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	B_2O_3	Outros
Sílica fundida	> 99,5	-	-	-	-	-
Sodo-cálcico	74	16	5	1	-	MgO
Vidro ao chumbo	63	8	-	1	-	PbO
Boro-silicato	81	3,5	-	2,5	13	-
Alumino-silicato	62	1	8	17	5	MgO
Fibra de vidro	55	-	16	15	10	MgO

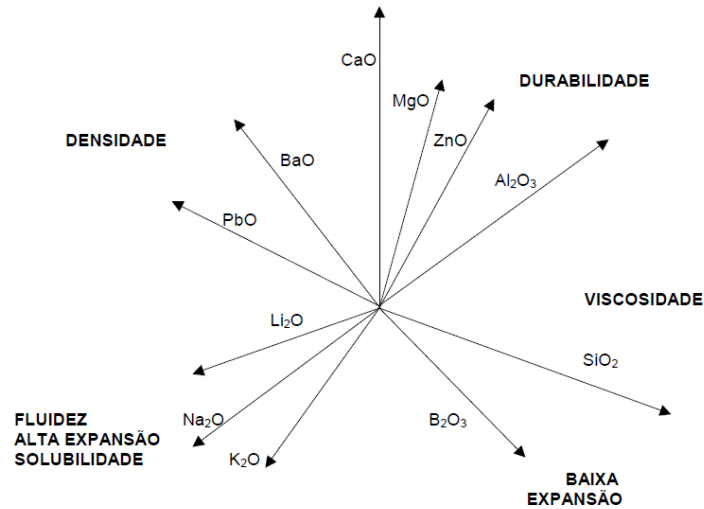
Fonte: Adaptado de Callister (2000) e Akerman (2000).

Como esta pesquisa busca desenvolver material vítreo a partir de LBRO, vale ressaltar como as características do vidro são influenciadas tanto pelo processo de produção como por sua composição química.

A Figura 18 ilustra qualitativamente a relação entre as propriedades e os óxidos componentes de um vidro (AKERMAN, 2000).

² **Viscosidade:** “É uma medida da resistência à deformação de um material não-cristalino” (CALLISTER, 2000, p. 305). O escoamento viscoso se origina nas tensões de cisalhamento e a velocidade depende do arranjo atômico e conseqüentemente da temperatura. Quanto maior a viscosidade, maior a resistência do material ao escoamento.

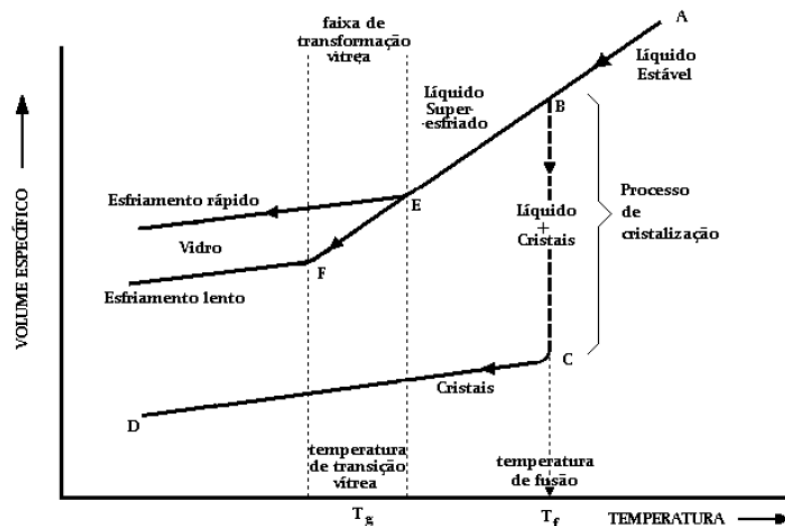
Figura 18: Funções relativas dos óxidos nos vidros.



Fonte: Akerman (2000, p. 23).

Além da composição, o fator temperatura também afeta as propriedades dos materiais vítreos, pois estes são sensíveis a alterações de temperatura e fabricados a partir de tratamentos térmicos, porém não se solidificam do mesmo modo que os materiais cristalinos, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19: Gráfico do comportamento volume específico x temperatura no processo de solidificação para materiais vítreos e cristalinos.



Fonte: Akerman (2000, p.11).

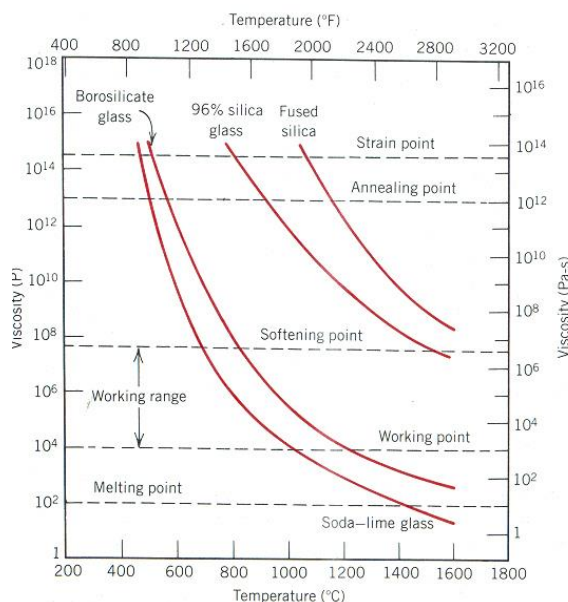
No caso dos materiais cristalinos, existe uma diminuição descontínua no volume quando se atinge a temperatura de fusão, T_f , formando posteriormente o sólido

crystalino. Entretanto, no caso dos materiais vítreos, o volume diminui continuamente em função da redução na temperatura, ocorrendo uma diminuição na inclinação da curva na temperatura de transição vítrea T_g (CALLISTER, 2000).

Porém, como é possível observar, T_g na verdade não é um ponto fixo, mas sim uma faixa, e dentro desta faixa pode assumir diversos valores de acordo com a velocidade de resfriamento do material, o que trata-se de outro fator determinante na obtenção de material vítreo. No gráfico pode se observar ainda, que uma determinada massa de um vidro que sofreu esfriamento rápido, por ter tido menos chance de se rearranjar, ocupa um volume maior, ou seja, tem menor densidade que o mesmo vidro esfriado lentamente (AKERMAN, 2000).

Também importantes para as operações de conformação do vidro são as características viscosidade-temperatura apresentadas por esses materiais. A Figura 20 apresenta as curvas típicas de viscosidade em função da temperatura para alguns vidros de base sílica.

Figura 20: Gráficos de viscosidade x temperatura para os diferentes tipos de vidro.



Fonte: Callister (2000, p. 294)

Verifica-se que vidros com maiores teores de óxidos modificadores de rede vítrea e intermediários na composição têm menores temperaturas de fusão e menor viscosidade como o caso do boro-silicato (*borosilicate glass*) e o sodo-cálcico (*soda-*

lime glass), comparados ao vidro de 96% de sílica (96% *silica glass*) e da sílica fundida (*fused silica*).

Desta forma, pode-se afirmar que a obtenção de material vítreo depende diretamente da composição química da mistura e do tratamento térmico ao qual será submetida, sendo a temperatura limite e a velocidade de resfriamento fatores determinantes nas características resultantes e também na viscosidade da massa, o que influencia na capacidade de conformação.

2.3.1 Estudos de aplicação do resíduo de vidro como pozolana

O vidro se destaca como material que atende à necessidade de desenvolvimento sustentável visto que pode ser considerado como um material completamente reciclável. A reciclagem sempre teve grande destaque na indústria vidreira e ganhou força nos últimos anos com os investimentos feitos pelas indústrias para promover e estimular o retorno das embalagens de vidro como matéria-prima. Além da vantagem do reaproveitamento dos cacos, a reciclagem permite poupar matérias primas naturais, como areia, barilha, calcário etc. No entanto, vidros mistos de cores diferentes são economicamente difíceis de reutilizar para a fabricação de novos produtos (ABIVIDRO, 2013).

Desta forma, vale ressaltar que, além da possibilidade de reciclagem dos cacos na própria indústria vidreira, outra aplicação viável para dar vazão ao montante de resíduo de vidro gerado, não somente em forma de cacos, mas também proveniente dos processos de lapidação e tratamento dos vidros é utilizá-lo como componente para produção de materiais para a construção civil (ANTÔNIO, 2012).

A eliminação de custos com aterros, diminuição da extração de matérias-primas, a economia de quantidade significativa de energia e a redução de poluentes emitidos a partir da produção do clínquer para o cimento estão entre alguns dos benefícios promovidos pela utilização de resíduos de vidro em materiais de construção (SHI; ZHENG, 2007).

Pesquisas realizadas com resíduos de vidro apresentaram resultados satisfatórios para sua aplicação em finalidades variadas no contexto dos materiais cimentícios,

atuando como agregado ou como adição mineral, sendo benéficas no que se refere ao desempenho mecânico do material como também pelo fato de consumir quantidade significativa do resíduo que seria descartado (ANTÔNIO, 2012).

Verificar a viabilidade de utilização do resíduo de vidro em matrizes cimentícias demanda de analisar também a reação que ocorre entre o vidro e os álcalis do cimento. A Reação Álcali-Sílica (RAS) ocorre quando os álcalis do cimento reagem com a sílica do vidro formando um gel. Este gel se expande na presença de água provocando danos como fissuras e enfraquecimento do concreto ou argamassa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A Tabela 8 apresenta uma relação de pesquisas sobre a aplicação específica do resíduo de vidro como material pozolânico em matrizes cimentícias, sem exaurir o assunto. Vale ressaltar que são inúmeras as pesquisas sobre a utilização de material vítreo em materiais de construção, porém esta aplicação específica foi enfatizada, visto que é foco desta pesquisa.

Tabela 8: Estudos de aplicação de resíduo de vidro como pozolana em materiais cimentícios.

Autores	Produto final da pesquisa
Concreto	
Antônio (2012)	Concretos com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro
Nassar e Soroushian (2012)	Concretos com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro
Argamassa	
Shi <i>et al.</i> (2005)	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Paiva <i>et al.</i> (2010)	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Salomão <i>et al.</i> (2010)	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro e adição de resíduo de vidro
Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011)	Argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Wang (2011)	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro
Khmiri, Samet e Chaabouni (2012)	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica e adição de sílica ativa
Matos e Souza-Coutinho (2012)	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Sauer (2013)	Argamassa de recuperação estrutural com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro de para-brisa moído
Cimento	
Sobolev <i>et al.</i> (2007)	Eco-cimento com substituição de clínquer por resíduo de vidro

Fonte: Acervo pessoal.

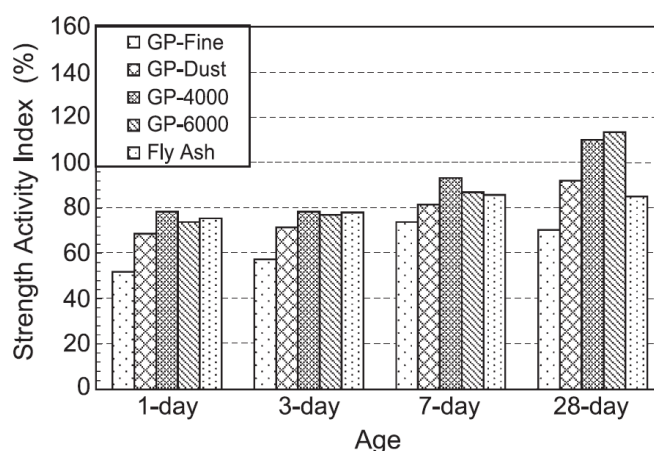
Características químicas, físicas e mineralógicas

Todos os estudos apresentados recomendam a utilização do vidro como pó fino quando está substituindo o cimento, pois as partículas finas de vidro apresentam atividade pozolânica benéfica para concretos e argamassas, inibindo a Reação Álcali-Sílica (RAS) (MATOS, 2010). Shi *et al.* (2005), Sobolev *et al.* (2007), Paiva *et al.* (2010), Salomão *et al.* (2010), Wang (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Ling e Poon (2010), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) afirmam que as expansões devido a RAS são controladas apenas quando o resíduo de vidro é utilizado com grãos de diâmetros inferiores a 75 μ m.

Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010) e Matos e Souza-Coutinho (2012) verificaram a morfologia das partículas do resíduo de vidro, concluindo que é formado por grãos de alta angulosidade o que amplia significativamente sua superfície específica quando comparado ao cimento, podendo auxiliar assim na reatividade do material.

Shi *et al.* (2005) demonstraram ainda que o índice de atividade pozolânica variou ao longo do tempo de acordo com a granulometria do resíduo de vidro, mas manteve-se similar e superior (aos 28 dias) aos valores para a cinza volante (*fly ash*), conforme é possível verificar na Figura 21, com exceção do resíduo GP-fine (primeira coluna em cada conjunto no gráfico), pois possui grãos maiores que os demais.

Figura 21: Desenvolvimento do índice de atividade pozolânica segundo a ASTM C311.



Fonte: Shi *et al.* (2005, p. 991).

Influência nas matrizes – estado fresco

Antônio (2012) observou uma redução da trabalhabilidade do concreto com o aumento do teor de vidro na mistura, mantendo constante a relação a/c. A justificativa para esta redução do abatimento pode ser atribuída à maior superfície específica e a geometria desfavorável do resíduo de vidro, corroborando com os resultados encontrados por Wang (2011) e Sauer (2013) em argamassas. Em contrapartida Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) não observaram diferenças significativas para as argamassas sem substituição e aquelas com resíduo de vidro.

Quanto à massa específica no estado fresco, Nassar e Soroushian (2012) e Sauer (2013) observaram uma tendência de redução nas misturas com o aumento do teor de resíduo de vidro, o que foi atribuído à menor massa específica do pó de vidro quando comparado ao cimento.

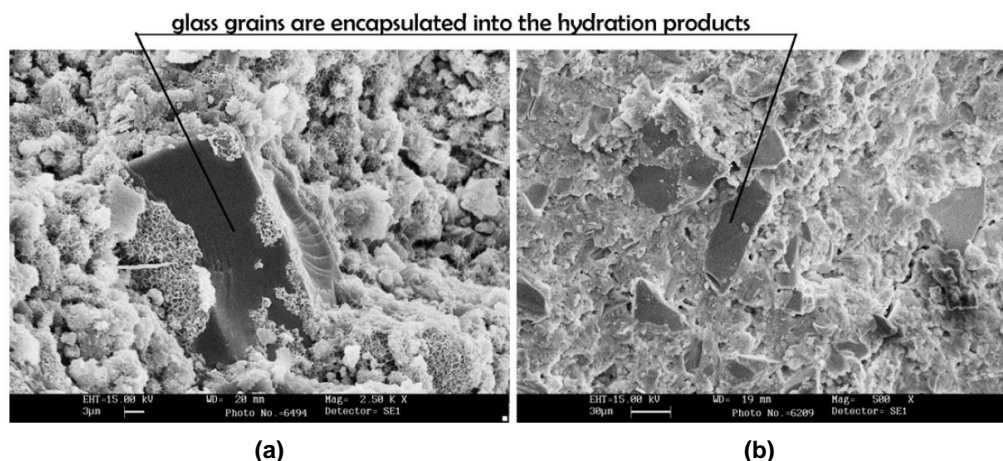
Influência nas matrizes – estado endurecido

O comportamento no estado endurecido indica a capacidade do material de suportar as ações que aconteceram sobre ele ao longo de sua vida útil e as adições pozolânicas tendem a participar ativamente das reações durante a hidratação, colaborando para a densificação da matriz e aumentando a durabilidade.

Sobolev *et al.* (2007) obteve um eco-cimento produzido com 50% de substituição de clínquer por resíduo de vidro com um aumento de resistência à compressão aos 28 dias em relação ao cimento Portland de referência o que pode estar relacionado às reações pozolânica, sendo possível visualizar os produtos da hidratação pelas imagens da microscopia eletrônica de varredura apresentadas na Figura 22.

Observa-se aos 7 dias a formação do C-S-H em sua fase fibrosa, em camadas, envolvendo os grãos de vidro em uma membrana gelatinosa e aos 28 dias um maior encapsulamento dos grãos.

Figura 22: Microestrutura do cimento produzido com vidro verde aos (a) 7 dias e aos (b) 28 dias.



Fonte: Sobolev *et al.* (2007, p. 975).

Quanto à resistência à compressão axial de concretos produzidos com o resíduo de vidro em substituição parcial do cimento Antônio (2012) e Nassar e Soroushian (2012) obtiveram resultados positivos nas matrizes, mas com uma tendência de redução à medida que se aumenta o teor de resíduo.

Antônio (2012) equiparou ainda estes resultados com as imagens de microestrutura, onde verificou um maior preenchimento das zonas de transição e não observou qualquer tipo de fissuração que pudesse estar associada à ocorrência da RAS.

No caso dos estudos desenvolvidos em argamassas com o resíduo de vidro como substituto do cimento por Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Salomão *et al.* (2010), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010), Wang (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012), Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) e Sauer (2013) os resultados de resistência à compressão axial demonstraram a viabilidade técnica de aproveitamento do resíduo, economizando cimento em argamassas diversas. Vale ressaltar que em idades posteriores, por exemplo 270 dias, como na pesquisa de Sauer (2013) as argamassas com substituição de cimento por resíduo obtiveram valores de resistência à compressão superiores aos da argamassa de referência.

Shi *et al.* (2005), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) avaliaram o comportamento mecânico das argamassas com resíduo de vidro em diferentes faixas granulométricas e concluíram que quanto mais fino melhores são os resultados de resistência à compressão das argamassas.

Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) identificaram ainda através de imagens de microscopia a formação de gel expansivo proveniente da RAS em argamassas produzidas com o resíduo de vidro em maiores granulometrias, mas quando finamente moídos, os efeitos da RAS não foram identificados, visto que a reação pozolânica é uma inibidora da RAS, pelo consumo de CH e formação de C-S-H adicional.

São claros os resultados positivos da utilização do resíduo de vidro como substituto do cimento em concretos e argamassas, entretanto, a tendência geral é uma diminuição da resistência à compressão com maiores teores de substituição principalmente visto que o material pozolânico não possui a mesma reatividade do cimento, dependendo dos produtos de hidratação para iniciar o processo de formação de C-S-H e também devido a um efeito de diluição.

Quanto ao módulo de elasticidade dos materiais produzidos com resíduo de vidro pode-se admitir que, conforme as pesquisas analisadas há uma tendência de aumento do módulo de elasticidade com o aumento no teor de substituição. Antônio (2012) afirmou a partir de análise estatística que, nos concretos produzidos, esta tendência de aumento do módulo de elasticidade não foi significativa. As pesquisas de Paiva *et al.* (2010) e Sauer (2013) são exceção, pois identificaram uma tendência de redução do módulo de elasticidade com o aumento do percentual de substituição, ou seja, as argamassas com os melhores resultados foram aquelas com os maiores percentuais.

Sendo assim, além dos benefícios relativos à mitigação da RAS em granulometrias mais finas, em geral, as pesquisas constataram que a adição do pó de vidro pode influenciar positivamente na qualidade de concretos e argamassas, devido ao efeito pozolânico comprovado e à melhora no empacotamento das partículas, confirmando o potencial para a utilização de materiais vítreos como substitutos parciais de cimento Portland, sendo que diversos autores concluíram que substituições de até 20% por resíduo de vidro foram as que produziram os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico de argamassas.

Capítulo 3

Programa experimental

“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos.”

Albert Einstein

3. Programa Experimental

A revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior fundamentou esta pesquisa de forma que pudessem ser definidos os objetivos e as hipóteses dentro dos temas propostos, podendo identificar como lacuna o potencial de aplicação do resíduo proveniente do setor de rochas ornamentais como material pozolânico em matrizes cimentícias após o devido tratamento.

Considerando que pesquisa é um procedimento racional e sistemático, visando proporcionar respostas a determinados problemas, pode-se afirmar que, a partir dos conhecimentos disponíveis, os métodos são o meio para obtenção destas respostas que devem ser analisados de forma satisfatória para apresentação dos resultados.

De acordo com Gil (2002) esta pesquisa é do tipo explicativa, pois busca verificar a influência de fatores específicos em determinados fenômenos e, por estar relacionada às ciências naturais requer, portanto o uso de métodos experimentais para possibilitar a explicação da relação entre as variáveis definidas, utilizando uma abordagem quantitativa com coleta de dados a partir da realização e observação de experimentos.

A metodologia experimental adotada estabeleceu os critérios para o uso dos materiais e as estratégias de ensaios no intuito de averiguar o comportamento e as interações destes, objetivando verificar a obtenção de material pozolânico a partir de LBRO.

Para delinear os experimentos foi elaborado um planejamento experimental que contempla a organização desta pesquisa, visando direcionar a execução dos ensaios e a análise dos dados obtidos a partir das argamassas estudadas com resíduo. Foram avaliadas as principais propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido, utilizando diferentes percentuais de substituição do resíduo com e sem tratamento térmico.

Vale ressaltar que o projeto experimental é constituído também de ferramentas estatísticas, cujo objetivo é analisar com confiabilidade os resultados obtidos nos ensaios experimentais para que a partir da abordagem quantitativa possam ser realizadas as conclusões com embasamento.

3.1 Planejamento geral dos experimentos

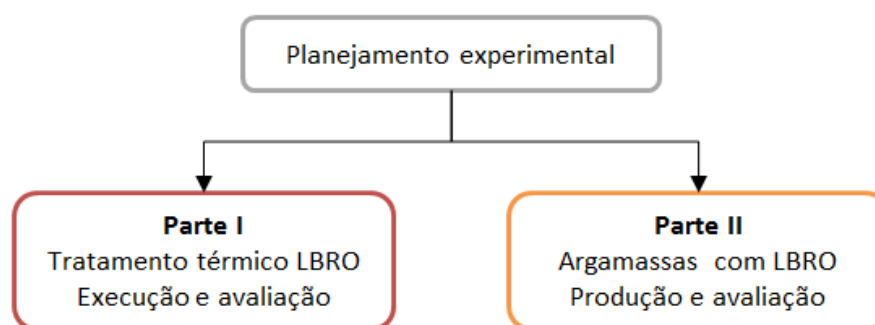
O projeto de experimentos trata-se de uma metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. O uso de projeto de experimentos permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador (RIBEIRO; CATEN, 2011).

Este projeto foi desenvolvido definindo a sequência de ensaios de forma econômica e eficiente e procedendo a uma avaliação estatística dos resultados o que assegura respaldo científico e maximiza as informações obtidas (RIBEIRO; CATEN, 2011).

O programa experimental deste trabalho foi dividido em duas grandes etapas, cujo esquema geral está apresentado na Figura 23. A partir de um estudo inicial das características dos resíduos, foram aplicados quatro tipos de tratamentos térmicos e identificadas as características resultantes, visando aplicar o material tratado termicamente como pozolana.

Então, a partir da escolha de um destes tratamentos pesquisados, os resíduos foram fundidos em maiores quantidades e utilizados como substituto do cimento em argamassas, podendo avaliar, assim, a influência dos diferentes percentuais nas propriedades mecânicas resultantes.

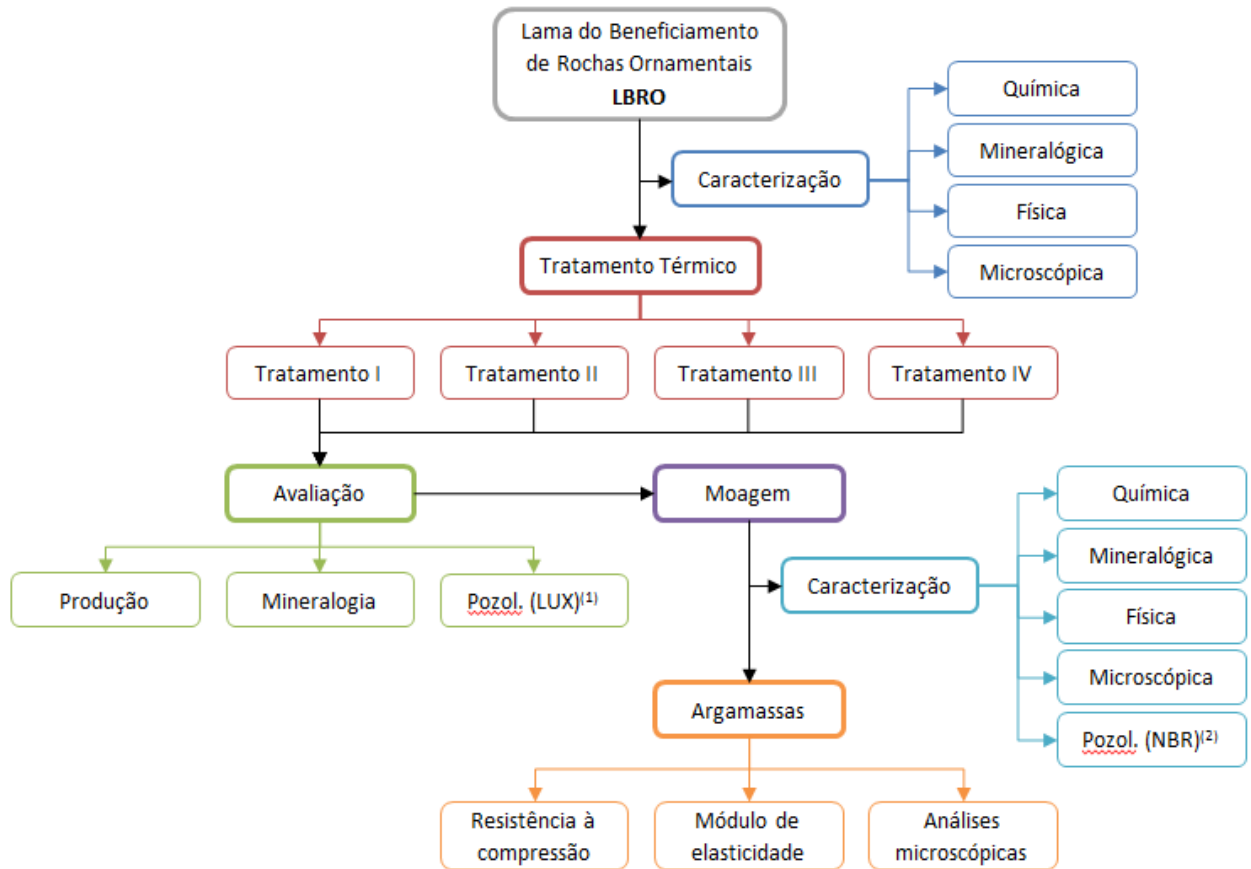
Figura 23: Programa experimental – esquema geral.



Fonte: Acervo pessoal.

A parte I do programa experimental constitui-se de caracterização inicial, realização dos tratamentos no resíduo e avaliação da condição resultante e a parte II refere-se à preparação dos resíduos conforme o tratamento selecionado, caracterização posterior, preparação das argamassas e análise das propriedades finais. O fluxograma desta pesquisa está apresentado na Figura 24.

Figura 24: Programa experimental – fluxograma da pesquisa.



Notas: (1) Pozolanicidade avaliada com a utilização do método proposto por Lúxan, Madruga e Saavedra (1989), denominado Método de Lúxan.

(2) Pozolanicidade avaliada com a utilização do método proposto pela NBR 5752 – Materiais pozolânicos: Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento (ABNT, 2012).

Fonte: Acervo pessoal.

Com base nesta estrutura foram definidos quais os parâmetros que deveriam permanecer constantes (fatores constantes) e os que seriam alterados de forma controlada (fatores controláveis) a fim de obter as variáveis de resposta, ou seja, os aspectos que permitem quantificar as características de qualidade do produto final (RIBEIRO; CATEN, 2011).

3.1.1 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta estudadas neste programa experimental, buscando atingir os objetivos do trabalho, são mensuráveis, quantitativas e estão definidas separadamente por parte da pesquisa.

Parte I

- Condutividade – atividade pozolânica conforme o Método de Lúxan (LÚXAN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989).

Parte II

- Resistência à compressão axial;
- Módulo de elasticidade dinâmico.

3.1.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis, ou seja, os parâmetros do processo desta pesquisa foram:

Parte I

- Tipo de resíduo;
- Tratamento térmico aplicado.

Parte II

- Tipo de resíduo;
- Condição do resíduo;
- Percentual de substituição;
- Idade dos ensaios.

3.1.3 Fatores constantes

Para possibilitar comparativos, alguns fatores são comumente mantidos constantes. Para todos os experimentos desta pesquisa foram fatores constantes:

- Origem dos materiais;
- Procedimento de secagem e destorroamento do resíduo;
- Procedimento de moagem após tratamento térmico.

- Relação água/cimento (0,5);
- Relação material cimentício/agregado (1:3);
- Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova.

3.1.4 Definição dos níveis dos fatores controláveis

Os níveis dos fatores controláveis adotados para esta pesquisa, apresentados nas Tabela 9 e Tabela 10, foram escolhidos com base na revisão bibliográfica, visando inicialmente, na primeira etapa, identificar o tratamento térmico a ser adotado para a segunda etapa da pesquisa, com o desenvolvimento de argamassas para avaliação do comportamento mecânico.

Tabela 9: Níveis dos fatores controláveis para a primeira etapa da pesquisa.

Fatores controláveis	Nº de níveis	Níveis adotados
Tipo de resíduo	2	LBRO G, LBRO D
Tratamento aplicado	4	TTI, TTII, TTIII, TTIV

Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 10: Níveis dos fatores controláveis para a segunda etapa da pesquisa.

Fatores controláveis	Nº de níveis	Níveis adotados
Tipo de resíduo	2	LBRO G, LBRO D
Condição do resíduo	2	Sem e com tratamento (TT0 e TTselecionado)
Percentual de substituição	5	0%, 5%, 10%, 15%, 20%
Idade	3	28, 63 e 91 dias

Fonte: Acervo pessoal.

Os quatro tipos de tratamentos térmicos realizados, bem como o tratamento base de secagem e o tratamento térmico selecionado para a parte II da pesquisa estão nomeados com a sigla TT e a descrição de cada um deles ocorrerá na sequência deste planejamento experimental.

3.1.5 Parte I – Tratamento térmico LBRO: execução e avaliação

As diferentes temperaturas e condições de aplicação do tratamento térmico objetivaram identificar o ponto de fusão dos resíduos LBRO G e LBRO D no intuito

de obter material vítreo após resfriamento, gerando composto amorfo que é ideal para aplicação como pozolana.

Desta forma, com base na revisão bibliográfica, nos resultados obtidos pela caracterização inicial e nas condições disponíveis para realização dos testes, estão descritos na Tabela 11 os tratamentos térmicos aos quais os resíduos foram submetidos e também a condição de preparação inicial definida como TT0.

Tabela 11: Tratamentos aplicados aos resíduos.

Identificação	Descrição	Temperatura	Resfriamento	Observações
TT0	Sem tratamento térmico	100°C	-	Secagem em estufa e destorroamento
TTPilotoA	Tratamento térmico piloto A	900°C	Lento	Teste piloto A
TTPilotoB	Tratamento térmico piloto B	1100°C	Lento	Teste piloto B
TTI	Tratamento térmico I	1200°C	Lento	
TTII	Tratamento térmico II	1300°C	Rápido	Adição de CaO
TTIII	Tratamento térmico III	1400°C	Rápido	Uso de tinta refratária no cadinho
TTIV	Tratamento térmico IV	1500°C	Rápido	

Fonte: Acervo pessoal.

Diante da composição química dos materiais definiu-se a aplicação dos tratamentos térmicos ao resíduo sem gralha (LBRO D) como base para análise inicial e aplicação em ambos para os principais tratamentos identificados.

Após a realização dos tratamentos térmicos, os resíduos foram devidamente preparados e deu-se o processo de avaliação para a escolha daquele que seria o procedimento padrão para obtenção do material a ser adotado para a produção das argamassas. Esta avaliação foi baseada nas condições de produção do material e nas características resultantes quanto à pozolanicidade e mineralogia.

3.1.6 Parte II – Argamassas com LBRO: produção e avaliação

Após a escolha de um dos tipos de tratamento térmico houve produção de material em maior escala de forma que fosse possível suprir a demanda para uma nova caracterização de acordo com as propriedades selecionadas e para produção das argamassas conforme os teores a serem verificados.

O intuito foi de avaliar a capacidade do resíduo produzido ao atuar em matrizes cimentícias, de forma geral, sem determinar uma aplicação específica. Vislumbrando as dimensões dos corpos de prova e conseqüentemente o volume de material necessário, foi estabelecido que a produção fosse de argamassas.

Foram preparados 13 diferentes grupos de argamassas listadas na Tabela 12, variando conforme o tipo de resíduo adotado, LBRO G ou LBRO D, com e sem tratamento térmico e conforme o teor de substituição de cimento por estes diferentes resíduos.

Tabela 12: Programa experimental - grupos de argamassas.

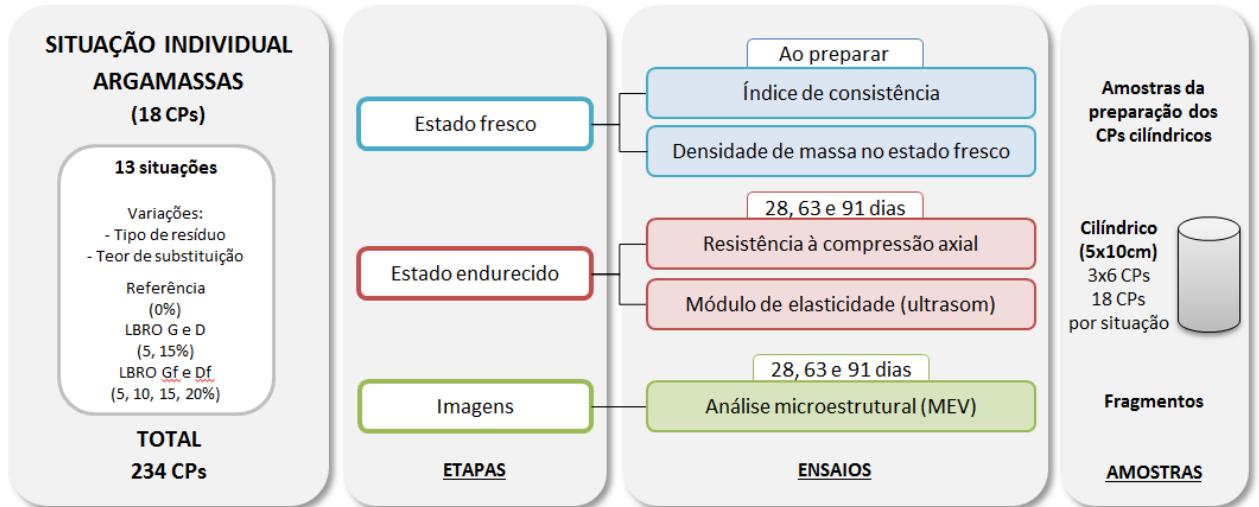
Identificação	Descrição
AREF	Argamassa de referência sem substituição
ALG 5	Argamassa com substituição de 5% por LBRO G seco e destorroado
ALG 15	Argamassa com substituição de 15% por LBRO G seco e destorroado
ALD 5	Argamassa com substituição de 5% por LBRO D seco e destorroado
ALD 15	Argamassa com substituição de 15% por LBRO D seco e destorroado
ALGf 5	Argamassa com substituição de 5% por LBRO G após fusão e moagem
ALGf 10	Argamassa com substituição de 10% por LBRO G após fusão e moagem
ALGf 15	Argamassa com substituição de 15% por LBRO G após fusão e moagem
ALGf 20	Argamassa com substituição de 20% por LBRO G após fusão e moagem
ALDf 5	Argamassa com substituição de 5% por LBRO D após fusão e moagem
ALDf 10	Argamassa com substituição de 10% por LBRO D após fusão e moagem
ALDf 15	Argamassa com substituição de 15% por LBRO D após fusão e moagem
ALDf 20	Argamassa com substituição de 20% por LBRO D após fusão e moagem

Obs.: A fusão pela qual os resíduos LBRO G e D passaram enunciada nesta tabela refere-se ao tratamento térmico selecionado após a fase de avaliação na parte I desta pesquisa (TTselecionado).

Fonte: Acervo pessoal.

A análise de cada uma das argamassas preparadas procedeu-se de forma a avaliar como as diferentes substituições tanto no que se refere ao resíduo adotado como também quanto aos teores utilizados poderiam influenciar nas propriedades resultantes da matriz cimentícia quando comparada à argamassa referência, sem qualquer adição. O estudo desenvolve-se conforme os itens estabelecidos na Figura 25, onde estão apresentados os ensaios realizados e as amostras utilizadas, enfatizando a quantidade de corpos de prova (CPs) necessária.

Figura 25: Programa experimental – ensaios nas argamassas.



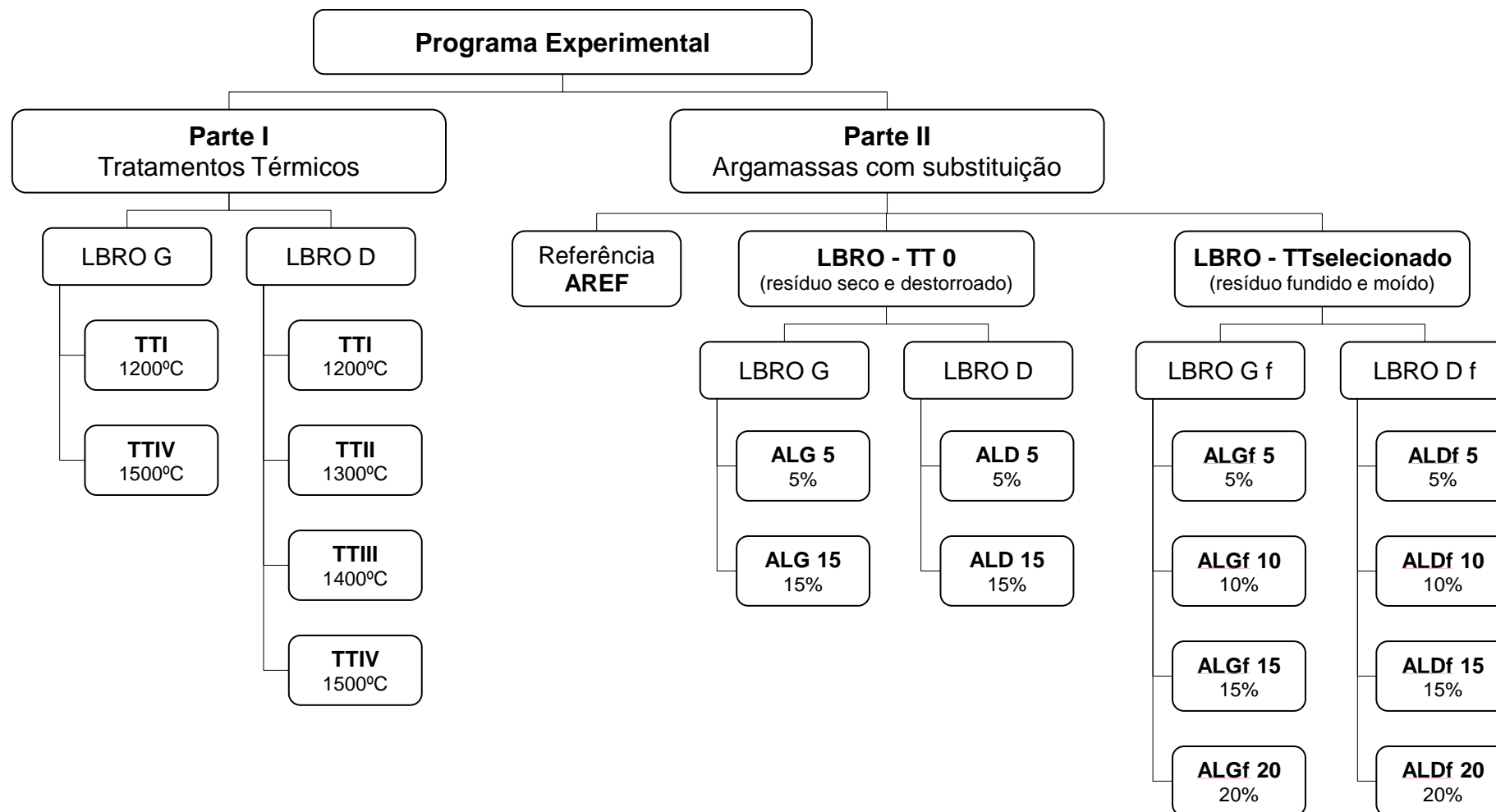
Fonte: Acervo pessoal.

Como o ensaio de módulo de elasticidade é do tipo não-destrutivo, com a utilização do método de ultrassom, os mesmos corpos de prova utilizados para esta verificação podem ser rompidos para avaliação da resistência à compressão axial, demandando, portanto 6 CPs para cada idade, e como são 3 idades (28, 63 e 91 dias), totalizam 18 CPs por situação individual, o que gera um montante de 234 CPs, considerando as 13 situações individuais, conforme Tabela 12.

3.2 Apresentação geral do programa experimental

Tendo em vista as partes da pesquisa e as variáveis adotadas para estudo, um resumo do programa experimental contemplando estas variáveis está apresentado no organograma da Figura 26.

Figura 26: Programa experimental – quadro geral.



Fonte: Acervo pessoal.

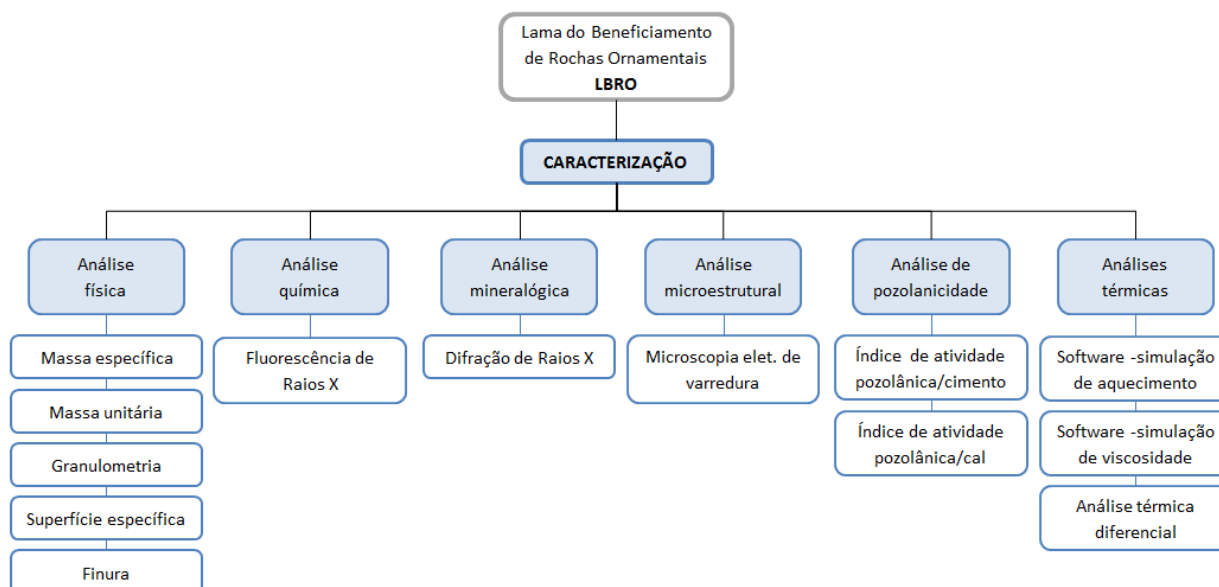
3.3 Métodos

Os principais métodos a serem adotados foram definidos com base na revisão bibliográfica de forma que fosse possível identificar o tratamento térmico mais adequado, as dosagens e os meios para análise da aplicação do material produzido.

3.3.1 Caracterização dos materiais

Na primeira etapa deste trabalho, antes da execução dos diferentes tratamentos térmicos propostos, os resíduos LBRO G e LBRO D foram devidamente caracterizados para identificação de suas propriedades iniciais, conforme os parâmetros indicados na Figura 27. E, da mesma forma, antes da produção das argamassas com o resíduo selecionado para tal, este também foi devidamente caracterizado, para as efetivas comparações.

Figura 27: Programa experimental – caracterização dos resíduos.



Fonte: Acervo pessoal.

Sendo assim, pode-se afirmar que foi realizada uma caracterização completa, inicialmente com o objetivo de identificar todas as propriedades dos resíduos que são relevantes ao contexto da pesquisa e uma caracterização mais direcionada às principais propriedades para dar prosseguimento à segunda etapa. Além disso, vale ressaltar, que na segunda etapa foram caracterizados também os outros materiais necessários para o desenvolvimento deste programa.

