

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

GUILHERME PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE MATÉRIA PRIMA
CONVENCIONAL POR LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO EM ARGAMASSAS
COLANTES**

**São Leopoldo
2020**

GUILHERME PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE MATÉRIA PRIMA
CONVENCIONAL POR LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO EM ARGAMASSAS
COLANTES**

Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em engenharia civil, pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina Célia Espinosa Modolo

São Leopoldo

2020

P436a Pereira, Guilherme.

Avaliação da substituição parcial de matéria prima convencional por lama do beneficiamento de rochas ornamentais e lama de carbonato de cálcio em argamassas colantes / por Guilherme Pereira. – 2020.

109 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.

“Orientadora: Dr^a. Regina Célia Espinosa Modolo”.

1. Agregado miúdo. 2. Substituição parcial. 3. Lama do beneficiamento de rochas ornamentais. 4. Lama de carbonato de cálcio. 5. Argamassa colante. I. Título.

CDU: 666.972.124

GUILHERME PEREIRA

**AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE MATÉRIA PRIMA
CONVENCIONAL POR LAMA DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO EM ARGAMASSAS
COLANTES**

Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em engenharia civil, pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Aprovado em 29/05/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak – Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Profa. Dra. Feliciane Andrade Brehm – Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Prof. Dr. Victor Miguel Ferreira – Universidade de Aveiro, Portugal

Dedico esta dissertação aos meus pais, David Eraldo Pereira e Inês Maria Pereira, por todo o apoio durante esse período, e principalmente por todo o suporte me oferecido durante toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha professora orientadora Regina Celia Espinosa Modolo pelos conhecimentos compartilhados, pela paciência e disposição para o atendimento de dúvidas.

Aos colegas do Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais, por todo o suporte e disposição durante este programa experimental.

À empresa Ranzan Mármore e Granitos por gentilmente oferecer a lama de beneficiamento de rochas ornamentais, ao Grupo Saint-Gobain em Portugal pela disponibilização dos aditivos necessários para a realização deste programa experimental, à Universidade de Aveiro em Portugal por disponibilizar seus laboratórios e funcionários para realizar ensaios importantes para esta dissertação.

À todos citados meu muito obrigado, sem a ajuda de vocês essa dissertação não teria se tornado realidade.

“O importante é a lembrança dos erros, que nos permite não cometer sempre os mesmos. O verdadeiro tesouro do homem é o tesouro dos seus erros, a larga experiência vital decantada por milênios, gota a gota” (Ortega y Gasset, J.)

RESUMO

O Brasil é o quarto maior produtor de rochas ornamentais e celulose do mundo. Estes setores geram elevadas quantidades de resíduos, entre eles, lamas. A lama de rochas ornamentais (LBRO) é gerada no processos de corte e polimento, ou seja, no beneficiamento das rochas. Já a lama de carbonato de cálcio (LCC) é gerada no processo kraft para produção de celulose. O objetivo geral deste estudo é a produção de argamassa colante com substituição parcial do agregado miúdo por essas lamas. Os métodos adotados para este estudo envolvem três etapas, sendo elas: a caracterização química, física e mineralógica das lamas, além de ensaios da argamassa colante tanto no estado fresco, como no estado endurecido. As substituições foram realizadas nas proporções de 5% e 10% do agregado miúdo passante pela peneira de Mesh #100, sendo que o percentual de agregado miúdo retido nesta peneira não foi modificado. Foram realizados ensaios de caracterização das lamas, sendo eles, granulometria por via úmida, granulometria por via seca, área superficial específica, decomposição termogravimétrica, picnometria à gás, difração por raios-x e fluorescência por raios-x. Foram realizados ensaios no estado fresco, sendo eles, índice de consistência, deslizamento, calorimetria. Foram realizados ensaios no estado endurecido, sendo eles, resistência de aderência à tração, tempo em aberto e absorção de água por capilaridade. Os resultados obtidos indicam para uma diminuição do índice de consistência e do deslizamento conforme aumenta a proporção de substituição, observou-se que o comportamento de hidratação não é alterado pela substituição. As proporções de 5% tanto de LBRO como LCC apresentaram menores resistências de aderência à tração e menor absorção de água por capilaridade que a argamassa colante referência. Enquanto as proporções de 10% apresentaram maiores resistências de aderência à tração e menor absorção de água do que o traço referência.

Palavras-chave: Agregado Miúdo. Substituição Parcial. Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais. Lama de Carbonato de Cálcio. Argamassa Colante.

ABSTRACT

Brazil is the fourth largest producer of ornamental stone and cellulose in the world. These sectors generate high amounts of waste, including sludge. Ornamental stone sludge (LBRO) is generated in the stone cutting and polishing processes. Lime mud (LCC) is generated in the kraft process for pulp and paper production. The general objective of this study is the production of adhesive-mortar with partial replacement of the fine aggregate by these sludges. The adopted methodology for this study involves three stages, namely: the chemical, physical and mineralogical characterization of the sludges, in addition to tests of the adhesive-mortar both in the fresh and in the hardened state. The replacement was made in the proportions of 5%w.t. and 10%w.t. (total weight) of the fine aggregate passing through the Mesh # 100 sieve, and the percentage of fine aggregate retained in this sieve has not been modified. Sludge characterization tests were carried out, namely, wet granulometry, dry granulometry, specific surface area, thermogravimetric decomposition, gas pycnometry, x-ray diffraction and x-ray fluorescence. Tests were carried out in the fresh state, namely, consistency index, sliding and calorimetry. Tests were carried out in the hardened state, namely, resistance to traction adhesion, open time and water absorption by capillarity. The results obtained indicate a reduction in the consistency index and sliding as the proportion of replacement increases, it was observed that the hydration behavior is not altered by the replacement. The proportions of 5% of both sludges, LBRO and LCC, showed lower tensile bond strengths and less water absorption by capillarity than the reference adhesive mortar. While the proportions of 10% showed greater resistance to adhesion to tensile and reduction of water absorption when comparing to the reference trace.