3.3.1.1 Caracterização física

No aspecto físico, os resíduos e o cimento foram analisados através de ensaios realizados no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção (LEMAC) – UFES, descritos na Tabela 13.

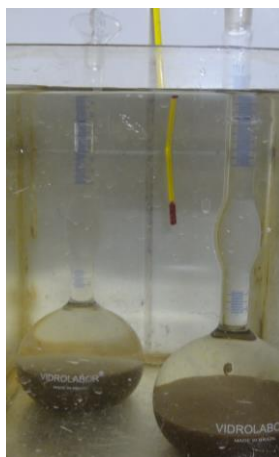
Tabela 13: Métodos de ensaios para a caracterização física.

Propriedade	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Massa unitária	NBR 12127 (ABNT, 1991)
Teor de umidade	NBR NM 24 (ABNT, 2002)
Finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)	NBR NM 76 (ABNT, 1998)
Finura por meio da peneira 0,075 mm (nº 200)	NBR 11579 (ABNT, 2012)
Finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325)	NBR 9202 (ABNT, 1985)

Fonte: Acervo pessoal.

A determinação da massa específica é de grande importância para o desenvolvimento da pesquisa e seguiu os procedimentos estabelecidos para o cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco de Le Chatelier, verificando o deslocamento do líquido no interior do recipiente após a inserção de material conforme Figura 28.

Figura 28: Ensaio de massa específica do resíduo.



Fonte: Acervo pessoal.

Para verificação da massa unitária dos resíduos, dada a faixa granulométrica das partículas, optou-se por utilizar o método estabelecido para o gesso, que se adequa a materiais em pó, conforme aparato experimental da Figura 29.

Figura 29: Ensaio de massa unitária do resíduo.



Fonte: Acervo pessoal.

O teor de umidade foi avaliado conforme o procedimento estabelecido para materiais pozolânicos com verificação de variação da massa de amostras de 1,0 g após 24 horas em estufa.

A finura indica a área superficial do material o que impacta significativamente nas propriedades reativas e essa análise foi executada por meio de percentual retido nas peneiras nº 200 e nº 325 e pelo método de Blaine conforme Figura 30.

Figura 30: Ensaio de finura por meio da (a) peneira nº 200, (b) peneira nº 325 e pelo (b) método da permeabilidade de Blaine.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Acervo pessoal.

A verificação da distribuição granulométrica dos resíduos foi realizada por granulometria a laser pelo Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) de Criciúma/SC. O equipamento utilizado foi o granulômetro a laser da marca Cilas. Esta análise é fundamental para identificar, de fato, o tamanho dos grãos do cimento e dos resíduos tanto na caracterização inicial, como após o tratamento térmico e moagem.

3.3.1.2 Caracterização química

Os componentes químicos foram identificados e quantificados por meio da técnica de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX). Sendo uma técnica bastante utilizada, a FRX baseia-se no princípio de que a absorção de raios X pelo material provoca excitação dos átomos o que acarreta uma radiação denominada fluorescência. Os raios emitidos têm comprimento de onda diferente para cada um dos elementos, o que proporciona sua identificação, a partir da comparação com padrões devidamente calibrados. Testes para obtenção dos dados de perda ao fogo e teores de carbono e enxofre também foram executados.

Estas análises foram realizadas na etapa I pelo Laboratório Químico e de Monitoramento Ambiental da empresa Vale e na etapa II pelo Laboratório de Análises Químicas do Centro de Tecnologia do Gás (CTGÁS) do SENAI/RN.

3.3.1.3 Caracterização mineralógica

A técnica de difração de raios X é uma maneira usual de identificação das fases mineralógicas presentes em um material e representa uma importante ferramenta para a verificação da organização das moléculas em sua formação.

A preparação do material deu-se por moagem com a utilização de grau e pistilo até passar pela peneira nº 200, sendo então acondicionado em porta-amostras de alumínio para análise no equipamento XRD 6000 da Shimadzu no Laboratório de Materiais Carbonosos e Plasmas Térmicos (LMC/LPT) do Centro de Ciências Exatas (CCE) da UFES.

A análise ocorre com a projeção de um feixe de raios X sobre a amostra devidamente preparada e, conforme a sua organização cristalina, a interação entre o campo elétrico do feixe e os elétrons dos átomos provoca a difração dos raios X. A partir do ângulo de varredura são traçados os pontos relativos à incidência da radiação que varia de acordo com a ocorrência de interferências construtivas e destrutivas causadas pelo posicionamento dos átomos, sendo que esta relação obedece a Lei de Bragg³.

Os parâmetros adotados para a análise das amostras foram a voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA, sistema $\theta/2\theta$ com velocidade de varredura de 0,02°/seg e varredura 2θ de 10° a 80°. O equipamento adotado tem como fonte de energia um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios-X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda são $K\alpha$ 1,5418 Å e $K\beta_1$ 1,3922 Å.

Os difratogramas foram gerados com a utilização do software do difratômetro, a partir do computador conectado a ele conforme Figura 31, sendo possível interpretar os gráficos com a utilização do banco de dados do Joint Committee for Powder Diffraction Standards (JCPDS) do International Centre for Diffraction Data (ICDD).

Figura 31: Ensaio de difração de raios X - (a) difratômetro e (b) computador com software.



Fonte: Acervo pessoal.

³ **Lei de Bragg:** Equação que relaciona o comprimento de onda de uma radiação incidente (λ), a distância interplanar da organização cristalina de um material (d) e ângulo de incidência da onda em relação ao plano atômico (θ), sendo definida conforme a equação $n\lambda = 2d \sin \theta$, onde n é um número inteiro (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

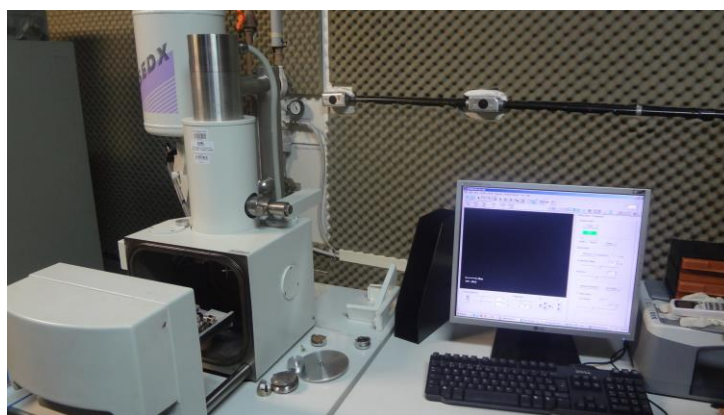
3.3.1.4 Caracterização por imagens

As imagens microscópicas foram geradas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde foi possível visualizar a forma e tamanho dos grãos, bem como confirmar a composição química das partículas a partir dos padrões de energia dos elementos químicos com a utilização do Espectrômetro por Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao instrumento.

Foram utilizados os equipamentos EVO 40XVP da empresa ZEISS do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais (LCSM) do Centro Tecnológico e o equipamento Shimadzu do LMC/LPT do CCE, conforme Figura 32, ambos da UFES.

Através de um feixe de elétrons emitido por um filamento de tungstênio, um sistema de lentes com instrumentos de detecção e uma unidade de varredura captam os elétrons secundários, retroespalhados e fótons projetados da superfície do material, transformando em sinais elétricos os dados recebidos e resultando em uma imagem ampliada que é ajustada conforme os parâmetros introduzidos no software que acompanha o equipamento.

Figura 32: Microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Acervo pessoal.

3.3.1.5 Caracterização quanto à atividade pozolânica

Para verificar a pozolanidade dos resíduos, foram realizados os ensaios de índice de atividade pozolânica conforme as normas NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com a cal (ABNT, 2012) e NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com o cimento (ABNT, 2012).

O ensaio consiste na preparação de três corpos de prova de referência e três de uma argamassa com 35% de substituição do aglomerante pelo material a ser analisado, com a devida compensação de volumes. Foram utilizadas 234 g de cada uma das quatro frações de areia padrão (1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm) beneficiada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a água utilizada foi fornecida pela concessionária pública de abastecimento e usada em quantidade suficiente para obtenção de um índice de consistência da argamassa em 225 ± 5 mm analisado de acordo com a NBR 7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1997).

O cimento utilizado para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi o CPV ARI com massa específica de $3,1 \text{ g/cm}^3$. Apesar da norma NBR 5752 (ABNT, 2012) determinar o uso do cimento CP I não foi possível adotá-lo, pois este não se encontra disponível no mercado. Foi substituído, então, pelo CPV ARI por ser o tipo de cimento com menor teor de adições.

A cal utilizada foi a CH I conforme determina a norma NBR 5751 (ABNT, 2012) com massa específica igual a $2,07 \text{ g/cm}^3$ verificada no LEMAC conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2001).

3.3.1.6 Caracterização térmica

As análises térmicas tiveram o objetivo de determinar a temperatura de fusão dos resíduos LBRO G e LBRO D para dar um direcionamento para os tratamentos térmicos a serem realizados.

A partir dos dados de composição química dos resíduos, foram realizadas simulações computacionais de aquecimento utilizando o software *ThermoCalc®* (THERMO-CALC, 2013), para verificar a temperatura de fusão, e com o software *Slag Viscosity Model* (MAGNESITA, 2010) com o objetivo de avaliar a viscosidade da escória formada pela fusão de cada um dos resíduos em altas temperaturas.

Foi realizada uma análise térmica com os resíduos para verificação da variação de massa com a variação de temperatura (Termogravimetria – TGA). Foi utilizado o equipamento SDT Q600 da fabricante TA Instrument do LABPETRO na UFES que gera gráficos dessa variação e também de sua derivada, sendo realizadas com a

utilização de uma pequena amostra de resíduo (aproximadamente 10 mg) que é alocada em “cadinho” e acondicionada no interior do equipamento. A partir do software específico da empresa em computador conectado ao sistema, inserem-se os parâmetros de aquecimento e ficam registrados os dados das medições que o equipamento executa.

Com este sistema é possível identificar a temperatura da formação de fases e degradação de compostos no material o que, em paralelo aos dados obtidos nos teste piloto e nas simulações computacionais serve como temperatura de referência para parametrização do tratamento térmico do material.

Para as análises desta pesquisa foi adotada uma faixa de temperatura de 10°C a 1300°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min e atmosfera inerte de nitrogênio a uma taxa de 100 mL/min.

3.3.2 Aplicação e avaliação dos tratamentos térmicos

As diferentes temperaturas e condições de aplicação do tratamento térmico no material objetivaram identificar o ponto de fusão dos resíduos LBRO G e LBRO D bem como a forma ideal de executar este processo no intuito de obter material vítreo após resfriamento, gerando composto amorfo que tem grande possibilidade de utilização como pozolana, conforme já identificado na revisão bibliográfica.

A aplicação dos tratamentos térmicos deu-se utilizando dois métodos baseados em equipamentos diferentes:

- **Forno tipo mufla:** Modelo KK, fabricante Linn High Therm, com capacidade de aquecimento de até 1340°C, disponível no LEMAC – UFES.

Este equipamento apresentado na Figura 33 possibilitou a realização de tratamento térmico com baixa velocidade tanto de aquecimento como de resfriamento especialmente por sua estrutura tipo câmara com porta e um volume interno total de aproximadamente 160 litros.

Figura 33: Forno tipo mufla utilizado na pesquisa.



Fonte: Acervo pessoal.

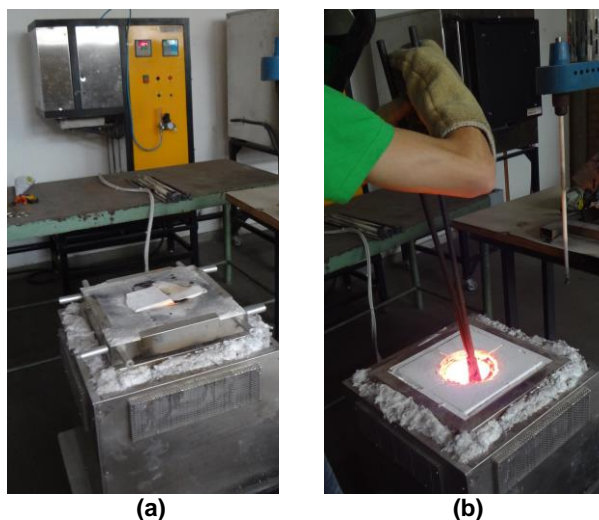
As amostras foram inseridas no interior do forno em temperatura ambiente alocadas em recipientes de porcelana refratária e foi então aplicada a programação de aquecimento com dados de tempo e temperatura para definir a rampa, o patamar e a temperatura final, sendo que o resfriamento deu-se pela inércia do forno.

Estabeleceu-se como padrão uma taxa de aquecimento de 10°C/min até alcançar a temperatura máxima do tratamento térmico em questão, onde o forno mantinha um patamar de temperatura por 2 horas e era então desligado para resfriar lentamente até a temperatura de 100° C quando poderia ser aberto novamente.

- **Forno tipo tubular:** Modelo FE50RP, fabricante Flyever, com controlador de potência e capacidade de aquecimento de até 1600°C, disponível no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES).

Com este equipamento foi possível realizar tratamento térmico com alta velocidade de aquecimento e de resfriamento, justificada por sua capacidade interna de apenas 3 litros e pela possibilidade de inserção e retirada de amostra mesmo em altas temperaturas conforme adaptação de sua estrutura visualizada na Figura 34.

Figura 34: Forno tubular adaptado (a) parte de controle separado da caixa do forno e (b) processo de retirada da amostra.



Fonte: Acervo pessoal.

O forno foi previamente aquecido conforme a temperatura do tratamento térmico e as amostras foram inseridas no interior do forno alocadas em cacinhos de grafite, sendo aquecidas rapidamente e mantidas a temperatura padrão por duas horas. Para o resfriamento, o cacinho foi removido do forno com a utilização do aparato de segurança necessário e mergulhado em água à temperatura ambiente.

Quanto à realização dos tratamentos térmicos, foram realizados testes iniciais, denominados tratamento térmico piloto A e B (TTPilotoA e TTPilotoB) para verificar o comportamento do material em temperaturas mais baixas utilizando o forno mufla.

Para o TTI também foi utilizado o forno mufla, porém com a temperatura máxima de 1200°C sem qualquer alteração no processo padrão.

TTII foi realizado no forno tubular até 1300°C, mas adotou a inserção de 10% em massa de cal (CaO) na mistura do resíduo visto que é um dos óxidos comumente utilizados como modificados da rede vítrea.

No TTIII foi realizado um novo teste, também em forno tubular até 1400°C, porém com a adoção de uma pintura interna no cacinho com tinta refratária de zirconita fabricada pela empresa Magnesita conforme apresentado na Figura 35, visando a possibilidade de remoção do material fundido.

Figura 35: Cadinho de grafite com tinta refratária.



Fonte: Acervo pessoal.

O tratamento TTIV foi realizado também em forno tubular até o limite de 1500°C sem qualquer alteração no processo padrão, com o cadinho de grafite sem qualquer tipo de revestimento interno.

Para avaliar o material resultante dos diferentes tratamentos térmicos aplicados no intuito de escolher um deles para utilização posterior foram estabelecidos três critérios de análise.

- **Produção:** a execução da técnica relativa ao tratamento térmico em questão foi avaliada diante das dificuldades operacionais e riscos ao operador, levando em conta também a energia dispendida no processo, bem como a quantidade de material que pode ser produzida.
- **Mineralogia:** foi avaliada a mineralogia das amostras através da técnica de difração de raios X, com o objetivo de verificar nos difratogramas a ocorrência de picos cristalinos ou redução e alargamento dos mesmos indicando halo amorfo e possível desorganização da rede cristalina.
- **Atividade pozolânica:** para um direcionamento quanto à condição de utilização do material como pozolana foi realizado um teste rápido desta atividade com base na metodologia proposta por Lúxan, Madruga e Saavedra (1989) conhecido como Método de Lúxan que avalia a atividade pozolânica pela variação da condutividade de uma solução saturada de hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , inicialmente sem o material e após a inserção de uma amostra de 5,0 g aguardando um período de 2 minutos com agitação constante, mantendo uma temperatura de $40 \pm 1^\circ\text{C}$.

Este método foi utilizado para facilitar a verificação da atividade pozolânica com pequenas amostras e de forma rápida, fundamentando-se na ocorrência de reações pozolânicas entre os íons da solução e do material inserido, o que reduz a condutividade, aferida em mS/cm, sendo então o material classificado conforme a Tabela 14.

Tabela 14: Classificação dos materiais pozolânicos quanto à condutividade.

Classificação do material	Variação da condutividade (Δc) conforme o método proposto (mS/cm)
Não pozolânico	< 0,4
Pozolanidade variável	0,4 a 1,2
Boa pozolanidade	> 1,2

Fonte: Lúxan, Madruga e Saavedra (1989, p. 68).

O aparato experimental utilizado para realização desta análise está apresentado na Figura 36 e foi composto de uma chapa de aquecimento com agitador magnético da marca Tecnal, condutivímetro de campo CD 4301 da Lutron e um cronômetro.

Figura 36: Aparato experimental para o ensaio de pozolanidade pelo método de Lúxan.



Fonte: Acervo pessoal.

Desta forma, avaliando então os critérios de produção, mineralogia e pozolanidade, escolheu-se o tratamento térmico julgado como mais adequado para este trabalho, definido como TTselecionado, que será apresentado no item 4.1.3. Estabeleceu-se, assim, o procedimento para o preparo dos resíduos após fusão sendo denominados LBRO Gf e LBRO Df a serem utilizados na parte II da pesquisa.

3.3.3 Produção e avaliação das argamassas

Partindo do pressuposto da obtenção de material vítreo na primeira parte da pesquisa, o estudo com as argamassas deu-se para verificação da viabilidade técnica para aplicação do material como pozolana e também para identificação dos teores de substituição de aglomerante com melhores desempenhos.

Conforme descrito na revisão bibliográfica, Park e Lee (2004), Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Wang (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Matos e Sousa-Coutinho (2012) apontaram resultados melhores nas argamassas com até 20% de substituição em massa.

Para verificar se os resíduos possuem desempenho comparável a pozolanas após tratamento térmico, foram adotados teores de substituição de 5, 10, 15 e 20% de material cimentício por resíduo tratado (TTselecionado) e também traços de argamassa com substituição por resíduo sem tratamento térmico (TT0) com teores de 5 e 15% além de uma argamassa de referência.

As relações água/(cimento+resíduo) e (cimento+resíduo)/areia foram constantes para os traços e foram estabelecidas com base em normas e revisão bibliográfica. Desta forma, os teores adotados para cada traço estão descritos na Tabela 15.

Tabela 15: Traços das argamassas produzidas (quantidades em massa).

Identificação	Cimento	LBRO	Areia	Água	Observações
AREF	1,00	0,00	3,00	0,50	Sem resíduo
ALG 5	0,95	0,04	3,00	0,50	LBRO G TT0
ALG 15	0,85	0,13	3,00	0,50	
ALD 5	0,95	0,04	3,00	0,50	LBRO D TT0
ALD 15	0,85	0,13	3,00	0,50	
ALGf 5	0,95	0,04	3,00	0,50	LBRO Gf TTselecionado
ALGf 10	0,90	0,08	3,00	0,50	
ALGf 15	0,85	0,12	3,00	0,50	
ALGf 20	0,80	0,16	3,00	0,50	LBRO Df TTselecionado
ALDf 5	0,95	0,04	3,00	0,50	
ALDf 10	0,90	0,08	3,00	0,50	
ALDf 15	0,85	0,12	3,00	0,50	
ALDf 20	0,80	0,16	3,00	0,50	

Fonte: Acervo pessoal.

Apesar dos percentuais de substituição serem padronizados em 5, 10, 15 e 20%, pode-se observar na Tabela 15 que os teores em massa de resíduo utilizado não assumiram exatamente estes valores, justificados pela necessidade de compensação de volumes realizada a partir da relação entre a massa específica do resíduo adotado e do cimento, obedecendo a equação (3).

$$Q_{LBRO_{xi}} = p_i \cdot Q_C \cdot \frac{\rho_{LBRO_x}}{\rho_C} \quad (3)$$

onde $Q_{LBRO_{xi}}$ é a quantidade do resíduo LBRO X variando conforme cada grupo de argamassa (LBRO G, D, Gf ou Df) de acordo com o teor i (5, 10, 15 ou 20); p_i é o percentual padrão de substituição; Q_C é a quantidade referência de cimento; ρ_{LBRO_x} e ρ_C são as massas específicas do resíduo em questão e do cimento.

Com os traços definidos, as argamassas foram produzidas em misturador planetário conforme Figura 37, seguindo os procedimentos definidos na NBR 7215 (ABNT, 1997) no LEMAC – UFES.

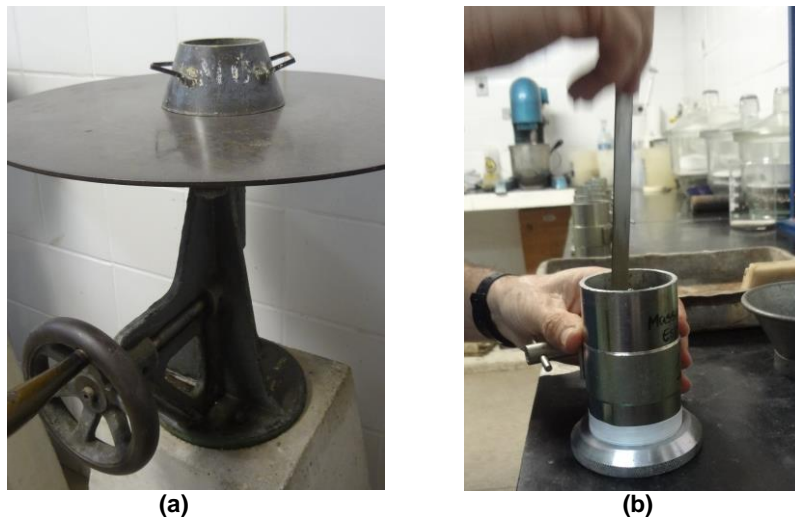
Figura 37: Misturador planetário utilizado para produção das argamassas.



Fonte: Acervo pessoal.

Antes de realizar a moldagem e cura dos corpos de prova das argamassas, foram verificadas as suas características no estado fresco, sendo feitos os ensaios para determinação do índice de consistência pelo espalhamento do tronco de cone na mesa, realizado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005) e para verificação da massa específica das argamassas de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005) que estão apresentados na Figura 38.

Figura 38: Ensaios no estado fresco (a) índice de consistência na mesa e (b) massa específica.



Fonte: Acervo pessoal.

Para os ensaios no estado endurecido fez-se necessário moldar corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm e para isso foi adotada a metodologia descrita na NBR 7215 (ABNT, 1997).

Na sequência, os corpos de prova foram mantidos dentro das fôrmas em câmara úmida e desmoldados após 24 horas, então, foram identificados e submetidos à cura imersa em água saturada com cal até a data definida para a realização dos ensaios como pode ser visualizado na Figura 39.

Figura 39: Preparação dos corpos de prova (a) 24 horas em câmara úmida e (b) cura imersa.



Fonte: Acervo pessoal.

As propriedades no estado endurecido foram avaliadas nas idades de 28, 63 e 91 dias e para isto foram moldados 234 corpos de prova no total, sendo 18 para cada traço e para cada idade. Nestas datas, os corpos de prova eram retificados, passavam pela análise do módulo de elasticidade dinâmico, eram rompidos para avaliação da resistência à compressão axial e eram coletadas as amostras para geração de imagens microscópicas.

Módulo de elasticidade dinâmico: esta propriedade foi mensurada com a adoção de um medidor de velocidade de pulso ultrassônico (Figura 40), modelo *Pundit Lab* da Proceq, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 15630 (ABNT, 2008).

Figura 40: Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Acervo pessoal.

Trata-se de um ensaio não-destrutivo que baseia na velocidade da propagação da onda ultra-sônica (v), ou seja depende do tempo de emissão e recepção da onda nos transdutores ao longo do corpo de prova (altura). Sendo então calculado conforme a equação (4).

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (4)$$

onde E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, ρ é a densidade de massa aparente do corpo de prova (massa do corpo de prova no ato do ensaio sobre o seu volume) e μ é o coeficiente de Poisson, com valor adotado de 0,2 conforme a NBR 15630 (ABNT, 2008). Para esta análise, os corpos de prova foram retificados por via úmida, e analisados após aproximadamente 1 hora.

Resistência à compressão axial: com o objetivo de determinar a tensão de ruptura dos corpos de prova avaliados, este ensaio foi baseado nos princípios da NBR 5739 (ABNT, 2007). Os rompimentos foram realizados utilizando a prensa *Amsler* de mostrador analógico com um limite de escala de 25 tf no LEMAC – UFES como pode ser visto na Figura 41.

Figura 41: Prensa universal adotada para realização dos ensaios de resistência à compressão.



Fonte: Acervo pessoal.

Análise microestrutural: Esta verificação deu-se com o uso dos equipamentos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com acoplamento de um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) já apresentados na etapa de caracterização.

As amostras foram coletadas nos fragmentos dos corpos de prova rompidos após o ensaio de resistência à compressão axial especificamente da faixa central interna, sendo devidamente identificadas conforme tipo de argamassa e idade e então submersas em acetona para paralização do processo de hidratação até o momento de análise no microscópio.

Além do traço de referência, foram selecionados os traços de maior e menor desempenho em cada grupo de argamassas para observação. Com resíduo sem tratamento térmico foram analisadas amostras das argamassas ALG 5 e ALD 15 e no grupo das fabricadas com resíduo após tratamento térmico, a ALGf 5 e ALDf 20.

As amostras foram afixadas em porta-amostras e sofreram o processo de metalização superficial com ouro para permitir a visualização no MEV e análise da composição de partículas com o uso do EDS.

3.3.3.1 Tratamento dos dados e análise estatística

Para identificar a real influência dos fatores controláveis no desempenho das argamassas na segunda etapa desta pesquisa, os resultados obtidos no estado endurecido foram submetidos a uma análise estatística para avaliar sua significância estatística perante o conjunto de dados.

Foi utilizada a técnica de análise de variância (ANOVA), considerando um nível de confiança de 95%, através do programa computacional *Statistica 7.0* (STATSOFT, 2004) podendo determinar a significância dos diversos fatores e também as suas interações.

Com base na função de distribuição de probabilidade, estabelecendo um nível de significância de 5%, são determinados os valores de F ($F_{\text{calculado}}$) e do parâmetro p -valor para cada fator controlável utilizado na pesquisa, podendo visualizar assim se a hipótese de influência do fator nos resultados é verdadeira.

Então, se o p -valor calculado for menor que o adotado, pode-se afirmar que este fator ou interação de fatores exerce influência significativa sobre a variável de resposta analisada.

3.4 Materiais

Para uma pesquisa eficaz, faz-se necessário identificar e conhecer de forma adequada os materiais a serem adotados e obedecer a normas técnicas nacionais ou internacionais aplicáveis tanto em sua definição, manuseio, armazenagem e utilização, diante da regularidade e das necessidades de estabelecer o método científico adequado e coerente, capaz de ser replicado em situações posteriores (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

No intuito de verificar a hipótese desta pesquisa, foram mantidas constantes a origem e as características de cada um dos materiais utilizados para possibilitar a comparação entre os resíduos produzidos e os diferentes traços de argamassas. E estes materiais adotados foram: areia quartzosa, cimento CP V ARI, água potável fornecida pela concessionária local de abastecimento (CESAN) e o resíduo

denominado Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais com granalha (LBRO G) e sem granalha (LBRO D) provenientes de uma serraria do município de Serra, Espírito Santo.

3.4.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo adotado nesta pesquisa foi a areia normal brasileira, que é material quartzoso natural, beneficiado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) conforme os requisitos estabelecidos na NBR 7214 (ABNT, 2012).

A utilização deu-se conforme as dimensões padronizadas em quatro faixas granulométricas, sendo 1,20, 0,60, 0,30 e 0,15 mm, inseridas em proporções iguais, de 25% para cada faixa granulométrica de acordo com o padrão adotado na NBR 7215 (ABNT, 1996).

Esta escolha fundamentou-se na busca por um agregado livre de contaminantes ou materiais deletérios que poderiam dificultar ou minimizar os efeitos da adição mineral testada nesta pesquisa, provocando ruídos nos resultados ou até mesmo, impossibilitando visualizá-los.

3.4.2 Cimento Portland

Para possibilitar uma visualização mais clara dos efeitos da substituição de cimento por resíduo nas matrizes a serem analisadas, foi necessário considerar a composição do cimento a ser adotado.

Diante disto, o cimento utilizado para a fabricação das argamassas foi o Cimento Portland de alta resistência inicial – CP V ARI conforme a norma NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial (ABNT, 1991), considerando o seu menor teor de adições diante daqueles disponíveis no mercado, buscando evitar efeitos combinados.

Os sacos de cimento foram devidamente acondicionados na câmara seca em sacos plásticos lacrados, visando à manutenção de suas propriedades.

A caracterização física que foi realizada no LEMAC – UFES, e a análise química correspondente ao lote do cimento utilizado que foi fornecida pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16: Propriedades físicas e químicas do cimento CP V - ARI.

Propriedades		Resultados	Método de Ensaio	Limites ⁽¹⁾
Massa específica (g/cm ³)		2,823	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E. ⁽²⁾
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	4459	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 3000
	Material retido na peneira 200 (%)	0,1	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Tempos de Pega	Início de Pega (min)	128	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de Pega (min)	181	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≤ 600
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	29,4	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 14
	3 dias (MPa)	42,2	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 24
	7 dias (MPa)	46,0	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 34
Composição Química	Perda ao fogo - PF (%)	3,84	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	≤ 4,5
	SiO ₂ (%)	18,65	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	CaO (%)	63,72	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	MgO (%)	0,75	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	4,91	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,97	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	K ₂ O (%)	0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	SO ₃ (%)	2,87	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	C3A teórico	7,66	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Resíduo Insolúvel - RI (%)	0,75	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	≤ 1,0

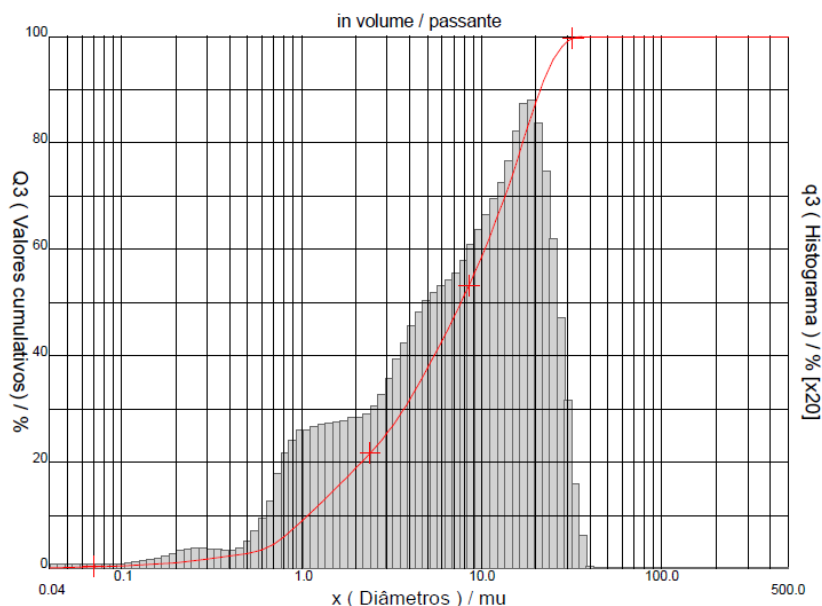
Notas: (1) Limites estabelecidos com base na NBR 5733 (ABNT, 1991).

(2) N.E. – Não especificado.

Fonte: Acervo pessoal e cortesia Cimentos Holcim (2013).

Quanto ao tamanho das partículas, a granulometria a laser realizada pelo LDCM do SENAI/SC indica que 50% dos grãos de cimento tem diâmetro inferior a 7,68 µm e 100% está abaixo de 36,00 µm. O gráfico de distribuição granulométrica está apresentado na Figura 42.

Figura 42: Curva de distribuição granulométrica do CP V ARI utilizado na pesquisa.



Fonte: Relatório técnico do SENAI/SC (2013).

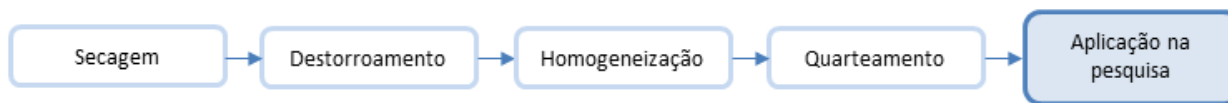
3.4.3 Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais

A lama residual proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais utilizada nesta pesquisa provém de uma serraria localizada no município de Serra, Espírito Santo. Esta empresa desdobra em chapas, blocos de mármore, granito e outras rochas, provenientes do interior do Estado e de outros Estados do Brasil.

Após o corte dos blocos, o resíduo é destinado a um filtro-prensa e posteriormente depositado em baias separadas conforme sua composição: resíduo com granalha (LBRO G) proveniente dos teares tradicionais, e resíduo sem granalha (LBRO D) proveniente de teares de fios diamantados e do polimento das chapas. Em geral, o resíduo depositado é levado, então, em caminhões para aterros privados, sendo sua destinação final. Para esta pesquisa, o resíduo foi coletado nos diferentes depósitos na própria serraria conforme a NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004) e alocado em tonéis de 20 litros para transporte até o LEMAC – UFES.

Os resíduos estavam compactados dentro dos tonéis e com altos teores de umidade (LBRO G 34,4% e LBRO D 38,3%), sendo necessária a preparação inicial deste material para o desenvolvimento da pesquisa. Essa preparação deu-se de acordo com o esquema da Figura 43.

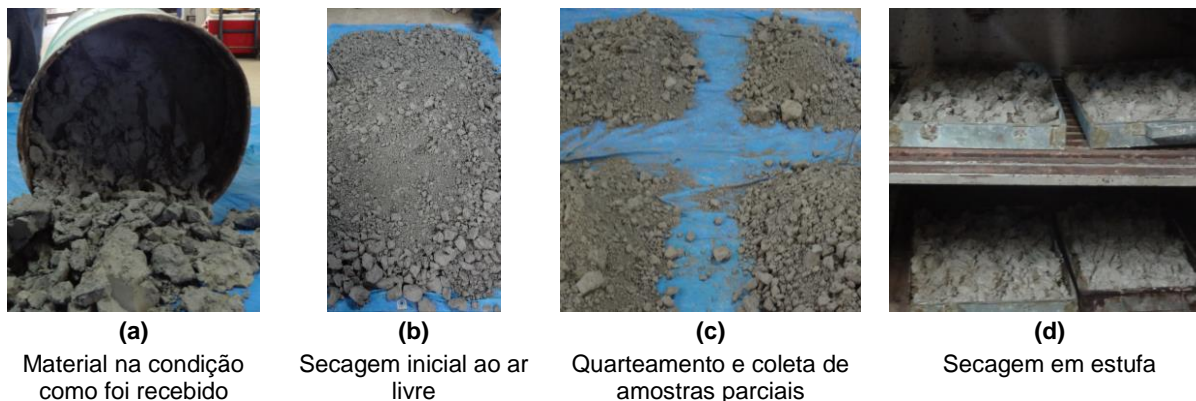
Figura 43: Processo de preparação dos resíduos para aplicação na pesquisa.



Fonte: Acervo pessoal.

A secagem ocorreu em duas etapas, como é possível observar na Figura 44, inicialmente ao ar livre por 48 horas e em seguida por 24 horas em estufa a 100°C, sendo que as bandejas foram compostas por amostras parciais do material coletadas conforme as orientações da NBR NM 26 (ABNT, 2009) obtendo, assim, amostras representativas de cada um dos resíduos.

Figura 44: Processo de secagem dos resíduos.



Fonte: Acervo pessoal.

O material foi armazenado em sacos plásticos lacrados dentro da câmara seca até o momento de utilização, quando passavam pelo processo de destorroamento manual com grau e pistilo, homogeneização e redução por quarteamento para a amostra de ensaio necessária de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001). Esta metodologia foi adotada visando à manutenção da distribuição granulométrica natural dos resíduos.

Sendo assim, são apresentados na Figura 45 o resíduo LBRO G e LBRO D já preparados para utilização, ou seja, secos e destorroados.

Figura 45: Resíduos utilizados na pesquisa (a) LBRO G e (b) LBRO D – condição TT0.



Fonte: Acervo pessoal.

A aplicação na pesquisa inicia-se com a caracterização onde foi possível visualizar as semelhanças e algumas diferenças entre os tipos LBRO G e LBRO D quanto às suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas, térmicas e microestruturais.

As características físicas, químicas e quanto à atividade pozolânica dos resíduos LBRO G e LBRO D estão apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17: Caracterização dos resíduos LBRO G e LBRO D.

(continua)

Propriedades		LBRO G	LBRO D	Limites ⁽¹⁾
Massa específica (g/cm ³)		2,4804	2,5253	N.E. ⁽²⁾
Massa unitária (g/cm ³)		814,85	766,28	N.E.
Umidade para utilização na pesquisa – TT0 (%)		0,04	0,04	≤ 3,0
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	7277,8	6179,3	N.E.
	Material retido na peneira 200 (%)	8,56	3,08	N.E.
	Material retido na peneira 325 (%)	18,10	7,00	≤ 34
Índice de atividade pozolânica	Com a cal (MPa)	0,84	3,17	≥ 6,0
	Com o cimento (%)	52,5	63,9	≥ 75
	Água requerida em IAP-cim (%)	100,0	103,3	≤ 110
Composição Química	Perda ao fogo - PF (%)	0,69	3,50	≤ 6,0
	SiO ₂ (%)	63,75	66,80	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	14,55	13,50	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	7,57	3,79	N.E.
	CaO (%)	3,72	3,44	N.E.

(continuação)

Propriedades		LBRO G	LBRO D	Limites ⁽¹⁾
Composição Química	MgO (%)	0,31	0,93	N.E.
	K ₂ O (%)	5,01	3,83	N.E.
	Na ₂ O (%)	3,58	3,50	N.E.
	C (%)	0,39	1,11	N.E.
	TiO ₂ (%)	0,22	0,16	N.E.
	SO ₃ (%)	0,06	0,06	≤ 5,0
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	85,87	85,08	≥ 50,0

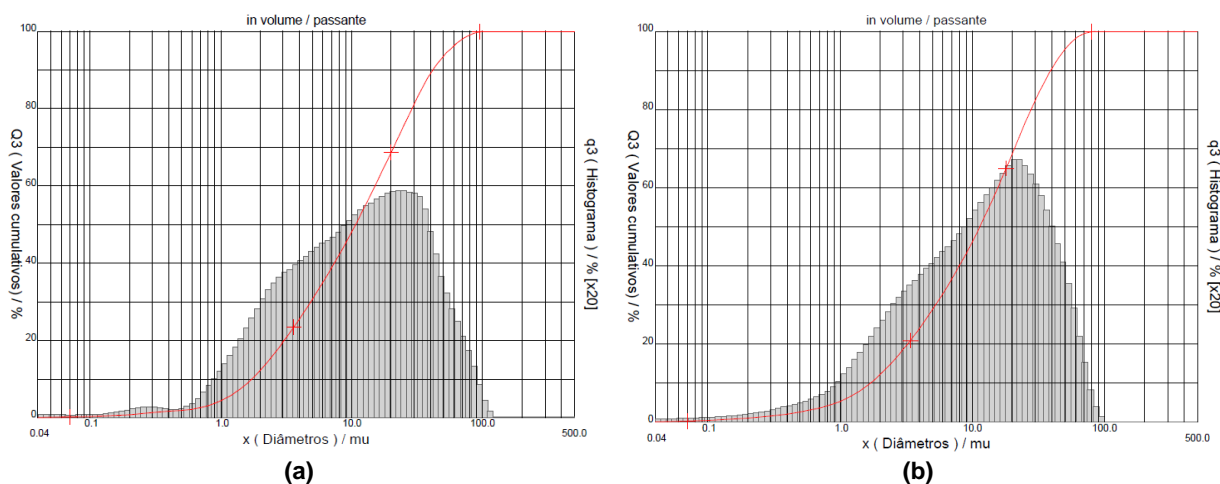
Notas: (1) Limites estabelecidos para a Classe E de pozolanas descritos na NBR 12653 (ABNT, 2012).
(2) N.E. – Não especificado.

Fonte: Acervo pessoal e relatório técnico da Vale (2013).

A área específica do LBRO G indica que seus grãos são menores que os do LBRO D, possivelmente porque o resíduo com granalha é reaproveitado várias vezes no processo de corte dos blocos através dos hidrociclones e apenas descartado quando a lama se encontra muito viscosa, perdendo sua capacidade abrasiva. Com isso os grãos do LBRO G recirculam no processo, sendo cortado de forma subsequente diferentemente do LBRO D, que é descartado diretamente durante o processo de corte do bloco ou de polimento.

Mediante os resultados da finura de ambos os resíduos, é possível constatar que se trata de material pulverulento, mais fino que o cimento. Apesar do LBRO G possuir grãos menores que o LBRO D, uma quantidade maior daquele material ficou retido nas peneiras nº 200 e nº 325, possivelmente devido à presença da granalha e a variada distribuição granulométrica desses materiais, como se pode observar nos gráficos apresentados na Figura 46.

Figura 46: Curva de distribuição granulométrica dos resíduos (a) LBRO G e (b) LBRO D.



Fonte: Relatório técnico do SENAI/SC (2013).

Em ambos os resíduos observa-se predominância do quartzo sílica (SiO_2) e, secundariamente, do feldspato alumina (Al_2O_3), o que evidencia serem os resíduos sílico-aluminosos. Em menores teores, há presença de minerais do grupo das micas (Na_2O e K_2O), compostos estes presentes em rochas graníticas. É possível identificar um maior teor de hematita (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO) no resíduo LBRO G referente à utilização da granalha de aço como abrasivo e da cal como lubrificante/aglomerante no processo de serragem dos blocos, respectivamente. O óxido de magnésio (MgO) em maior percentual no LBRO D possivelmente é proveniente do desgaste das sapatas de polimento que são fabricados com cimento sorel, formado por óxidos de magnésio e cloro tipicamente adotados na confecção das coroas abrasivas (DE AZEREDO *et al.*, 2008).

Com base nos dados obtidos, pode-se verificar se os resíduos podem ser classificados como pozolana, comparando com os requisitos químicos e físicos exigidos pela NBR 12653 (ABNT, 2012) para a Classe E de material pozolânico, conforme a última coluna da Tabela 17, definidas por serem justamente as que não se enquadram nem na classe N (pozolanas naturais), nem na classe C (cinzas volantes).

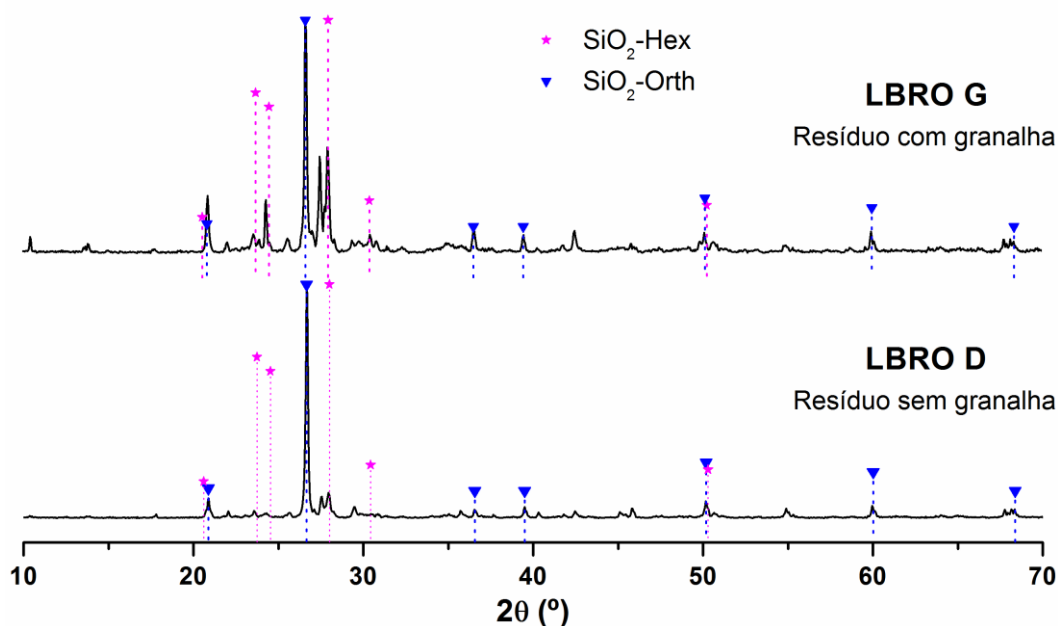
Quanto aos requisitos químicos e à finura exigida, o LBRO G e o LBRO D atendem as especificações da norma, diante de sua composição química e da baixa granulometria justificada pelo processo produtivo que os gera.

Quanto à verificação da pozolanicidade em argamassas, tanto com cal como com cimento, ambos os resíduos não apresentaram resultados dentro dos limites

estabelecidos, sendo que o LBRO D apresentou resultados superiores aos do LBRO G, mas ainda assim, ambos não se enquadram nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2012). Desta forma, os resíduos na condição que se encontram, não podem ser classificados como material pozolânico, ou seja, por sua finura e composição classificam-se como adição inerte, fíler, exercendo um efeito físico em concretos ou argamassas.

As fases morfológicas presentes nos resíduos estão demonstradas nos difratogramas de raios X da Figura 47 e mostram a presença de sílica (SiO_2) sob as formações cristalinas hexagonal e ortorrômbica e, de maneira geral, é possível identificar picos bem definidos, característica típica de compostos cristalinos quimicamente estáveis e portanto com baixa possibilidade de atividade reativa e consequentemente pozolânica.

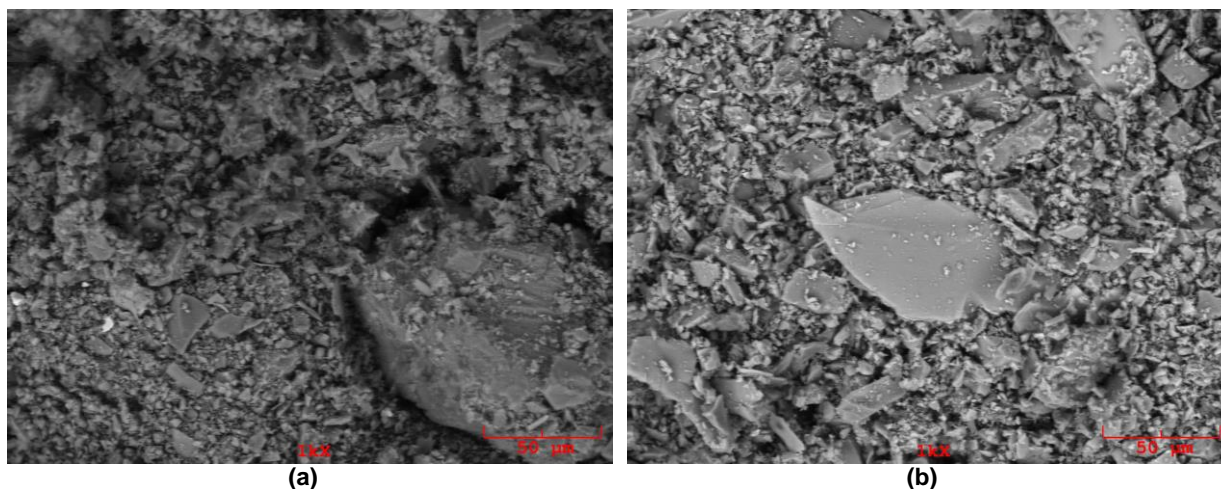
Figura 47: Difratogramas de raios X dos resíduos LBRO G e LBRO D.



Fonte: Acervo pessoal.

As micrografias de ambos os resíduos apresentadas na Figura 48 mostram que os grãos não apresentam uma forma definida possuindo, em geral, um formato anguloso devido ao processo de serragem das rochas, com grãos de dimensão entre 0,8 a 25 μm , e alguns um pouco maiores na ordem dos 60 μm . As imagens corroboram com as características físicas avaliadas, observam-se grãos de morfologia mais regular no LBRO G e mais angulosos no LBRO D.

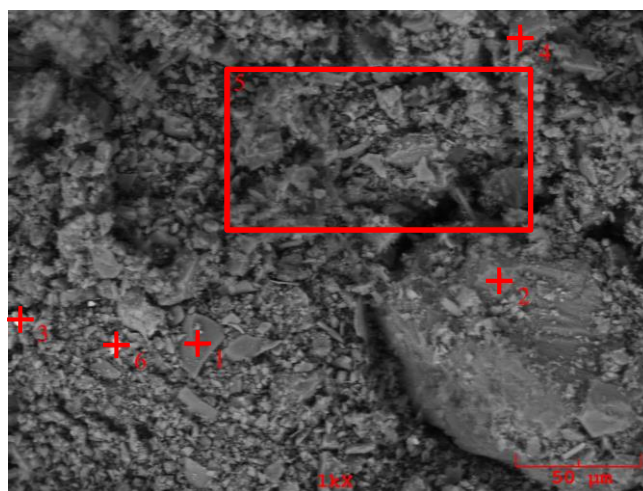
Figura 48: Micrografias com ampliação de 1000 vezes do (a) LBRO G e (b) LBRO D.



Fonte: Acervo pessoal.

O ensaio de Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) foi realizado em diferentes pontos e regiões das imagens, identificadas para o LBRO G na Figura 49 e os resultados para o percentual dos elementos químicos presentes encontram-se na Tabela 18.

Figura 49: Pontos e região analisados no EDS para o LBRO G.



Fonte: Acervo pessoal.

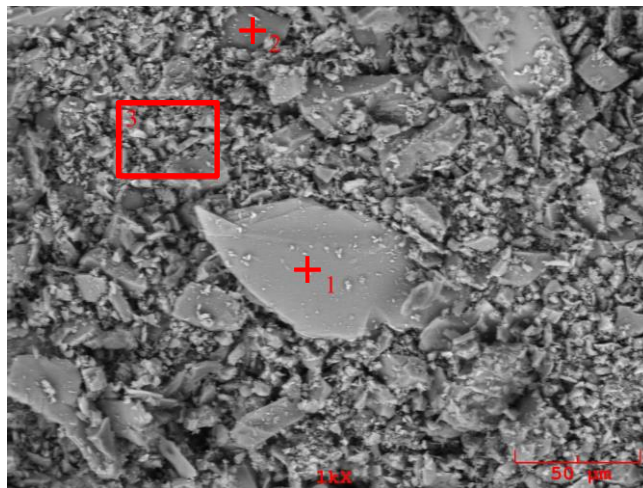
Tabela 18: Resultado da análise química do EDS para o LBRO G.

LBRO G								
-	O	Mg	Al	Si	S	K	Ti	Fe
Ponto 1	32,7	0,094	0,758	65,235	0,289	0,03	0,073	0,155
Região 5	36,723	0,27	10,119	35,133	0,195	4,771	0,186	3,246
Ponto 6	10,334	0,186	2,386	13,411	0,293	0,688	0,109	64,919

Fonte: Acervo pessoal.

Para o LBRO D, os pontos e a região analisada estão identificados na Figura 50 e os resultados para o percentual dos elementos químicos presentes encontram-se na Tabela 19.

Figura 50: Pontos e região analisados no EDS para o LBRO D.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 19: Resultado da análise química do EDS para o LBRO D.

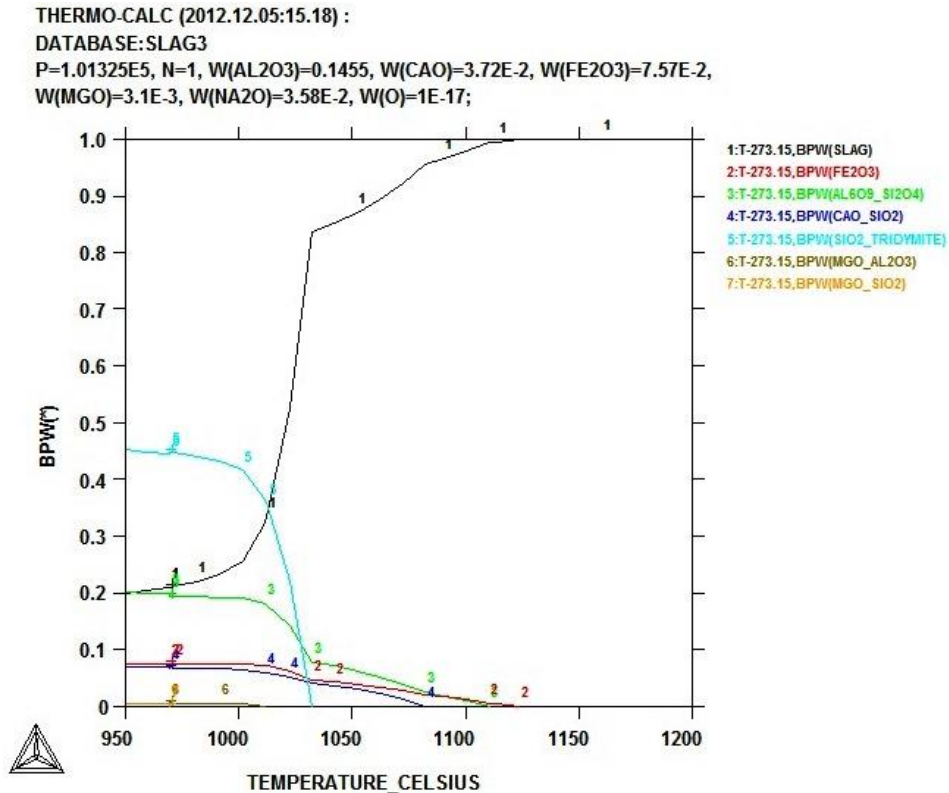
LBRO D								
-	O	Mg	Al	Si	S	K	Ti	Fe
Ponto 1	23,551	4,86	13,48	30,124	0,31	10,382	2,605	13,236
Ponto 2	43,946	0,435	19,166	26,364	0,215	6,722	0,113	1,316
Região 3	37,817	0,667	6,971	43,802	0,236	2,742	0,193	0,585

Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se que os dois resíduos são constituídos, principalmente de silício (Si), seguido por alumínio (Al) e potássio (K). O alto teor de ferro (Fe) no ponto 6 analisado no LBRO G é devido a presença de partícula de granalha de aço. Tais resultados complementam os encontrados através da espectrometria de fluorescência de raios X, indicando, mais uma vez, serem os resíduos sílico-aluminosos (Tabela 17).

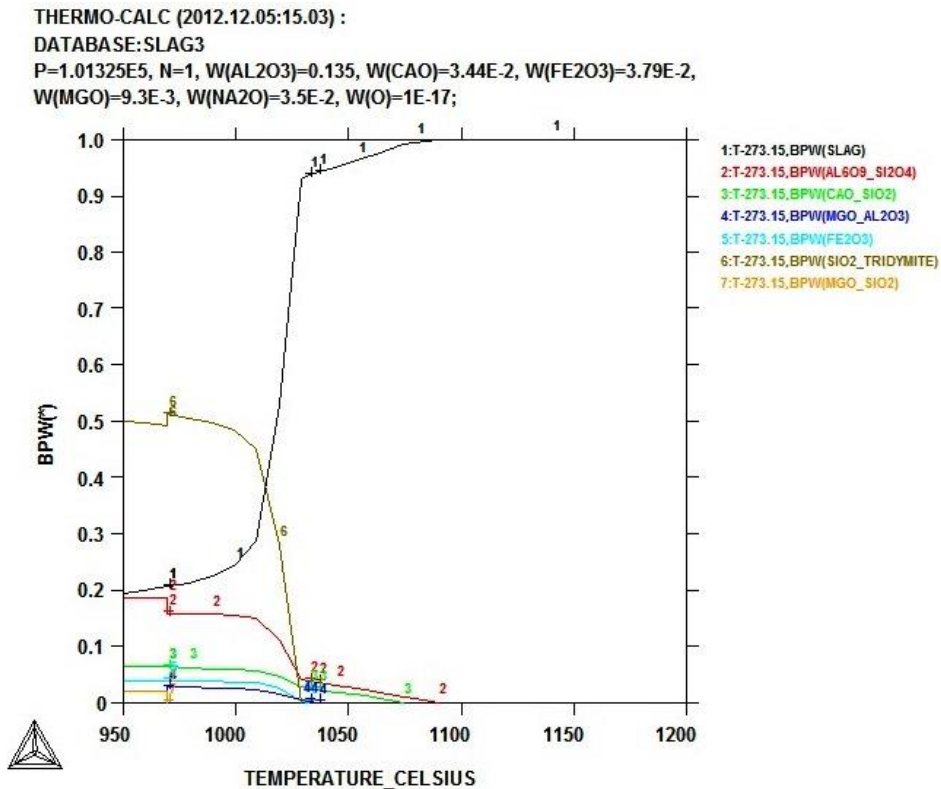
Os resíduos foram avaliados quanto ao seu comportamento sob a influência de altas temperaturas. Os gráficos apresentados na Figura 51 e Figura 52 mostram a simulação de aquecimento através do software ThermoCalc® (THERMO-CALC, 2013) para indicar a temperatura de fusão quando da formação completa de massa fundida, denominada no gráfico como escória (*slag*) – representada pela linha 1 de cor preta.

Figura 51: Simulação computacional de aquecimento utilizando a composição química do LBRO G.



Fonte: Thermo-calc (2013).

Figura 52: Simulação computacional de aquecimento utilizando a composição química do LBRO D.



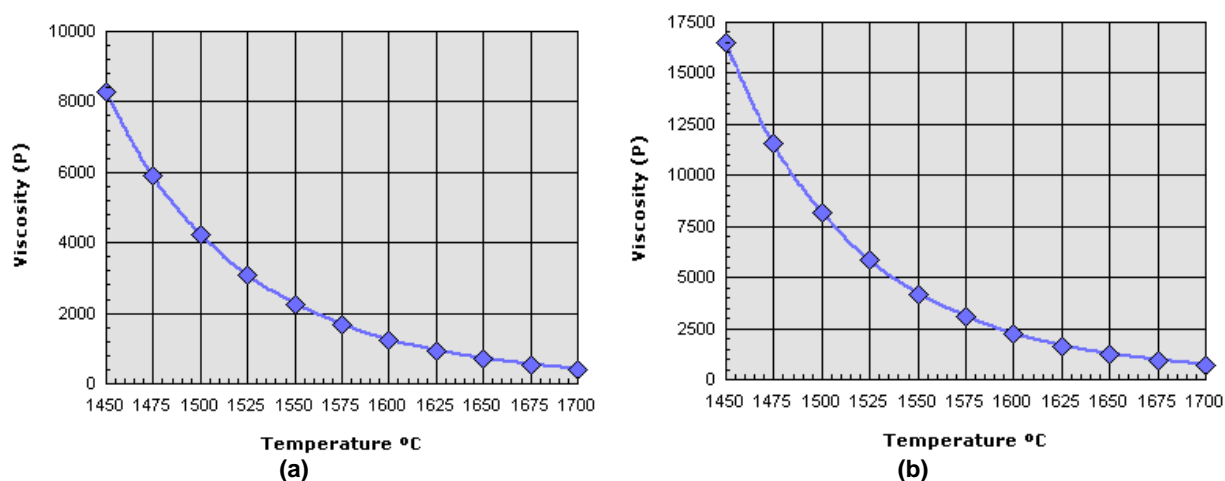
Fonte: Thermo-calc (2013).

Utilizando a análise de acordo com a composição química, é possível identificar as temperaturas aproximadas que as fases do material se decompõem durante o aquecimento, cuja variação é representada em percentual (curvas coloridas – numeradas). Esta simulação considera atmosfera inerte e os compostos presentes e gerados ao longo do processo, até a formação completa de uma massa fundida, que identifica a possível temperatura de fusão.

Para o resíduo LBRO G verificou-se através dos dados gerados uma temperatura de fusão de aproximadamente 1125°C e para o LBRO D 1090°C. Esta diferença deve-se, possivelmente a presença de maiores teores de Fe_2O_3 no resíduo com granalha, como se pode observar nos gráficos das Figura 51 e Figura 52, esta fase é a última a se extinguir na simulação de aquecimento do LBRO G (linha vermelha - 2).

Mesmo diante dos valores indicados de temperatura, achou-se pertinente avaliar a viscosidade das escórias formadas por cada um dos resíduos individualmente, principalmente considerando seus altos teores de sílica (SiO_2), o que geralmente resulta em escórias com baixa fluidez mesmo em elevadas temperaturas. Os gráficos estão apresentados na Figura 53.

Figura 53: Simulação computacional da viscosidade da escória proveniente da fusão do (a) LBRO G e (b) LBRO D.



Fonte: Slag Viscosity Model (MAGNESITA, 2013).

Sabendo que a viscosidade (η) da água em sua fase líquida a temperatura ambiente é de aproximadamente 0,005 Poise (P) e vidros comerciais, enquanto em fusão, normalmente possuem viscosidade de cerca de 100 P (AKERMAN, 2000), verifica-se que a escória gerada após a fusão de ambos os resíduos, mesmo em

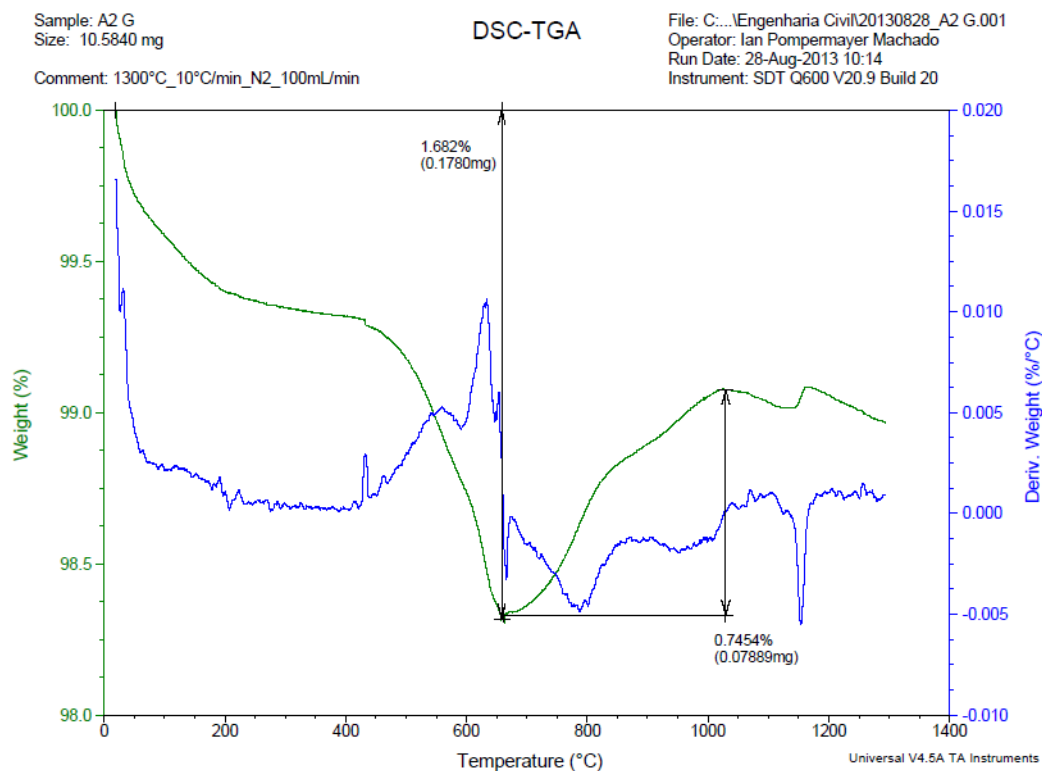
temperaturas maiores que a temperatura de fusão, exemplo em 1450°C, possui alta viscosidade. Como previsto, apresentou valores da ordem de grandeza de 10^4 P, dificultando sua conformação e impedindo que atinja fluidez para verter a massa fundida do recipiente de aquecimento, com redução de η para a ordem de grandeza de 10^2 P em temperaturas mais elevadas como 1700°C, mas também consideradas altas.

Para confirmar os dados de simulação quanto à identificação da temperatura de fusão dos resíduos, ambos foram submetidos a um ensaio de TGA e os gráficos gerados a partir do aquecimento estão apresentados nas Figura 54 e Figura 55.

Verificam-se curvas distintas para ambos os materiais, sendo a curva verde resultado da variação de massa medida ao longo do aquecimento, e a curva azul relativa à análise térmica diferencial, que representa a derivada da variação de massa, com picos para reações exotérmicas ou vales para as endotérmicas.

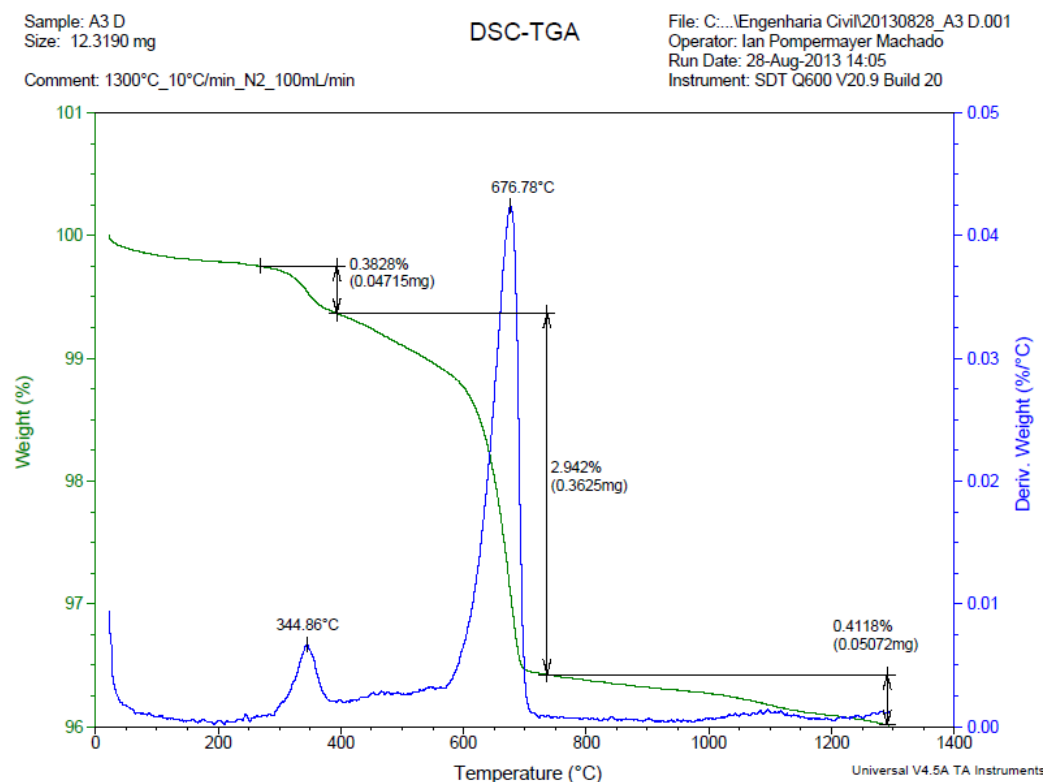
Pode-se observar um comportamento atípico do LBRO G com redução de massa inicialmente e ganho de massa após temperatura de 650°C. Este fato pode ser atribuído, possivelmente, a formação de novas fases com um vale na derivada da variação de massa aproximadamente em 1150°C indicando possivelmente o ponto de fusão.

Figura 54: Curvas de TG e TGA de amostra de LBRO G.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 55: Curvas de TG e TGA de amostra de LBRO D.



Fonte: Acervo pessoal.

Capítulo 4

Resultados e discussões

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua a estender-se totalmente inexplorado diante de mim.”

Isaac Newton

4. Resultados e Discussões

O capítulo anterior contemplou uma descrição detalhada do planejamento experimental desta pesquisa, dos métodos de ensaio utilizados e foram apresentadas as características dos materiais utilizados no programa, principalmente dos resíduos em questão, LBRO G e LBRO D.

Foram estabelecidas as partes da pesquisa, com as escolhas de tratamentos térmicos a serem avaliados na primeira etapa e com as dosagens de argamassas com percentuais de substituição de material cimentício por LBRO G e D com e sem tratamento térmico, além da argamassa referência, para o preparo dos corpos de

prova que foram submetidos aos ensaios mecânicos propostos, cujos dados foram tratados estatisticamente também conforme descrição do capítulo 3.

São apresentados neste capítulo, os resultados da pesquisa realizada conforme o capítulo anterior e uma discussão baseada na execução experimental, na análise estatística dos dados e na revisão bibliográfica levantada.

Para a parte I da pesquisa são apresentados os resultados relativos às características dos resíduos produzidos e à avaliação dos tratamentos térmicos realizados conforme os critérios já apontados.

Posteriormente, são analisados os resultados dos ensaios realizados nas argamassas tanto no estado fresco, com a determinação do índice de consistência e massa específica, como no estado endurecido, com os ensaios de resistência à compressão axial e de módulo de elasticidade, cujos dados foram submetidos estatisticamente a uma análise de variância (ANOVA).

Além disso, estão apresentadas as micrografias das amostras de argamassa para uma análise microestrutural no intuito de associar suas características com as propriedades mecânicas identificadas.

As tabelas contendo os resultados amostrais de cada corpo de prova estão no apêndice A.

4.1 Parte I – Resultados dos tratamentos térmicos aplicados

Os tratamentos térmicos aplicados tiveram a intenção de alterar as principais características do resíduo quanto ao arranjo atômico de seus compostos com vistas a obter material amorfo, com possibilidade de aplicação como pozolana. Desta forma, foram escolhidos determinados tratamentos térmicos, diante dos testes piloto e das características identificadas nos materiais.

4.1.1 Tratamentos Piloto

Os tratamentos térmicos iniciais, tratados como piloto, foram realizados em forno tipo mufla e visaram à indicação de um valor mínimo de temperatura para os testes.

O tratamento TTPilotoA mostrou que para uma temperatura de 900°C o resíduo não coalesceu⁴, mantendo sua condição de material pulverulento. No entanto, apresentou uma mudança de coloração, tornando-se avermelhado como pode ser observado na Figura 56.

Figura 56: Resultado do aquecimento do LBRO D no TTPilotoA.



Fonte: Acervo pessoal.

O tratamento TTPilotoB com temperatura de 1100°C no forno mufla fez com que o material coalescesse, tornando-se rígido e de superfície lisa com alguns poros obtendo aparência de material vitrificado como pode ser observado na Figura 57.

Figura 57: Resultado do aquecimento do LBRO D no TTPilotoB.

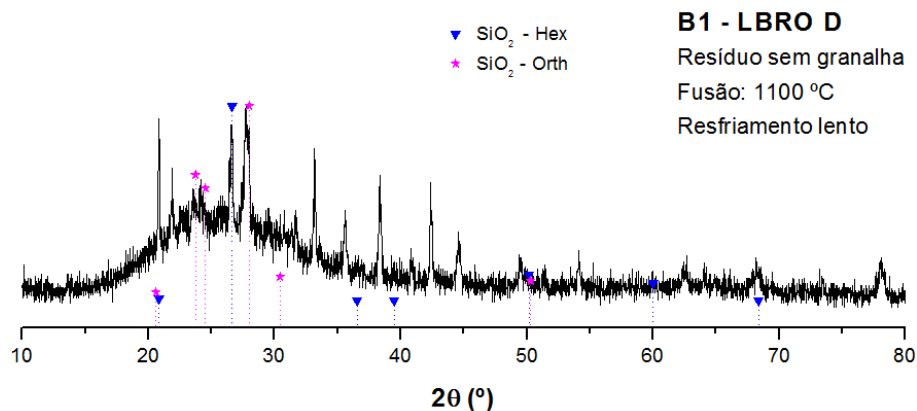


Fonte: Acervo pessoal.

Este tratamento indicou a possibilidade de desorganização da rede cristalina, mesmo sendo a partir do aquecimento no forno mufla e resfriamento lento como pode ser observado no difratograma de raios X da Figura 58.

⁴ **Coalescer:** De acordo com o dicionário da língua portuguesa Aulete (2008) significa unir fortemente; aglutinar; fundir. No âmbito do estudo de materiais, o termo coalescência está vinculado aos processos de sinterização com a formação de massas densas pela união de partículas com fusão de superfícies adjacentes (CALLISTER, 2000).

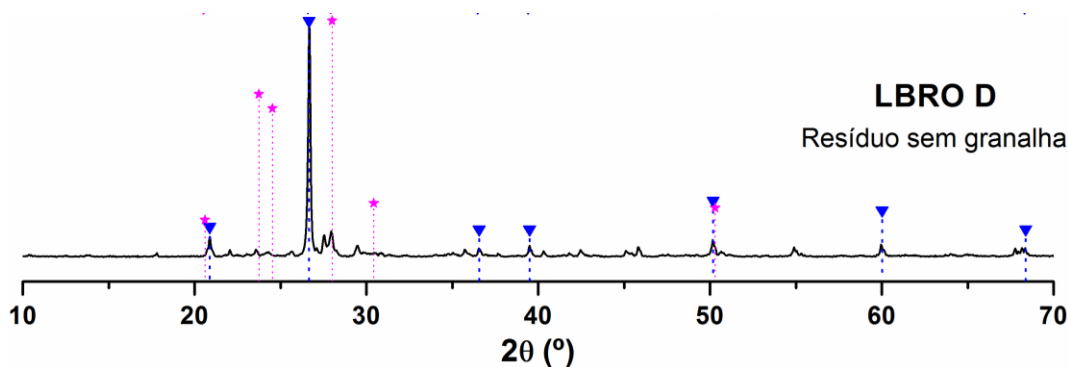
Figura 58: Difratoograma de raios X da amostra de LBRO D após o TTPilotoB.



Fonte: Acervo pessoal.

Este tratamento provocou efetiva alteração na organização da estrutura cristalina do material, apresentando halo amorfo, mas com picos cristalinos também presentes. Pode-se observar esta mudança, comparando este difratograma da amostra de LBRO D após o TTPilotoB com o difratograma gerado anteriormente a partir deste resíduo sem o tratamento térmico, representado como Figura 59 para facilitar a visualização.

Figura 59: Difratoograma de raios X do LBRO D sem tratamento térmico.



Fonte: Acervo pessoal.

4.1.2 Avaliação dos tratamentos térmicos

Diante dos diferentes tratamentos térmicos propostos, conforme a Tabela 11, foram avaliadas as condições de produção e também as características das amostras resultantes sendo que esta análise está apresentada nos itens apresentados a seguir.

4.1.2.1 Produção

Quanto à produção e realização dos tratamentos térmicos, foram avaliados os requisitos relativos às restrições do processo como riscos ao operador, energia envolvida no processo e também a quantidade de material possível de ser produzida.

TTI: Tratamento Térmico I

Este tratamento apresenta risco mínimo ao operador, visto que o forno utilizado (mufla) possui estrutura tipo câmara e o acesso ao seu interior dá-se apenas quando não está em altas temperaturas.

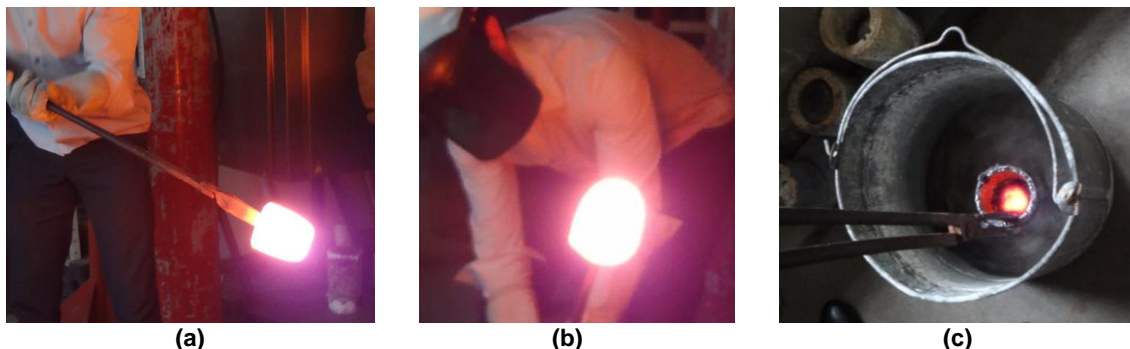
A principal dificuldade operacional está associada à escolha de um recipiente adequado capaz de suportar a temperatura aplicada sem interagir com a amostra, bem como as tensões internas provocadas pela massa aquecida em processo de coalescência. E ainda, após o aquecimento demanda a retirada forçada da amostra do interior deste recipiente.

Quanto ao gasto energético envolvido, este tratamento é o que prevê menor temperatura máxima para fusão (limitações do forno), porém, o volume interno do forno é amplo, demandando alta energia para aquecimento de todo seu interior, mas também permitindo produção de grandes quantidades de material.

TTII: Tratamento Térmico II

O risco operacional envolvido nos tratamentos térmicos realizados no forno tubular é alto. Havia a intenção de verter o conteúdo fundido em água, para permitir um resfriamento brusco, porém, a alta viscosidade da massa fundida (comprovando a previsão da simulação computacional realizada) impediu este procedimento. Desta forma, para resfriar bruscamente o material, foi necessário imergir todo o cadinho em um recipiente com água à temperatura ambiente, conforme apresentado na Figura 60.

Figura 60: Retirada do cadinho do forno tubular, (a) rotação do cadinho, (b) impossibilidade de verter e (c) resfriamento da amostra diretamente no cadinho em água.



Fonte: Acervo pessoal.

Além das dificuldades apresentadas para o resfriamento, houve também aquelas vinculadas à determinação do tipo de cadinho adequado e ainda quanto à necessidade de remoção forçada da amostra.

Este forno possui baixo volume interno, demandando menor energia para o aquecimento completo. No entanto limita a quantidade de material a ser produzido, pois o volume do cadinho é de aproximadamente 250 ml apenas.

Para a temperatura de 1300°C deste tratamento térmico, foi realizada ainda a inserção de CaO na mistura no intuito de produzir uma variação na composição química buscando a redução da viscosidade, porém, este processo não foi eficaz. O material não pode ser vertido, pois a viscosidade manteve-se alta. E ainda, a inserção de CaO demandaria a aquisição e mistura de um novo material, o que amplia a complexidade de produção.

TTIII: Tratamento Térmico III

Assim como o TTII, este tratamento foi realizado no forno tubular, acarretando os riscos e dificuldades já enunciados anteriormente.

Para o caso deste tratamento vale ressaltar a utilização de tinta refratária nas paredes internas do cadinho, o que não influenciou a remoção da amostra fundida, que também não verteu em água, demandando resfriamento conforme TTII.

Quanto à remoção da amostra do cadinho após o resfriamento, a tinta refratária facilitou o processo por descolar das paredes internas com pequena aplicação de

força. No entanto, foi necessário remover também os resíduos de tinta da amostra, que interagiu ligeiramente com o material nas bordas, não sendo possível aproveitar toda a massa produzida, apenas a parte central mais interna do cadinho, distante das paredes e fundo.

A temperatura de 1400°C, mesmo que para o forno tubular de baixo volume interno, já demanda alta carga energética para aquecimento do conjunto dada a alta temperatura.

TTIV

Este tratamento não contemplou a inserção de novos materiais e também não previu a utilização de tinta refratária no cadinho, sendo realizado no forno tubular com os devidos riscos operacionais e dificuldades já apresentadas.

Conforme TTII e TTIII, o material após aquecimento não verteu do cadinho devido sua alta viscosidade, mesmo em um patamar de temperatura de 1500°C, sendo esta a maior temperatura de todos os tratamentos realizados, ou seja, aquela que demandou a maior quantidade de energia na produção.

A remoção das amostras do cadinho após o TTIV foi realizada de forma forçada, dificultando significativamente o processo.

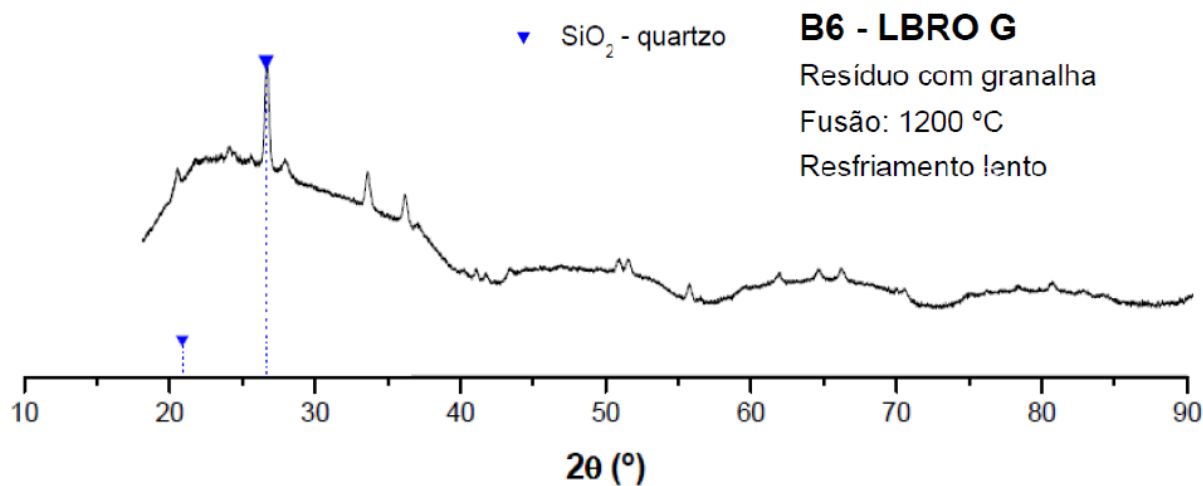
4.1.2.2 Mineralogia

Estão apresentados os difratogramas das amostras produzidas após os diferentes tratamentos térmicos com o objetivo de avaliar a presença de fases cristalinas e também a formação de halo amorfo.

Os tratamentos térmicos aplicados foram eficazes, pois obtiveram amostras com indícios de desorganização da rede cristalina e os difratogramas referentes às amostras produzidas no TTI estão apresentados nas Figura 61 e Figura 62, do TTII na Figura 63, TTIII na Figura 64 e TTIV na Figura 65 e na Figura 66.

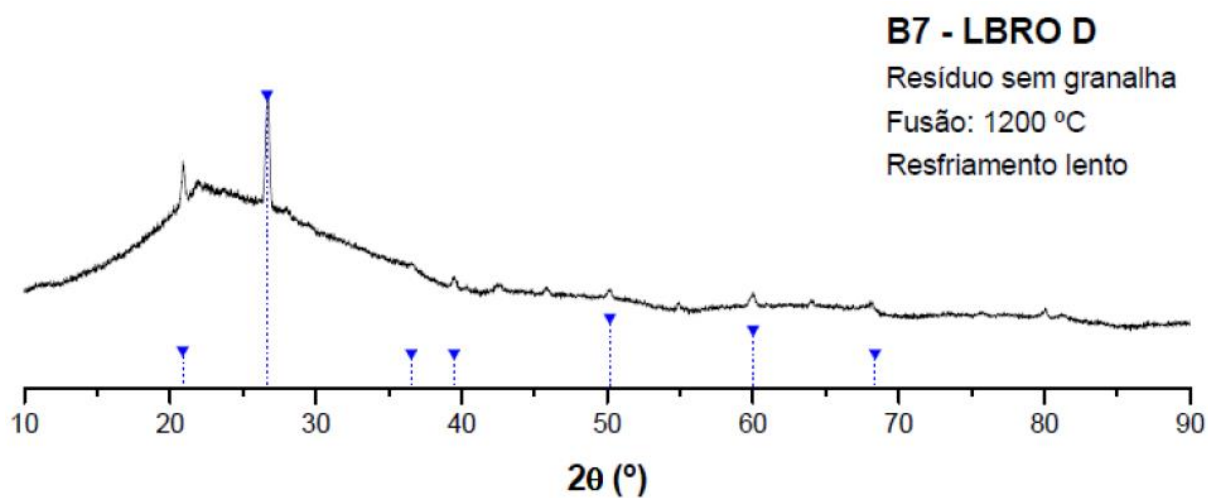
Amostra de LBRO D após TTI

Figura 61: Difratoograma de raios X do LBRO Gf.



Fonte: Acervo pessoal.

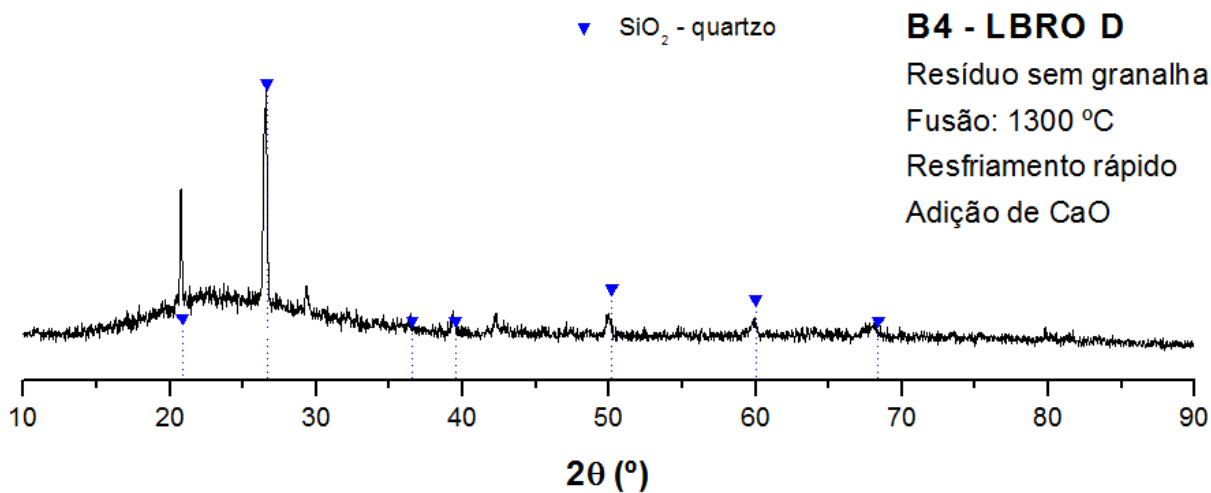
Figura 62: Difratoograma de raios X do LBRO Df.



Fonte: Acervo pessoal.

Amostra de LBRO D após TTII

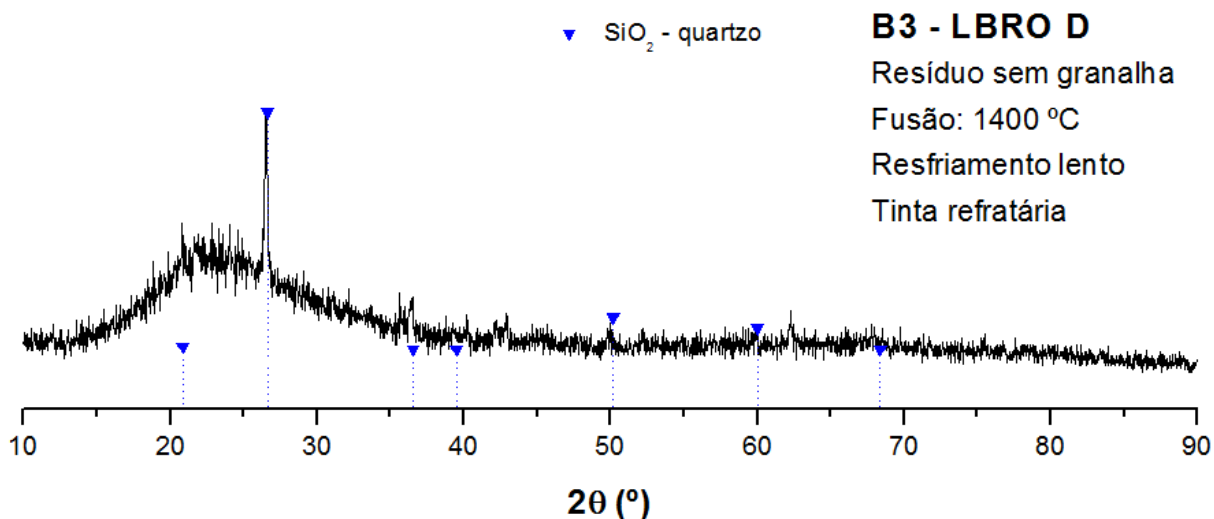
Figura 63: Difratograma de raios X da amostra de LBRO D após o TTII.



Fonte: Acervo pessoal.