Key-words: Fine Agregate. Partial Replacement. Ornamental stone sludge. Lime mud. Adhesive-mortars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução dos Estudos dos Materiais	7
Figura 2 - Morfologia do agregado miúdo.....	9
Figura 3 - Empacotamento das partículas.....	10
Figura 4 - Morfologia dos grãos da lama de rochas ornamentais.....	12
Figura 5 – Difrátogramas de raios - X da LBRO	13
Figura 6 - Morfologia dos grãos da lama de carbonato de cálcio	15
Figura 7 - Diferente morfologia dos grãos da lama de carbonato de cálcio.....	16
Figura 8 - Difrátograma da LCC	17
Figura 9 - Estrutura de sistema de revestimento	19
Figura 10 – MEV sistema placa cerâmica/ argamassa colante/ substrato	19
Figura 11 – Exemplos de mecanismos químicos e físicos de ancoragem	28
Figura 12 – Reações provocadas pela adição de PVA.....	29
Figura 13 - Forças aplicadas no deslizamento da argamassa colante	32
Figura 14 - Deslizamento do revestimento cerâmico.....	33
Figura 15 - Macro e microestrutura de uma argamassa	37
Figura 16 – Aderência x reologia da argamassa colante.....	39
Figura 17 – Temperatura de calor de hidratação do cimento em função do tempo ..	41
Figura 18 – Temperaturas de calor de hidratação.....	42
Figura 19 – Distribuição granulométrica do cimento	45
Figura 20 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	47
Figura 21 – Comparação granulometria entre agregado miúdo, LBRO e LCC	49
Figura 22 - LBRO seca (a) e moída (b)	52
Figura 23 - Distribuição granulométrica da LBRO	52
Figura 24 - Granulometria por via seca LBRO	54
Figura 25 – Imagem da análise térmica da LBRO.....	55
Figura 26 – Difração de raios – x LBRO.....	57
Figura 27 - Distribuição granulométrica da LCC.....	59
Figura 28 - Granulometria por via seca LCC	60
Figura 29 - Imagem da análise térmica da LCC	62
Figura 30 – Difração por raios – x LCC	64
Figura 31 - substrato padrão	65
Figura 32 - Programa experimental	66

Figura 33 – Materiais constituintes da argamassa colante	67
Figura 34 – Argamassadeira utilizada para a confecção da argamassa colante	68
Figura 35 – Ensaio de deslizamento em andamento	69
Figura 36 – Mesa de consistência	70
Figura 37 - Placas cerâmicas assentadas na argamassa colante	71
Figura 38 – Pastilhas metálicas (a) e ensaio de resistência de aderência à tração em andamento (b)	72
Figura 39 - Esquema para determinação da absorção de água por capilaridade.....	73
Figura 40 – Ensaio de absorção de água por capilaridade em andamento	73
Figura 41 – Tipos de ruptura.....	85
Figura 42 – Área de aderência argamassa colante/ placa cerâmica	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Deslizamento - LBRO	74
Gráfico 2 – Deslizamento - LCC	75
Gráfico 3 – Índice de consistência - LBRO	77
Gráfico 4 – Índice de consistência - LCC	77
Gráfico 5 – Correlação entre o deslizamento e o índice de consistência	79
Gráfico 6 – Calorimetria.....	80
Gráfico 7 – Temperaturas máximas e mínimas LBRO	81
Gráfico 8 – Temperaturas máximas e mínimas LCC.....	81
Gráfico 9 – Resistência de aderência à tração.....	83
Gráfico 10 – Variação percentual de resistência de aderência à tração aos 28 dias	85
Gráfico 11 – Resistência de aderência à tração LBRO	86
Gráfico 12 – Resistência de aderência à tração LCC.....	87
Gráfico 13 – Deslizamento x resistência LBRO.....	88
Gráfico 14 – Deslizamento x resistência LCC	88
Gráfico 15 – Índice de consistência x resistência LBRO	89
Gráfico 16 – Índice de consistência x resistência LCC.....	90
Gráfico 17 – Tempo em aberto.....	91
Gráfico 18 – Superfície de aderência x resistência	94
Gráfico 19 – Absorção de água por capilaridade	95
Gráfico 20 – Absorção de água x resistência	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de normas.....	30
Tabela 2 - Principais constituintes químicos do cimento	40
Tabela 3 - Diâmetros característicos do cimento D10, D50 e D90	45
Tabela 4 – Comparação entre os diâmetros característicos	47
Tabela 5 - Granulometria por via seca agregado miúdo	48
Tabela 6 - Ensaios para caracterização físico-química da LBRO	50
Tabela 7 - Diâmetros característicos da LBRO D10, D50 e D90.....	53
Tabela 8 – Granulometria por via seca LBRO.....	53
Tabela 9 – Composição química da LBRO	56
Tabela 10 - Ensaios para caracterização físico-química da LC.....	57
Tabela 11 - Diâmetros característicos LCC D10, D50 e D90	59
Tabela 12 - Granulometria por via seca LCC	60
Tabela 13 – Comparação entre a área superficial específica.....	61
Tabela 14 – Composição química da LC.....	63
Tabela 15 – Deslizamento (cm).....	75
Tabela 16 – Índice de consistência (cm)	78
Tabela 17 – Temperaturas máximas e mínimas LBRO e LCC.....	81
Tabela 18 - Resistência de aderência à tração	83
Tabela 19 – Tempo em aberto	91
Tabela 20 – Absorção de água por capilaridade	95

LISTA DE SIGLAS

a/c	Relação água/ cimento
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AC I	Argamassa Colante Tipo I
AC II	Argamassa Colante Tipo II
AC III	Argamassa Colante Tipo III
ASPACER	Associação Paulista da Cerâmicas de Revestimento
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
BET	Brunauer- Emmett- Teller
CaO	Óxido de cálcio
C – H	Hidróxido de Cálcio
C – S – H	Silicato de Cálcio Hidratado
EDS	Sistema Dispersivo de Energia
EM	Norma Europeia
EUA	Estados Unidos da América
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
HEC	Ésteres de Celulose
LBRO	Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais
LCC	Lama de Carbonato de Cálcio
LCVMat	Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MHEC	Metilhidrocietilcelulose
MgO	Óxido de Magnésio
MME	Ministério de Minas e Energia
Na_2S	Sulfeto de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
P_2O_5	Pentóxido de Sódio

PVA	Poliacetato de Vinila-Etilioeno
SiO ₂	Dióxido de Silício

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	4
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	5
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 Objetivo Geral.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 SUSTENTABILIDADE	6
2.2 AGREGADO MIÚDO	8
2.3 LAMA DE ROCHAS ORNAMENTAIS	10
2.4 LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO	14
2.5 ARGAMASSA COLANTE.....	18
2.5.1 Tempo em aberto.....	24
2.5.2 Resistência de aderência à tração	25
2.5.3 Absorção de água por capilaridade.....	31
2.5.4 Deslizamento	32
2.5.5 Preenchimento dos vazios	33
2.6 REOLOGIA DAS ARGAMASSAS COLANTES	35
2.7 CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 MATERIAIS	45
3.1.1 Cimento	45
3.1.2 Agregado miúdo	46
3.1.2.1 Peneiramento do agregado miúdo	46
3.1.2.2 Granulometria à laser do agregado miúdo	46
3.1.2.3 Granulometria por via seca do agregado miúdo.....	47
3.1.2.4 Massa específica do agregado miúdo	49
3.1.2.5 Área superficial específica (BET) do agregado miúdo.....	49
3.1.3 Aditivos	50
3.1.3.1 Aditivo polimérico	50
3.1.3.2 Aditivo à base de éter de celulose	50
3.1.4 Lama do beneficiamento de rochas ornamentais	50

3.1.4.1 Secagem da lama de beneficiamento de rochas ornamentais	51
3.1.4.2 Granulometria à laser da LBRO.....	52
3.1.4.3 Granulometria por via seca da LBRO	53
3.1.4.4 Massa específica da LBRO	54
3.1.4.5 Área superficial específica (BET) da LBRO	54
3.1.4.5 Análise térmica da LBRO.....	55
3.1.4.6 Composição química da LBRO.....	56
3.1.4.7 Difração por raios – x da LBRO	56
3.1.5 Lama de carbonato de cálcio.....	57
3.1.5.1 Granulometria à laser da LCC	58
3.1.5.2 Granulometria por via seca da LCC.....	59
3.1.5.3 Massa específica da LCC	60
3.1.5.4 Área superficial específica da LCC	61
3.1.5.5 Análise da análise térmica da LCC.....	62
3.1.5.6 Composição química da LCC	63
3.1.5.7 Difração por raios – x da LCC.....	63
3.1.6 Substrato padrão	64
3.2 MÉTODOS.....	65
3.2.2 Confeção da argamassa colante	66
3.3.2 Ensaios realizados no estado fresco	68
3.3.2.1 Ensaio de determinação do deslizamento	68
3.3.2.2 Ensaio de índice de consistência.....	69
3.3.2.3 Ensaio de calorimetria	70
3.4.3 Ensaios realizados no estado endurecido	70
3.4.3.1 Ensaio de determinação da resistência de aderência à tração.....	70
3.4.3.2 Ensaio de determinação do tempo em aberto	72
3.4.3.3 Ensaio da absorção de água por capilaridade	73
4 RESULTADOS	74
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO	74
4.1.1 Ensaio de determinação do deslizamento.....	74
4.1.2 Índice de consistência.....	77
4.1.2.1 Correlação entre o deslizamento e o índice de consistência	79
4.1.3 Ensaio de calorimetria.....	80
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO ...	82

4.2.1 Ensaio de determinação da resistência de aderência à tração	83
4.2.1.1 Deslizamento x resistência de aderência à tração	87
4.2.1.2 Índice de consistência x resistência de aderência à tração	89
4.2.2 Ensaio de determinação do tempo em aberto	90
4.2.3 Ensaio da absorção de água por capilaridade.....	95
4.2.1.3 Absorção de água x resistência de aderência à tração	96
5. CONCLUSÕES	98
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	99
REFERÊNCIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o elevado consumo de matéria prima por indústrias, fez com que a humanidade pensasse mais no conceito de sustentabilidade. Há alguns anos este pensamento não era difundido, indústrias produziam ao máximo, sem pensar que no futuro, poderiam ficar sem tal recurso natural, por sua mentalidade consumista, onde o lucro sobrepõe-se a qualquer bom senso ambiental e sustentável, porém atualmente, algumas empresas dão mais valor para o conceito de desenvolvimento sustentável (YEMAL; TEIXEIRA; NAAS, 2011).

As questões de sustentabilidade são uma grande preocupação atualmente, principalmente para a construção civil, que utiliza grandes quantidades de recursos naturais para a produção de materiais, como concretos e argamassas. O esgotamento de recursos naturais não renováveis é um assunto que necessita ser abordado de forma mais eficiente. A recente tendência na indústria da construção é utilizar fontes de materiais renováveis, podendo estas fontes serem principalmente resíduos provenientes de outros processos que são gerados em larga escala, podendo atender à atual demanda da construção civil. Tais resíduos podem substituir o uso de materiais virgens, reduzindo os impactos ambientais, seja pela diminuição da extração de recursos naturais ou pelo melhor gerenciamento dos resíduos gerados. Assim, a utilização desses resíduos em materiais da construção civil tem se mostrado uma boa alternativa para minimizar impactos ambientais. (BEHERA et al., 2014).

A argamassa é um produto muito utilizado na construção civil, seja para novas edificações ou reabilitação de construções com perda de desempenho aparente (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Este tipo de material é comumente utilizado devido a seu fácil manuseio, e principalmente ao seu custo relativamente baixo, dado a disponibilidade de seus insumos no mercado (SCRIVENER; KIRKPATRICK, 2008). Sendo a areia natural um dos principais materiais utilizados para a confecção de argamassas, no Brasil 368.957.000 toneladas deste recurso natural não renovável são consumidas anualmente para a confecção de tais materiais. A extração de areia natural, para alimentar o setor da construção civil, está no limite, não tendo muito material disponível para reservas (KULAIF, 2014).

A larga utilização de placas cerâmicas de revestimentos no Brasil, e por consequência a utilização de argamassa colante, para realizar o assentamento

destas placas, nota-se o elevado consumo de recursos naturais não renováveis e a necessidade de novas tecnologias para suprir esta demanda (DIAS et al, 2016).

A reciclagem de resíduos é um meio de se diversificar a oferta de matéria-prima para a utilização como material de construção, assim viabilizando seu uso pelo baixo custo de mercado. A reciclagem de materiais como entulhos, resíduos agrícolas, resíduos florestais, resíduos industriais e resíduos minerais, entre outros, pode aferir diretamente na preservação do meio ambiente (LIMA; MENEZES; NEVES, 2008).

De acordo com MME (2018) o Brasil é o quarto maior produtor de rochas ornamentais do mundo, ficando atrás apenas de países como China, Índia e EUA. Porém durante o beneficiamento das rochas, que é feito com uma lâmina auxiliada com água corrente, para a refrigeração da lamina e também serve como transporte de resíduos durante o beneficiamento, esta lama gerada durante este processo é denominada de lama do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) (SILVEIRA; VIDAL; SOUZA, 2014).

Para Degen et al (2013), só no Brasil a quantidade de resíduo proveniente da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais, gira em torno de 1,6 milhões de toneladas anuais. A utilização deste resíduo para a construção civil como insumo, é uma forma de reduzir impactos ambientais. Atualmente a destinação final deste resíduo, é o seu despejo em lagoas ou aterros industriais, sendo um problema ambiental à ser gerido com extrema velocidade, pois a quantidade gerada demanda pressa.

Os resíduos gerados durante o processo de beneficiamento de rochas ornamentais, são depositados em corpos hídricos e/ou aterros, que neste caso atualmente já se encontram no limite de sua capacidade. Por isso verifica-se a necessidade de transformar este subproduto do beneficiamento de rochas ornamentais, em um resíduo de mais-valia para o atual mercado da construção civil. As características físico-químicas deste resíduo podem ser semelhantes as características de agregados utilizados para preenchimento em compósitos cimentícios (REIS; CASTRO, 2015).

Segundo a Industria Brasileira de Árvore (2016) o Brasil é o quarto maior produtor de celulose do mundo. A indústria de celulose tipo Kraft gera um grande volume de resíduos sólidos, entre eles a lama de carbonato de cálcio (CaCO_3), que comumente é destinado à aterros industriais, o processo Kraft é um processo

químico que utiliza hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) para realizar a deslignificação da celulose (RODRIGUES et al, 2016).