Amostra de LBRO D após TTIII

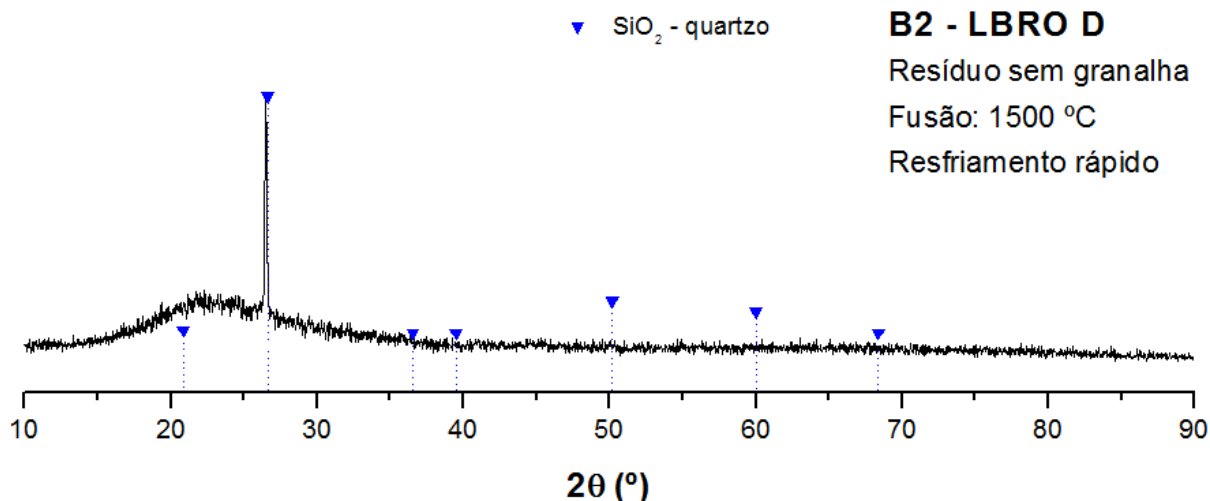
Figura 64: Difratograma de raios X da amostra de LBRO D após o TTIII.



Fonte: Acervo pessoal.

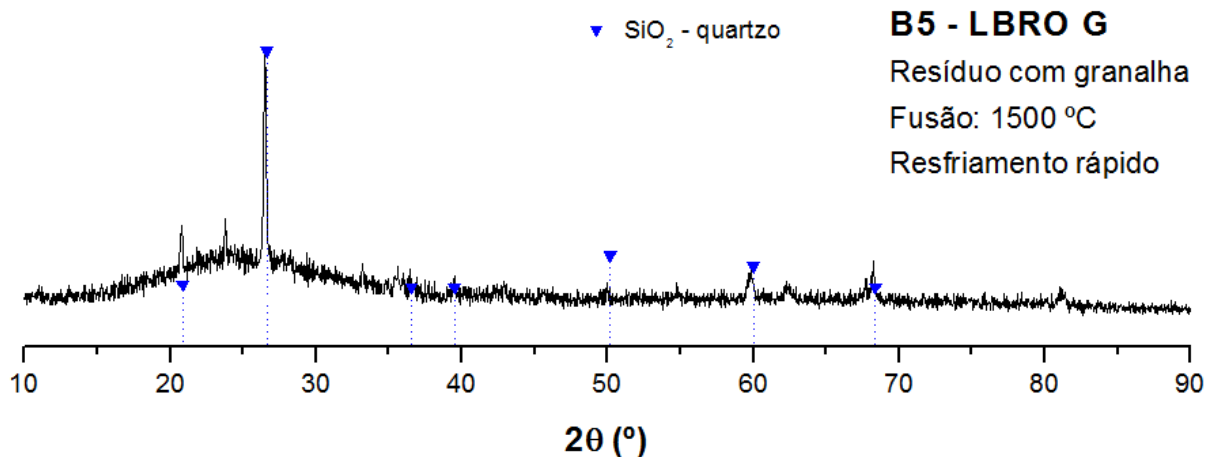
Amostras de LBRO após TTIV

Figura 65: Difratograma de raios X da amostra de LBRO D após o TTIV.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 66: Difratograma de raios X da amostra de LBRO G após o TTIV.



Fonte: Acervo pessoal.

Como foi possível observar nos difratogramas apresentados houve em todos os tratamentos propostos uma tendência de desorganização da rede cristalina com o aparecimento de halo amorfo, mesmo com a ocorrência dos picos cristalinos relativos ao dióxido de silício na forma de quartzo, visto que esta fase é estável e sua temperatura de fusão é maior do que as temperaturas dos tratamentos aplicados.

4.1.2.3 Atividade pozolânica

O ensaio de atividade pozolânica pelo método de Lúxan (LÚXAN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989) foi realizado em oito amostras de resíduo sendo: LBRO G e LBRO D sob o tratamento inicial de secagem e destorroamento, denominado TT0, apenas para comparação; LBRO D após a realização de cada um dos tratamentos térmicos propostos e o LBRO G apenas após os principais tratamentos, TTI e TTIV. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Resultados referentes ao ensaio de pozolanidade pelo método de Lúxan.

Resíduo	Tratamento térmico da amostra	Leitura Inicial (mS/cm)	Leitura Final (mS/cm)	Condutividade (mS/cm)	Classificação quanto à pozolanicidade (LUXAN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989)
LBRO D	TT0	4,86	4,84	0,02	Não pozolânico
	TTI	4,89	4,45	0,44	Pozolanidade Variável
	TTII	4,88	4,63	0,25	Não pozolânico
	TTIII	4,87	4,65	0,22	Não pozolânico
	TTIV	4,85	4,12	0,73	Pozolanidade Variável
LBRO G	TT0	4,86	4,83	0,03	Não pozolânico
	TTI	4,88	4,60	0,28	Não pozolânico
	TTIV	4,89	4,59	0,30	Não pozolânico

Fonte: Acervo pessoal.

A variação na condutividade nas soluções após a inserção das amostras dos materiais avaliados indicou que os resíduos com tratamento térmico tiveram resultados consistentemente superiores aos dos resíduos sem tratamento térmico, que mesmo não sendo reativos apresentaram uma baixa variação que pode ter sido gerada devido ao efeito de aglomeração causado pelas partículas finas.

A inserção de CaO na massa de resíduo utilizada no tratamento térmico, conforme estabelecido no TTII não contribuiu para o aumento da reatividade do material assim como também não contribuiu para a redução da viscosidade. Da mesma forma o tratamento térmico com o uso de tinta refratária, TTIII, também não gerou uma amostra pozolânica. Isso pode se dar ao fato de ter havido uma contaminação, com a interação dos óxidos da composição da tinta com o material.

Foram classificadas com pozolanicidade variável, as amostras de LBRO D relativas ao tratamento térmico TTI, realizado no forno mufla até 1200°C com resfriamento lento e ao tratamento térmico TTIV, realizado no forno tubular com temperatura de 1500°C.

Era esperado que as amostras com temperaturas de fusão mais altas e maior velocidade de resfriamento obtivessem maiores variações de condutividade causada pela maior reatividade do material, conforme ocorrido com a amostra de LBRO D do TTIV. Entretanto, a amostra do TTI também alcançou o índice para ser classificada como pozolana, indicando que com uma temperatura de 1200°C e mesmo com o resfriamento lento é possível obter uma pozolana a partir da LBRO.

Esta reatividade pode estar atrelada à alta viscosidade do material durante o aquecimento, fazendo com que, após a desorganização do arranjo atômico durante o aquecimento haja a dificuldade de reorganização, gerando, assim, material com halo amorfo mesmo sem resfriamento brusco.

4.1.3 Tratamento térmico selecionado (TTselecionado)

Diante dos critérios utilizados para avaliação dos tratamentos térmicos, julgou-se a utilização do TTI como mais adequada. Este processo consiste em elevar gradativamente a temperatura de uma amostra até 1200° C, manter nesta temperatura por 2 horas e resfriar lentamente conforme a inércia do forno.

Este tratamento térmico foi utilizado como padrão para produção de resíduo em maior quantidade, visando à produção de material suficiente para a etapa II da pesquisa, com caracterização posterior, produção de argamassas e considerando ainda as perdas dos processos.

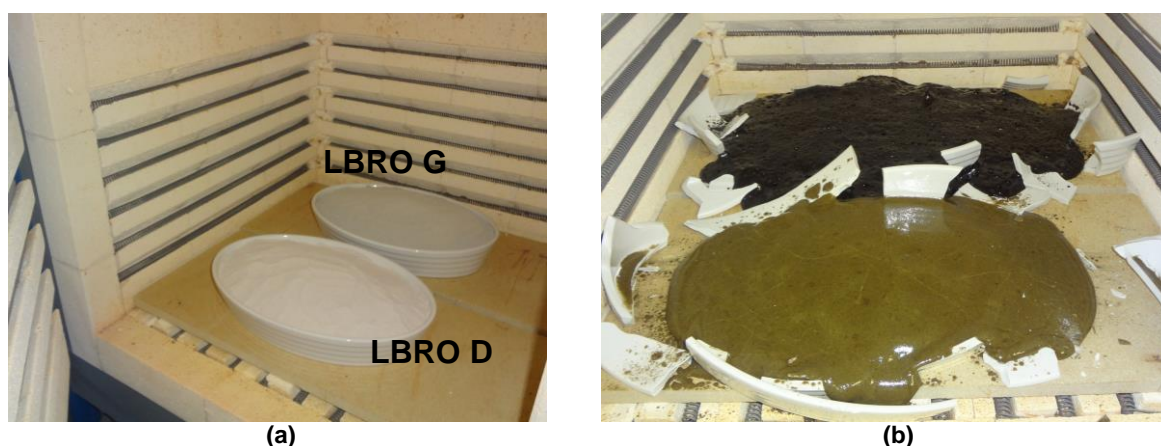
Sendo assim, para iniciar a etapa II, aproximadamente 2 kg de cada um dos resíduos, LBRO G e LBRO D, foram submetidos ao TTselecionado, que foi o TTI, ou seja, fusão a 1200°C com resfriamento lento em forno mufla.

4.2 Parte II – Resultados do estudo das argamassas

Para iniciar esta etapa, aproximadamente 2 kg de cada um dos resíduos, LBRO G e LBRO D, foram submetidos ao tratamento térmico selecionado, fusão a 1200°C com resfriamento lento em forno mufla, devidamente justificado no item anterior.

Após inserção na mufla, a visualização do material só ocorreu após o tratamento completo. Quando o forno foi novamente aberto, pode-se observar que a porcelana refratária suportou a temperatura sem degradar-se enquanto material, porém os recipientes estavam rompidos possivelmente devido às pressões internas promovidas pela massa fundida, empurrando as paredes laterais tendendo a desconectá-las do fundo do recipiente, ficando conforme apresentado na Figura 67.

Figura 67: Tratamento térmico selecionado aplicado aos resíduos LBRO G e LBRO D, (a) início e (b) término.



Fonte: Acervo pessoal.

Os fragmentos de cada um dos resíduos após a fusão foram removidos cuidadosamente do forno, eliminando os cacos de porcelana a eles aderidos para a sua preparação que se deu pelo processo de moagem. Utilizou-se para tal um moinho de argolas (também denominado moinha de panela ou pulverizador) apresentado na Figura 68, durante 40 segundos para cada fração de 50 gramas de material. O peneiramento foi realizado passando o material fino na peneira 75 μ m (nº 200) e repetindo o processo com a fração de material retido.

Figura 68: Moinho de argolas utilizado na moagem dos resíduos após fusão.



Fonte: Acervo pessoal.

Esta condição foi estabelecida, pois vidro quando finamente moído apresenta tipicamente propriedades de pozolana. Quando o resíduo de vidro é utilizado em granulometria inferior a $75\mu\text{m}$, possui características pozolânicas devido a grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição, conforme contatado por Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Araújo *et al.* (2011), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012), Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) e Sauer (2013).

A partir desta condição, amostras do resíduo vitrificado foram submetidas a ensaios de caracterização para verificar principalmente suas características físicas, químicas, mineralógicas e o índice de atividade pozolânica.

4.2.1 Caracterização dos resíduos após TTselecionado

Estão apresentadas na Tabela 21 as principais características físicas (conforme as normas de cada ensaio já apresentadas no capítulo 3) e a composição química dos resíduos denominados LBRO Gf e LBRO Df utilizados como adição mineral em substituição ao cimento nas argamassas desta pesquisa.

Tabela 21: Propriedades físicas e composição química dos resíduos após TTI.

Propriedades		LBRO Gf	LBRO Df	Limites ⁽¹⁾
Massa específica (g/cm ³)		2,301	2,196	N.E. ⁽²⁾
Umidade para utilização na pesquisa (%)		0,03	0,02	≤ 3,0
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	4482,9	4266,8	N.E.
	Material retido na peneira 200 (%)	0,0	0,0	N.E.
	Material retido na peneira 325 (%)	9,5	5,0	≤ 34
Composição Química	Perda ao fogo - PF (%)	0,20	1,20	≤ 6,0
	SiO ₂ (%)	62,88	64,61	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	24,85	22,10	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	4,65	1,48	N.E.
	CaO (%)	2,82	2,57	N.E.
	MgO (%)	0,00	1,52	N.E.
	TiO ₂ (%)	0,18	0,16	N.E.
	K ₂ O (%)	4,10	2,90	N.E.
	Na ₂ O (%)	0,00	3,37	≤ 1,5
	SO ₃ (%)	0,00	0,00	≤ 5,0
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	92,38	88,19	≥ 50,0

Notas: (1) Limites estabelecidos para a Classe E de pozolanas descritos na NBR 12653 (ABNT, 2012).

(2) N.E. – Não especificado.

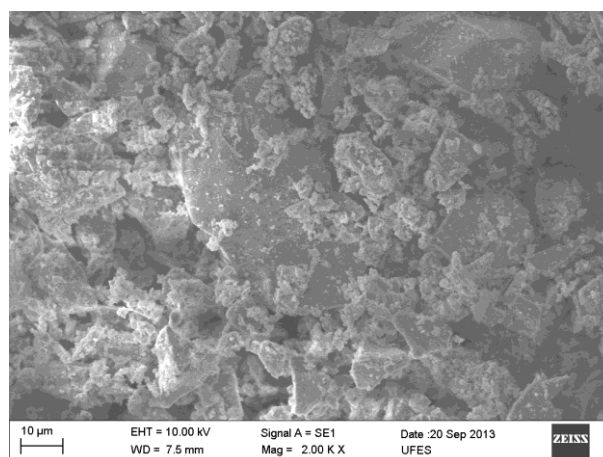
Fonte: Acervo pessoal e relatório técnico do SENAI/RN (2013).

Os dados apresentados mostram que depois do processo de fusão e moagem, os resíduos apresentaram características similares, diferindo quimicamente pelo maior teor de Fe₂O₃ no LBRO Gf e maior teor de álcalis de Na₂O no LBRO Df, possivelmente causado pela presença de resíduos de granalha de aço no primeiro e resíduos de produtos do polimento no segundo.

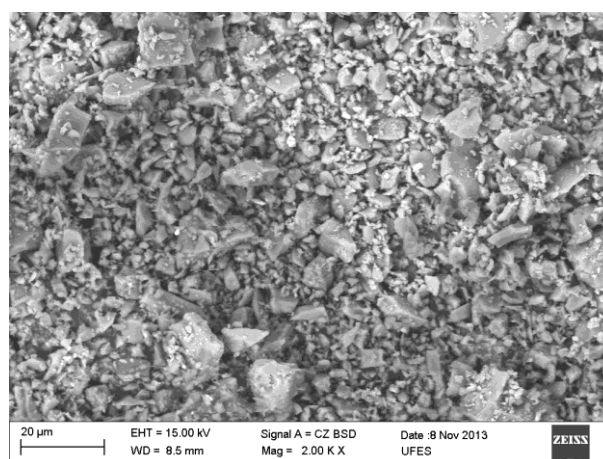
Quanto às características físicas, o resíduo LBRO Gf possui massa específica ligeiramente maior também possivelmente causada pela presença de vestígios da granalha de aço, mais densa que o restante do material. Mesmo com o tamanho das partículas semelhante ao do cimento, os resíduos LBRO Gf e LBRO Df apresentam superfície específica maior, o que pode ser atribuído a angulosidade dos grãos característica de materiais vítreos conforme pode ser observado nas imagens da

Figura 69, corroborando com os resultados apresentados por diversos autores que pesquisaram a utilização de resíduo de vidro como Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Sauer (2013).

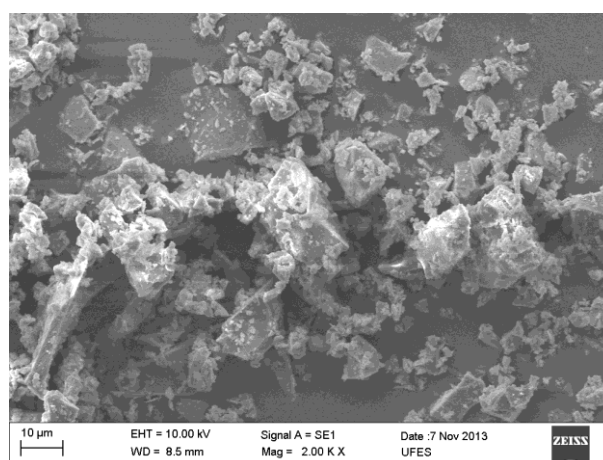
Figura 69: Micrografias com aumento de 2000x do (a) cimento CP V ARI, do (b) LBRO Gf e do (c) LBRO Df.



(a) Cimento CP V ARI



(b) LBRO Gf



(c) LBRO Df

Fonte: Acervo pessoal.

Quanto à caracterização mineralógica, as principais fases presentes no material foram verificadas a partir das medidas de difração de raios X. Os difratogramas dos resíduos após tratamento térmico já foram apresentados nas Figura 61 e Figura 62.

Nestas figuras, pode-se observar uma redução e alargamento nos picos, o que indica uma tendência de desorganização da rede cristalina, característica marcante nos materiais vítreos, o que favorece a ação pozolânica do material, mesmo identificando ainda a presença da sílica em sua fase quartzo (SiO_2), que apesar do aquecimento não atingiu por completo sua temperatura de fusão que é cerca de 1700°C .

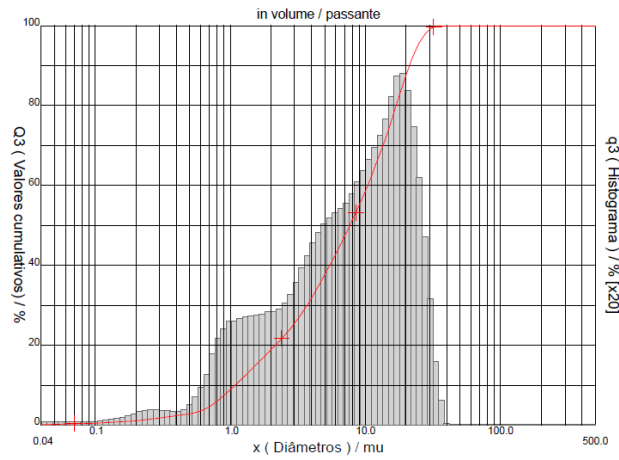
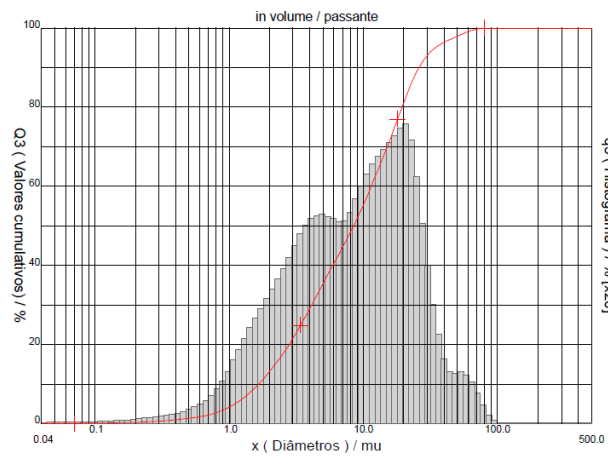
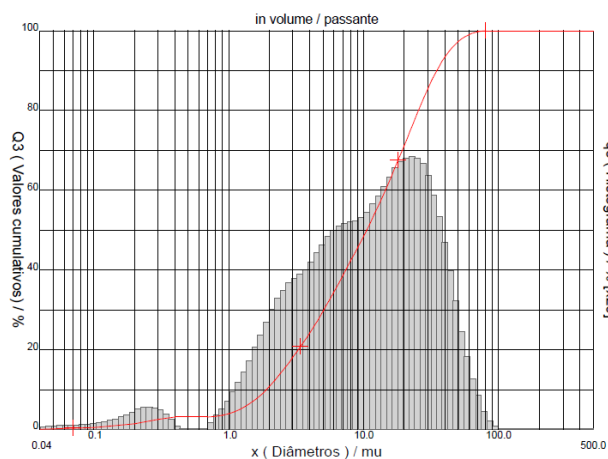
Tratando-se do tamanho das partículas, a partir da Tabela 22 é possível verificar que os materiais possuem uma distribuição granulométrica similar, sendo que os resíduos tratados termicamente possuem fragmentos de tamanho maior com cerca de 10% das partículas maiores que as partículas do cimento, mas não superiores a $90\ \mu\text{m}$. Vale ressaltar que os resíduos passaram pelo mesmo processo de moagem, mas pode-se afirmar que o resíduo LBRO Gf possui grãos ligeiramente menores que o LBRO Df, possivelmente devido às diferenças de cada material vítreo gerado, dada a diferença de composição química dos resíduos inicialmente.

Tabela 22: Distribuição granulométrica dos materiais utilizados em percentual.

Distribuição de tamanho de partículas	CP V ARI	LBRO Gf	LBRO Df
10 % das partículas abaixo de	1,08 μm	1,65 μm	1,90 μm
50 % das partículas abaixo de	7,68 μm	8,46 μm	10,53 μm
90 % das partículas abaixo de	21,15 μm	26,08 μm	34,90 μm
100 % das partículas abaixo de	36,00 μm	90,00 μm	90,00 μm

Fonte: Relatório técnico do SENAI/SC (2013).

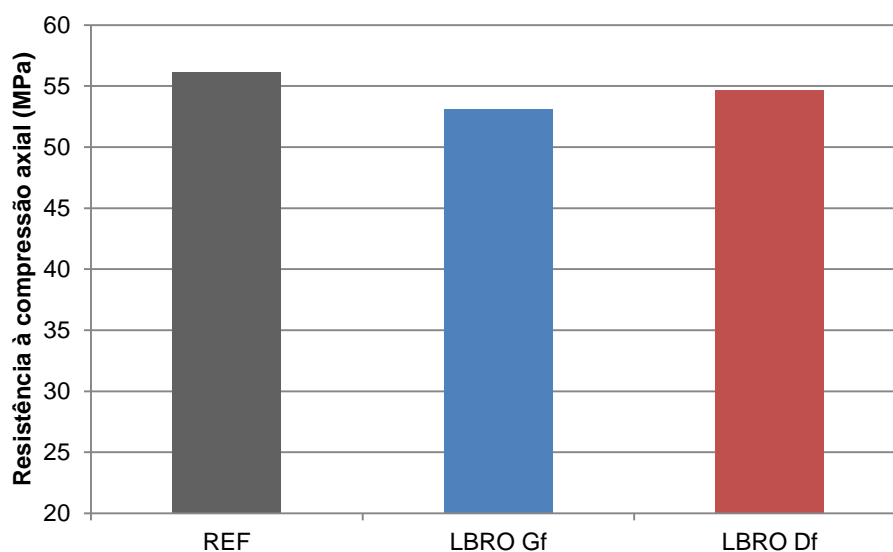
Na Figura 70 estão apresentadas as curvas de distribuição granulométrica dos materiais para comparação quanto ao tamanho das partículas.

Figura 70: Curvas de distribuição granulométrica do (a) CP V ARI, do (b) LBRO Gf e do (c) LBRO Df.**(a) Cimento CP V ARI****(b) LBRO Gf****(c) LBRO Df**

Fonte: Relatório técnico do SENAI/SC (2013).

Para verificar a capacidade dos resíduos tratados termicamente de realizarem a reação pozolânica na matriz cimentícia os mesmos foram avaliados quanto ao seu Índice de Atividade Pozolânica com o cimento (IAP-cim), um dos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2012) para a classificação de um material pozolânico, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2012). A resistência à compressão axial das argamassas analisadas com substituição de cimento por resíduo está apresentada na Figura 71.

Figura 71: Resultados da resistência à compressão axial média para identificação do IAP-cim.



Fonte: Acervo pessoal.

Com a verificação destes resultados é possível calcular o IAP-cim que é a relação entre a resistência dos corpos de prova com substituição de 35% em volume do cimento e a resistência dos corpos de prova de controle. Além disso, verifica-se também o percentual de água requerida, da argamassa referência para a argamassa com resíduo. Desta forma, o IAP-cim para cada um dos resíduos pode ser visualizado na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados do IAP-cim para os resíduos LBRO Gf e LBRO Df.

Argamassa	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)	Água requerida (%)	IAP-cim (%)
Referência	56,15	3,90	-	-
LBRO Gf	53,16	1,52	100,00	94,66
LBRO Df	54,65	1,74	100,00	97,33

Fonte: Acervo pessoal.

Como a NBR 12653 (ABNT, 2012) estabelece que o valor mínimo do IAP-cim para que o material seja considerado pozolânico é de 75% e água requerida máxima de 110%. Diante dos resultados apresentados pode-se afirmar que ambos os resíduos possuem atividade pozolânica comprovada com o cimento.

A análise do Índice de Atividade Pozolânica com a cal (IAP-cal) também é demandada pela NBR 12653 (ABNT, 2012) como requisito para definir um material como pozolânico. Porém, como o foco de aplicação do material produzido nesta pesquisa é como substituto parcial do cimento, esta propriedade não foi avaliada e, neste contexto pode-se afirmar que ambos os resíduos produzidos são pozolanas enquadradas na Classe E.

A pozolanidade identificada neste material está de acordo com a previsão da possibilidade de produção de material vítreo a partir do resíduo de rochas ornamentais identificada por Babisk (2009) e Marçal (2011) e também corrobora com os resultados das pesquisas de Paiva *et al.* (2010), Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) e Sauer (2013) que utilizaram resíduos de vidro em materiais cimentícios, avaliando seu IAP-cim variando entre 85 e 104%, ou seja, pozolana. Vale ressaltar que, Shi *et al.* (2005), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) afirmaram ainda que o índice de atividade pozolânica aumenta conforme o tamanho das partículas diminui, o que justifica alta pozolanidade, visto que os grãos dos resíduos das pesquisa são inferiores 75 μ m.

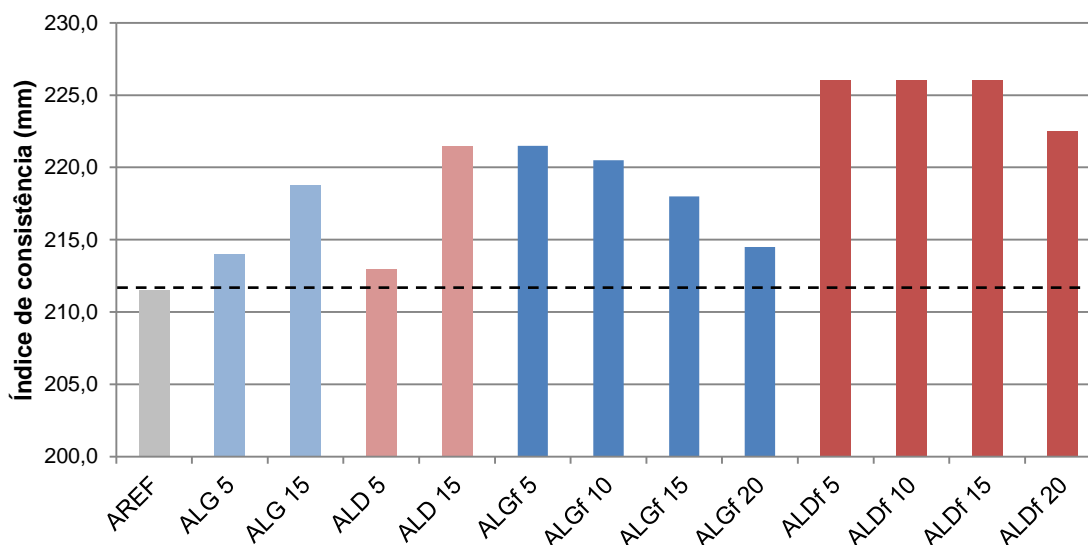
4.2.2 Ensaios realizados nas argamassas no estado fresco

Antes de serem moldadas, as argamassas produzidas passaram pela verificação de suas propriedades no estado fresco, objetivando conhecer o comportamento inicial das misturas e avaliar possíveis mudanças causadas a partir da inserção dos resíduos como adição mineral. Foram determinados o índice de consistência e a massa específica no estado fresco.

4.2.2.1 Índice de consistência

Na Figura 72 estão apresentados os resultados do índice de consistência das argamassas em seus diferentes teores determinados pelo espalhamento do tronco de cone na mesa conforme a NBR 13276 (ABNT, 2005).

Figura 72: Índice de consistência das argamassas.



Fonte: Acervo pessoal.

Dal Molin (2011) e Mehta e Monteiro (2008) afirmaram que o consumo de água em materiais cimentícios com a inserção de adições minerais depende da forma dos grãos, da massa específica e superfície específica do material, justificada por um maior ou menor preenchimento dos poros na mistura.

Esta pesquisa, não buscou analisar as adições em uma argamassa de aplicação específica, ou seja, a intenção foi avaliar o comportamento na matriz cimentícia de forma geral, não estabelecendo um valor meta para o índice de consistência.

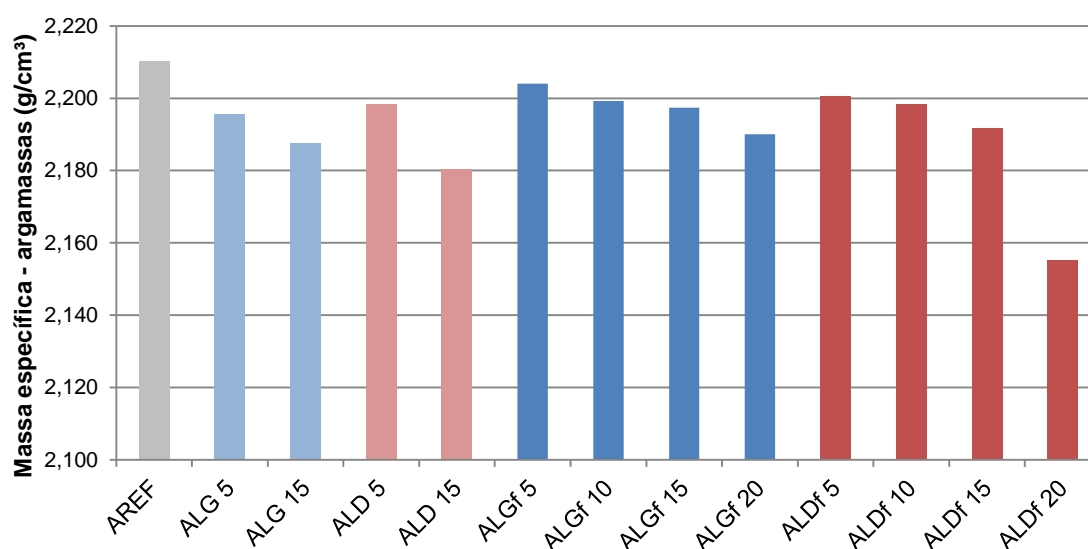
Como a relação a/c foi mantida constante e as adições foram usadas em substituição ao cimento, a quantidade de água foi padrão em todas as argamassas preparadas.

O Índice de Consistência (IC) variou de 211,5 mm na AREF a 226,0 mm nas ALDf 5, 10 e 15. A máxima variação foi de 6,9 % em relação à AREF. Verificou-se que o IC está dentro do intervalo inerente ao da variabilidade do tipo de ensaio, não sendo possível afirmar que tais resultados são efetivamente diferentes.

4.2.2.2 Massa específica

A Figura 73 contém os resultados da massa específica das argamassas no estado fresco obtidas conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Figura 73: Massa específica das argamassas.



Fonte: Acervo pessoal.

Observa-se que há uma redução da massa específica das argamassas com o aumento do teor de substituição, o que se justifica pela massa específica dos resíduos quando comparadas ao cimento como pode ser visualizado na Tabela 24, considerando que houve uma compensação de volumes com o uso das relações expostas na Tabela 24.

Tabela 24: Relação entre a massa específica do cimento e dos materiais utilizados na substituição.

Material	Massa específica (g/cm³)	Relação ($\rho_{\text{resíduo}} / \rho_{\text{cimento}}$)
Cimento	2,823	-
LBRO G	2,480	0,879
LBRO D	2,525	0,895
LBRO Gf	2,301	0,815
LBRO Df	2,196	0,778

Fonte: Acervo pessoal.

Nassar e Soroushian (2012) e Sauer (2013) também identificaram uma tendência de redução na massa específica das argamassas com o aumento do percentual de substituição por resíduo de vidro em suas pesquisas, visto que a massa específica do vidro moído utilizado foi menor que a do cimento em todos os casos.

4.2.3 Ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido

As propriedades mecânicas verificadas no estado endurecido das argamassas tem a função de indicar as dosagens que possuem os melhores desempenhos, sendo avaliadas, portanto, a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade dinâmico.

Além disso, foram verificadas as características microestruturais das argamassas nas idades dos ensaios com a utilização do MEV e do EDS, identificando as fases formadas e suas morfologias. Estão apresentados a seguir os resultados obtidos, a análise estatística realizada e as discussões acerca do desempenho das argamassas avaliadas nesta pesquisa.

4.2.3.1 Resistência à compressão axial

Para determinação da resistência à compressão axial das argamassas foram utilizados os procedimentos estabelecidos na NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo os corpos de prova rompidos aos 28, 63 e 91 dias. O objetivo foi identificar o desempenho das argamassas com o uso dos resíduos após os 28 dias visto que, segundo Mehta e Monteiro (2008), as reações pozolânicas são mais lentas e desenvolvem-se principalmente em fases posteriores pelo aumento de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) disponível na matriz.

Os resultados individuais dos 6 (seis) corpos de prova testados nas idades mencionadas estão apresentados no Apêndice A1 e as resistências médias obtidas para cada traço, bem como o coeficiente de variação encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25: Resultados da resistência à compressão axial média das argamassas.

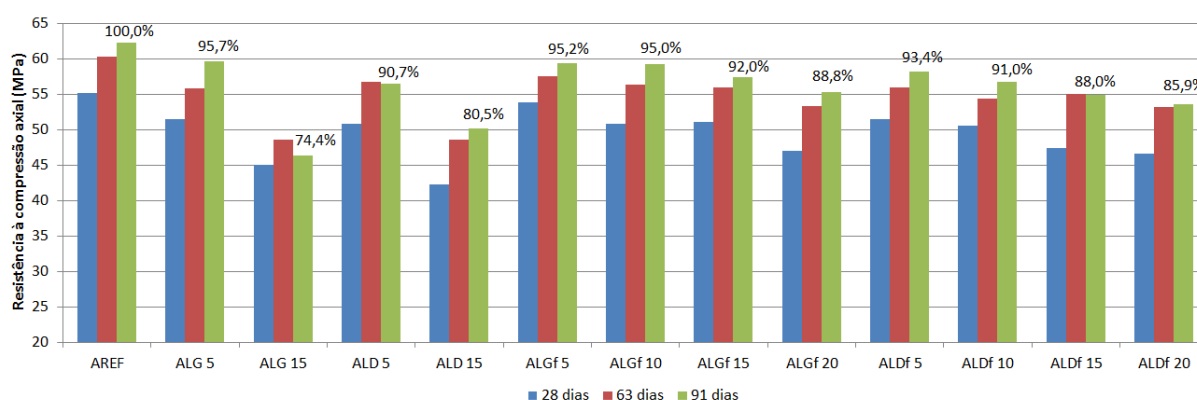
Argamassa	28 dias		63 dias		91 dias	
	$f_c^{(1)}$ (MPa)	CV ⁽²⁾ (%)	f_c (MPa)	CV (%)	f_c (MPa)	CV (%)
AREF	55,20	0,97%	60,26	0,64%	62,31	2,27%
ALG 5	51,43	2,46%	55,83	1,86%	59,61	2,80%
ALG 15	45,07	1,51%	48,53	2,29%	46,39	2,41%
ALD 5	50,80	3,56%	56,73	1,88%	56,48	3,31%
ALD 15	42,29	2,19%	48,53	2,29%	50,19	2,19%
ALGf 5	53,89	2,92%	57,46	3,55%	59,34	1,44%
ALGf 10	50,78	1,09%	56,26	2,34%	59,21	0,89%
ALGf 15	51,09	2,52%	55,94	1,41%	57,34	3,06%
ALGf 20	46,93	1,50%	53,27	3,96%	55,33	2,42%
ALDf 5	51,47	1,89%	55,97	2,87%	58,21	3,15%
ALDf 10	50,53	3,25%	54,39	3,16%	56,72	4,04%
ALDf 15	47,37	2,13%	55,00	3,45%	54,84	2,18%
ALDf 20	46,56	0,68%	53,21	4,12%	53,55	3,36%

Notas: (1) f_c – Resistência à compressão axial média.
(2) CV – Coeficiente de variação.

Fonte: Acervo pessoal.

Como pode ser visualizado na Figura 74 analisando em termos de valores absolutos, as argamassas com substituição de cimento por resíduo obtiveram resultados de resistência à compressão axial inferiores aos da AREF. As ALGf e ALDf apresentaram valores de resistência mais próximos ao de referência.

Figura 74: Resistência à compressão axial média das argamassas aos 28, 63 e 91 dias.



Fonte: Acervo pessoal.

Verificou-se, analisando somente a idade de 91 dias, que os equivalentes percentuais em relação à AREF variaram de 74,4 % a 95,7 %, sendo que as argamassas com valores mais próximos a AREF foram ALG 5, ALGf 5 e ALGf 10. Isto pode ser explicado pelo efeito filler com o baixo percentual de substituição na ALG 5, e nas ALGfs pode-se atribuir o desempenho à atividade pozolânica com o cimento dos resíduos que receberam tratamento térmico, conforme foi apresentado na Tabela 23.

Ainda que não se possa comprovar neste trabalho, espera-se uma tendência de aumento de resistência à compressão axial nas argamassas que utilizaram resíduos com tratamento térmico, de tal forma que se possam alcançar resistências muito próximas ou iguais ao da AREF, principalmente com menores teores de substituição, considerando o efeito tardio das reações pozolânicas, consequência da produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) nestas fases (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para avaliar os dados obtidos conforme os parâmetros definidos como níveis dos fatores controláveis em 3.1.4, os resultados deste ensaio foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) realizada a partir do software *Statistica 7.0* (STATSOFT, 2004). Esta verificação deu-se inicialmente de forma separada, para o conjunto de dados obtidos nas argamassas que utilizaram o resíduo sem tratamento térmico (TT0) e nas argamassas que foram preparadas com o uso dos resíduos após tratamento térmico (TTI) e moagem. Posteriormente, uma análise conjunta foi executada, para avaliar a influência do fator tratamento térmico nos resultados.

4.2.3.1.1 Análise de variância das argamassas com resíduos após TT0

Os resultados da análise de variância da resistência à compressão axial nas argamassas produzidas com os resíduos LBRO G e LBRO D (sem tratamento térmico – TT0) estão apresentados na Tabela 26. Foi avaliada a significância estatística de cada variável, considerando um intervalo de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 26: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão.

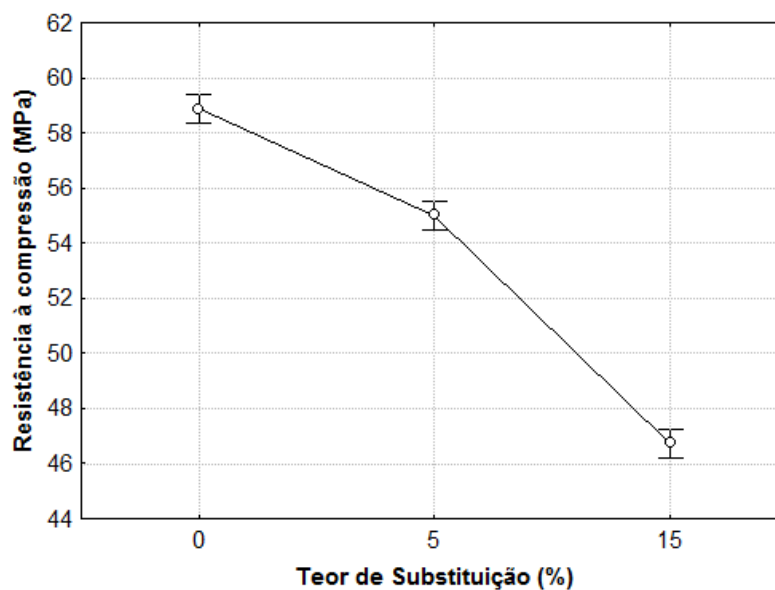
Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Tipo de resíduo	0,1	1	0,1	0,0	0,8553	Não significativo
Substituição (%)	2766,7	2	1383,4	547,1	0,0000	Significativo
Idade (dias)	766,2	2	383,1	151,5	0,0000	Significativo
Tipo x %	6,6	2	3,3	1,3	0,2749	Não significativo
Tipo x Idade	11,4	2	5,7	2,2	0,1114	Não significativo
% x Idade	40,3	4	10,1	4,0	0,0050	Significativo
Tipo x % x Idade	79,1	4	19,8	7,8	0,0002	Significativo
Erro	227,5	90	2,5			-

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

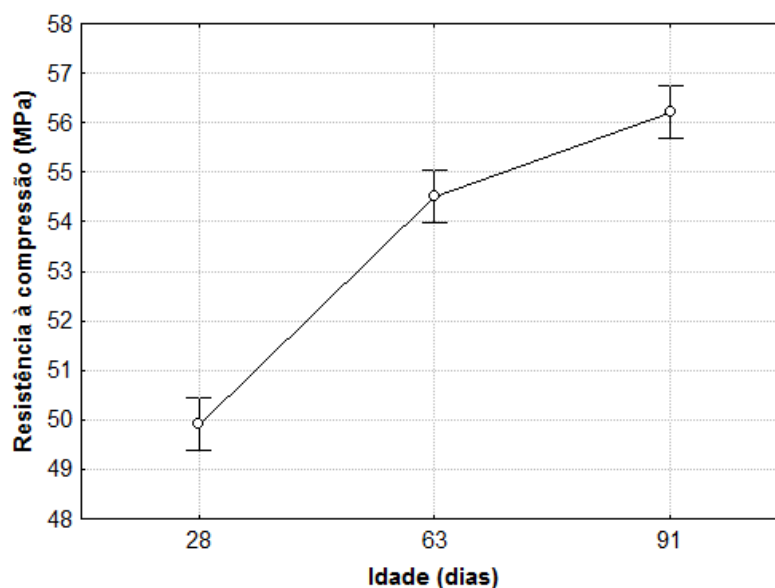
Com os dados de p-valor apresentados, pode-se afirmar que o tipo de resíduo (com granalha - LBRO G ou sem granalha - LBRO D) não foi uma variável significativa nos resultados. Também, o mesmo pode ser verificado na interação com percentual de substituição e idade, o que indica que, para a resistência à compressão axial das argamassas nestas condições, se o material de substituição é o resíduo LBRO G ou LBRO D não faz diferença.

Estes resultados justificam-se pela similaridade química e física dos resíduos, já apresentadas no capítulo 3, Programa experimental, no item 3.4.3. Mesmo sendo resultantes de processos de produção distintos, as pequenas diferenças de composição química e características dos grãos não foram suficientes para gerar variação significativa nos resultados de resistência à compressão das argamassas ao longo das diferentes idades e mesmo com os diferentes teores de substituição.

Conforme esperado, é possível confirmar com esta análise estatística que os fatores teor de substituição e idade foram significativos. Com o aumento do percentual de substituição de cimento por resíduo há uma redução significativa da resistência à compressão, conforme gráfico da Figura 75. E observa-se na Figura 76 que com o aumento da idade a tendência é que haja uma elevação da resistência.