Para Foelkel (2011) a lama de carbonato de cálcio (LCC) é um material residual liberado como purga da alimentação do forno de cal, sendo o carbonato de cálcio o principal compósito químico encontrado no material. Também segundo Foelkel (2011) o termo resíduo deve ser extinguido, pois a partir da criação de novas tecnologias os materiais que são resultados de outros processos industriais, devem ser convertidos em insumos para novas aplicações, ou seja, tornando-o um coproduto.

Devido a não somente interação de clínquer moído e sulfato de cálcio com as moléculas orgânicas, mas também a interação de produtos minerais e amorfos, os produtos cimentícios modernos estão se tornando um material químico mais complexo. Moléculas orgânicas são desenvolvidas para destacar as características de compósitos cimentícios ou corrigir deficiências presentes nos cimentos atuais. A ciência de compósitos cimentícios está em crescente evolução, é de se aguardar que nos próximos anos, sejam desenvolvidos novos tipos de compósitos cimentícios para que melhor atendam às necessidades socioeconômicas solicitadas. (AİTCIN, 2016).

Portanto, a presente dissertação propõe um estudo sobre o desempenho de argamassa colante com substituição parcial e total do agregado miúdo por lama de rochas ornamentais e lama de carbonato de cálcio.

1.1 JUSTIFICATIVA

A construção civil é responsável por vários impactos, seja ele, ambiental, social ou econômico, principalmente ao local e a região onde a obra está instalada. Os impactos podem ser diretos, ou seja, pelo mal gerenciamento dos resíduos gerados durante a obra, ou indiretos, através do consumo de recursos naturais não renováveis utilizados para a confecção de materiais básicos para a construção civil. Porém, afim de mitigar esses impactos novos materiais têm vindo a ser utilizados para a conclusão de uma edificação. Materiais esses que podem ser obtidos de outros processos industriais (SPADOTTO et al, 2011).

Segundo a ABNT (2012) a argamassa colante é a mistura de cimento Portland, agregado miúdo mineral e aditivos químicos. A ASPACER (2015) afirma que, a produção nacional de cerâmicas para revestimentos atingiu a marca de 899 milhões de metros quadrados, sendo o Brasil o segundo maior consumidor de placas cerâmicas para revestimento, ficando atrás apenas da China.

Segundo a ABRELPE (2015) a construção civil incorpora a alta extração de recursos para o desenvolvimento de seus principais componentes, como por exemplo o concreto e a argamassa. Porém além de um alto consumo de matérias-primas a construção civil também apresenta alto índice de desperdício de material em seu processo de fabricação, em torno de 25%.

A utilização de resíduos como insumo para a criação de novos produtos, traz vantagens relacionadas à sustentabilidade de seus processos, como por exemplo a diminuição do consumo energético para extração e beneficiamento de matérias primas, assim como a redução de transporte e custo de manutenção de resíduos em aterros, tornando essa alternativa em uma oportunidade técnica, ambiental e econômica (DIAS et al, 2016).

Conforme citado anteriormente, o Brasil é um grande gerador de resíduos industriais, afim de minimizar os impactos causados pelo mal gerenciamento, ou despejo destes materiais em aterros, e minimizar o consumo de matérias-primas como o agregado miúdo (areia natural), portanto esta pesquisa visa avaliar a substituição do agregado miúdo por resíduos sólidos industriais, no caso, lama do beneficiamento de rochas ornamentais e lama de carbonato de cálcio, em argamassas colantes.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente estudo está limitado a testes em escala laboratorial.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho dividem-se em: geral e específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da presente dissertação é a produção de argamassas colantes com LBRO e LCC.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) caracterizar fisicamente e quimicamente a LBRO e a LCC
- b) verificar se há relação entre o percentual de substituição do agregado miúdo por LBRO e LC e as propriedades obtidas;
- c) analisar o comportamento calorimétrico das formulações;
- d) analisar a absorção de água por capilaridade como um indicador da durabilidade e da porosidade do material;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O setor da construção civil é responsável por um consumo elevado de recursos naturais não renováveis, porém por outro lado, as indústrias são grandes geradoras de resíduos, atualmente sabemos que estes resíduos gerados durante outros processos, são reutilizáveis, se devidamente pesquisados e empregados. No intuito de diminuir a extração do agregado miúdo e realocar os resíduos gerados pelas indústrias, este trabalho avaliou os impactos gerados pela substituição parcial do agregado miúdo, por LBRO e LCC.

2.1 SUSTENTABILIDADE

Para Gasques et al (2014) a construção civil é reconhecidamente umas das principais atividades de um país, gerando empregos e movimentação econômica. Porém também se trata de um setor de grande impacto ambiental, responsável pelo consumo de aproximadamente 75% da matéria prima e por emitir 1/3 dos gases de efeito estufa, por isso um desenvolvimento sustentável se torna necessária para este setor.

Uma atitude sustentável pode ser mantida por tempo ilimitado, ou seja, é uma exploração de recursos naturais exercida de uma forma limitada, mas que atende à demanda do consumo - por consequência, essas matérias primas utilizadas pelas indústrias nunca se acabam. Vale ressaltar que o desenvolvimento sustentável tem como objetivo melhorar a qualidade de vida do homem na terra, porém sempre respeitando o ecossistema existente ao seu redor, e sempre levando em consideração seu tempo de produção para gerar novos recursos (MIKHAILOVA, 2004).

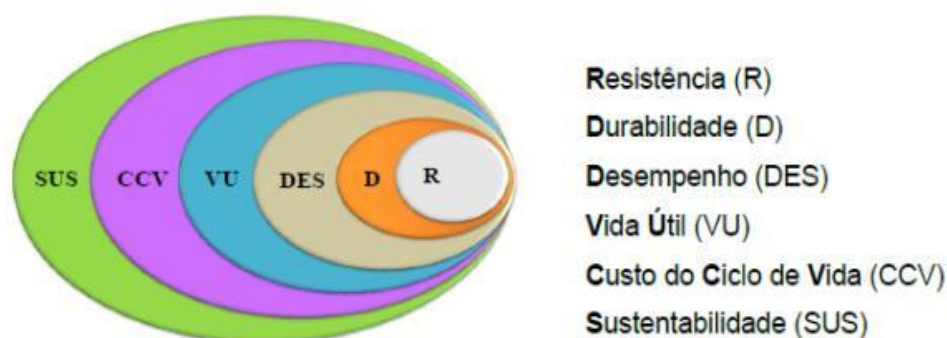
Para que seja possível alcançar esses conceitos, a sociedade tem um papel fundamental. Sibila (2002) descreve que, enquanto a população mundial incorporar um pensamento apenas de consumidores, a lógica do mercado passa a ser contrária ao pensamento sustentável. Resumidamente, não é possível ter uma atitude nem desenvolvimento sustentável caso a sociedade não mude sua ética de consumo. O indivíduo, antes de consumir, precisa ter uma reflexão sobre como o produto é, e se seu processo é sustentável.

Segundo Kürklü e Görhan (2019), reduzir o desperdício nas atividades industriais tem sido uma das principais atividades ambientais recentemente. Sendo essencial desenvolver novas tecnologias para converter resíduos (subprodutos) em produtos de alto valor agregado (coprodutos), trazendo melhorias para as novas tecnologias desenvolvidas se comparadas com as anteriores.

Devido a regulamentação ambiental imposta pelos órgãos responsáveis, o despejo de resíduos sólidos, gerados em processos industriais, em aterros vem se tornando uma tarefa difícil de ser gerenciada, este cenário faz com que cresça a oportunidade de pesquisa desses materiais para serem empregados em outros destinos, como por exemplo a reciclagem, utilizando estes resíduos como insumos de outros materiais (CHEAH; RAMLI, 2012).

Para Possan e Demoliner (2013) com o passar dos anos, somente a resistência do material não mais satisfazia as exigências modernas, tendo o material que apresentar parâmetros como: durabilidade, desempenho, vida útil, custo de ciclo de vida e mais recentemente foi incorporado a sustentabilidade, como um parâmetro a ser considerado e avaliado, conforme Figura 1 abaixo:

Figura 1 - Evolução dos Estudos dos Materiais



Fonte: Possan e Demoliner (2013, p. 4).

Chaves (2019) realizou a substituição parcial do agregado miúdo por lodo de estação de tratamento de esgoto em argamassas. Foram executadas duas substituições nas proporções de 5% e 10% em relação ao volume, os resultados do seu estudo apontaram para um ganho de resistência à compressão da argamassa aos 28 dias de idade de 190% e 248%, respectivamente.

Bertoletto et al (2017) avaliou a substituição parcial do agregado miúdo por cinza de madeira de eucalipto em argamassas. Foram executadas substituições nas

proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em relação à massa. Aos 7 dias de idade os corpos de provas foram rompidos e a resistência à compressão foi analisada. Todos os traços contendo substituição parcial do agregado miúdo por cinza de madeira de eucalipto, para este estudo, obtiveram maiores resistências se comparados ao traço referência.

2.2 AGREGADO MIÚDO

Segundo Becker e Valério Filho (2018) o agregado miúdo é um recurso natural, e insumo básico para a atual mercado da construção civil, diretamente ligado ao processo de crescimento urbano. Porém o elevado consumo deste material acarreta em uma problemática relacionado com diversos impactos, podendo ser, ambiental, topográfico, físico e biológico, que consequentemente geram desequilíbrio da flora e fauna. Diante da exploração desenfreada de materiais para atender a atual demanda do mercado, identifica-se que os recursos naturais estão se tornando escassos, sobre tudo os não renováveis, como o caso do agregado miúdo.

O agregado miúdo tem um valor de mercado relativamente barato, se comparado ao cimento, e não entra em reação química com a água, por isso tem sido comumente utilizado como material para enchimento inerte de concretos e argamassas. As características importantes da areia para a composição de compósitos cimentícios incluem: a composição do material e curva granulométrica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O agregado miúdo é um aglomerado de partículas de minerais ou rochas sedimentadas, composta basicamente por dióxido de silício (SiO_2). Na maioria dos casos a areia é formada principalmente por quartzo, que é um mineral duro muito comum. Sua composição em média apresenta SiO_2 na ordem de grandeza de >65% da sua composição total. O agregado miúdo é resultado do intemperismos geológicos, provenientes da fragmentação de rochas por erosão, ação do vento e da água, é constituída por fragmentos de rochas e minerais duros, de forma angulosa e arredondadas e superfície lisa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2 - Morfologia do agregado miúdo.

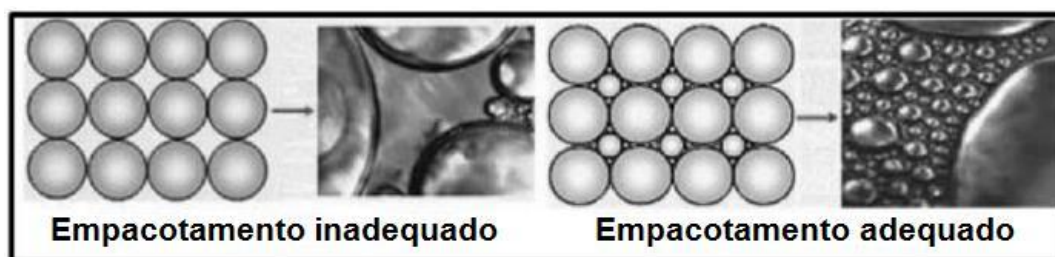


Fonte: Modolo et al, 2015.

Para Bezerra et al (2011), a utilização de agregado miúdo em uma matriz cimentícia, além de trazer vantagens de custo benefício, causa outros impactos importantes aos compósitos cimentícios, como por exemplo: redução da retração da matriz cimentícia, aumento da resistência à abrasão do material, e também um aumento considerável da resistência ao fogo do material.

Também segundo Mehta e Monteiro (2014) a composição granulométrica do agregado miúdo é fundamental para o desenvolvimento de uma matriz cimentícia, por exemplo areias muito grossas produzem materiais ásperos e pouco trabalháveis, por outro lado areias muito finas aumentam a demanda de água do compósito cimentício. Por isso para ter o melhor empacotamento das partículas possível é preciso trabalhar com uma areia que apresente grãos de tamanhos heterogêneos, causando um preenchimento efetivo da matriz cimentícia, ou seja, as partículas menores preenchem os vazios entre as partículas maiores, e consequentemente aumentam o desempenho do material, tanto para aspectos mecânicos como para aspectos de durabilidade.

Figura 3 - Empacotamento das partículas.



Fonte: PET CIVIL – UFJF, 2012 apud WINCKLER, 2015.

Modolo et al (2015) investigaram a influência de cinzas pesadas provenientes da queima de biomassas em leito fluidizado borbulhante na composição de argamassas colante, realizando a substituição parcial e total do agregado miúdo por esta cinza pesada de leito fluidizado borbulhante, com proporções de 25%, 50% e 100% em massa. De acordo com os resultados, houve uma melhora considerável nas propriedades da argamassa colante, mostrando que é viável a substituição do agregado miúdo, por cinza pesada de leito fluidizado borbulhante.

2.3 LAMA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais são materiais geológicos naturais, que podem ser extraídos em blocos ou placas, e serrados em formas variadas, além de beneficiadas por meio de esquadrejamento, polimento, lustro, etc. Estes materiais se destacam pela versatilidade de aplicação, que podem ser em um simples tampo, até complexas edificações. Usualmente utilizadas para revestimentos, podendo ser interno ou externo (MME, 2018).

De acordo com Sardou (2013), as rochas ornamentais comerciais são classificadas em granitos e mármore. Sendo as rochas silicáticas agrupadas como granitos, enquanto as rochas carbonáticas são classificadas como mármore.

A produção de rochas ornamentais no Brasil, no ano de 2017, foi de 9,24 milhões de toneladas, sendo 3,24 milhões de toneladas para o atendimento do mercado externo, e 6 milhões de toneladas para o mercado interno (ABIROCHAS, 2018). Este consumo interno corresponde a aproximadamente 67,3 milhões de metros quadrados equivalentes, de chapas com 2 centímetros de espessura, resultando em um consumo per capita de 0,32 m²/hab ou aproximadamente 17,28 kg/ hab (MME, 2018).