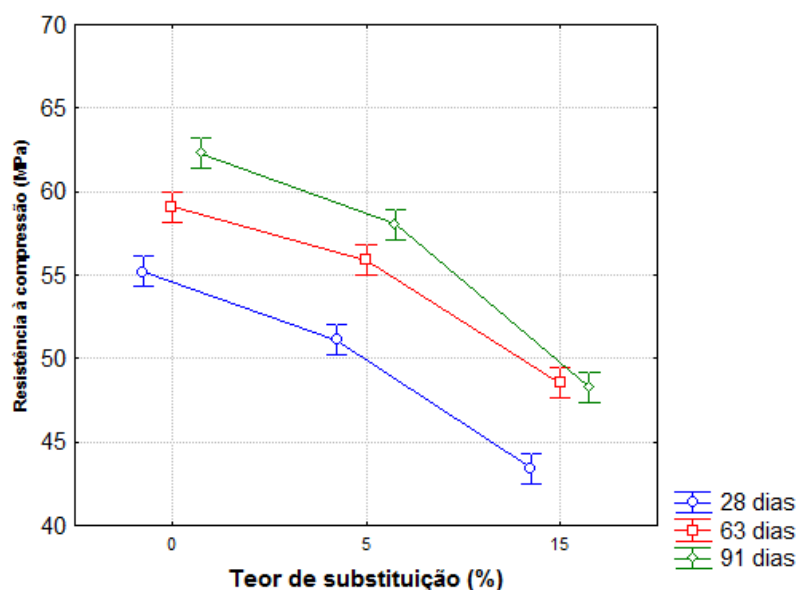
Figura 75: Efeito isolado do teor de substituição na resistência à compressão axial.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Figura 76: Efeito isolado da idade na resistência à compressão axial.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Tratando-se da influência conjunta das variáveis, a interação entre o percentual de substituição e a idade também foi significativa estatisticamente, como era esperado. Observa-se na Figura 77 a redução da resistência à compressão com o aumento do teor de substituição e também a elevação da resistência com o aumento da idade, tendendo a estabilizar-se.

Figura 77: Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição sobre a resistência à compressão.

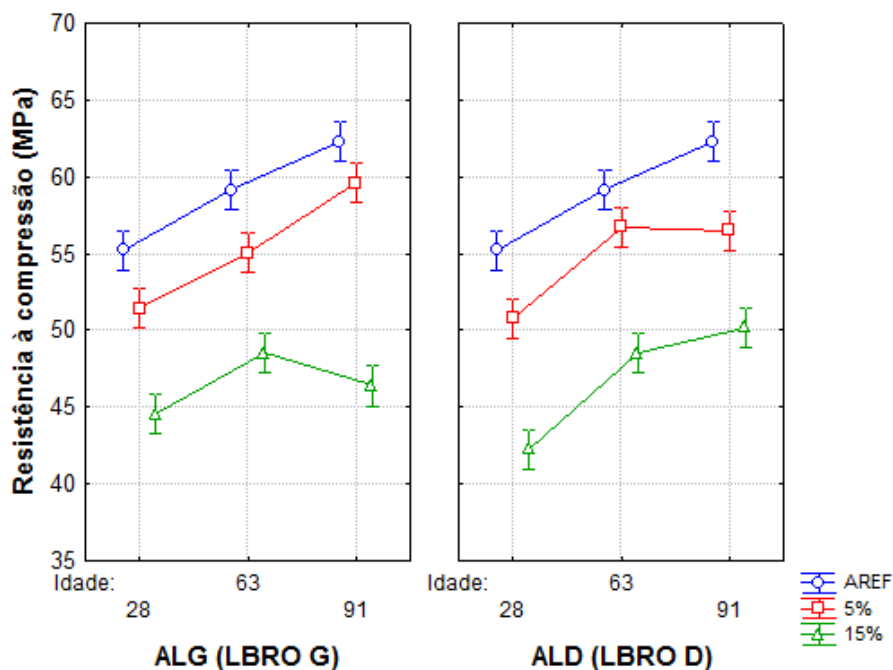
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

É possível identificar que, aos 91 dias, as argamassas deste grupo obtiveram resultados similares aos de 63 dias, principalmente com 15% de substituição. Este fato pode ser justificado por tratar-se de adição mineral inerte, que não possui reatividade e, portanto, a elevação da resistência é apenas resultado da hidratação do cimento.

Os gráficos apresentados na Figura 78 demonstram a interação entre os três fatores controláveis, que foi significativa. Verifica-se que AREF tem resultados superiores, que são similares aos da argamassa ALG 5 e, as argamassas ALG15 e ALD15, que possuem 15% de substituição de cimento por resíduo, tiveram os menores resultados da pesquisa.

Figura 78 Sabe-se que a substituição de aglomerante por adições do tipo fíler, sem efeito pozolânico, deve ser controlada em baixos teores bem definidos, pois estas adições comportam-se como material de preenchimento, sem atuação direta no desenvolvimento da resistência da matriz ao longo do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 78: Efeito da interação entre os fatores tipo de resíduo, idade e teor de substituição sobre a resistência à compressão axial.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

4.2.3.1.2 Análise de variância das argamassas com resíduos após TTI

A Tabela 27 apresenta a análise de variância da resistência à compressão axial das argamassas produzidas com substituição de cimento pelos resíduos LBRO Gf e LBRO Df, ou seja, resíduos vítreos obtidos após tratamento térmico selecionado na parte I desta pesquisa (TTI) – com nível de significância de 5 %.

Tabela 27: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão.

(continua)

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Tipo de resíduo	68,0	1	68,0	23,8	0,0000	Significativo
Substituição (%)	1093,9	4	273,5	95,5	0,0000	Significativo
Idade (dias)	1553,6	2	776,8	271,2	0,0000	Significativo
Tipo x %	29,3	4	7,3	2,6	0,0411	Significativo

(continuação)

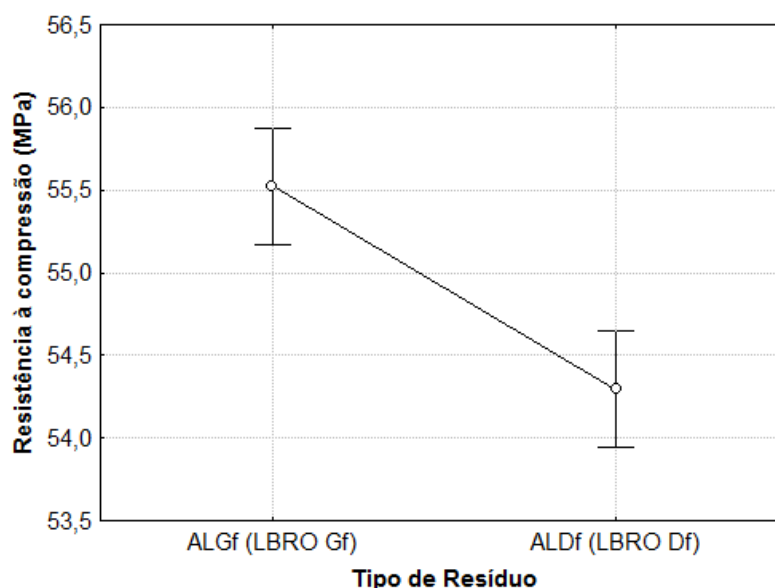
Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Tipo x Idade	2,9	2	1,5	0,5	0,6006	Não significativo
% x Idade	49,5	8	6,2	2,2	0,0335	Significativo
Tipo x % x Idade	27,1	8	3,4	1,2	0,3127	Não significativo
Erro	429,7	150	2,9		-	-

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

No caso das argamassas produzidas com os resíduos que passaram por tratamento térmico, pode-se verificar a partir dos dados de p-valor que todos os fatores controláveis (tipo de resíduo, teor de substituição e idade) interferem de forma significativa na resistência à compressão independentemente.

O tipo de resíduo (LBRO Gf ou LBRO Df) utilizado na substituição foi significativo para este grupo, o que não ocorreu no caso das argamassas com resíduo sem tratamento térmico. Observa-se a variação no gráfico da Figura 79. Este resultado pode estar relacionado à diferença no material vítreo produzido, causada possivelmente pela composição química dos materiais. Ainda que tenham passado pelo mesmo processo de moagem, o LBRO Gf ficou com grãos ligeiramente menores e maior área específica.

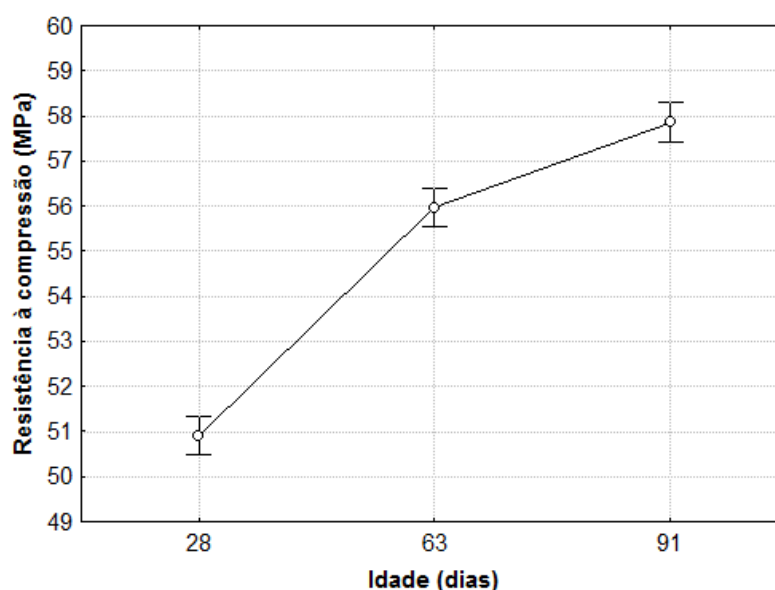
Figura 79: Efeito isolado do tipo de resíduo utilizado na resistência à compressão axial.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A idade também é um fator significativo, conforme previsto. É possível observar na Figura 80 a elevação da resistência à compressão axial com o aumento da idade. Há uma maior taxa de crescimento entre 28 e 63 dias, justamente pela formação de C-S-H na matriz. Depois dos 63 dias a resistência continua a aumentar, porém com menor taxa de variação. A tendência é continuar essa elevação gradualmente para idades posteriores, promovida pela atividade pozolânica do material, que tem uma reação mais lenta na produção do C-S-H.

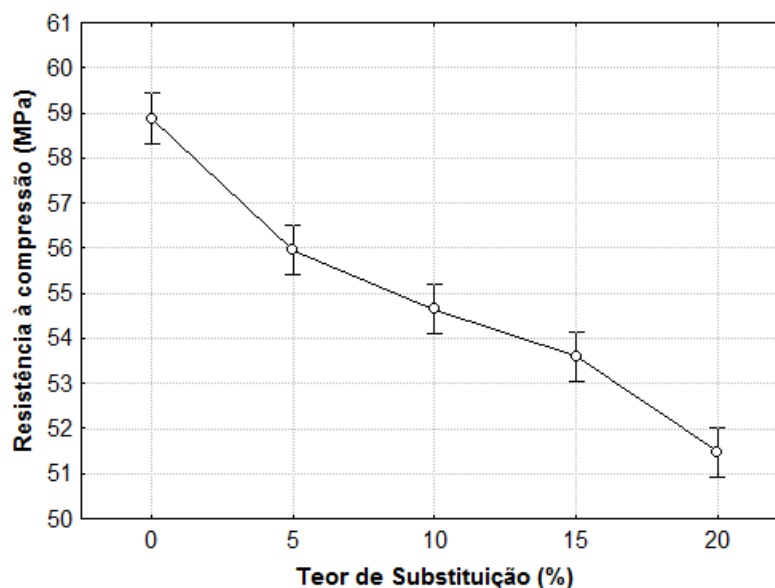
Figura 80: Efeito isolado da idade na resistência à compressão axial.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A outra variável envolvida, teor de substituição, também foi considerada significativa. Verifica-se na Figura 81 uma redução na resistência à compressão, dado o aumento do percentual, justamente pela redução do teor de cimento na mistura e pela ação mais tardia das pozolanas.

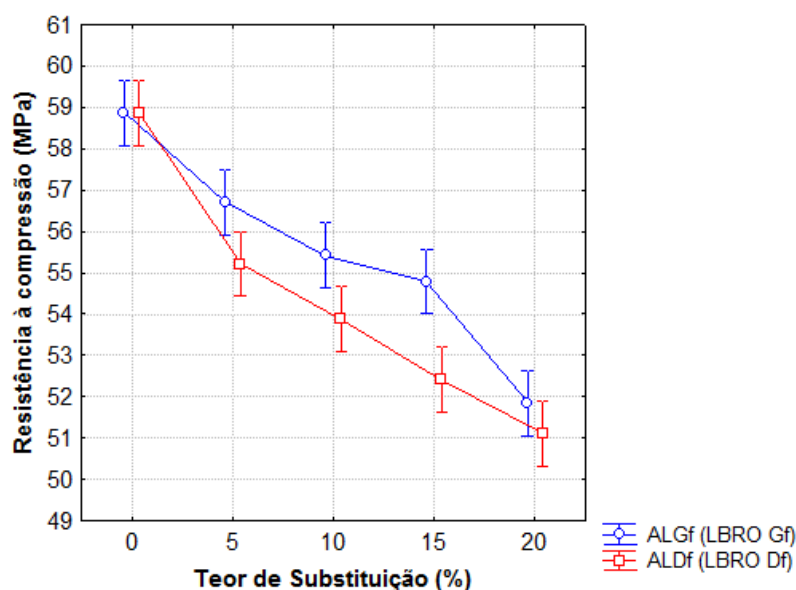
Figura 81: Efeito isolado do teor de substituição na resistência à compressão axial.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Tratando-se da interação entre os fatores de variação, tipo de resíduo X percentual de substituição foi estatisticamente significativa. A Figura 82 apresenta o gráfico que demonstra o comportamento das argamassas ALGf e ALDf para cada teor de substituição. Observa-se a redução com o aumento do percentual e maiores valores para as argamassas produzidas com o LBRO Gf.

Figura 82: Efeito da interação entre o tipo de resíduo e o teor de substituição na resistência à compressão axial.

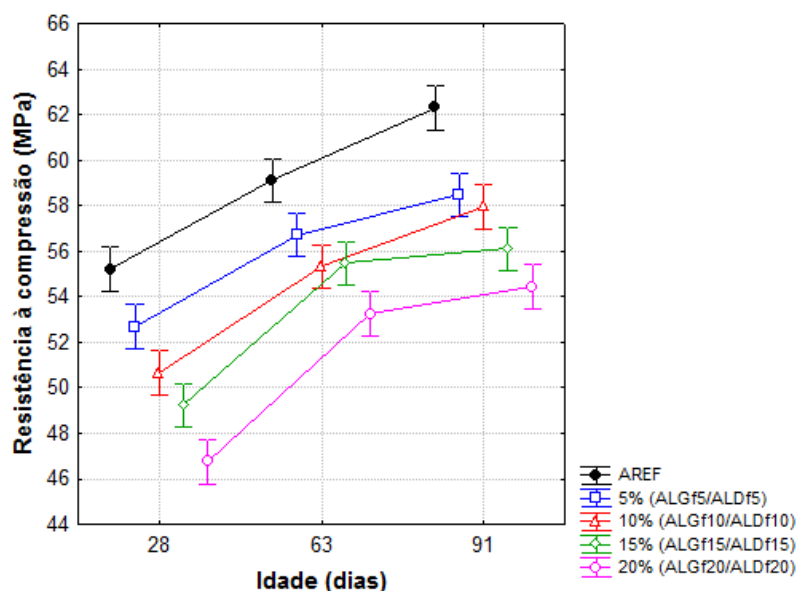


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A significância estatística desta interação pode estar associada a menor granulometria do LBRO Gf que mesmo com maiores teores de substituição obteve melhores resultados de resistência em relação às argamassas ALDfs.

A interação entre os fatores idade e teor de substituição pode ser visualizada na Figura 83. Observa-se que as argamassas com substituição não atingiram a resistência da argamassa referência, porém com redução da ordem de apenas 10% em relação à referência aos 91 dias, mesmo para as argamassas com 15 ou 20% de substituição, mantendo taxas similares de crescimento da resistência com o tempo em cada fase.

Figura 83: Efeito da interação entre a idade e o teor de substituição na resistência à compressão.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Os resultados aqui apresentados estão de acordo com as conclusões de diversos autores que trataram de adições em matrizes cimentícias. Sabendo que os materiais produzidos tem características similares aos vidros, pode-se ressaltar que Wang (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Sauer (2013) identificaram em suas pesquisas que argamassas com utilização de resíduo de vidro finamente moído obtiveram resistência inferior a da argamassa referência, mas com resultado satisfatório, principalmente em idades posteriores, associado à ação pozolânica do material.

4.2.3.1.3 Análise de variância conjunta das argamassas

Foi executada também a análise de variância dos resultados de resistência à compressão das argamassas ALG, ALD e ALGf e ALDf com os percentuais de substituição de 5 e 15%, para avaliar a influência da realização do tratamento térmico nos resíduos sobre os resultados de resistência. Esta avaliação deu-se com a inclusão da fonte de variação que determina se houve ou não tratamento térmico no resíduo. Os resultados estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis na resistência à compressão.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Tratamento térmico	364,7	1	364,7	127,1	0,0000	Significativo
Tipo de resíduo	24,5	1	24,5	8,5	0,0039	Significativo
Substituição (%)	2772,6	2	1386,3	483,0	0,0000	Significativo
Idade (dias)	1597,5	2	798,7	278,3	0,0000	Significativo
Tratamento x Tipo	20,6	1	20,6	7,2	0,0080	Significativo
Tratamento x %	497,1	2	248,6	86,6	0,0000	Significativo
Tipo x %	12,5	2	6,2	2,2	0,1167	Não significativo
Tratamento x Idade	0,8	2	0,4	0,1	0,8765	Não significativo
Tipo x Idade	19,1	2	9,5	3,3	0,0382	Significativo
% x Idade	56,2	4	14,0	4,9	0,0009	Significativo
Trat x Tipo x %	20,3	2	10,2	3,5	0,0311	Significativo
Trat x Tipo x Idade	0,2	2	0,1	0,0	0,9702	Não significativo
Trat x % x Idade	15,1	4	3,8	1,3	0,2676	Não significativo
Tipo x % x Idade	35,2	4	8,8	3,1	0,0180	Significativo
Trat x Tipo x % x Idade	53,0	4	13,3	4,6	0,0014	Significativo
Erro	516,7	180	2,9	-	-	

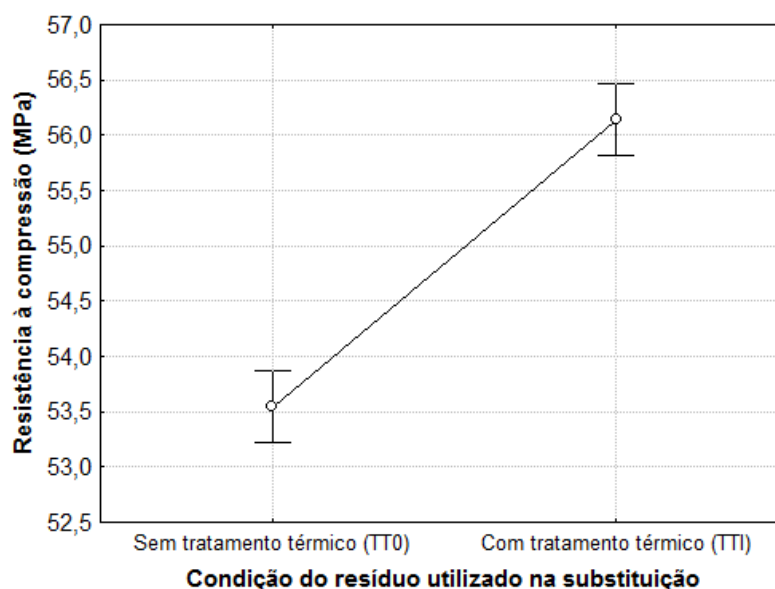
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Isoladamente todos os fatores são significativos, sendo que o tipo de resíduo é o fator de menor influência conforme o valor de p . Algumas das interações não o são, considerando um nível de significância de 5%.

Em geral, os gráficos com a variação dos fatores e as suas interações são similares aos já apresentados anteriormente. E o objetivo desta análise é identificar a influência do tratamento térmico dos resíduos na resistência.

Como se pode observar na Figura 84 é possível confirmar que o fato dos resíduos terem sido ou não tratados termicamente é uma questão significativa nos resultados da resistência à compressão axial das argamassas.

Figura 84: Efeito isolado do tipo de tratamento do resíduo na resistência à compressão axial.

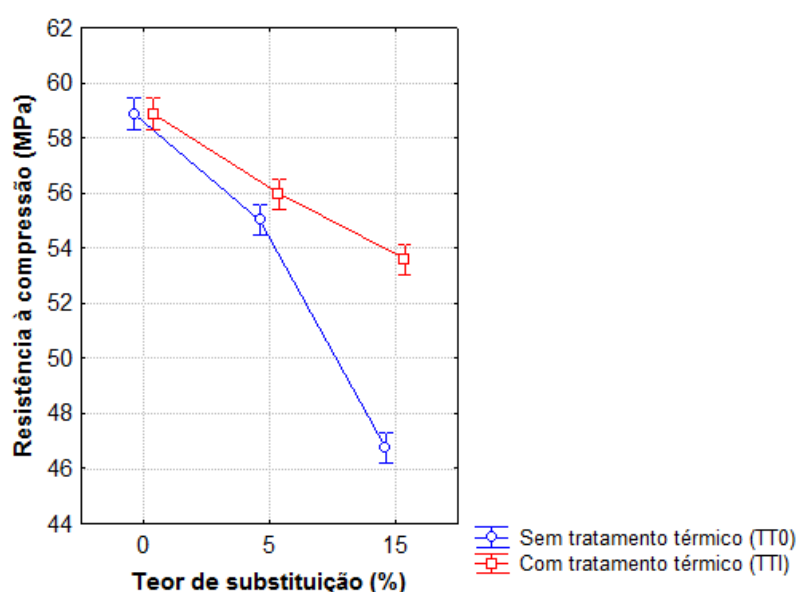


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Esta discrepância está relacionada diretamente à diferença de comportamento do resíduo sem tratamento térmico, adição inerte, e com tratamento térmico, adição pozolânica. Quando há a substituição de cimento por LBRO G e ou LBRO D, eles atuam no preenchimento de poros, o que contribui com a resistência, mas sem participar das reações. Porém, substituindo por LBRO Gf ou LBRO Df, o CH formado pela reação de hidratação do cimento é consumido pela reação pozolânica formando mais C-S-H, que contribui diretamente para o desempenho mecânico da matriz.

Na Figura 85 está uma das interações estatisticamente significativas: entre o tratamento aplicado e o percentual de substituição. O aumento do percentual provoca uma redução da resistência à compressão axial, porém, é possível observar no gráfico que as argamassas com o resíduo sem tratamento térmico têm uma redução brusca de resistência, enquanto que aquelas produzidas com o resíduo tratado termicamente tem uma redução menos acentuada e mantém valores mais próximos aos de referência.

Figura 85: Efeito da interação entre tratamento do resíduo e teor de substituição na resistência à compressão.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Este fato confirma que, para substituir o cimento, os resíduos após tratamento térmico geram maiores resultados de resistência à compressão axial quando comparados com o desempenho dos resíduos apenas secos e destorroados. Ou seja, no que se refere à diferença entre o comportamento do resíduo com e sem tratamento térmico, pozolânico e não pozolânico, esta pesquisa confirmou que para teores mais elevados há uma redução da resistência, quando se utiliza material não pozolânico, sendo que o material pozolânico mantém os resultados mais próximos aos da argamassa de referência.

4.2.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico intrínseco do material e está relacionado à sua rigidez e capacidade de resistir a deformações elásticas (CALLISTER, 2000). Em argamassas e concretos esta propriedade é extremamente importante por demonstrar o comportamento do material sob a ação de carregamento e sua capacidade de deformação, considerando a minimização de trincas e fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Foi utilizado o procedimento estabelecido na NBR 15630 (ABNT, 2008) para determinação do módulo de elasticidade dito dinâmico, por basear-se na aplicação de onda ultrassônica nos corpos de prova de argamassa. Por tratar-se de ensaio não-destrutivo, foram usados os mesmos 06 (seis) corpos de prova utilizados para a resistência à compressão aos 28, 63 e 91 dias, com os resultados individuais no Apêndice A2 e os valores médios obtidos com os coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 29 e na Figura 86 para uma melhor visualização.

Tabela 29: Resultados do módulo de elasticidade dinâmico médio das argamassas.

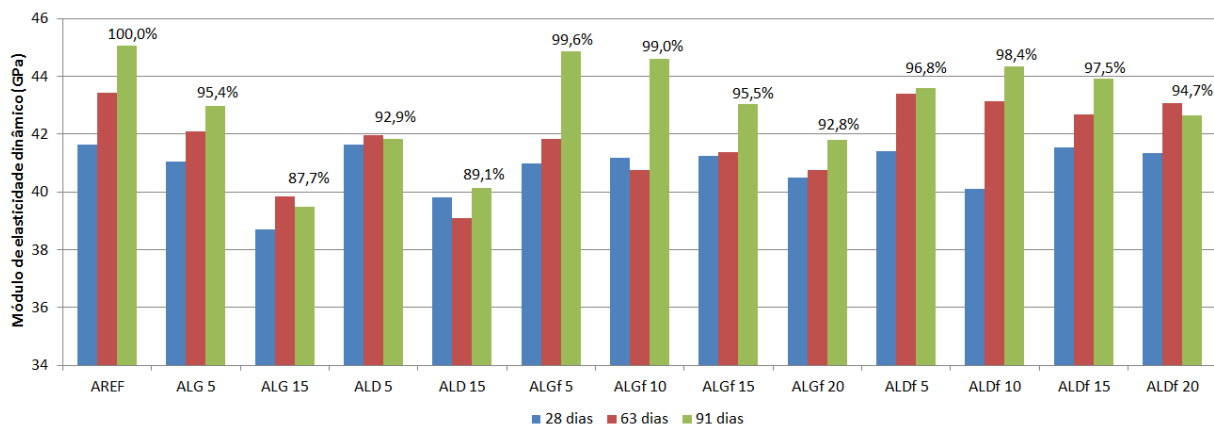
Argamassa	28 dias		63 dias		91 dias	
	E_c (GPa)	CV (%)	E_c (GPa)	CV (%)	E_c (GPa)	CV (%)
AREF	41,64	1,82%	43,44	1,85%	45,04	1,55%
ALG 5	41,06	2,30%	42,10	1,83%	42,96	1,68%
ALG 15	38,69	1,31%	39,84	2,11%	39,49	0,17%
ALD 5	41,64	1,13%	41,95	2,17%	41,82	2,30%
ALD 15	39,82	1,17%	39,09	1,72%	40,15	1,17%
ALGf 5	40,99	2,52%	41,83	0,83%	44,85	1,66%
ALGf 10	41,17	1,37%	40,75	1,44%	44,60	1,14%
ALGf 15	41,25	1,25%	41,37	2,89%	43,03	1,53%
ALGf 20	40,48	1,73%	40,75	1,48%	41,79	1,25%
ALDf 5	41,39	2,12%	43,38	2,33%	43,58	2,76%
ALDf 10	40,11	1,70%	43,12	0,98%	44,33	1,50%
ALDf 15	41,54	1,11%	42,67	2,91%	43,91	2,74%
ALDf 20	41,35	0,95%	43,07	0,33%	42,64	1,16%

Notas: (1) E_c – Resistência à compressão axial média.

(2) CV – Coeficiente de variação.

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 86: Módulo de elasticidade dinâmico médio das argamassas aos 28, 63 e 91 dias.



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados de módulo de elasticidade não apresentaram a regularidade dos dados obtidos de resistência à compressão quanto à ocorrência de uma ordem aproximada de argamassas com maiores e menores resultados.

Analisando os equivalente percentuais em relação a AREF para a idade de 91 dias, observa-se que variaram de 87,7 % a 99,6 %, sendo que as argamassas com valores mais próximos a AREF foram ALGf 5 e ALGf 10 e os e menores valores são das argamassas ALG 15 e ALD 15. Este comportamento pode estar relacionado à maior densidade nas matrizes das argamassas com os resíduos após fusão, pela atividade pozolânica destes materiais.

Assim como com os dados de resistência à compressão, para avaliar os resultados obtidos conforme os parâmetros definidos como níveis dos fatores controláveis em 3.1.4, os valores do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas foram submetidos à análise de variância, com o software *Statistica 7.0* (STATSOFT, 2004), inicialmente em dois grupos (argamassas produzidas com resíduos na condição TT0 e após o tratamento TTI) e depois de forma conjunta.

4.2.3.2.1 Análise de variância das argamassas com resíduos após TT0

A Tabela 30 apresenta a análise de variância do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas com os resíduos na condição TT0, sem tratamento térmico para o intervalo de confiança de 95 % e significância de 5 %.

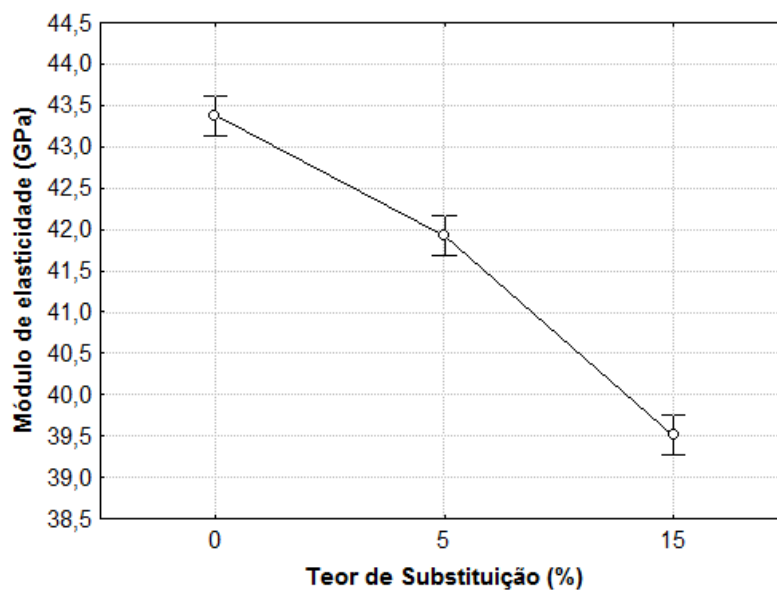
Tabela 30: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Tipo de resíduo	0,0	1	0,0	0,1	0,7899	Não significativo
Substituição (%)	273,8	2	136,9	266,3	0,0000	Significativo
Idade (dias)	50,3	2	25,1	48,9	0,0000	Significativo
Tipo x %	1,5	2	0,8	1,5	0,2306	Não significativo
Tipo x Idade	3,9	2	1,9	3,8	0,0263	Significativo
% x Idade	27,8	4	7,0	13,5	0,0000	Significativo
Tipo x % x Idade	6,3	4	1,6	3,1	0,0206	Significativo
Erro	46,3	90	0,5			-

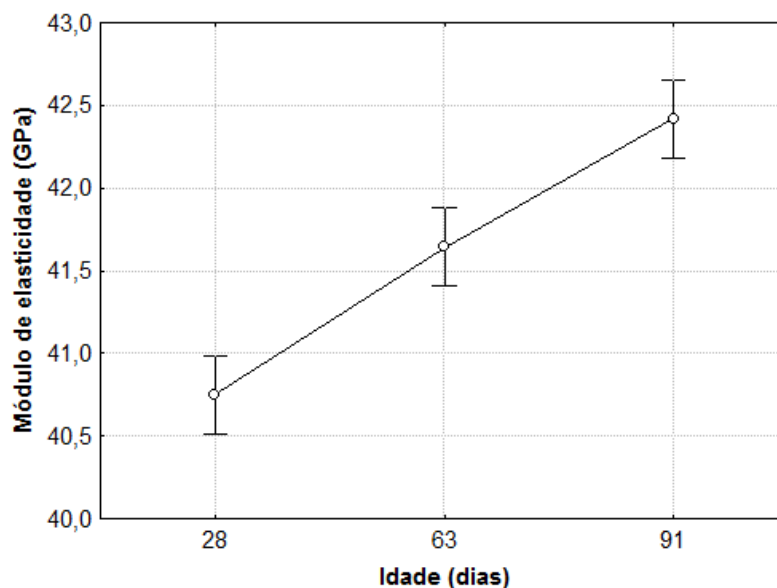
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Como é possível observar a partir dos valores apresentados, o tipo de resíduo (LBRO G ou LBRO D) utilizado como substituto do cimento não foi estatisticamente significativo no módulo de elasticidade dinâmico, assim como também não foi significativa a interação entre o tipo de resíduo e o percentual de substituição, identicamente ao que ocorreu com a resistência à compressão destas argamassas.

Em contrapartida, todas as outras fontes de variação foram estatisticamente significativas. As que possuem maior influência são o percentual de substituição que reduziu o módulo, como se pode observar na Figura 87, e a idade das argamassas que o aumentou, com o gráfico apresentado na Figura 88.

Figura 87: Efeito isolado do percentual de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.

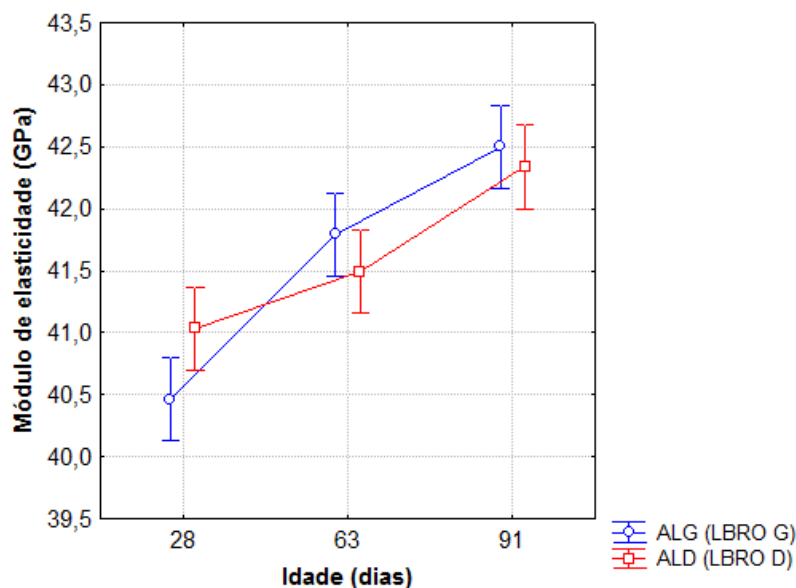
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Figura 88: Efeito isolado da idade no módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Diferentemente da variável resistência à compressão para estas mesmas argamassas, o tipo de resíduo e a idade em conjunto foram significativos, mesmo que pouco, possivelmente pela diferença na densidade das matrizes com o avançar da idade, afetada pelo maior preenchimento de poros no caso do resíduo mais fino, o LBRO G. Esta relação está apresentada na Figura 89.

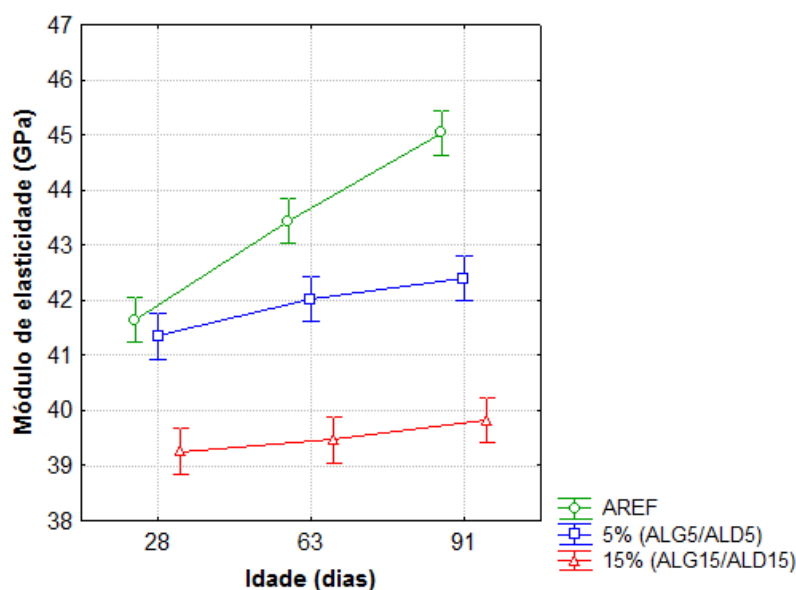
Figura 89: Efeito da interação entre o tipo de resíduo utilizado e a idade no módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Pode-se visualizar a interação estatisticamente significativa entre o teor de substituição e a idade na Figura 90. A argamassa referência obteve os maiores valores do módulo de elasticidade e com maior incremento ao longo do tempo, enquanto que as outras argamassas tiveram uma elevação menos acentuada.

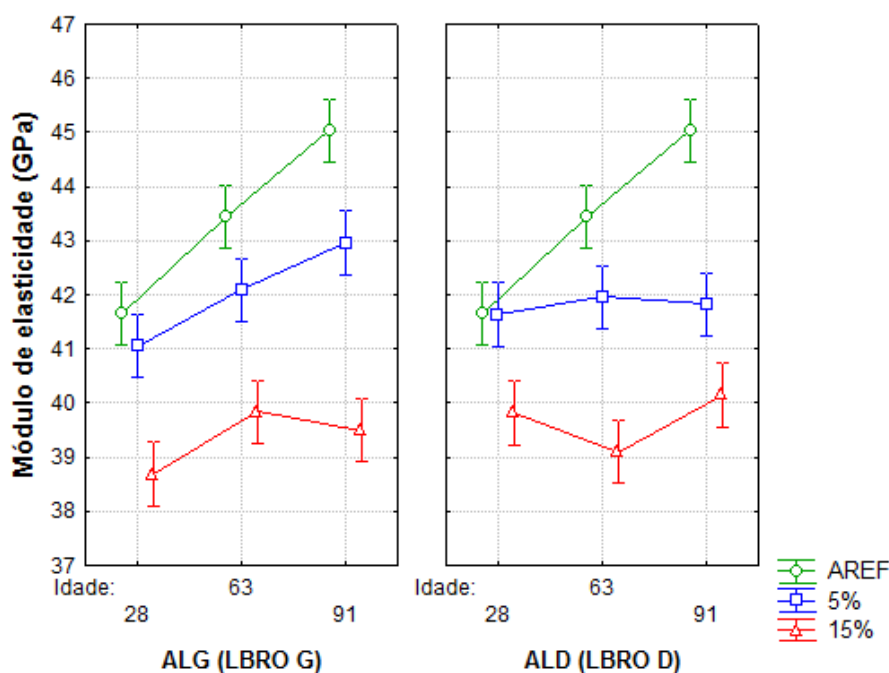
Figura 90: Efeito da interação entre o teor de substituição e a idade no módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A Figura 91 contempla a interação de todos os fatores envolvidos nesta análise. Pode-se afirmar que foi significativa estatisticamente conforme o valor de p apresentado, onde se verifica que as argamassas com substituição tiveram uma elevação no módulo de elasticidade menos acentuada que a referência, com redução aos 91 dias, para algumas.

Figura 91: Efeito da interação entre tipo de resíduo utilizado, idade e teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Sabe-se que o aumento do módulo de elasticidade geralmente representa o aumento da rigidez do material, com a diminuição de sua resiliência e consequentemente capacidade de deformação sem a ocorrência de fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Neste contexto, ressalta-se apenas a variação de comportamento das argamassas produzidas, visto que esta pesquisa não buscou um tipo de argamassa para aplicação específica, que demandam maiores ou menores limites de resultado para o módulo de elasticidade conforme a aplicação.

4.2.3.2.2 Análise de variância das argamassas com resíduos após TTI

A análise de variância dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas produzidas com o uso dos resíduos LBRO Gf e LBRO Df (tratamento térmico TTI) está apresentada na Tabela 31.

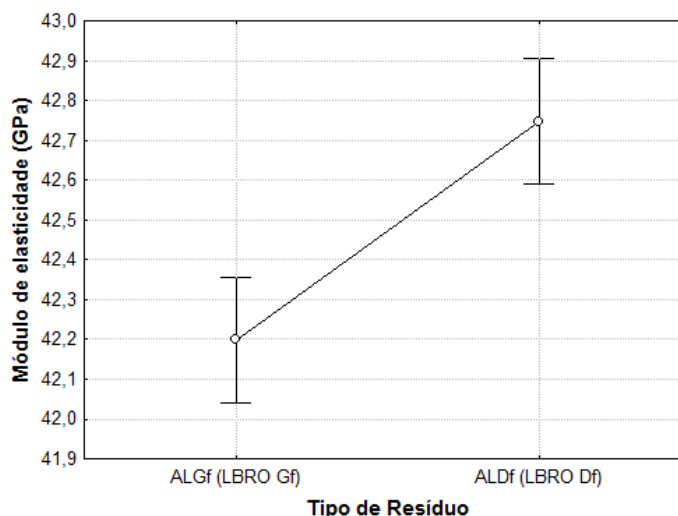
Tabela 31: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Tipo de resíduo	13,6	1	13,6	23,5	0,0000	Significativo
Substituição (%)	55,0	4	13,7	23,9	0,0000	Significativo
Idade (dias)	223,5	2	111,7	193,8	0,0000	Significativo
Tipo x %	10,4	4	2,6	4,5	0,0018	Significativo
Tipo x Idade	20,6	2	10,3	17,9	0,0000	Significativo
% x Idade	30,1	8	3,8	6,5	0,0000	Significativo
Tipo x % x Idade	16,4	8	2,1	3,6	0,0008	Significativo
Erro	86,5	150	0,6		-	-

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

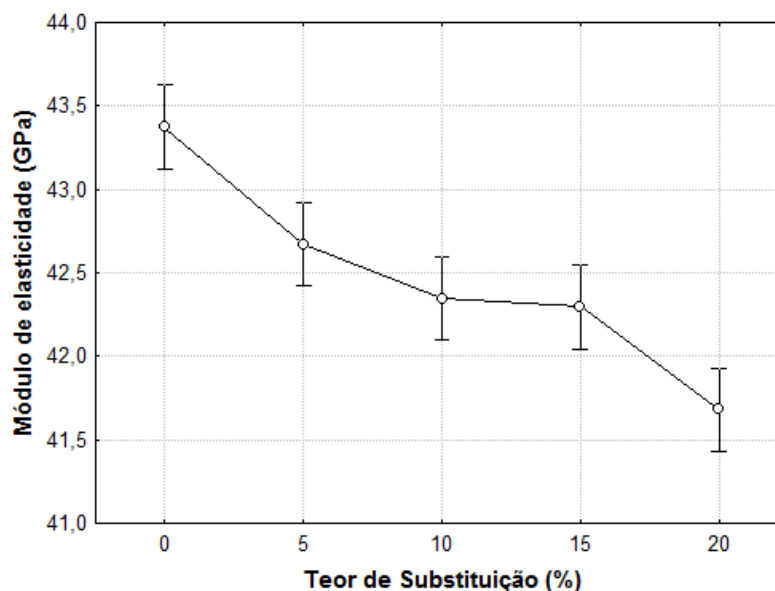
Esta análise também foi realizada considerando um nível de significância 5 % e, conforme apresentado, todas as fonte de variação foram significativas estatisticamente no resultado obtido para o módulo de elasticidade das argamassas, sendo que a maior influência é causada pelo fator idade.

Assim como ocorreu com a resistência à compressão para as argamassas produzidas com resíduos após TTI, o tipo de resíduo foi estatisticamente significativo nos resultados do módulo de elasticidade, podendo visualizar na Figura 92 a diferença para as argamassas produzidas com LBRO Gf e com LBRO Df que obtiveram maiores valores.

Figura 92: Efeito do tipo de resíduo utilizado no módulo de elasticidade dinâmico.