De acordo com Saboya, Xavier e Alexandre (2007), o processo de beneficiamento de rochas ornamentais gera grandes quantidades de resíduos, denominado lama de rochas ornamentais, que podem chegar a atingir 40% do volume beneficiado, estimando uma geração entre 32 – 40 m³/dia deste resíduo. Ainda de acordo com os autores este resíduo é composto basicamente por água, cal, areia, pó de granito e pó de mármore. Já para Uliana et al (2013) o Brasil gera em torno de 1,6 milhões de toneladas por ano deste resíduo, apenas no processo de desdobramento dos blocos de rocha em chapas.

A lama de rocha ornamentais trata-se de um material quimicamente inerte. Quando incorporada como adição ou outro meio em pastas cimentícias desempenha o papel de preenchimento dos poros da matriz cimentícia, conhecido como empacotamento das partículas. Este resíduo apresenta estrutura cristalina em sua formação original, o que impossibilita que reaja quimicamente com o cimento, e a água (MITTRI, 2016).

Segundo o estudo realizado por Uliana et al (2013), a lama de rochas ornamentais ensaiada em sua pesquisa, a partir de uma fluorescência de raios-x, a lama apresentou a seguinte composição química, apresentada na forma de óxidos mais estáveis: SiO₂ = 66.80%, Fe₂O₃ = 3.79%, Al₂O₃ = 13.50%, CaO = 3.44%, MgO = 0.93%, TiO₂ = 0.16%, Na₂O = 3.50%, K₂O = 3.83%, P₂O₅ = 0.07% e SO₃ = 0.03%, perda ao fogo de 3.5% e de acordo com Braga et al (2010) o pH está entre 5,2 e 5 medidos ao longo de 24 horas.

De acordo com a ABNT (2004), os resíduos sólidos classificados como Classe II, são resíduos não perigosos, ou seja, são resíduos sólidos que não apresentam características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. A Classe II é dividida em duas subclasses, sendo elas, A – não inertes, e B – inertes.

A Classe II A, são aqueles resíduos sólidos não perigosos e não inertes, que podem apresentar propriedades como, biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A Classe II B, são os resíduos sólidos não perigosos e inertes, que em contato com qualquer meio, não causam alterações, de acordo com os limites estabelecidos em norma.

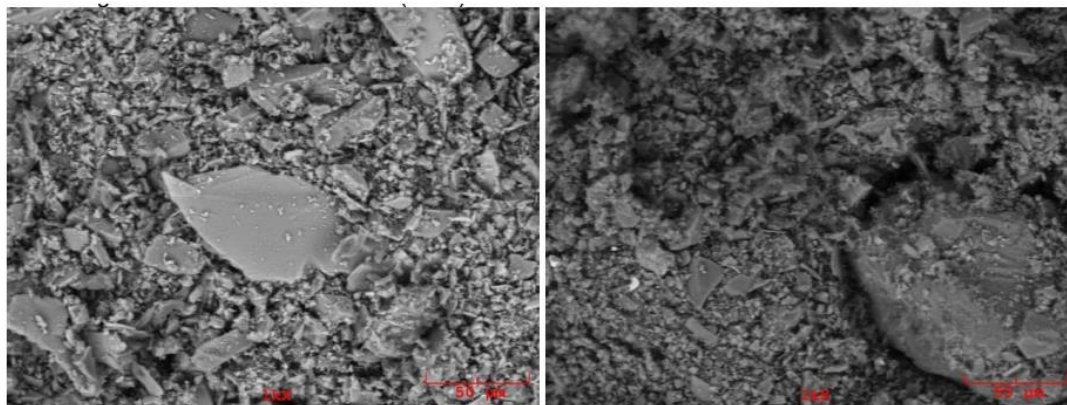
Porém Braga et al (2010) descrevem em seu estudo que, a composição química da LBRO, varia em função principalmente da composição das rochas empregadas no beneficiamento, mas também dos insumos utilizados, entre outros

fatores. Ainda no mesmo estudo foi constatado que a LBRO utilizada, de acordo com a ABNT NBR 10004: 2004, é classificada como não perigoso Classe II A – não inerte. Esta classificação é decorrente da presença de chumbo, cromo total, ferro e manganês, acima dos limites máximos descritos na norma.

Em contrapartida, Braga et al (2010), descrevem em seu estudo que em uma amostragem de várias origens, 50% da LBRO será classificada com Classe II B – inerte, e os outros 50% como Classe II A – não inerte, mostrando a variabilidade quanto a classificação do material.

A Figura 4 abaixo, mostra a morfologia dos grãos de lama de rochas ornamentais, que de acordo com Uliana et al (2013), não apresenta uma forma definida, possuindo grãos com formato anguloso, geralmente devido ao processo de beneficiamento, com grãos de dimensões variando entre 0,8 e 25 μm , e alguns maiores, na ordem de 60 μm . A Figura 4 abaixo, foi realizada com o auxílio de um aparelho de microscopia eletrônica de varredura – MEV, com aumento de 1000X.

Figura 4 - Morfologia dos grãos da lama de rochas ornamentais



Fonte: Uliana et al (2013)

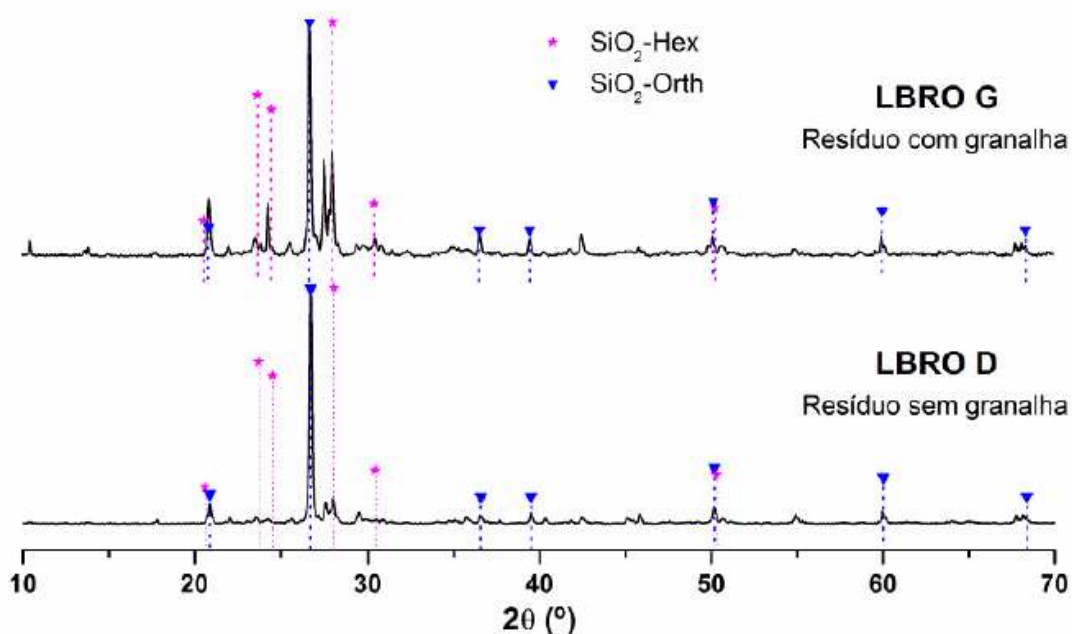
A incorporação da LBRO em matrizes cimentícias, tanto como substituição parcial do cimento ou como uma simples adição, faz com que o conjunto perca trabalhabilidade, ou seja, quanto maior for a incorporação deste resíduo em compósitos cimentícios menor será a trabalhabilidade do material confeccionado (DEGEN et al, 2013; MITTRI, 2016).

A substituição do cimento por pó de granito, de acordo com o estudo realizado por Abukersh e Fairfield (2011), mostrou que a substituição até 30% do cimento em concreto, causa o aumento na resistência mecânica do material, e até

50% o concreto perde resistência, embora as propriedades mecânicas permaneçam aceitáveis.

Uliana et al (2014), observaram o difratograma de raios-x da lama de rochas ornamentais, chegando na conclusão de que a sílica (SiO_2) presente na composição química deste resíduo com e sem granalha (sendo a granalha resquícios de material metálico na composição da LBRO provenientes do processo de beneficiamento), é cristalina hexagonal. De maneira geral, é um composto cristalino quimicamente estável. Portanto, com baixa possibilidade de atividade pozolânica.

Figura 5 – Difratogramas de raios - X da LBRO



Fonte: Uliana et al (2014)

Damineli et al (2017) observaram que para os três tipos de areias usadas em seu estudo a superfície específica foram de 0.21 m^2/g , 0.34 m^2/g e 0.20 m^2/g . Enquanto que Uliana et al (2013) obtiveram os valores de 0.73 cm^2/g e 0.62 cm^2/g para as lamas de rochas ornamentais utilizadas. Este aspecto favorece a afirmação de que a lama de rochas ornamentais, devido a esta característica, podem influenciar na redução da trabalhabilidade de materiais cimentícios.

2.4 LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO

O Brasil é o quarto maior produtor de celulose no mundo, para que isso seja possível, o processo mais utilizado para fabricação de celulose é o Kraft, que nada mais é do que um processo químico que utiliza Hidróxido de sódio (NaOH) para realizar a deslignificação da celulose. Durante a etapa de recuperação química dos reagentes do processo Kraft resíduos inorgânicos são gerados, entre eles o dregs, grits e a lama de carbonato de cálcio, sendo o último destacado pela quantidade gerada durante o processo (RODRIGUES et al, 2016).

Segundo Foelkel (2011), estes resíduos normalmente são dispostos em aterros, apesar de existir estudos mostrando que estes resíduos são neutralizantes eficazes de solos ácidos. Em indústrias de celulose que possuem fornos de calcificação, a LCC é empregada como fonte de cal (CaO), porém problemas de manutenção, ou operação, ou contaminação elevada da LCC, faz com que estes fornos parem de funcionar, causando o armazenamento deste material.

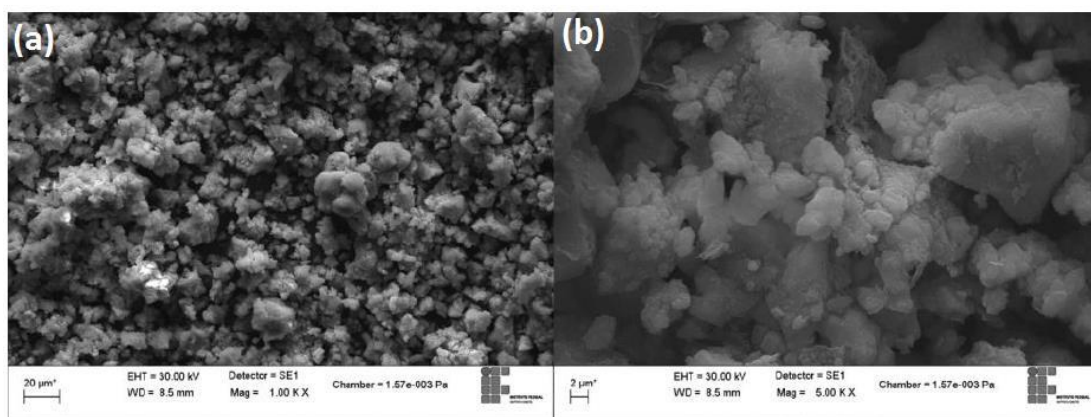
A LCC é um resíduo da indústria da celulose, é extraída da etapa de clarificação, constituída principalmente por óxido de cálcio (CaO), por se tratar de um material que precisa ser estabilizado, este material fica disposto ao contato com a umidade do ar, para futuramente não ter problema com a expansão de seus átomos, pois a molécula de CaO é menor que o resultado desta molécula mais a adição de água (RODRIGUES et al, 2016).

A quantidade e a composição deste resíduo sólido, dependem necessariamente das técnicas empregadas durante o processo de extração da celulose, e das matérias primas utilizadas. Os resíduos sólidos provenientes da indústria da celulose, entre eles a lama de cal, são constantes e controlados, o que possibilita a valorização deste resíduo sólido, como insumo de outros processos, como por exemplo o setor da construção civil, que é um grande escoador e gerador de resíduos sólidos (MONTE et al, 2009).

Segundo o ensaio de fluorescência de raios-x realizado por Rodrigues et al (2016), a composição química da LCC após calcinação é: CaO = 53.10%, Na₂O = 1.70%, MgO = 0.88%, SiO₂ = 1.68%, Al₂O₃ = 0.25%, P₂O₅ = 0.82%, Fe₂O₃ = 0.14%, e outros componentes com ordem de grandeza inferior à 0,1%, além de uma perda ao fogo de 40,10% do material inicial. A LCC apresenta uma morfologia com grãos irregulares e de tamanhos diferentes, além de pequenos aglomerados de grãos,

conforme pode ser observado na Figura 9, que foi realizada com o auxílio de um aparelho de microscopia eletrônica de varredura – MEV, com aumento de 1000X (a) e 5000 X (b).