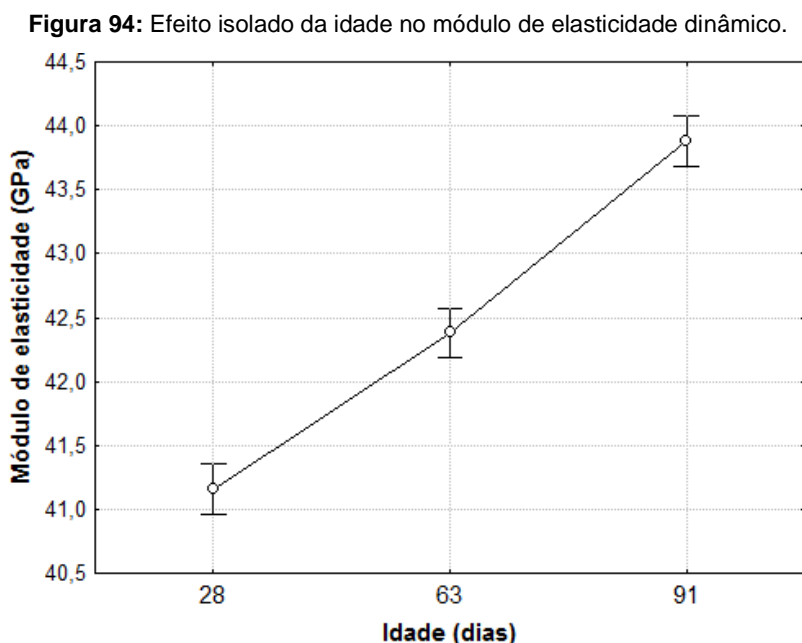
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Há uma tendência de redução do módulo de elasticidade com o aumento do teor de substituição conforme apresentado na Figura 93, o que é um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 81 quanto à resistência à compressão destas mesmas argamassas.

Figura 93: Efeito isolado do teor de substituição no módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

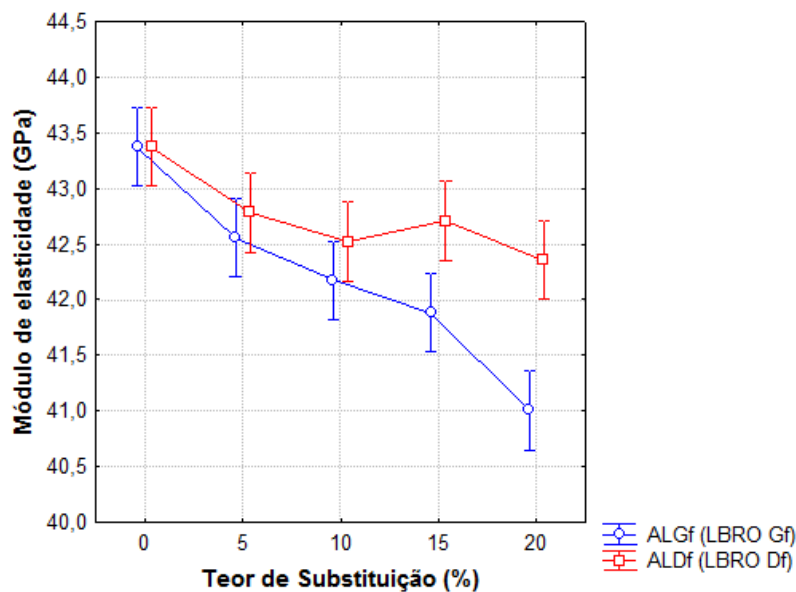
A idade influencia de forma significativa e seu efeito sob o módulo causa um crescimento aproximadamente constante, apresentado na Figura 94 e justificado pela maior densidade das matrizes com a evolução da hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Observa-se na Figura 95, a interação entre o tipo de resíduo e o percentual de substituição que foi significativo nos resultados. Verifica-se uma redução do módulo de elasticidade com o aumento do teor de substituição e uma crescente diferença entre os valores obtidos para as argamassas produzidas com LBRO Gf e LBRO Df, que obtiveram maiores resultados em média.

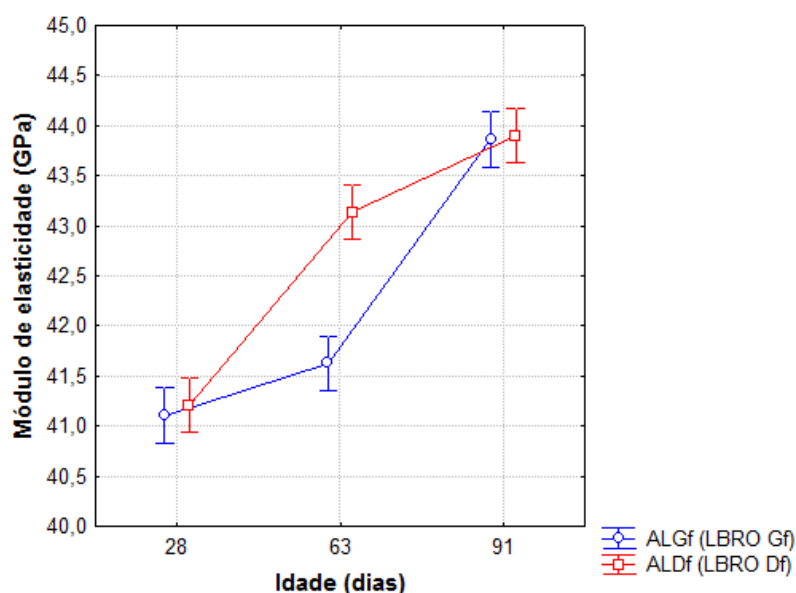
Figura 95: Efeito da interação entre o tipo de resíduo e o teor de substituição no módulo de elasticidade.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A interação entre o tipo de resíduo e a idade das argamassas foi significativa estatisticamente e esta relação está apresentada na Figura 96. A influência destes fatores pode ser atribuída à diferença do comportamento pozolânico destes materiais.

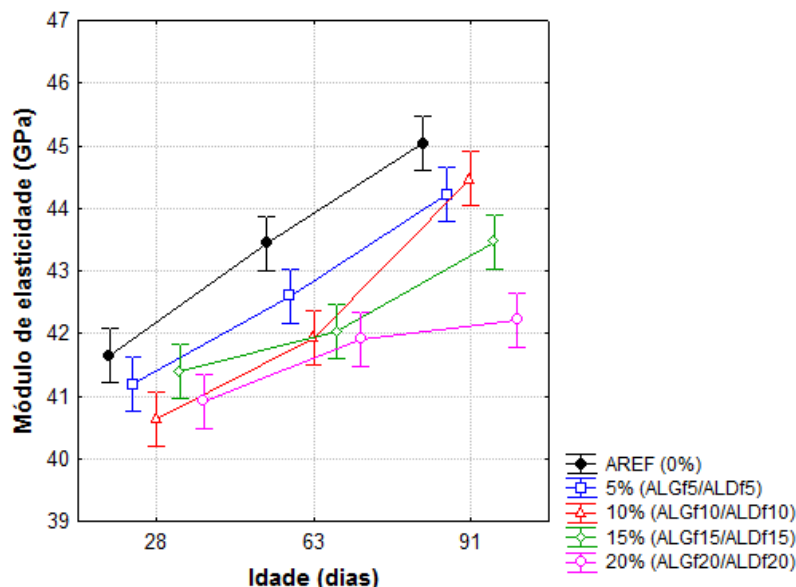
Figura 96: Efeito da interação entre o tipo de resíduo e a idade no módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A Figura 97 apresenta a interação entre o teor de substituição e da idade das argamassas cuja influência combinada resulta em matrizes mais densas com o avançar da idade, mas com redução do módulo conforme o aumento do teor de substituição devido à menor quantidade de material cimentício.

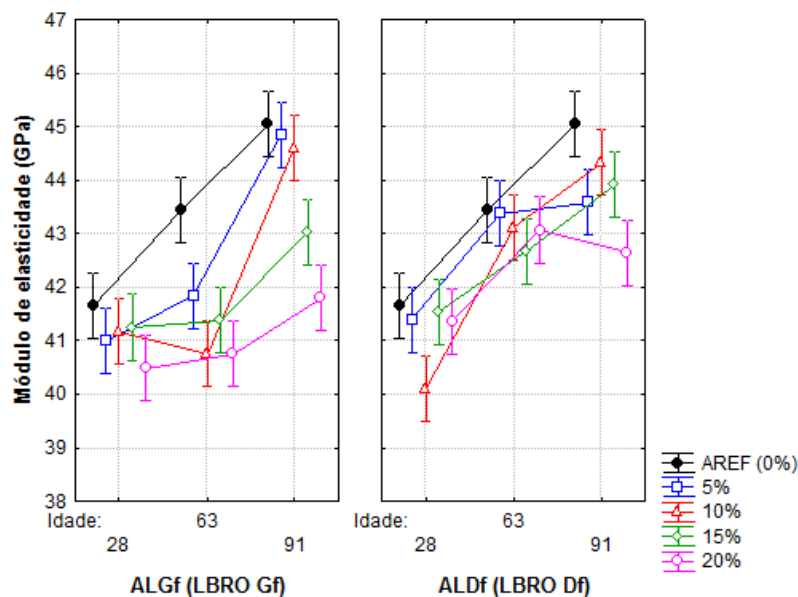
Figura 97: Efeito do teor de substituição e da idade no módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Na interação entre todos os fatores, pode-se observar (Figura 98) que a argamassa de referência obteve em todas as idades valores para o módulo de elasticidade dinâmico maiores que os das argamassas com substituição. Este resultado é similar ao encontrado por Sauer (2013) para argamassas com substituição de cimento por resíduo de vidro moído.

Figura 98: Efeito da interação entre tipo de resíduo, teor de substituição e idade no módulo de elasticidade.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Sendo assim, considerando a afirmação de que o módulo de elasticidade dinâmico demonstra a rigidez do material e sua capacidade de deformação, pode-se afirmar que os melhores resultados quanto a esta propriedade estão atribuídos às argamassas com maiores teores de substituição de cada um dos resíduos, ou seja, ALGf 20 e ALDf 20, sendo que destaca-se a ALGf 20. Resultado compatível com o que foi observado por Paiva *et al.* (2010) e Sauer (2013) que também indicaram resultados melhores de suas argamassas com maiores teores de substituição de cimento por resíduo de vidro.

4.2.3.2.3 Análise de variância conjunta das argamassas

Para avaliar a influência da realização do tratamento térmico nos resíduos sobre os resultados do módulo de elasticidade, foi realizada a ANOVA, conforme o procedimento utilizado para a resistência: argamassas ALG, ALD e ALGf e ALDf com os percentuais de substituição de 5 e 15%. Incluindo a fonte de variação que determina se houve ou não tratamento térmico no resíduo. Os resultados estão apresentados na Tabela 32, e foi considerado um nível de 5 % de significância.

Tabela 32: Análise de variância do efeito dos fatores controláveis no módulo de elasticidade.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Tratamento térmico	74,8	1	74,8	117,1	0,0000	Significativo
Tipo de resíduo	2,0	1	2,0	3,2	0,0774	Não significativo
Substituição (%)	220,8	2	110,4	172,9	0,0000	Significativo
Idade (dias)	182,4	2	91,2	142,8	0,0000	Significativo
Tratamento x Tipo	1,3	1	1,3	2,1	0,1525	Não significativo
Tratamento x %	74,6	2	37,3	58,4	0,0000	Significativo
Tipo x %	4,1	2	2,1	3,2	0,0418	Significativo
Tratamento x Idade	12,6	2	6,3	9,9	0,0001	Significativo
Tipo x Idade	3,1	2	1,6	2,5	0,0886	Não significativo
% x Idade	27,8	4	6,9	10,9	0,0000	Significativo
Trat x Tipo x %	0,7	2	0,3	0,5	0,5973	Não significativo
Trat x Tipo x Idade	6,2	2	3,1	4,8	0,0089	Significativo
Trat x % x Idade	6,7	4	1,7	2,6	0,0374	Significativo
Tipo x % x Idade	10,8	4	2,7	4,2	0,0026	Significativo
Trat x Tipo x % x Idade	3,6	4	0,9	1,4	0,2319	Não significativo
Erro	115,0	180	0,6			

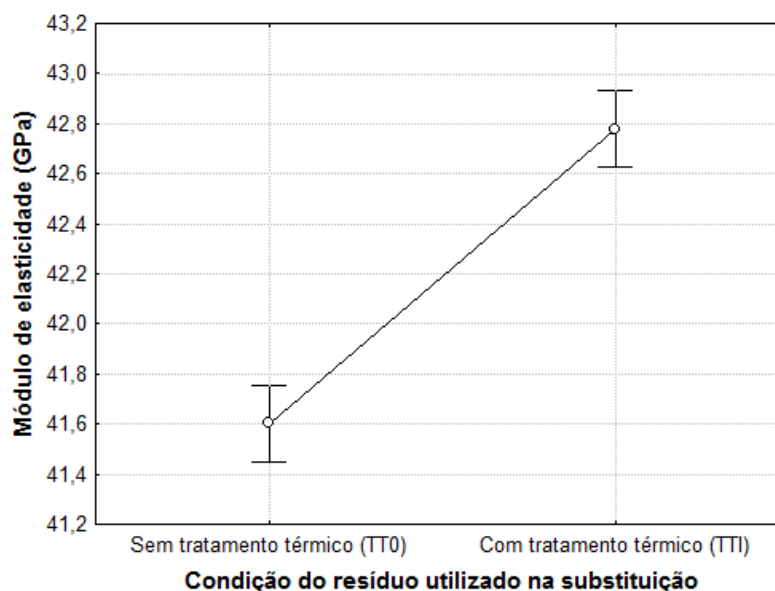
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

A análise de variância indica que todas as variáveis analisadas independentemente são significativas, com exceção do tipo de resíduo, que fez com que grande parte das interações que esta variável está envolvida também não fosse significativa.

O foco deste item é identificar a influência do tratamento térmico realizado nos resíduos nos resultados do módulo de elasticidade. Sendo assim, serão apresentados os gráficos dos efeitos contendo esta variável e não os demais gráficos (com a variação dos outros fatores e as suas interações) visto que são similares aos já apresentados.

Observa-se na Figura 99 que, de fato, a realização do tratamento térmico nos resíduos exerce uma influência significativa nos resultados do módulo de elasticidade das argamassas.

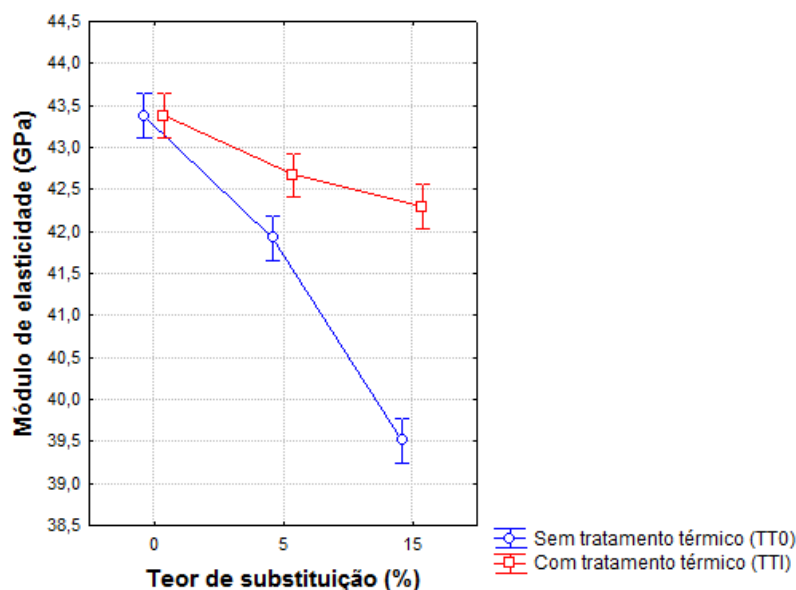
Figura 99: Efeito isolado do tipo de tratamento do resíduo na resistência à compressão axial.



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Assim como na resistência à compressão, esta influência no módulo de elasticidade também está relacionada ao comportamento diferenciado do resíduo em cada uma das condições. O uso do resíduo após TTI, pozolânico, faz com que haja uma contribuição direta nas reações, auxiliando na densificação da matriz cimentícia o que tende a elevar o módulo de elasticidade.

A Figura 100 apresenta a interação entre o tratamento aplicado e o percentual de substituição. Observa-se que, assim como para a resistência à compressão, o aumento do percentual provoca uma redução do módulo e as argamassas com o resíduo sem tratamento térmico têm uma redução acentuada, enquanto que aquelas produzidas com o resíduo tratado termicamente tem menor redução, mantendo valores próximos aos de referência.

Figura 100: Efeito da interação entre tratamento do resíduo e teor de substituição no módulo de elasticidade.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Sabe-se que o aumento do módulo de elasticidade geralmente representa o aumento da rigidez do material, com a diminuição de sua resiliência e consequentemente capacidade de deformação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Neste contexto, vale ressaltar que esta pesquisa não buscou um tipo de argamassa para aplicação específica, que demandam maiores ou menores limites de módulo de elasticidade. Mas enfatiza-se que houve uma variação de comportamento das argamassas produzidas, ao longo do tempo, com os diferentes teores e tipos de resíduo, com e sem tratamento térmico, pozolânico e não pozolânico.

4.2.4 Análise microestrutural das argamassas

As propriedades mecânicas de um material que definem suas possíveis aplicações estão em geral vinculadas a diversas condições e características microestruturais (CALLISTER, 2000), sendo, portanto uma importante abordagem dos estudos de avaliações de novos materiais de construção.

Em matrizes cimentícias, o processo de hidratação do cimento e as fases sólidas geradas ao longo deste influenciam diretamente em propriedades como as que foram avaliadas nesta pesquisa, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

O aparecimento de alguns destes compostos pode ser visualizado através da microscopia eletrônica de varredura com a utilização de um sistema de identificação de elementos químicos por meio de EDS. De acordo com Magalhães (2007) as fases sólidas e cristais a serem identificados são principalmente:

- Etringita ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$): primeiro hidrato a se cristalizar, reduz a consistência da pasta e inicia a solidificação, tem morfologia primária em forma de agulhas e secundária como partículas curtas, grossas e de seção hexagonal.
- Monossulfato hidratado ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$): proveniente da reação da etringita com aluminatos, tem estrutura morfológica de placas hexagonais, longas mas pouco espessas.
- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H: $(\text{CaO})_{1,5}(\text{SiO}_2)(\text{H}_2\text{O})_{1,5}$ – não é um valor fixo): material amorfo, principal produto da hidratação, responsável pela rigidez da matriz e com estrutura variável.
- Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$): cristais formados pela dissolução do C_2S e C_3S , nas primeiras idades é uma placa fina hexagonal, e posteriormente com maior densificação da matriz perde o contorno hexagonal apresentando-se em depósitos aglomerados.
- Aluminato de cálcio hidratado ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$): decorrentes das reações de hidratação do C_3A e C_4AF (aluminato tricálcico e ferro aluminato tetracálcico), são cristais em forma acicular que podem estar presentes na matriz e sua composição varia conforme a concentração de aluminatos (COSTA *et al.*, 2009).

Identificou-se que as proporções em massa para uma pasta de cimento totalmente hidratada estão em geral da seguinte forma: C-S-H (~ 70%); CH (~ 20%); $\text{C}_6\text{A}_{323}\text{HS}$ e $\text{C}_4\text{A}_{12}\text{HS}$, (~ 7% juntos); resíduos de clínquer e outros constituintes menores (~ 3%) (DIAMOND *apud* MAGALHÃES, 2007).

No entanto, sabe-se que com a utilização de adições minerais, principalmente as pozolânicas, podem ser alteradas tanto a quantidade como a ordem de formação destas fases sólidas, devido às suas reações e consequente produção de silicato de cálcio hidratado adicional (DAL MOLIN, 2011).

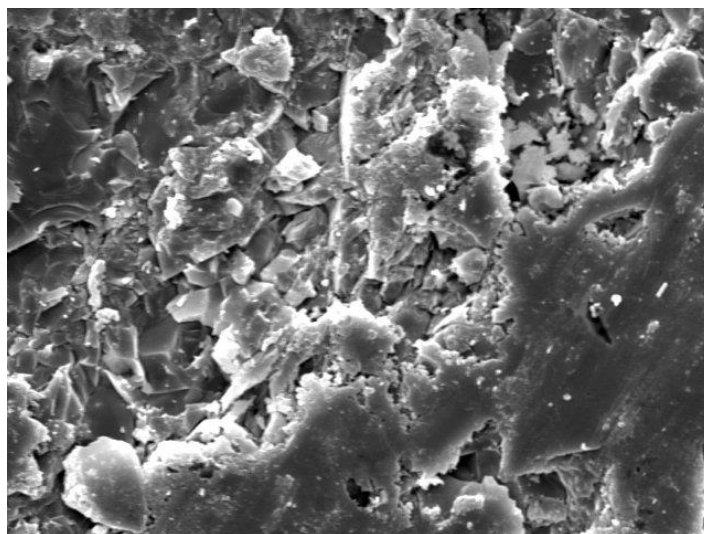
Para identificar estas questões e analisar a relação microestrutura-propriedades, foram obtidas micrografias das argamassas cujo comportamento mecânico indicou a necessidade de observação, aos 28 e 91 dias, sendo elas: a argamassa referência,

um caso de argamassa com substituição de cimento por resíduo sem tratamento térmico e as argamassas contendo resíduo após tratamento térmico com a maior e a menor resistência à compressão.

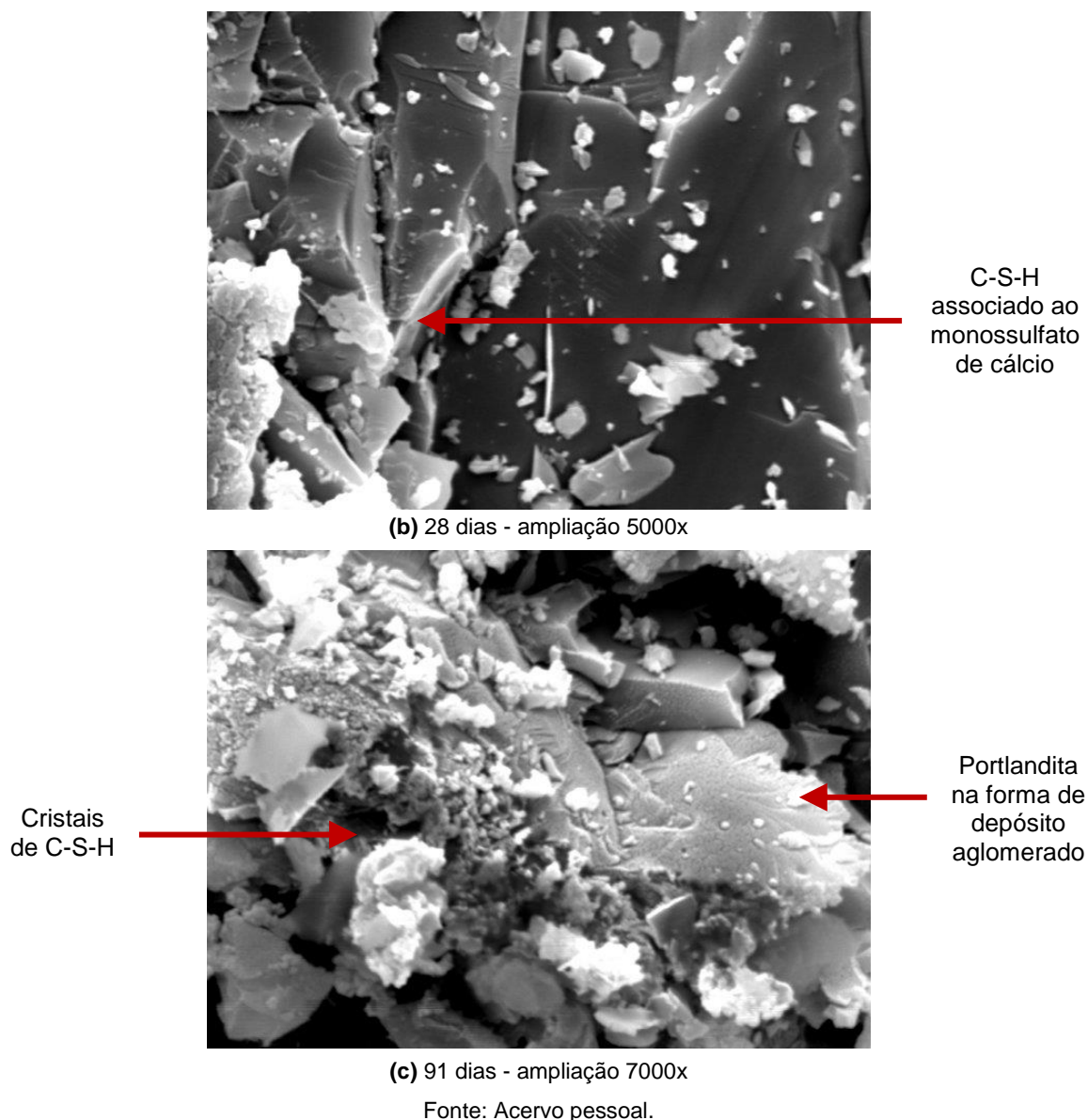
Além das imagens, a indicação das formações típicas apresentadas deu-se com as confirmações realizadas através do EDS, onde foi possível constatar os principais elementos químicos presentes no ponto ou região analisada diferenciando, assim os compostos presentes. Deve-se ressaltar que nos espectros gerados nesta pesquisa há sempre a indicação da presença de ouro (Au) que é proveniente do processo de metalização das amostras devendo, portanto ser desconsiderado, pois não faz parte do material.

Pode-se observar nas imagens obtidas pelo MEV da argamassa referência (AREF) na Figura 101 que esta argamassa caracteriza-se por uma matriz densa onde são observadas fraturas devido ao processo de obtenção das amostras para este ensaio, e mesmo aos 28 dias, já foi observada a possível formação de C-S-H associado a cristais de monossulfato hidratado, o que indica uma pasta de cimento Portland bem hidratada. Já na idade de 91 dias verifica-se a formação de cristais fibrosos que se tratam possivelmente de C-S-H preenchendo os espaços entre as partículas de cimento sendo que a argamassa apresenta uma estrutura densa, com uma matriz aparentemente densa e lisa.

Figura 101: Imagens obtidas por MEV da AREF (argamassa referência).



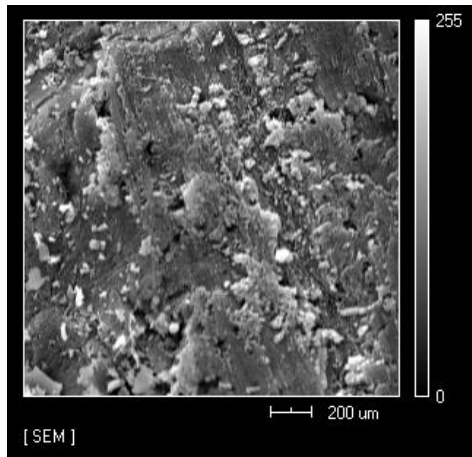
(a) 28 dias - ampliação 1500x



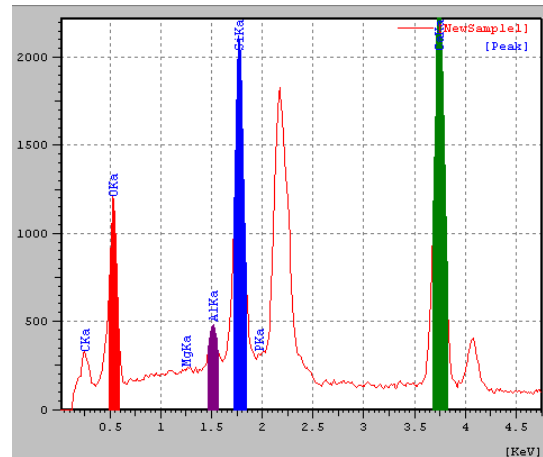
Para complementar a observação da amostra de referência, com o uso da técnica de análise do EDS, foi avaliada a intensidade de ocorrência dos principais elementos químicos presentes na matriz cimentícia (O, Ca, Si, Al) através da observação de uma região da superfície do material.

Pode-se verificar pela intensidade de coloração apresentada nas imagens da Figura 102, que os elementos estão presentes de maneira aproximadamente uniforme, com exceção do silício que possui regiões delimitadas de maior concentração, possivelmente devido à concentração de produtos de hidratação.

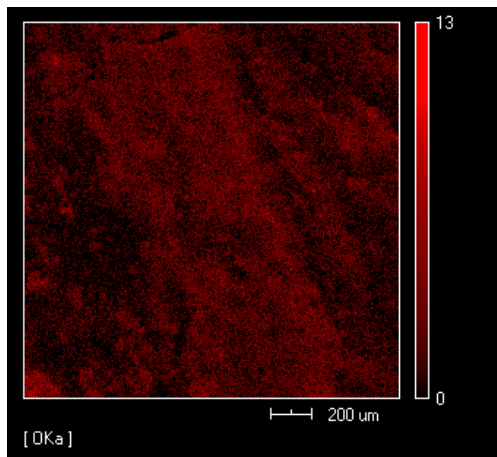
Figura 102: Apresentação da análise dos compostos pelo EDS na amostra a argamassa AREF.



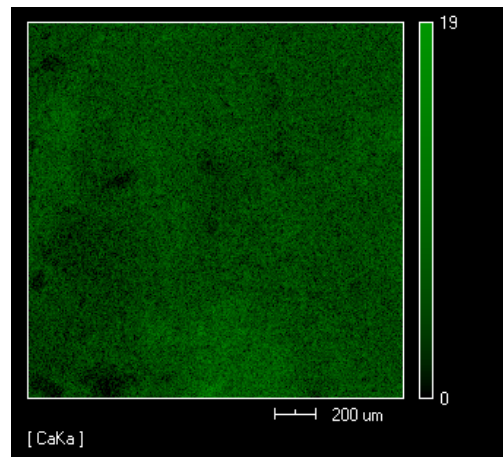
(a) Imagem do MEV que determina a região de análise.



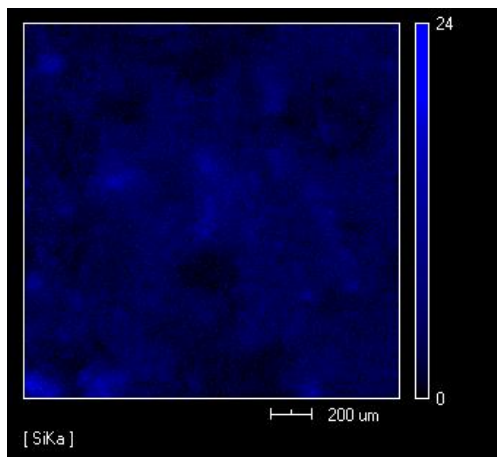
(b) Espectro de energia com a indicação dos elementos analisados na região.



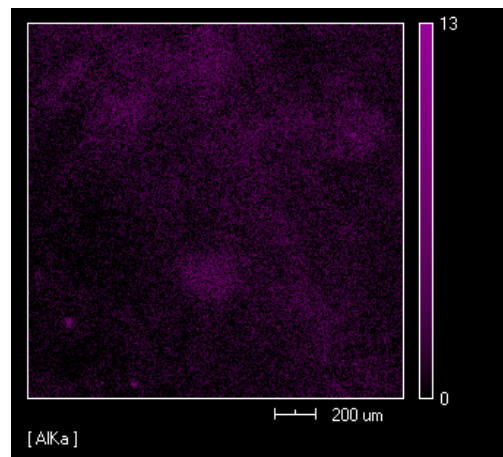
(c) Oxigênio (O) na região.



(d) Cálcio (Ca) na região.



(e) Silício (Si) na região.



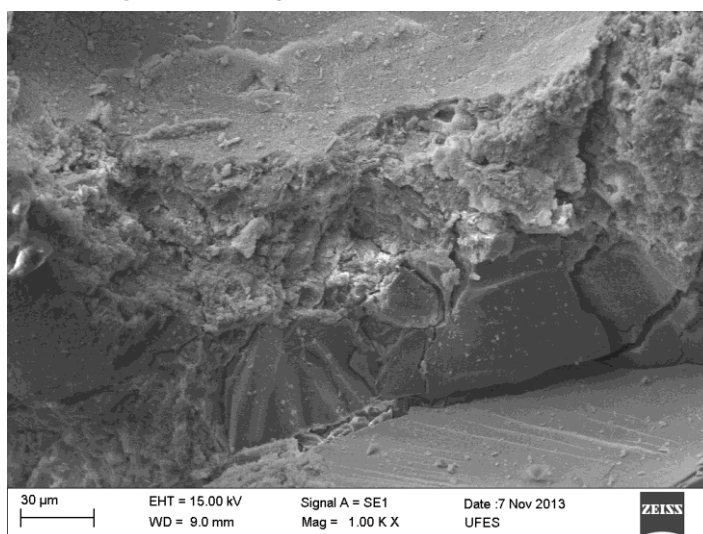
(f) Alumínio (Al) na região.

Fonte: Acervo pessoal.

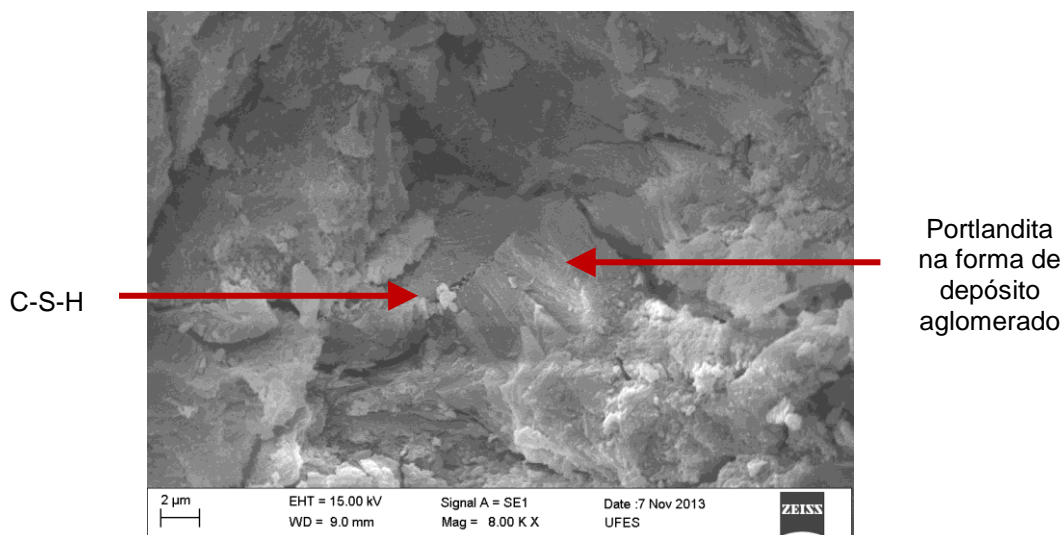
No grupo das argamassas com resíduo sem tratamento térmico, foram avaliadas duas das argamassas produzidas, ambas aos 91 dias. Aquelas de melhor e pior desempenho neste grupo: ALG 5 e AL D 15, respectivamente.

Estão demonstradas as imagens da ALG 5 da Figura 103 onde se pode observar a solidez e regularidade da argamassa, com formações características de matrizes bem hidratadas.

Figura 103: Imagens obtidas por MEV da ALG 5.



(a) 91 dias - ampliação 1000x

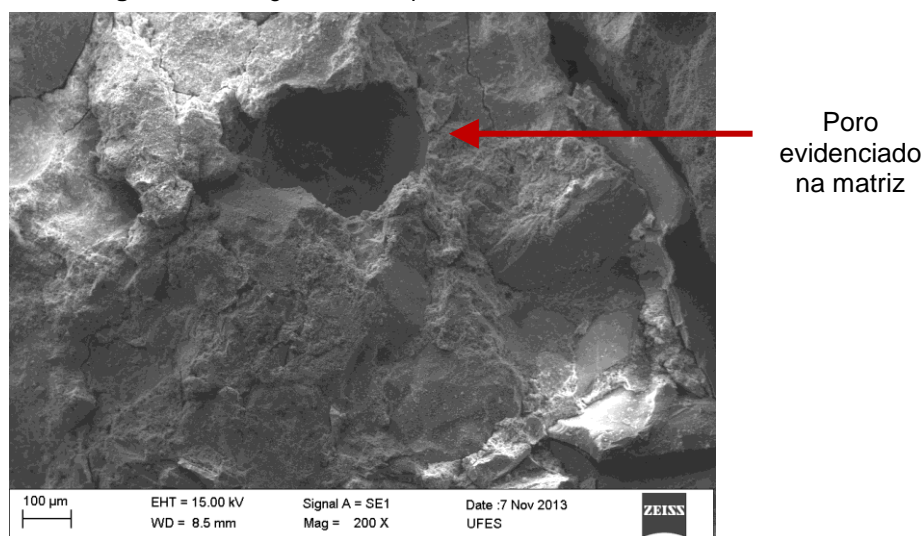


(b) 91 dias - ampliação 8000x

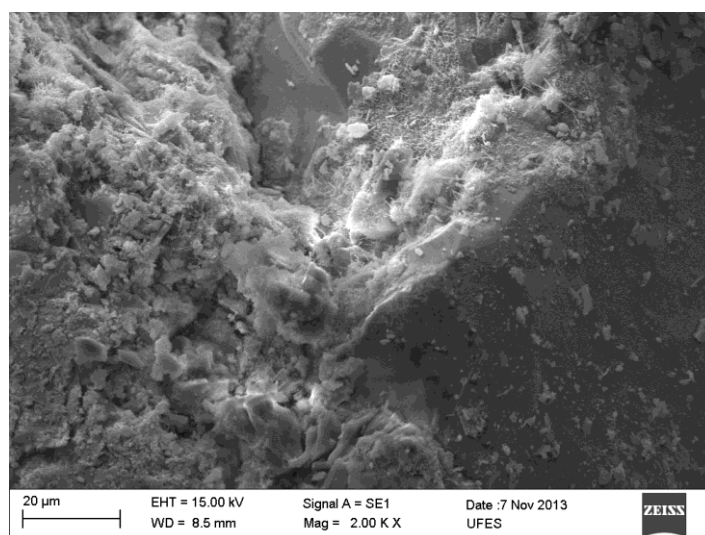
Fonte: Acervo pessoal.

As imagens da argamassa ALD 15, que possuiu o menor desempenho mecânico das argamassas avaliadas, demonstraram que esta se trata de uma matriz menos densa, podendo identificar a presença de alguns poros e formação cristalina possivelmente de aluminatos de cálcio hidratado aos 91 dias conforme observado na Figura 104.

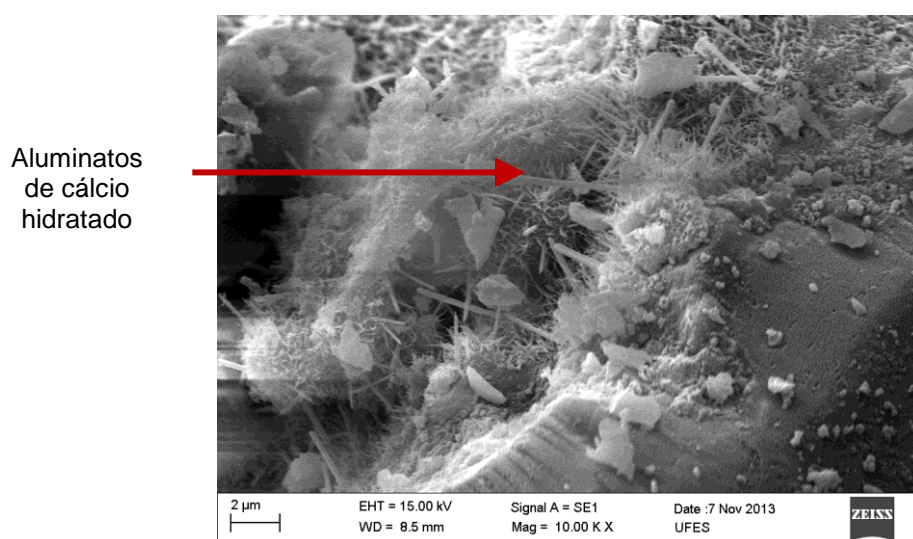
Figura 104: Imagens obtidas por MEV da ALD 15.



(a) 91 dias - ampliação 200x



(b) 91 dias - ampliação 2000x

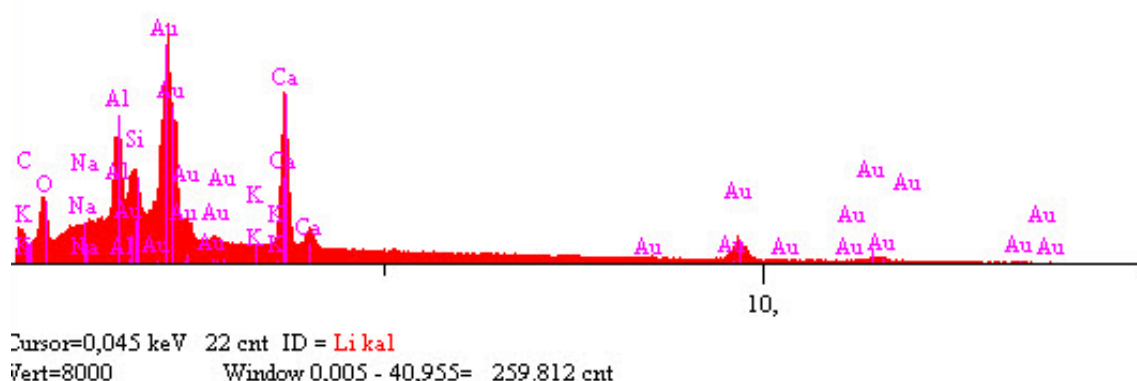


(c) 91 dias - ampliação 10000x

Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 104 (c) a composição química da partícula em formato de agulha foi analisada através do espectro apresentado na Figura 105. Pode-se observar uma alta concentração de cálcio, alumínio e oxigênio, indicando que, de fato, a partícula deve tratar-se de aluminato de cálcio hidratado tardio, disperso na matriz relacionado aos menores valores de resistência à compressão.

Figura 105: Espectro de energia da partícula de aluminato de cálcio hidratado na imagem (c) da Figura 104.

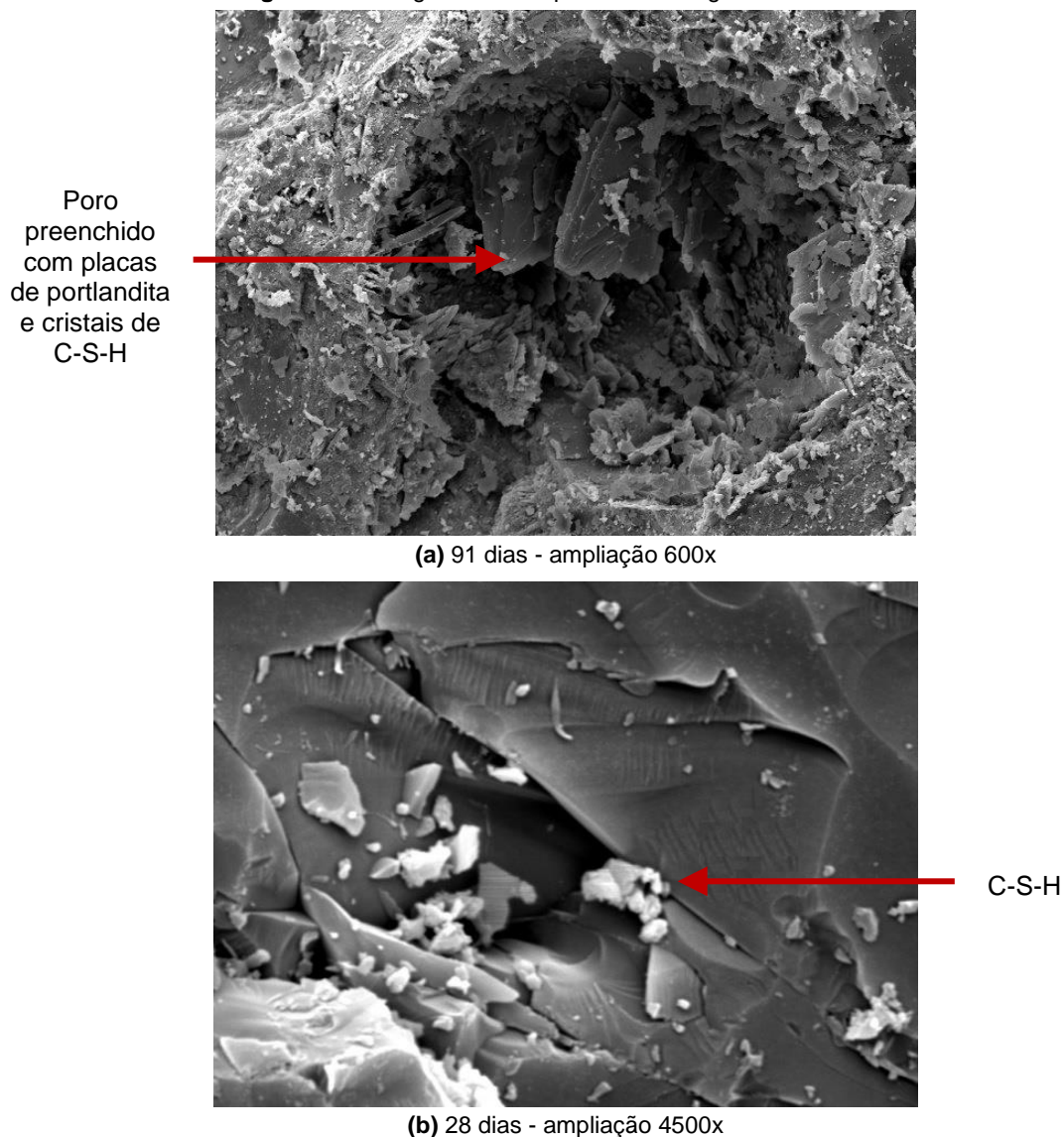


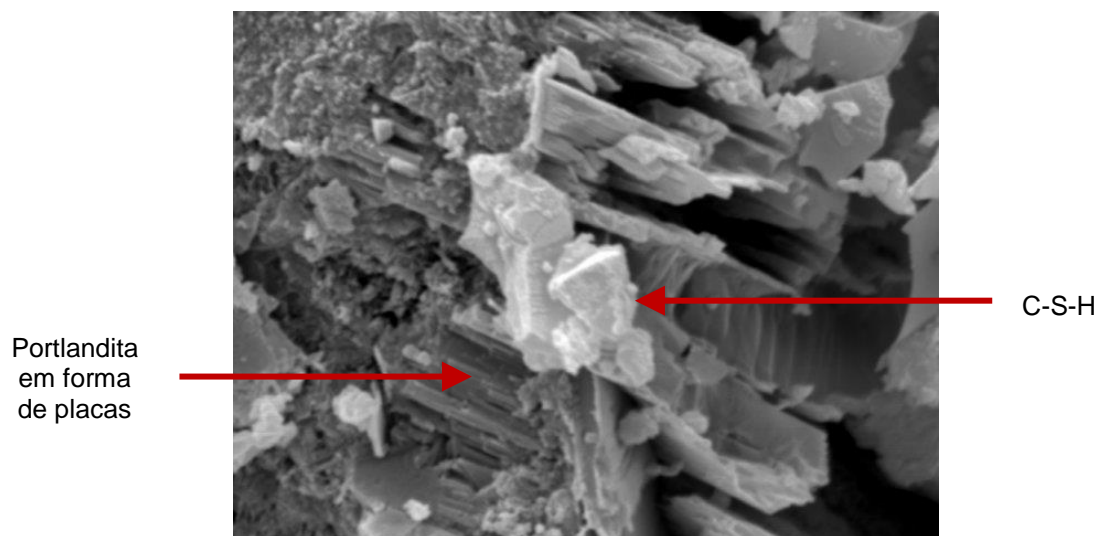
Fonte: Acervo pessoal.

Quanto às argamassas produzidas com o resíduo a partir de tratamento térmico também foram analisadas as de menor e maior desempenho do grupo: ALGf 5 e ALDf 20.

A argamassa com 5% de substituição de cimento por LBRO G após tratamento térmico obteve desempenho mecânico similar ao da argamassa de referência comprovado pela similar característica da matriz apresentada na Figura 106, dada a ampla solidez. Nota-se aos 28 e aos 91 dias a formação de pilhas de placas cristais, possivelmente portlandita e C-S-H respectivamente. Estes cristais preenchem os poros antes ocupados por água durante a hidratação do cimento, refinando a matriz e tornando a argamassa menos permeável, comportamento típico do efeito pozolânico. Esta formação também foi observada por Sobolev *et al.* (2007), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) e Nassar e Soroushian (2012) durante análises microestruturais em seus estudos.

Figura 106: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALGf 5.



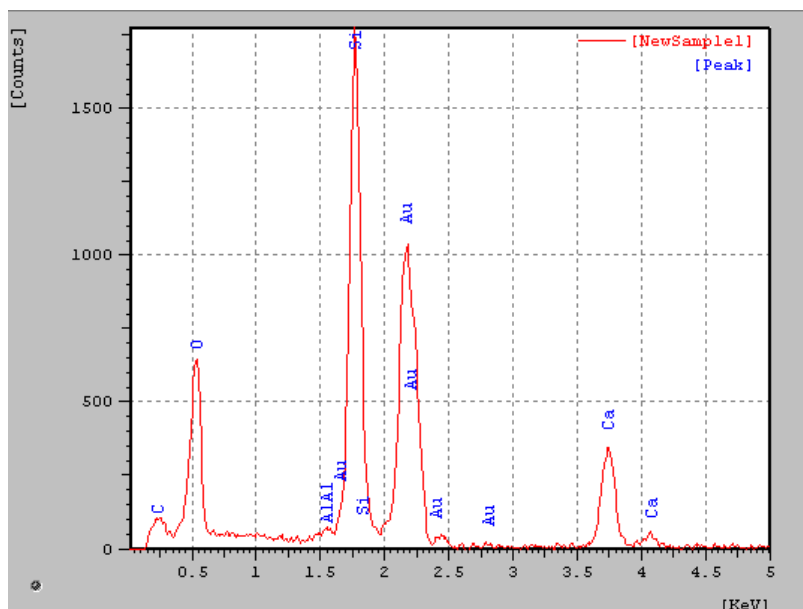


(c) 91 dias - ampliação 7000x

Fonte: Acervo pessoal.

A partícula apresentada como C-S-H na Figura 106 (b) foi um ponto de análise química via EDS apresentando o espectro de energia da Figura 107, o que confirma a presença de silício, cálcio e oxigênio, elementos presentes no C-S-H.

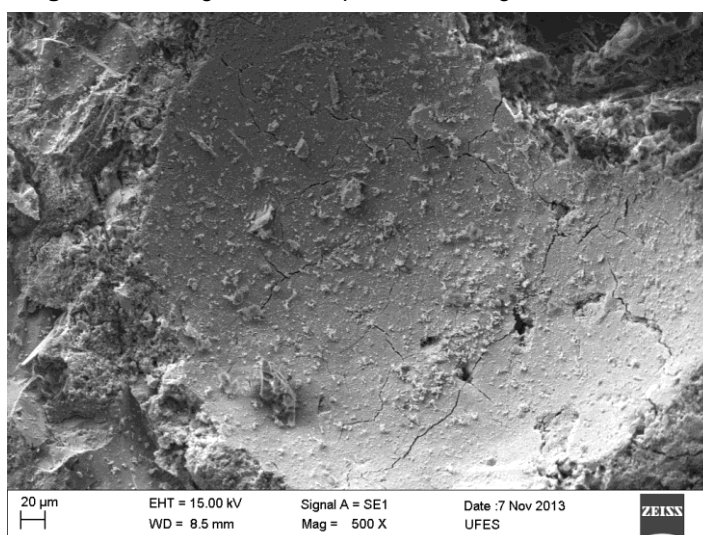
Figura 107: Espectro de energia da partícula de C-S-H na imagem (b) da Figura 106.



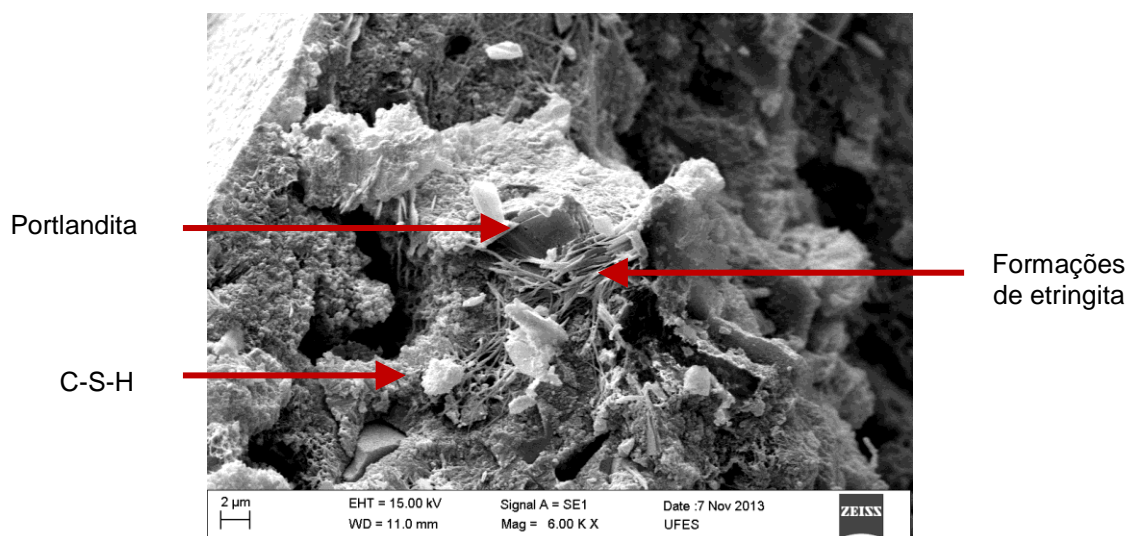
Fonte: Acervo pessoal.

As imagens da microestrutura da argamassa com menor desempenho deste grupo, 20% de substituição de cimento por resíduo LBRO D após tratamento térmico, estão apresentadas na Figura 108. Nas regiões de observação foi possível identificar mais poros, e há, nesta argamassa a presença de alguns cristais tardios possivelmente de aluminatos, sendo que esta região demonstra-se instável, o que pode ser fator relevante na redução da resistência. A concentração de aluminatos na matriz pode estar relacionada ao maior teor de Al_2O_3 nos resíduos quando comparado ao cimento, que possui 4,91 % enquanto que o LBRO Df possui 22,10 %.

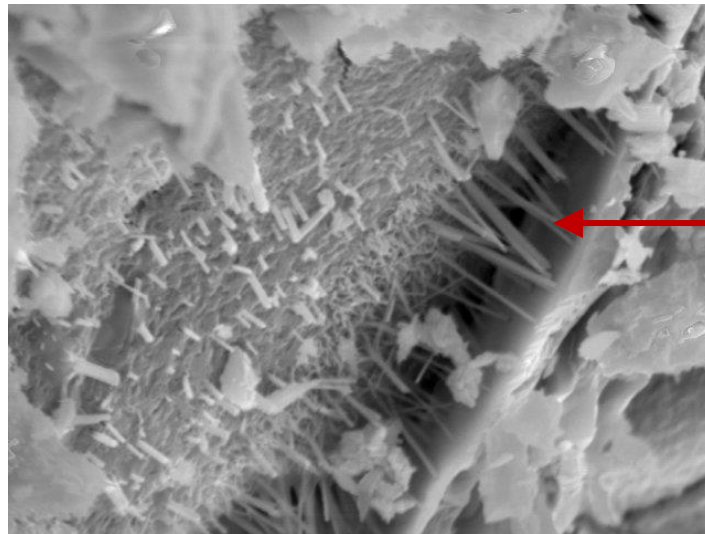
Figura 108: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALDf 20.



(a) 28 dias - ampliação 500x



(b) 28 dias - ampliação 6000x



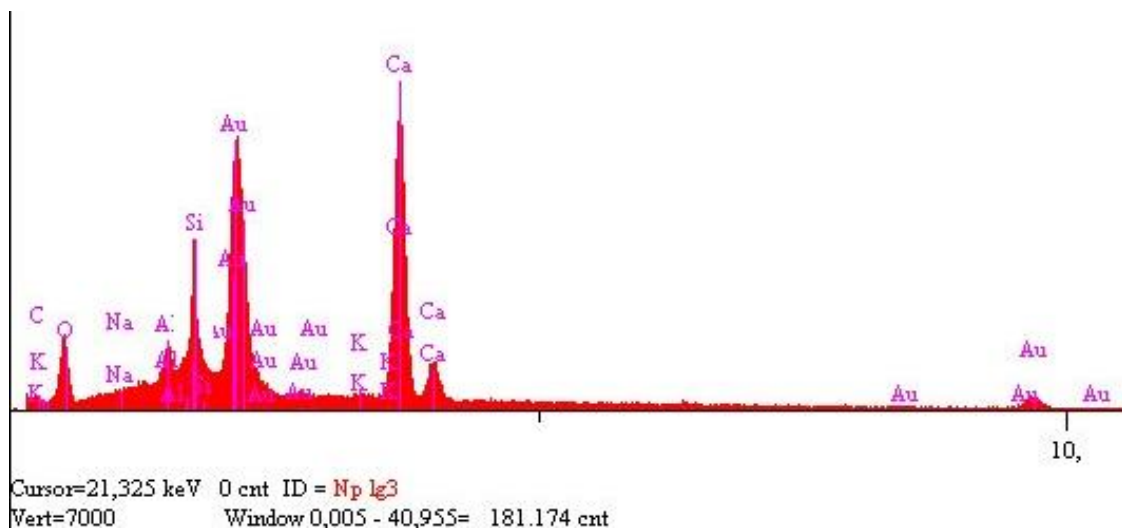
Cristais de aluminato de cálcio hidratado

(c) 91 dias - ampliação 8000x

Fonte: Acervo pessoal.

Na imagem (b) da Figura 108, foi realizada uma análise através do EDS no ponto indicado como portlandita, cujo espectro está apresentado na Figura 109, que confirmam a composição das partículas, com o alto teor de cálcio.

Figura 109: Espectro de energia da partícula de portlandita na imagem (b) da Figura 108.



Fonte: Acervo pessoal.

As micrografias realizadas nas argamassas podem ser visualizadas por completo no Apêndice B.

Capítulo 5

Conclusões e considerações finais

“O cientista não pretende alcançar um resultado imediato. Ele não espera que suas ideias avançadas sejam facilmente aceitas. Seus trabalhos são como sementes para o futuro. Seu dever é lançar as bases para aqueles que estão por vir e apontar um caminho.”

Nikola Tesla

5. Conclusões e considerações finais

O capítulo 4 contém a apresentação e discussão dos resultados obtidos por esta pesquisa, tanto na etapa I como na etapa II, com uma análise microestrutural, visando à visualização das características que podem ter influenciado nas propriedades que foram ainda analisadas estatisticamente para fundamentar estas considerações.

As discussões propostas objetivaram a comparação e avaliação do potencial de aplicação da LBRO em matrizes cimentícias em sua condição natural e como material vítreo (produzido após tratamento térmico), ampliando a utilização deste resíduo do setor de rochas ornamentais em materiais de construção.

Estão apresentadas então, neste capítulo as conclusões gerais e específicas desta pesquisa agrupadas conforme a análise abordada e ainda sugestões de trabalhos futuros dentro deste tema.

5.1 Conclusão geral

O objetivo estabelecido possibilitou a estruturação do planejamento experimental que por sua vez gerou resultados para substanciar as discussões e permitir a determinação destas conclusões.

A partir dos resultados encontrados nesta pesquisa, pode-se concluir que existe viabilidade técnica de aplicação do LBRO, com granalha e sem granalha, como substituto parcial do cimento, atuando como pozolana, quando utilizado após tratamento térmico e moagem.

5.2 Conclusões específicas

5.2.1 Conclusões relativas à Parte I

5.2.1.1 Quanto à caracterização da LBRO

A caracterização física inicial dos resíduos permitiu concluir que os resíduos são classificados como material pulverulento, com alta superfície específica significativamente maior que a do cimento, sendo que o resíduo proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais com granalha, LBRO G tem grãos menores que o LBRO D, sem granalha.

Ambos os resíduos são sílico-aluminosos com predominância de compostos cristalinos em sua formação, indicando estabilidade química, sendo principalmente o quartzo, SiO₂. Diferem quimicamente pela presença de óxidos de ferro provenientes de resquícios de granalha de aço no LBRO G e de óxidos presentes no LBRO D provenientes do polimento.

Quanto à atividade pozolânica, os resíduos LBRO G e LBRO D não alcançaram os requisitos físicos de IAP-cim e IAP-cal estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2012).

Com as micrografias foi possível observar que os grãos de ambos os resíduos são angulosos, com distribuição granulométrica variada, sendo que o LBRO G realmente possui grãos menores e alguns de aspecto diferenciado, que são resultantes da granalha utilizada no corte, comprovados pelos resultados do MEV e EDS.

A simulação computacional de aquecimento indicou que a temperatura de fusão de ambos os resíduos está entre 1000° C e 1200°C, que não foi comprovada pela análise termogravimétrica, que não obteve resultados para a temperatura de fusão na faixa térmica analisada. Porém, a simulação de viscosidade demonstrou através da composição química dos materiais que mesmo após fusão em altas temperaturas a massa formada tem altos valores de viscosidade, não sendo possível verter após o aquecimento.

5.2.1.2 Quanto aos tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos propostos objetivaram a geração de material vítreo fundamentada na fusão e resfriamento das amostras. Os materiais resultantes tinham aspecto poroso, porém de superfície lisa, com coloração diferenciada conforme o tipo de resíduo utilizado e o tratamento aplicado.

Quanto aos aspectos da produção do material, destaca-se a dificuldade de resfriamento brusco, visto que os resíduos quando aquecidos não adquirem viscosidade mínima para serem vertidos do recipiente de aquecimento, mesmo com o uso de tinta refratária e adição de CaO, limitando conseqüentemente as condições de produção.

As amostras produzidas após os diferentes tratamentos apresentaram uma tendência de desorganização da rede cristalina nos difratogramas de raios X com presença de halo amorfo. E, quanto à análise de atividade pozolânica através do método de Lúxan (LÚXAN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989) foi possível constatar que em geral, foram classificadas como não pozolânica com exceção das que foram produzidas a partir do resíduo LBRO D sob os tratamentos TTI e do TTIV.

Sendo assim, o tratamento térmico selecionado foi o TTI, definido por aquecimento em forno tipo mufla até 1200°C com resfriamento pela inércia do forno, visto que é um processo que não oferece riscos ao operador e que obteve material de aparência

vítrea com difratograma de raios X indicando desorganização da rede cristalina, sendo a amostra com pozolanicidade comprovada de menor temperatura de aquecimento.

5.2.2 Conclusões relativas à Parte II

5.2.2.1 Quanto à caracterização da LBRO após tratamento térmico selecionado

A caracterização física demonstrou que, os materiais vítreos produzidos com os resíduos após tratamento térmico e moagem alcançaram a finura com área superficial desejada, similar a do cimento, porém com massa específica inferior, sendo o LBRO Gf mais denso que o LBRO Df.

Dado o processo de moagem realizado, os grãos dos materiais produzidos são predominantemente angulosos com distribuição granulométrica uniforme, sendo que LBRO Gf possui grãos em uma faixa granulométrica ligeiramente menor, resultando em uma maior área superficial.

A composição química dos materiais é similar, com a soma dos teores dos óxidos SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 superior a 70 %. Sendo que, o LBRO Gf possui maior concentração de Fe_2O_3 que o LBRO Df e este apresenta percentual de Na_2O , possivelmente associados à vestígios de granalha de aço no primeiro e de resíduos de polimento no segundo.

Nos difratogramas de raios X foi possível observar que, apesar de não terem uma estrutura predominantemente amorfa, como os vidros em geral, foi possível identificar uma redução e alargamento nos picos, o que indica uma tendência de desorganização da rede cristalina, característica típica de materiais pozolânicos.

Quanto à atividade pozolânica em si tanto o LBRO Gf como o LBRO Df superaram o valor mínimo estabelecido para o índice de atividade pozolânica com o cimento conforme a NBR 12653 – Materiais Pozolânicos – Especificação (ABNT, 2012), obtendo os valores de 94,7% e 93,6% respectivamente, verificando assim a hipótese estabelecida nesta pesquisa de que é possível desenvolver material pozolânico a partir de tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais.

Considerando os requisitos físicos e químicos estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2012), ambos os resíduos após o tratamento térmico e moagem, LBRO Gf e LBRO Df, podem ser classificados como material pozolânico, pertencentes à Classe E.

5.2.2.2 Quanto às argamassas produzidas

Estado Fresco

Os dois grupos de argamassas produzidos, com os resíduos na condição natural (TT0) e após o tratamento térmico (TTI), apresentaram comportamentos similares durante o preparo das argamassas.

Verificou-se que o índice de consistência está dentro do intervalo inerente ao da variabilidade do tipo de ensaio, não sendo possível afirmar que os resultados são efetivamente diferentes.

Devido à baixa granulometria do material e à menor massa específica dos resíduos utilizados como substituição ao cimento, a massa específica das argamassas no estado fresco apresentou uma tendência de queda com o aumento do teor de cada um dos resíduos incorporados.

Estado Endurecido

No estado endurecido ambos os grupos de argamassas foram avaliados quanto às propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico, além de uma avaliação microestrutural das principais argamassas produzidas.

Apesar de nenhuma das argamassas atingir o valor de resistência à compressão da argamassa de referência todas obtiveram valores similares, com uma redução máxima de aproximadamente 25%, para o caso de adição sem tratamento térmico.

Quando utilizados sem tratamento térmico como substitutos do cimento nas argamassas, os resíduos LBRO G e LBRO D tiveram resultados de desempenho mecânico próximos à argamassa referência, porém provocaram uma redução significativa do desempenho aumentando-se o percentual de substituição, apresentando valores de resistência à compressão cerca de 20% inferiores e módulo de elasticidade 10% menores para os casos de 15% de substituição.

Porém, quando utilizados nas argamassas após o tratamento térmico, os resíduos LBRO Gf e LBRO Df demonstraram comportamento típico de materiais pozolânicos, com desempenho mecânico próximo ao da argamassa referência mesmo com percentual de substituição de 20%. Aos 91 dias a resistência à compressão da argamassa com LBRO Gf foi apenas 9% inferior à da argamassa referência e com LBRO Df 12% inferior, sendo que o módulo de elasticidade de ambas atingiu aproximadamente 95% do valor da argamassa referência.

A análise microestrutural validou os resultados do desempenho mecânico, visto que foi possível observar argamassas densas, sendo que para as argamassas com 15% de substituição com resíduo sem tratamento térmico, foi possível identificar a formação de poros e cristais tardios de hidratação. E, para as argamassas com resíduo tratado termicamente, foi possível notar a formação de C-S-H iniciando o preenchimento de poros na idade de 91 dias indicando a ocorrência das reações pozolânicas nas idades mais avançadas.

Considerando as argamassas com os melhores desempenhos quanto às propriedades analisadas, pode-se afirmar que os resíduos que passaram por tratamento térmico obtiveram os melhores resultados como substitutos do cimento, sendo que o LBRO Gf proporcionou argamassas com desempenho superior.

Desta forma, é possível admitir que, tratando-se de desempenho das argamassas, a melhor condição é com 5% de substituição por LBRO Gf, porém no que tange às possibilidades de redução no consumo de cimento e também de destinação e utilização deste volumoso subproduto do setor de rochas ornamentais, a LBRO, a substituição de 20% tanto por LBRO Gf como por LBRO Df configura-se como opção apropriada.

5.3 Sugestões para pesquisas futuras

O tema desta pesquisa sugere estudos futuros para fundamentar e possibilitar a efetiva aplicação dos materiais desenvolvidos a partir de LBRO nesta pesquisa como pozolanas em matrizes cimentícias.

Inicialmente no que se refere à obtenção do material:

- Análise da produção do material a partir do resíduo obtido de diferentes fontes de coleta para caracterização e comparação, dada à variação da composição química das rochas serradas;
- Estudo para adequação da composição química dos resíduos com a inserção de óxidos modificadores da rede vítrea, buscando obter material com viscosidade suficiente para verter e resfriar bruscamente;
- Estudo de técnicas de tratamento térmico para fusão do LBRO (outros tipos de fornos e programação de temperatura) visando obtenção de pozolana com o menor gasto energético possível;
- Estudo com a comparação de diferentes tempos e/ou tipos de moagem do material fundido para avaliar também a condição ideal de obtenção da pozolana mais eficaz com menor gasto energético.

Sugestões quanto ao estudo da aplicação do material obtido:

- Avaliação da substituição de cimento pela pozolana produzida em concretos, para verificação do comportamento resultante principalmente nas zonas de transição agregado-pasta;
- Avaliação das propriedades mecânicas em idades avançadas (180, 270 e 360 dias) para melhor análise da atividade pozolânica, supondo que nestas idades os resultados poderiam ser iguais ou superiores aos do material de referência;
- Análise de parâmetros relativos à durabilidade das argamassas produzidas com estes resíduos como a capilaridade, permeabilidade de cloretos, resistência a sulfatos e carbonatação;
- Investigação de possíveis expansões devido à ocorrência de reações álcali-sílica;
- Estudo do comportamento reológico de pastas preparadas com a utilização da pozolana produzida, substituindo o cimento em diferentes percentuais;
- Análise microestrutural detalhada com avaliação das características da matriz cimentícia com o uso do resíduo ao longo do período de hidratação.

Capítulo 6

Referências normativas e bibliográficas

“Não está na natureza das coisas que o homem realize um descobrimento súbito e inesperado; a ciência avança passo a passo e cada homem depende do trabalho de seus predecessores.”

Ernest Rutherford

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 5751** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

_____.**NBR 5752** – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____.**NBR 5739** – Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____.**NBR 7214** – Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

_____.**NBR 7215** – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____.**NBR 9202** – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325). Rio de Janeiro, 1985.

_____.**NBR 10004** – Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____.**NBR 10007** – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____.**NBR 11579** – Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 12127** – Gesso para construção – Determinações físicas do pó. Rio de Janeiro, 1991.

_____.**NBR 12653** – Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

_____.**NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____.**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.

_____.**NBR 14656** – Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 15630** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 15** – Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 18** – Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 23** – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 24** – Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 26** – Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27** – Agregados - Redução da amostra de campo para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 65** – Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 76** – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1996.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO. **ANUÁRIO ABIVIDRO 2008**. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br>>, acesso em 10 de janeiro de 2013.

ACCHAR, W.; VIEIRA, F. A.; HOTZA, D. Effect of marble and granite sludge in clay materials. **Materials Science Engineering**. v. 319, p. 306-309, 2006.

ALMEIDA, N; BRANCO, F.; BRITO, J.; SANTOS, J. R. High-performance concrete with recycled stone slurry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 210–220, 2007.

ALMEIDA, N; BRANCO, F.; SANTOS, J. R. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. *Building and Environment*, 2007.

AKBULUT, H.; GÜRER, C.; CETIN, S.; ELMACI, A. Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. **Constructions and Building Materials**. v. 36, p. 430-436, 2012.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil, 2000.

AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 2658-2663, 2010.

ALYAMAÇ, K. E.; INCE, R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1201–1210, 2009.

ALZBOON K. K.; MAHASNEH, K. N. Effect of Using Stone Cutting Waste on the Compression Strength and Slump Characteristics of Concrete. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**. v. 1:4, p. 168-173, 2009.

AMBARISH, K.; MANJUNATH, S, RENUKADEVI, M. V.; JAGADISH, K. S. Effect of granite fines on strength of hollow concrete blocks. **International Journal of Advanced Engineering Technology**. v. II, p. 475-479, 2011.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos**, 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ARRIVABENE, L. F. **Adição de Resíduo da Indústria de Granito em Escória de Aciaria BOF visando sua utilização na Produção de Cimento**. Tese (Doutorado em Metalurgia e Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Metalurgia, Universidade de São Paulo, 2012.

ARUNTAS, W. Y.; GÜRÜ, M.; DAYI, M.; TEKIN, I. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials and Design**. v. 31, p. 4039-4042, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balço das Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2012**. Informe 01/2013. São Paulo, 2013.

AULETE, Caldas. **Dicionário Caldas Aulete da Língua Portuguesa**. 2ª ed. de bolso, Rio de Janeiro, Lexikon, 2008.

BABISK, M. P. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, 2009.

BAHIA. Secretaria da indústria, comércio e mineração. **Guia setorial de rochas ornamentais**. 2012. Disponível em: <http://www.sicm.ba.gov.br>, acesso em 07 de janeiro de 2013.

BARATA, M. S., DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v.2, n.1, p.69-78, jan./mar., 2002.

BASTOS, R. S.; ULIANA, J. G.; CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; DEGEN, M. K. Revisão bibliográfica dos estudos sobre a aplicação da lama do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de materiais de construção. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, **Anais**. Gramado: IBRACON, 2013.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Vol. 1, Ed. LTC, 5ª ed., Minas Gerais, 2005.

BDOUR, A. N.; AL-JUHANI, M. S. Utilization of Waste Marble Powder in Cement Industry. **Int. J. of Environment and Waste Management**. v. 11, p. 399-409, 2013.

BINICI, H.; KAPLAN, H.; YILMAZ, S. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. **Scientific Research and Essay**, v. 2, p. 372-379, 2007.

BILODEAU, A.; MALHOTRA, V. A., High-Volume Fly Ash System: Concrete Solutions for Sustainable Development. **ACI: Materials Journal**. V 97, nº 1, p. 41-48. 2000.

BILGIN, N.; YEPREM, H. A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MARSBOGLU. M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**. v. 29, p. 449-457, 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico 33: Rochas Ornamentais e de Revestimento**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília, 2009.

CALLISTER, W. D. **Ciência engenharia de materiais: uma introdução**. Ed. LTC, 5ª ed., Rio de Janeiro, 2000.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas. Encontro Nacional de Edificações e Comunidades Sustentáveis. **Anais**. Canela. ANTAC. 1997.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo cimento. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Qualidade no processo construtivo, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...**Santa Catarina: ANTAC. 1998.

CALMON, J. L., MORATTI, M., MORAES S., CENCI D., Self-compacting concrete using marble and granite sawing wastes as filler. **World Sustainable Building Conference**, Tokyo, 2005.

CALMON, J. L.; SILVA, S. A. C. Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: Domingues, A. F.; Boson, P. H. G.; Alípaz, S. (Org.). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Brasília. Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração. Capítulo 5, p. 199-231, 2006.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v. 2, p. 1590-1627, 2007.

CALMON, J. L. **Pesquisa e sustentabilidade**: ensaio sobre a utilização de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais na construção civil. Textos. 2014.

CHIODI, C. F. **Consumo interno, perfil de utilização e estrutura de comercialização das rochas ornamentais e de revestimento no Brasil**. Publicação técnica. ABIROCHAS. Minas Gerais. 2004.

CIMENTOS HOLCIM. **Relatório semanal de ensaios de cimento**: CP V ARI Fácil. Fábrica CIMINAS. 2013.

COCHI, M.C. Análise da incorporação de lama manufaturada do mármore em cerâmica estrutural. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...**Paraná: CBECIMat: 2006.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. **RILEM proceedings pro**, v. 40, p. 580-589, 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*. v. 24, p. 113–117, 2010.

COSTA, C.; ALMEIDA DE CARVALHO, P.; BORDADO, J. C.; NUNES, A. Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Eletrônica de Varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**. V. 21, n.º 3/4, 2009.

DAL MOLIN, D.C.C., Adições minerais. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v. 1, p. 261-309, 2011.

DANTAS, A. P. A. **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

DE AZEREDO, S.R.; BOBROVNITCHII, G.S.; GUIMARÃES, R.S.; FILGUEIRA, M. Desenvolvimento de um novo compósito abrasivo de desbaste de rochas ornamentais. **Revista Matéria**. v. 13, n. 1, p. 203-208, 2008.

ELICHE-QUESADA, D.; CORPAS-IGLESIAS, F. A.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, F. J. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. **Construction and Building Materials**. v. 34, p. 275-284, 2012.

ESPÍRITO SANTO. Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Instrução Normativa Nº 019** de 17 de agosto de 2005. Dispõe sobre a definição dos procedimentos de licenciamento das atividades de beneficiamento de rochas ornamentais. Disponível em <<http://www.meioambiente.es.gov.br/default.asp?pagina=18190>>. Acesso em 18 mar. 2013.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000. 247 p.

GARCIA, J. R.; DE OLIVEIRA, I. R.; PANDOLFELLI, V. C. Processo de hidratação e os mecanismos de atuação dos aditivos aceleradores e retardadores de pega do cimento de aluminato de cálcio. **Cerâmica**. v. 53, p. 42-56, 2007.

GENCEL, O.; OZEL, C.; KOKSAL, F.; ERDOGMUS, E.; MARTÍNEZ-BARRERA, G.; BROSTOW, W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**. v. 21, p. 62-70, 2012.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175 p.

GOBBO, L. A.; MELLO, I. S. C. Reciclagem dos resíduos finos da serragem de mármore e granitos pela indústria de cimento. **Anais**. 1st International Congress of Dimension Stones. 6p, 2005.

GONÇALVES, J.P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GOTTARDI, E. V.; CALMON, J. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. O uso de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria como filler em misturas asfálticas. In: 42º Reunião Anual de Pavimentação, 2013, Gramado. **Anais**. Gramado: RAPv, 2013.

GROUP VITORIA STONE. **Visita técnica**: imagens do processo produtivo. Relatório. 2012.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Óptica e Física Moderna**. Vol. 4, Ed. LTC, 9ª ed. Minas Gerais, 2012.

HAMEED, M. S.; SEKAR, A. S. S. Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble aludge powder as fine aggregate. **ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 4, n. 4, p. 83-89, 2009.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1309-1312, 2010.

JAIN N. Effect of nonpozzolanic and pozzolanic mineral admixtures on the hydration behavior of ordinary Portland cement. **Construction and Building Materials**. v. 27, p. 39-44, 2012.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113p. Tese (Livre Docência)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

KARASBAHIN, M.; TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. **Construction and Building Materials**. v. 21, p. 616-620, 2007.

KHMIRI, A.; SAMET, B.; CHAABOUNI, M. A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 680-686, 2012.

LI, Y.; YU, H.; ZHENG, L.; WEN, J.; WU, C.; TAN, Y. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 1-7, 2013.

LIMA, R.C.O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

LING, T.; POON, C. A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar. **Journal of Cleaner Production**, v.29-30, p. 46-52, 2010.

LÚXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. v. 19, p. 63-68, 1989.

MAGALHÃES, A. G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. Tese (doutorado). Engenharia de Estruturas, UFMG. Belo Horizonte, 2007.

MAGNESITA. Programa computacional **Slag Viscosity Model**. Disponível em: <<http://etech.lwbref.com/Applications/Ladle/slagViscosityApp.aspx?Mode=Preview>>, 2010.

MANHÃES, J. P. V. T.; MOREIRA, J. M. S.; HOLANDA, J. N. F. Variação microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental. **Cerâmica**, 55, p. 371-378, 2009.

MARÇAL, R. L. S. B.. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia, 2011.

MÁRMOL, I.; BALLESTER, P.; CERRO, S.; MONRÓS, G.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**. v. 32, p. 617-622, 2010.

MATOS, A. M. **Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos**. Dissertação (mestrado). Especialização em materiais e processos de construção. Faculdade de engenharia, Universidade do Porto, 2010.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 205-215, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutural, propriedades e materiais**, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, p. 674, 2008.

MELLO, R.M., AGOSTINHO, L.F.D. Avaliação da utilização da lama proveniente do acabamento de mármore e granitos como matéria prima em cerâmica vermelha. In: Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, 1.; Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, 2., 2005, Guarapari. **Anais...Espírito Santo**, 2005.

MONTANHEIRO T.J.; YAMAMOTO J.K.; KIHARA Y. Proposta de pré-qualificação pozolânica de materiais geológicos: Difractometria de raios x como método alternativo. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, v. 24 (1/2), p. 1-9, 2003.

MORAES, I. V. M. Mármore e granito: lavra, beneficiamento e tratamento de resíduos. **Dossiê Técnico**. Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**. v. 49, p. 262-267, 2003.

MORENO, F.; RUBIO, C.; ECHEVARRIA, M. J. M. Reuse of sludge from the decorative quartz industry in hot bituminous mixes. **Constructions and Building Materials**. v. 25, p. 2465-2471, 2011.

MOURA, W. A.; CALMON, J. L.; LIMA, M. B. L.; MORATTI, M.; CORREIA, R. F.; SENNA, D. O.; BOAVENTURA, M. C. **Relatório final do projeto utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais (RSRO) na produção de peças pré-moldadas para habitação de interesse social**. Relatório Final de Projeto. UFES. UEFS. 2007.

NASSAR R.; SOROUSHIAN P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 368-377, 2012.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos**. Monografia (Especialização em construção civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

NITA, C. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PAIVA, O. A.; CORDEIRO, G. C.; ROCHA, F. S.; LIMA, S. P. B.; VASCONCELOS, R. P.; FILHO, R. D. T. Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa de cimento portland. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: IBRACON, 2010.

PARK, S. B.; LEE, B. C. Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1145-1152, 2004.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 197-203, 2012.

REIS, A. S. **Estudo do aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

REIS, R. C.; SOUSA, W. T. Métodos de lavra de rochas ornamentais. **Revista Escola de Minas**. Mineração. v. 56, p. 207-209, 2003.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projetos de Experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2011.

RODRIGUES, G. F. **Reciclagem de resíduos visando à produção de lã mineral**. Dissertação (mestrado). Engenharia de materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

RODRIGUES, G. F.; ALVES, J. O.; TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. Estudo de resíduos de rochas ornamentais para a produção de materiais vítreos. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 203-207, 2011.

RUBIO, C.; MORENO, F.; BELMONTE, A.; MENÉNDEZ A. Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 2465-2471, 2010.

SALOMÃO, M. C. F.; DIAS, J. F.; MARTINS, J. A. L. G.; SILVA, T. J. Estudo sobre a utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: IBRACON, 2010.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SAUER, A. S. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SEGADÃES, A. M.; CARVALHO, M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. **Applied Clay Science**. v. 30, p. 42-52, 2005.

SENAI. **Relatório de análise de materiais**: composição química por fluorescência de Raios X. Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis – CTGAS, Rio Grande do Norte. 2013.

SENAI. **Relatório técnico de distribuição granulométrica de materiais**. Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM, Santa Catarina, Criciúma. 2013.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H.; Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v.35, p. 987-993, 2005.

SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in production of cement and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, p. 234-247, 2007.

SILVA, J.B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A.M.; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, 51, p. 325-330, 2005.

SOBOLEV, K.; TÜRKER, P.; SOBOLEVA, S.; ISCIOGLU, G. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. **Waste Management**, v. 27, p. 971-976, 2007.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR). **Revista Engenharia Civil**, Universidade do Minho, Portugal, v. 15, p. 45-54, 2002.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades tecnológicas e microestrutura de piso cerâmico vitrificado. **Cerâmica**, 57, p. 212-218, 2011.

SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J. K. G.; NETO, P. N. S. **Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente**. Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

STATSOFT, INC. Programa computacional **Statistica 7.0**. E.A.U, 2004.

THERMO-CALC. Programa computacional. **ThermoCalc**. Suécia, 2013.

TOPÇU, I. B.; BILIR, T.; UYGUNOGLU, T. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 1947–1953, 2009.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 29, p. 23-30, 2008.

TRUSILEWICZ, L.; FERNÁNDEZ-MATÍNEZ, F.; RAHHAL, V.; TALERO, R. TEM and SAED Characterization of Metakaolin. Pozzolanic Activity. **Journal The American Ceramic Society**, v. 95, p. 2989-2996, 2012.

ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S.; CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; RODRIGUES, J. A. Estudo comparativo da caracterização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais com e sem granalha de aço. In: 55° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, **Anais**. Gramado: IBRACON, 2013.

WANG, H. The effect of the proportion of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 791-797, 2011.

Apêndices

*Resultados individuais dos ensaios em argamassas
no estado endurecido*

Micrografias das argamassas.

“Em primeiro lugar vem a dedicação, depois a habilidade.”

Leonardo Da Vinci

APÊNDICE A - Resultados individuais dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido

APÊNDICE A

A. Resultados individuais - argamassas no estado endurecido

A.1 Resistência à compressão axial

Tabela 33: Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial das argamassas AREF, ALGs, ALDs, ALGfs e ALDfs aos 28, 63 e 91 dias.

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias					
		Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	
AREF	01	50,0	96	11050	55,19	55,20	50,0	96	12150	60,68	60,26	50,1	97	12450	62,06	62,31	
	02	50,0	95	10950	54,69		50,1	95	10700	53,33*		50,2	98	12300	61,07		
	03	50,4	96	11300	55,66		50,1	96	12050	60,06		50,0	98	12800	63,93		
	04	50,0	96	11050	55,19		50,1	97	12000	59,69		50,1	98	12800	63,80		
	05	50,0	97	11200	55,94	CV: 0,97	50,0	96	12100	60,43	CV: 0,64	50,1	97	12150	60,44		CV: 2,27
	06	49,9	97	10900	54,55	σ: 0,54	50,0	96	12100	60,43	σ: 0,39	50,2	98	12600	62,55		σ: 1,42
ALG 5	01	49,7	98	9950	50,20	51,43	50,0	98	11350	56,69	55,83	50,1	97	11600	57,82	59,61	
	02	49,9	98	10150	50,90		50,0	98	11250	56,19		50,1	99	11650	58,07		
	03	50,0	99	10600	52,94		50,0	99	10250	51,19*		50,1	99	12100	60,31		
	04	50,1	98	10250	50,99		50,1	99	11350	56,46		50,0	98	12250	61,18		
	05	50,0	97	10100	50,44	CV: 2,46	50,1	99	10850	54,08	CV: 1,86	50,1	96	11750	58,57		CV: 2,80
	06	50,1	98	10650	53,09	σ: 1,26	50,1	97	11200	55,72	σ: 1,04	50,1	97	12400	61,68		σ: 1,67
ALG 15	01	50,00	98	9150	45,70	45,07	50,00	99	9450	47,20	48,53	50,00	99	9500	47,45	46,39	
	02	49,90	96	9100	45,63		50,00	98	9650	48,20		50,05	99	9450	47,10		
	03	50,10	97	9050	45,02		50,05	99	10100	50,34		50,00	99	9350	46,70		
	04	50,25	99	9100	45,00		50,00	98	9750	48,70		50,00	97	8900	44,45		
	05	50,25	98	8900	44,01	CV: 1,51	49,95	98	9800	49,04	CV: 2,29	50,00	99	9150	45,70		CV: 2,41
	06	50,10	98	8400	41,79*	σ: 0,68	50,00	99	9550	47,70	σ: 1,11	50,15	98	9450	46,92		σ: 1,12

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias					
		Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	
ALD 5	01	50,0	98	10250	51,19	50,80	50,0	98	11250	56,19	56,73	50,1	99	10850	54,08	56,48	
	02	50,0	97	10700	53,55		50,0	99	11100	55,44		50,0	98	11600	57,94		
	03	50,1	99	9800	48,85		50,1	99	11450	57,07		50,1	98	11700	58,32		
	04	50,1	98	10300	51,34	CV: 3,56 σ: 1,81	50,0	98	11700	58,55	CV: 1,88 σ: 1,07	50,0	98	11450	57,19		CV: 3,31 σ: 1,87
	05	50,0	98	10250	51,19		50,0	99	11400	56,94		50,0	98	10850	54,19		
	06	50,0	97	9750	48,70		50,1	97	11300	56,21		50,0	97	11450	57,19		
ALD 15	01	50,0	98	8200	40,95	42,29	50,0	97	9450	47,20	48,53	50,0	99	10000	49,94	50,17	
	02	50,0	98	8450	42,29		50,0	98	9650	48,20		50,1	98	10350	51,59		
	03	50,0	97	8650	43,20		50,1	97	10100	50,34		50,1	98	10050	50,09		
	04	50,1	98	8450	42,04	CV: 2,19 σ: 0,93	50,0	98	9750	48,70	CV: 2,29 σ: 1,11	50,1	98	9800	48,75		CV: 2,19 σ: 1,10
	05	50,1	99	8400	41,79		50,0	98	9800	49,04		50,2	98	9950	49,40		
	06	50,0	98	8700	43,45		50,0	99	9550	47,70		50,1	99	10300	51,34		
ALGf 5	01	50,3	98	10800	53,41	53,89	50,1	99	11000	54,83	57,46	49,8	97	11850	59,78	59,34	
	02	50,1	97	10750	53,48		50,1	99	11050	55,08		50,1	98	11900	59,20		
	03	50,0	98	11250	56,19		50,0	99	11700	58,44		49,9	99	10450	52,40*		
	04	50,0	98	10800	53,94	CV: 2,92 σ: 1,57	50,0	99	11750	58,69	CV: 3,55 σ: 2,04	49,9	99	12000	60,17		CV: 1,44 σ: 0,86
	05	50,1	97	10350	51,49		50,1	98	12000	59,81		50,0	98	12550	62,81*		
	06	50,1	98	11000	54,83		50,0	99	11600	57,94		50,1	99	11700	58,20		
ALGf 10	01	50,0	97	10350	51,69	50,78	50,0	98	11400	56,94	56,26	50,1	98	11900	59,20	59,21	
	02	50,0	98	10100	50,44		50,0	98	11450	57,19		50,1	98	11750	58,57		
	03	50,0	97	10050	50,19		50,0	98	11300	56,44		50,0	97	11950	59,80		
	04	50,1	97	10200	50,74	CV: 1,09 σ: 0,55	50,0	97	11450	57,19	CV: 2,34 σ: 1,32	50,0	98	11950	59,80		CV: 0,89 σ: 0,53
	05	50,2	97	10300	51,14		50,1	99	10800	53,73		50,0	98	11750	58,69		
	06	50,0	96	10100	50,44		50,2	99	11300	56,10		50,0	98	11850	59,18		

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias				
		Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)
ALGf 15	01	50,0	97	10500	52,44	51,09 CV: 2,52 σ : 1,29	50,1	98	11050	55,08	55,94 CV: 1,41 σ : 0,79	50,1	98	11100	55,33	57,34 CV: 3,06 σ : 1,76
	02	50,0	96	10350	51,69		50,2	98	11200	55,60		50,1	99	12100	60,31	
	03	50,0	97	9750	48,70		50,1	98	11100	55,33		50,1	98	11350	56,46	
	04	50,0	96	10200	51,05		50,0	98	11350	56,69		50,1	98	11700	58,32	
	05	50,0	97	10200	50,94		50,1	98	11200	55,83		50,1	98	11350	56,46	
	06	50,0	97	10350	51,69		50,2	98	11500	57,09		50,0	97	11450	57,19	
ALGf 20	01	50,0	97	9250	46,20	46,93 CV: 1,50 σ : 0,71	50,0	99	10250	51,30	53,27 CV: 3,96 σ : 2,11	50,1	97	11400	56,82	55,33 CV: 2,42 σ : 1,34
	02	50,0	97	9250	46,20		50,1	98	11150	55,58		50,1	97	10750	53,48	
	03	50,1	98	9500	47,35		50,2	99	11000	54,61		50,1	97	11150	55,58	
	04	50,0	98	9400	46,95		50,1	99	10300	51,24		50,0	97	10900	54,44	
	05	50,1	98	9400	46,85		50,1	98	11100	55,33		50,1	98	11000	54,83	
	06	50,0	97	9600	48,04		50,1	98	10350	51,59		50,1	98	11400	56,82	
ALDf 5	01	50,0	98	10150	50,69	51,47 CV: 1,89 σ : 0,97	50,1	98	11400	56,82	55,97 CV: 2,87 σ : 1,60	50,1	99	11350	56,57	58,21 CV: 3,15 σ : 1,83
	02	50,0	99	10500	52,44		50,1	99	11000	54,83		50,0	99	11450	57,19	
	03	50,0	99	10150	50,69		50,0	98	11750	58,69		50,1	98	12350	61,56	
	04	50,1	99	10250	50,99		50,0	99	10850	54,19		50,1	99	11450	57,07	
	05	50,0	98	10600	52,94		50,0	99	11100	55,44		50,0	99	11800	58,93	
	06	50,2	98	10300	51,03		50,1	99	11200	55,83		50,1	99	11650	57,95	
ALDf 10	01	50,1	99	10200	50,84	50,53 CV: 3,25 σ : 1,64	50,0	99	11100	55,44	54,39 CV: 3,16 σ : 1,72	50,1	98	11750	58,57	56,72 CV: 4,04 σ : 2,29
	02	50,3	99	9950	49,20		50,0	99	10600	52,94		50,0	99	11100	55,44	
	03	50,1	99	9650	48,00		50,1	99	10700	53,23		50,0	99	10850	54,19	
	04	50,2	98	10600	52,52		50,0	99	11150	55,69		50,1	98	12050	60,06	
	05	50,0	98	10250	51,19		50,1	98	11350	56,57		50,2	98	11050	54,86	
	06	50,0	98	10300	51,44		50,0	99	10500	52,44		50,0	98	11450	57,19	

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias				
		Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)	Øm (mm)	h (mm)	Carga (Kgf)	Tensão (MPa)	fc (MPa)
ALDf 15	01	50,0	97	9450	47,20	47,37 CV: 2,13 σ : 1,01	50,0	98	11050	55,19	55,00 CV: 3,45 σ : 1,90	50,0	99	10800	53,94	54,84 CV: 2,18 σ : 1,20
	02	49,9	98	9750	48,89		50,1	98	11200	55,83		50,1	99	10650	52,98	
	03	50,0	99	9250	46,20		50,1	97	10650	52,98		50,1	99	11200	55,83	
	04	50,1	99	9300	46,36		50,1	98	10700	53,33		50,2	99	11200	55,60	
	05	50,0	98	9550	47,70		50,1	97	10950	54,47		50,1	99	11000	54,72	
	06	50,1	99	9600	47,85		50,0	98	11650	58,19		50,2	99	11300	55,99	
ALDf 20	01	50,0	97	9450	47,20	46,56 CV: 0,68 σ : 0,32	50,0	99	10100	50,44	53,21 CV: 4,12 σ : 2,19	50,1	98	10350	51,49	53,55 CV: 3,36 σ : 1,80
	02	50,1	97	9300	46,36		50,0	98	10350	51,80		50,1	98	10650	52,98	
	03	50,0	98	9300	46,45		50,1	98	11150	55,58		50,1	99	10800	53,83	
	04	50,0	98	9300	46,45		50,1	99	10350	51,59		50,1	97	11250	55,96	
	05	50,0	97	9300	46,45		50,0	99	10950	54,69		50,1	99	11100	55,22	
	06	50,0	99	9300	46,45		50,0	98	11050	55,19		50,1	99	10400	51,84	

Obs.: CV é o coeficiente de variação, dado em percentual (%) e σ é o desvio padrão amostral.

Fonte: Acervo pessoal.

A.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Tabela 34: Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas AREF, ALGs, ALDs, ALGfs e ALDfs aos 28, 63 e 91 dias.

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias				
		Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)
AREF	01	50,0	96	4,486	41,17	41,64 CV: 1,82 σ: 0,76	50,0	96	4,571	42,75	43,44 CV: 1,85 σ: 0,80	50,1	97	4,755	46,26	45,04 CV: 1,55 σ: 0,70
	02	50,0	95	4,460	40,70		50,1	95	4,657	44,37		50,2	98	4,689	44,98	
	03	50,4	96	4,571	42,75		50,1	96	4,571	42,75		50,0	98	4,689	44,98	
	04	50,0	96	4,486	41,17		50,1	97	4,619	43,65		50,1	98	4,689	44,98	
	05	50,0	97	4,533	42,04		50,0	96	4,657	44,37		50,1	97	4,641	44,07	
	06	49,9	97	4,533	42,04		50,0	96	4,571	42,75		50,2	98	4,689	44,98	
ALG 5	01	49,7	98	4,475	40,60	41,06 CV: 2,30 σ: 0,95	50,0	98	4,579	42,51	42,10 CV: 1,83 σ: 0,77	50,1	97	4,533	41,66	42,96 CV: 1,68 σ: 0,72
	02	49,9	98	4,475	40,60		50,0	98	4,579	42,51		50,1	99	4,626	43,38	
	03	50,0	99	4,521	41,44		50,0	99	4,521	41,44		50,1	99	4,626	43,38	
	04	50,1	98	4,521	41,44		50,1	99	4,521	41,44		50,0	98	4,601	42,92	
	05	50,0	97	4,429	39,77		50,1	99	4,521	41,44		50,1	96	4,593	42,77	
	06	50,1	98	4,579	42,51		50,1	97	4,619	43,25		50,1	97	4,641	43,67	
ALG 15	01	50,00	98	4,375	38,66	38,69 CV: 1,31 σ: 0,51	50,00	99	4,400	39,11	39,84 CV: 2,11 σ: 0,84	50,00	99	4,420	39,46	39,49 CV: 0,17 σ: 0,07
	02	49,90	96	4,384	38,82		50,00	98	4,455	40,09		50,05	99	4,420	39,46	
	03	50,10	97	4,330	37,87		50,05	99	4,521	41,29		50,00	99	4,420	39,46	
	04	50,25	99	4,420	39,46		50,00	98	4,455	40,09		50,00	97	4,429	39,62	
	05	50,25	98	4,375	38,66		49,95	98	4,414	39,36		50,00	99	4,420	39,46	
	06	50,10	98	4,375	38,66		50,00	99	4,400	39,11		50,15	98	4,420	39,46	

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias					
		Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	
ALD 5	01	50,0	98	4,579	42,24	41,64	50,0	98	4,579	42,24	41,95	50,1	99	4,521	41,17	41,82	
	02	50,0	97	4,533	41,39		50,0	99	4,521	41,17		50,0	98	4,558	41,85		
	03	50,1	99	4,533	41,39		50,1	99	4,648	43,52		50,1	98	4,579	42,24		
	04	50,1	98	4,521	41,17	50,0	98	4,579	42,24	50,0	98	4,579	42,24				
	05	50,0	98	4,579	42,24	CV: 1,13 σ: 0,47	50,0	99	4,521	41,17	CV: 2,17 σ: 0,91	50,0	98	4,475	40,34		CV: 2,30 σ: 0,96
	06	50,0	97	4,533	41,39		50,1	97	4,533	41,39		50,0	97	4,626	43,11		
ALD 15	01	50,0	98	4,475	40,12	39,82	50,0	97	4,429	39,30	39,09	50,0	99	4,521	40,95	40,15	
	02	50,0	98	4,475	40,12		50,0	98	4,375	38,35		50,1	98	4,475	40,12		
	03	50,0	97	4,429	39,30		50,1	97	4,429	39,30		50,1	98	4,475	40,12		
	04	50,1	98	4,475	40,12	CV: 1,17 σ: 0,47	50,0	98	4,475	40,12	CV: 1,72 σ: 0,67	50,1	98	4,475	40,12		CV: 1,17 σ: 0,47
	05	50,1	99	4,420	39,14		50,0	98	4,375	38,35		50,2	98	4,475	40,12		
	06	50,0	98	4,475	40,12	50,0	99	4,420	39,14	50,1	99	4,439	39,48				
ALGf 5	01	50,3	98	4,475	40,57	40,99	50,1	99	4,541	41,78	41,83	49,8	97	4,641	43,64	44,85	
	02	50,1	97	4,554	42,02		50,1	99	4,541	41,78		50,1	98	4,689	44,54		
	03	50,0	98	4,579	42,48		50,0	99	4,541	41,78		49,9	99	4,737	45,46		
	04	50,0	98	4,475	40,57	CV: 2,52 σ: 1,03	50,0	99	4,541	41,78	CV: 0,83 σ: 0,35	49,9	99	4,737	45,46		CV: 1,66 σ: 0,75
	05	50,1	97	4,429	39,74		50,1	98	4,579	42,48		50,0	98	4,689	44,54		
	06	50,1	98	4,475	40,57	50,0	99	4,521	41,41	50,1	99	4,737	45,46				
ALGf 10	01	50,0	97	4,533	41,42	41,17	50,0	98	4,495	40,73	40,75	50,1	98	4,689	44,32	44,60	
	02	50,0	98	4,475	40,37		50,0	98	4,475	40,37		50,1	98	4,689	44,32		
	03	50,0	97	4,533	41,42		50,0	98	4,495	40,73		50,0	97	4,755	45,58		
	04	50,1	97	4,554	41,80	CV: 1,37 σ: 0,57	50,0	97	4,450	39,92	CV: 1,44 σ: 0,59	50,0	98	4,689	44,32		CV: 1,14 σ: 0,51
	05	50,2	97	4,533	41,42		50,1	99	4,541	41,57		50,0	98	4,689	44,32		
	06	50,0	96	4,486	40,56	50,2	99	4,521	41,20	50,0	98	4,712	44,76				

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias					
		Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	
ALGf 15	01	50,0	97	4,533	41,47	41,25	50,1	98	4,455	40,06	41,37	50,1	98	4,601	42,72	43,03	
	02	50,0	96	4,486	40,62		50,2	98	4,579	42,32		50,1	99	4,626	43,19		
	03	50,0	97	4,554	41,86		50,1	98	4,475	40,42		50,1	98	4,648	43,60		
	04	50,0	96	4,486	40,62		50,0	98	4,601	42,72		50,1	98	4,648	43,60		
	05	50,0	97	4,533	41,47	CV: 1,25 σ: 0,51	50,1	98	4,475	40,42	CV: 2,89 σ: 1,20	50,1	98	4,626	43,19		CV: 1,53 σ: 0,66
	06	50,0	97	4,533	41,47		50,2	98	4,579	42,32		50,0	97	4,554	41,86		
ALGf 20	01	50,0	97	4,533	41,64	40,48	50,0	99	4,521	41,42	40,75	50,1	97	4,533	41,64	41,79	
	02	50,0	97	4,429	39,75		50,1	98	4,455	40,22		50,1	97	4,554	42,02		
	03	50,1	98	4,475	40,58		50,2	99	4,500	41,03		50,1	97	4,554	42,02		
	04	50,0	98	4,475	40,58		50,1	99	4,521	41,42		50,0	97	4,533	41,64		
	05	50,1	98	4,475	40,58	CV: 1,73 σ: 0,70	50,1	98	4,455	40,22	CV: 1,48 σ: 0,60	50,1	98	4,495	40,94		CV: 1,25 σ: 0,52
	06	50,0	97	4,429	39,75		50,1	98	4,455	40,22		50,1	98	4,579	42,49		
ALDf 5	01	50,0	98	4,475	40,34	41,39	50,1	98	4,721	44,89	43,38	50,1	99	4,579	42,23	43,58	
	02	50,0	99	4,521	41,17		50,1	99	4,626	43,11		50,0	99	4,626	43,11		
	03	50,0	99	4,521	41,17		50,0	98	4,689	44,29		50,1	98	4,689	44,29		
	04	50,1	99	4,500	40,79		50,0	99	4,601	42,64		50,1	99	4,626	43,11		
	05	50,0	98	4,601	42,64	CV: 2,12 σ: 0,88	50,0	99	4,626	43,11	CV: 2,33 σ: 1,01	50,0	99	4,626	43,11		CV: 2,76 σ: 1,20
	06	50,2	98	4,579	42,23		50,1	99	4,579	42,23		50,1	99	4,760	45,64		
ALDf 10	01	50,1	99	4,420	39,43	40,11	50,0	99	4,626	43,19	43,12	50,1	98	4,689	44,38	44,33	
	02	50,3	99	4,521	41,26		50,0	99	4,626	43,19		50,0	99	4,737	45,29		
	03	50,1	99	4,420	39,43		50,1	99	4,626	43,19		50,0	99	4,626	43,19		
	04	50,2	98	4,455	40,06		50,0	99	4,626	43,19		50,1	98	4,689	44,38		
	05	50,0	98	4,475	40,42	CV: 1,70 σ: 0,68	50,1	98	4,579	42,32	CV: 0,98 σ: 0,42	50,2	98	4,689	44,38		CV: 1,50 σ: 0,67
	06	50,0	98	4,455	40,06		50,0	99	4,648	43,61		50,0	98	4,689	44,38		

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Arg.	CP	28 dias					63 dias					91 dias					
		Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	Øm (mm)	h (mm)	Vp (km/s)	Módulo (GPa)	Ec (GPa)	
ALDf 15	01	50,0	97	4,533	41,42	41,54	50,0	98	4,689	44,32	42,67	50,0	99	4,626	43,14	43,91	
	02	49,9	98	4,579	42,26		50,1	98	4,579	42,26		50,1	99	4,626	43,14		
	03	50,0	99	4,521	41,20		50,1	97	4,641	43,42		50,1	99	4,626	43,14		
	04	50,1	99	4,562	41,95		50,1	98	4,533	41,42		50,2	99	4,626	43,14		
	05	50,0	98	4,521	41,20	CV: 1,11 σ: 0,46	50,1	97	4,641	43,42	CV: 2,91 σ: 1,24	50,1	99	4,737	45,23		CV: 2,74 σ: 1,20
	06	50,1	99	4,521	41,20		50,0	98	4,521	41,20		50,2	99	4,760	45,67		
ALDf 20	01	50,0	97	4,533	41,17	41,35	50,0	99	4,641	43,16	43,07	50,1	98	4,579	42,01	42,64	
	02	50,1	97	4,533	41,17		50,0	98	4,626	42,88		50,1	98	4,579	42,01		
	03	50,0	98	4,558	41,63		50,1	98	4,641	43,16		50,1	99	4,626	42,88		
	04	50,0	98	4,579	42,01		50,1	99	4,641	43,16		50,1	97	4,641	43,16		
	05	50,0	97	4,533	41,17	CV: 0,95 σ: 0,39	50,0	99	4,641	43,16	CV: 0,33 σ: 0,14	50,1	99	4,626	42,88		CV: 1,16 σ: 0,50
	06	50,0	99	4,521	40,96		50,0	98	4,626	42,88		50,1	99	4,626	42,88		

Obs.: CV é o coeficiente de variação, dado em percentual (%) e σ é o desvio padrão amostral.

Fonte: Acervo pessoal.

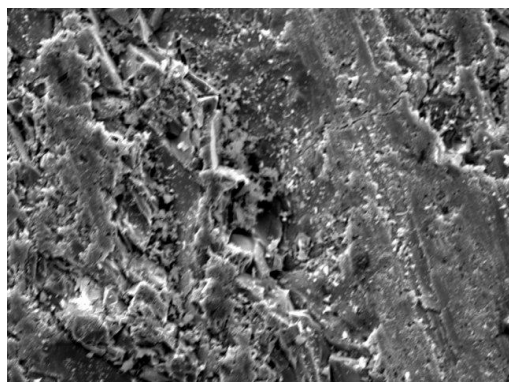
APÊNDICE B – Micrografias das argamassas

APÊNDICE B

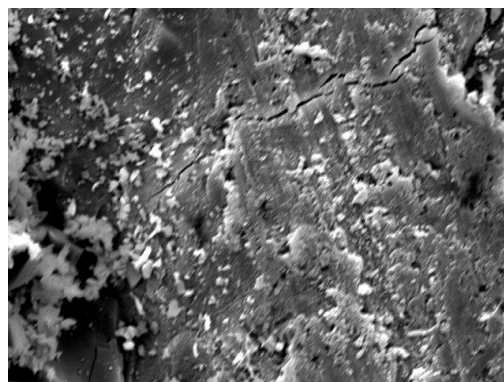
B. Micrografias das argamassas

B.1 Micrografias da argamassa referência

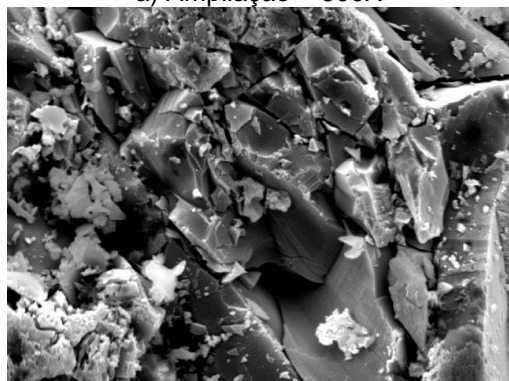
Figura 110: Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 28 dias.



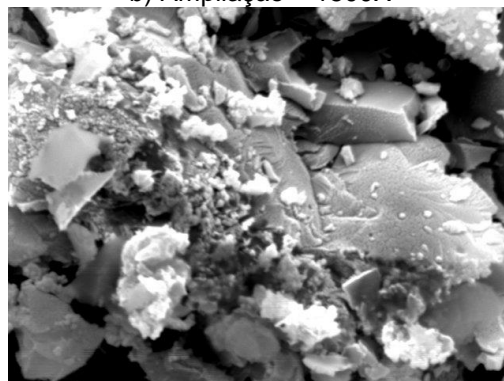
a) Ampliação – 600X



b) Ampliação – 1500X



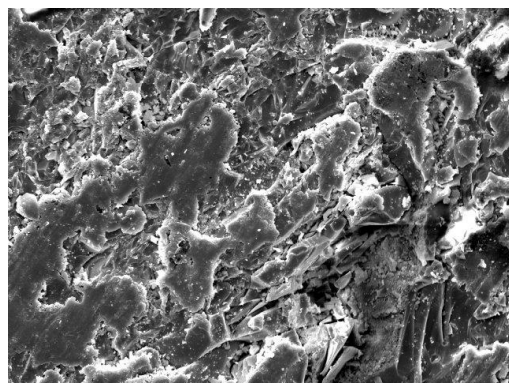
c) Ampliação – 3000X



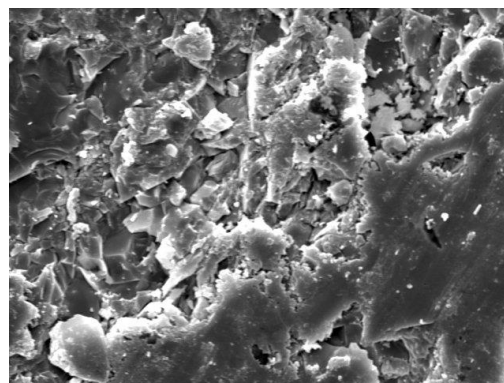
d) Ampliação – 7000X

Fonte: Acervo pessoal.

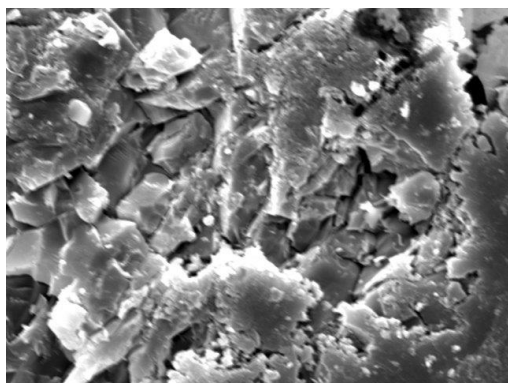
Figura 111: Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 91 dias.



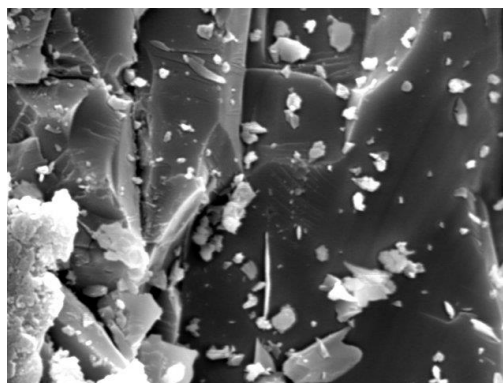
a) Ampliação – 600X



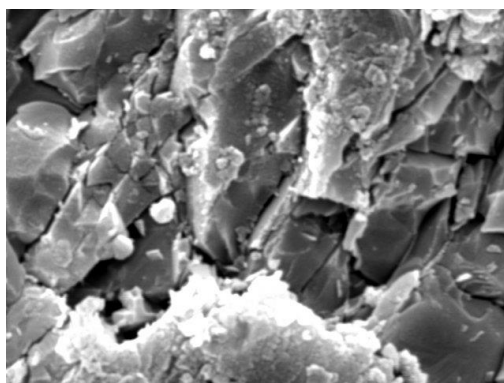
b) Ampliação – 1500X



c) Ampliação – 3000X



d) Ampliação – 4500X

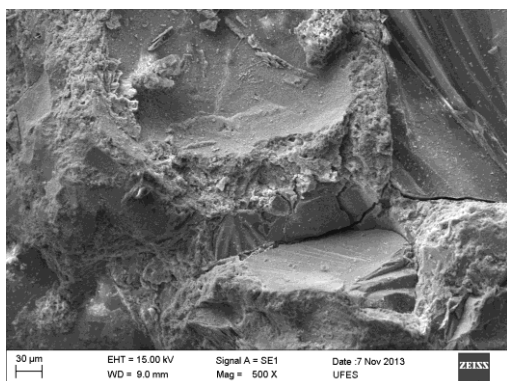


e) Ampliação – 7000X

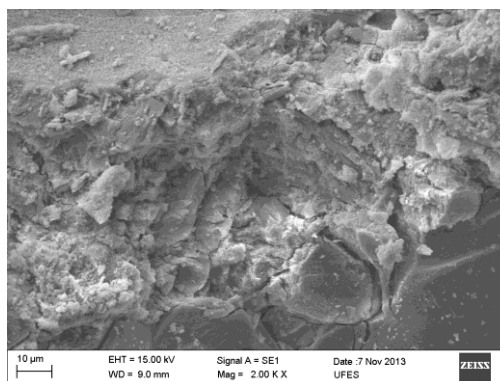
Fonte: Acervo pessoal.

B.2 Micrografias das argamassas com resíduo sem tratamento térmico

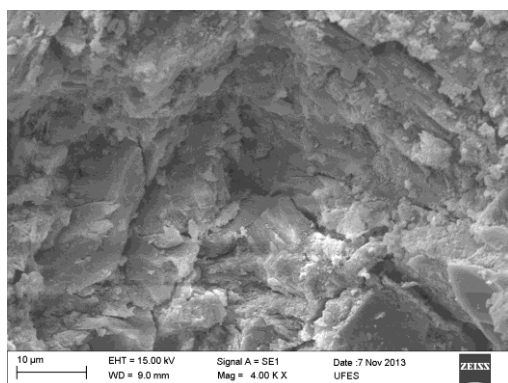
Figura 112: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALG 5 aos 91 dias.



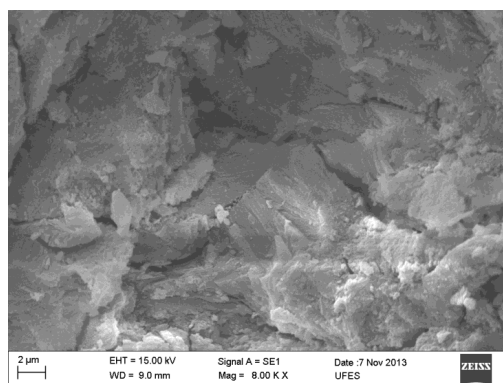
a) Ampliação – 500X



b) Ampliação – 2000X

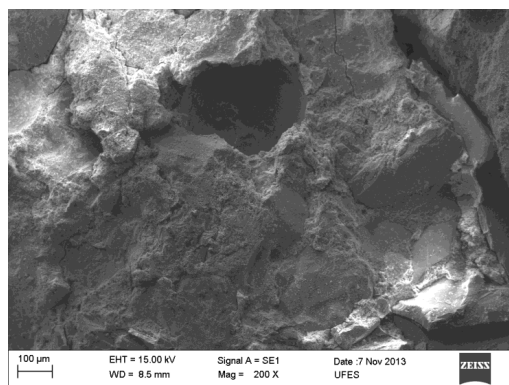


c) Ampliação – 4000X

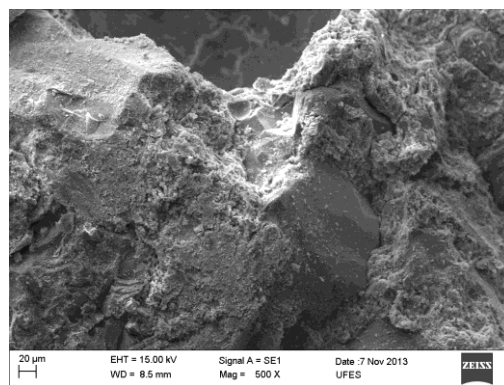


d) Ampliação – 8000X

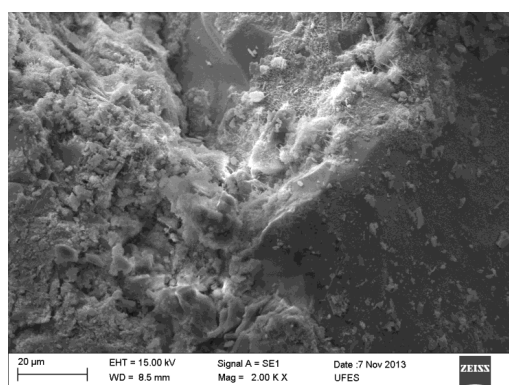
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 113: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALD 15 aos 91 dias.

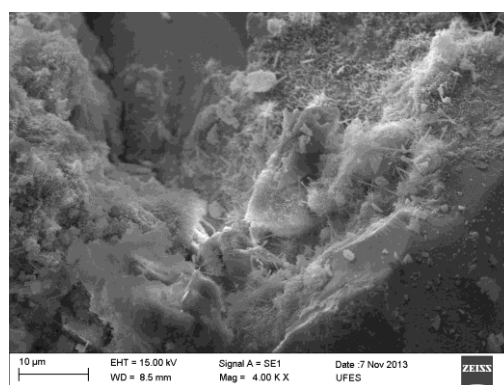
a) Ampliação – 200X



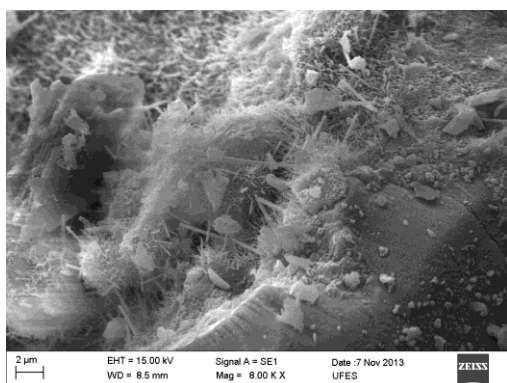
b) Ampliação – 500X



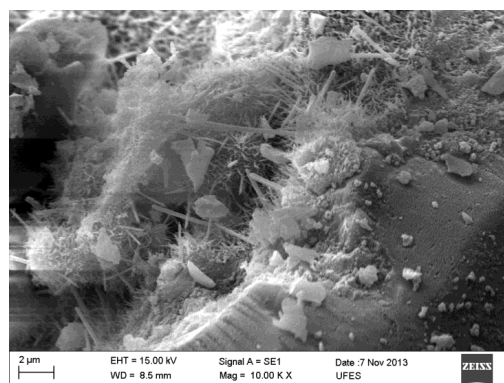
c) Ampliação – 2000X



d) Ampliação – 4000X



e) Ampliação – 8000X

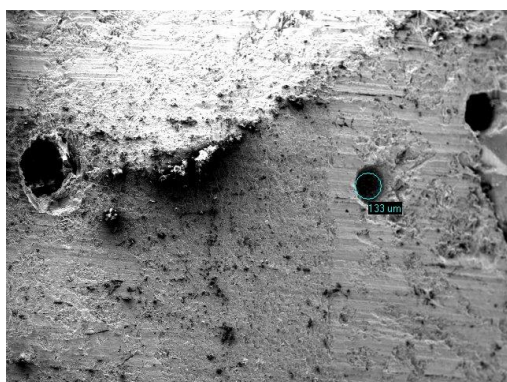


f) Ampliação – 10000X

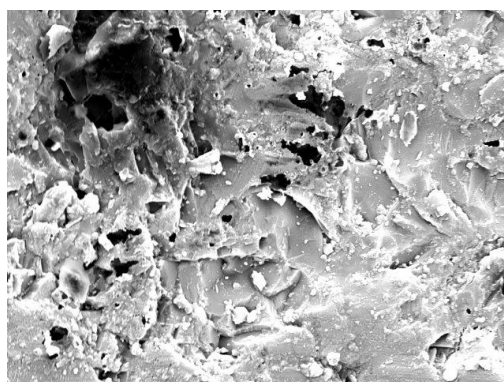
Fonte: Acervo pessoal.

B.3 Micrografias das argamassas com resíduo com tratamento térmico

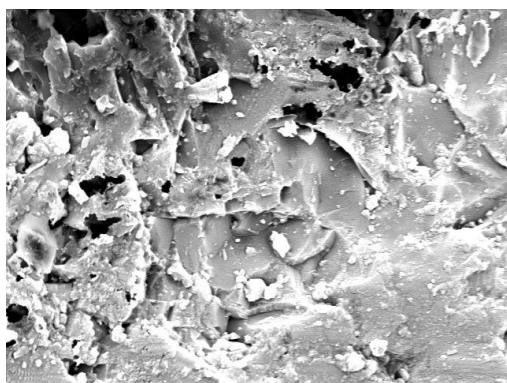
Figura 114: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALGf 5 aos 28 dias.



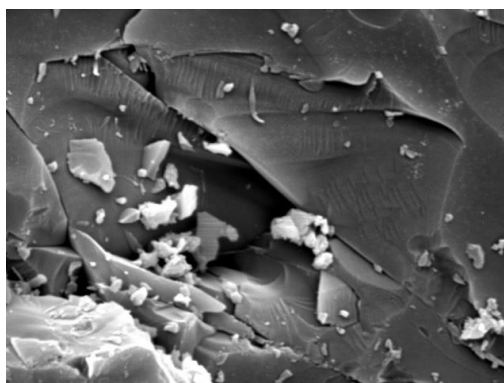
a) Ampliação – 40X



b) Ampliação – 1500X



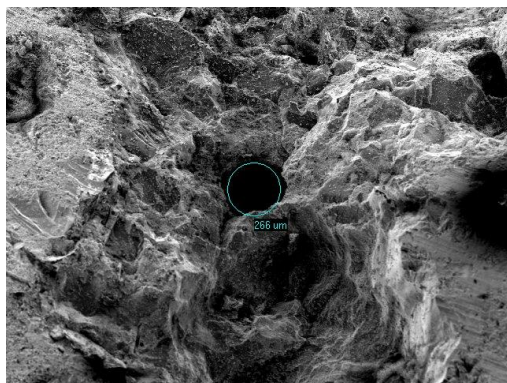
c) Ampliação – 2000X



d) Ampliação – 5000X

Fonte: Acervo pessoal.

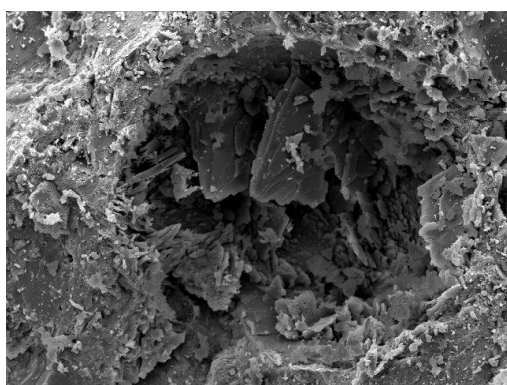
Figura 115: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALGf 5 aos 91 dias.



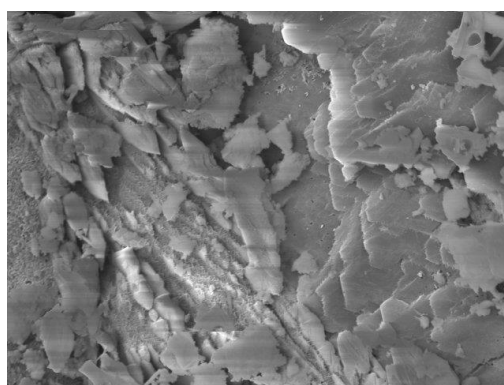
a) Ampliação – 40X



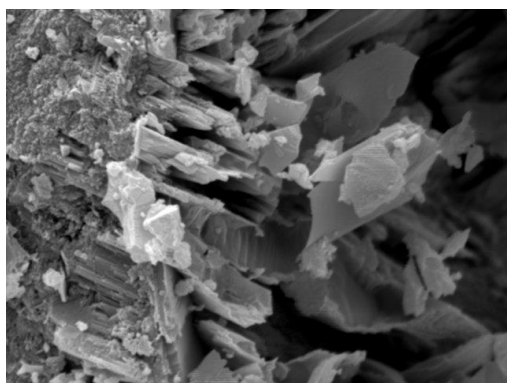
b) Ampliação – 200X



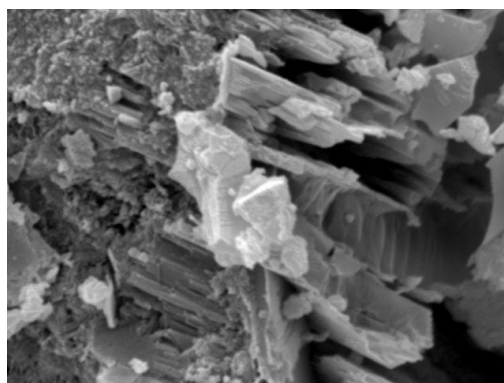
c) Ampliação – 600X



d) Ampliação – 2000X

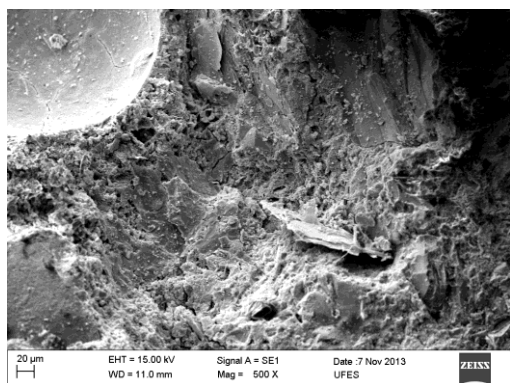


e) Ampliação – 4500X

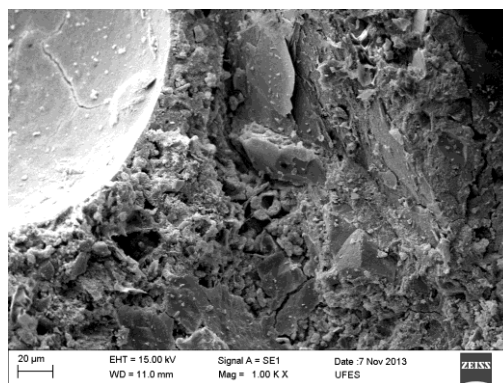


f) Ampliação – 7000X

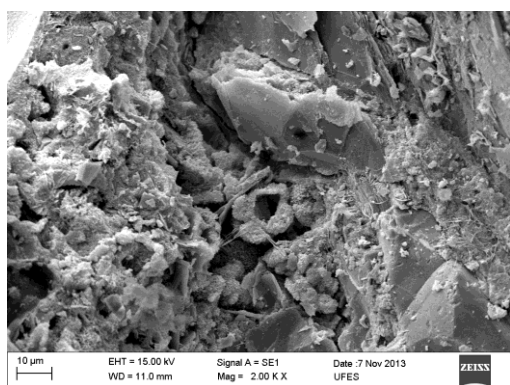
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 116: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALDf 20 aos 28 dias.

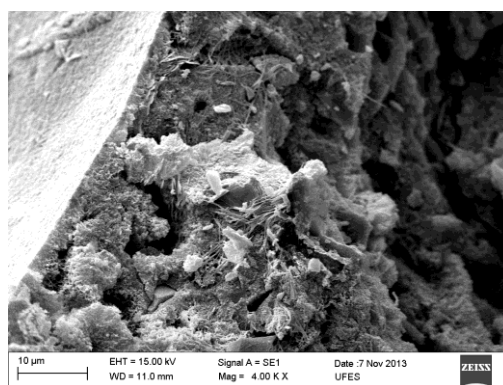
a) Ampliação – 500X



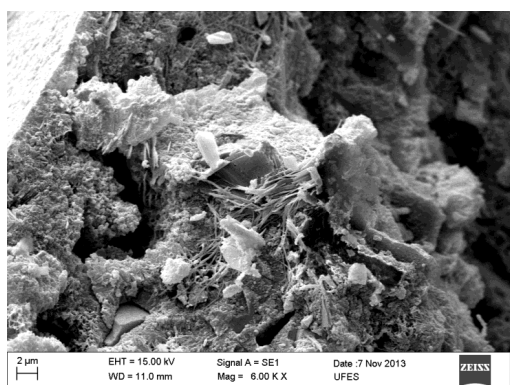
b) Ampliação – 1000X



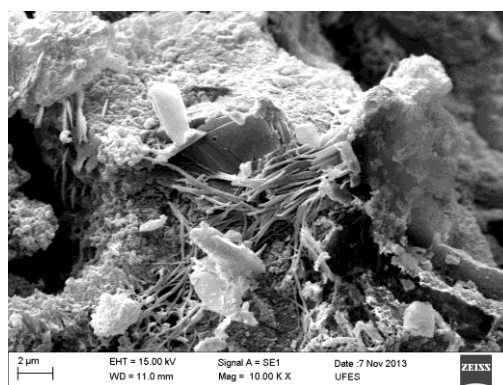
c) Ampliação – 2000X



d) Ampliação – 4000X

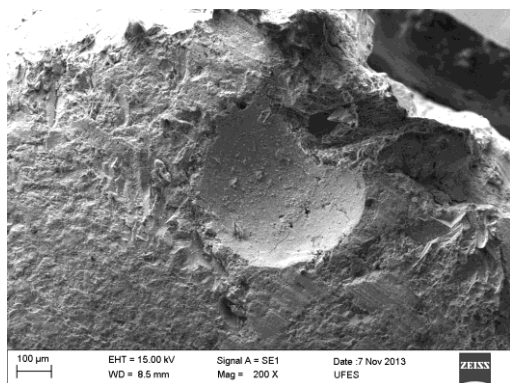


e) Ampliação – 6000X

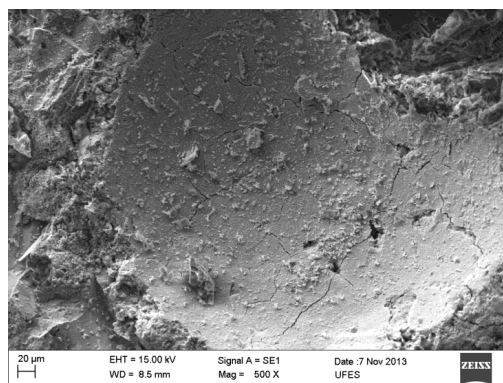


f) Ampliação – 10000X

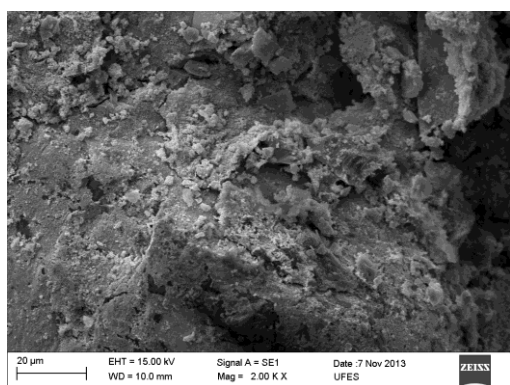
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 117: Imagens obtidas por MEV da argamassa ALDf 20 aos 91 dias.

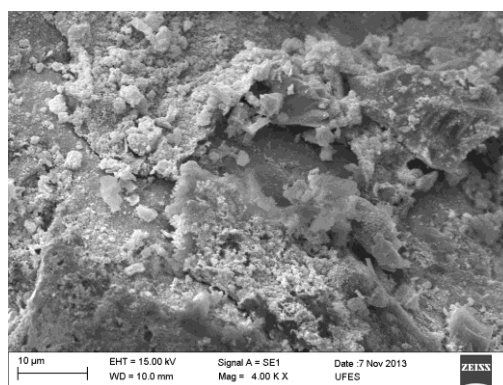
a) Ampliação – 200X



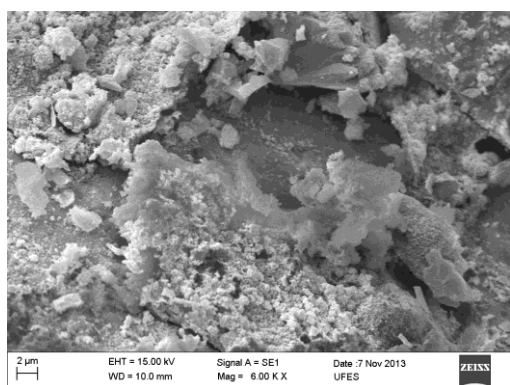
b) Ampliação – 500X



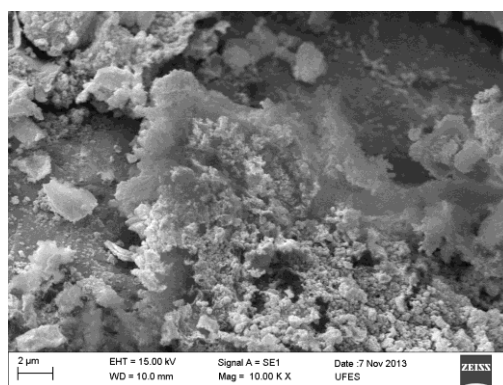
c) Ampliação – 2000X



d) Ampliação – 4000X



e) Ampliação – 6000X



f) Ampliação – 10000X

Fonte: Acervo pessoal.