Figura 6 - Morfologia dos grãos da lama de carbonato de cálcio

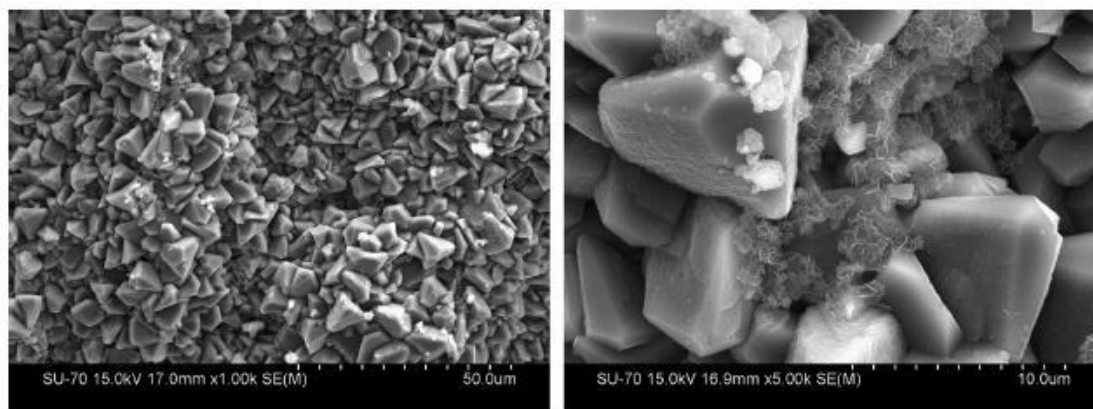


Fonte: Rodrigues et al (2016)

Os diâmetros característicos da LCC, determinados por Rodrigues et al (2016), são, $D_{10} = 5,024 \mu\text{m}$, $D_{50} = 17,503 \mu\text{m}$ e $D_{90} = 39,092 \mu\text{m}$. Também foi realizado um ensaio de análise térmica deste material, determinando que a LCC, apresenta um halo exotérmico relacionado à decomposição de matéria orgânica, entre as temperaturas de 200°C e 500°C , além de pico endotérmico relativo a decomposição de carbonatos que ocorre em $832,1^\circ\text{C}$.

Modolo et al (2014), também investigou as características da LCC, utilizada em seu estudo, a partir de uma ensaios de fluorescência de raios-x foi observado que a composição química da LCC é: $\text{CaO} = 51.80\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 1.90\%$, $\text{MgO} = 0.48\%$, $\text{SiO}_2 = 0.29\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.20\%$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.90\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.03\%$, e outros componentes com ordem de grandeza inferior à $0,1\%$. Além de uma superfície específica de $5,17 \text{ m}^2/\text{g}$, e densidade específica de $2,83 \text{ g/cm}^3$. Mostrando a variação deste material quanto ao processo utilizado para realizar a extração da celulose, principalmente quanto ao formato dos grãos, conforme pode ser vista na Figura 7 abaixo, descoberta com auxílio de um equipamento de MEV.

Figura 7 - Diferente morfologia dos grãos da lama de carbonato de cálcio

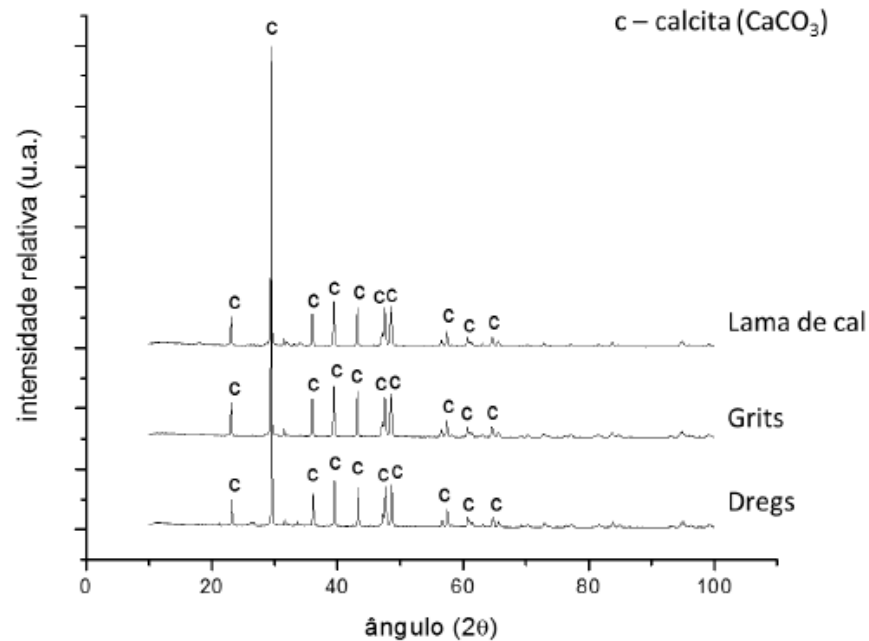


Fonte: Modolo et al (2014)

Modolo et al (2014) conclui em sua pesquisa que, a LCC deveria ser utilizada como um agregado mineral fino, em argamassas à base de cimento, devido à grande presença de CaCO_3 . Pois como adição ao cimento, as propriedades mecânicas das argamassas testadas, não sofreram alterações significativas. Porém quando analisado os aspectos econômicos, haveria a oportunidade de evitar diversos aterros industriais ao longo dos anos, e ao mesmo tempo, uma preservação de recursos naturais não renováveis.

Para Rodrigues et al (2016) a LCC tem potencial para ser usada como matéria-prima alternativa para produtos cimentícios, dado que a calcita (CaCO_3) é um componente encontrado em maior proporção no cimento. Além de apresentar um pH alcalino, por volta de 12,64, mostrando potencial também para aplicação como ativadores alcalinos em materiais cimentícios. Também foi determinado em seu estudo, que a LCC ou lama de cal, apresenta estrutura predominantemente cristalina, conforme pode ser observado na Figura 7, abaixo:

Figura 8 - Difratoograma da LCC



Fonte: Rodrigues et al (2016)

Distribuições granulométricas heterogêneas são favoráveis a pastas a base de cimento, dando maior estabilidade e preenchimento dos poros internos do material resultante. Materiais com partículas muito grossas produzem misturas de pasta cimentícia ásperas e não trabalháveis, enquanto partículas muito finas aumentam a demanda de água na mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Existem diversas manifestações patológicas em compósitos à base de cimento, entre elas o fenômeno da eflorescência, que representa o depósito de sais. Para que a eflorescência ocorra, são necessários três fatores (ocorrendo simultaneamente) água, gradiente hidráulico e sais solúveis. A água atravessa um corpo poroso, dissolve os sais presentes no interior e os transporta até a superfície, gerando esta manifestação. Nesses locais, pode ocorrer a evaporação da água e a consequente precipitação dos sais, que se depositam na forma de pó ou mancha na superfície do material (JUNGINGER; MEDEIROS, 2002).

A eflorescência apresenta duas formas, sendo uma solúvel, que é facilmente removida pela ação da água. A outra forma é insolúvel, com a presença de carbonato de cálcio, neste caso a manifestação deposita-se na forma de crosta brancas, necessitando tratamentos específicos para reparação do material, em alguns casos a única solução é a remoção do material contaminado (JUNGINGER; MEDEIROS, 2002).

Como na LCC o carbonato de cálcio é a substância química mais presente, o surgimento desta manifestação patológica, no caso a eflorescência, pode ser afetada, trazendo malefícios quanto a durabilidade da argamassa colante desenvolvida nesta dissertação.

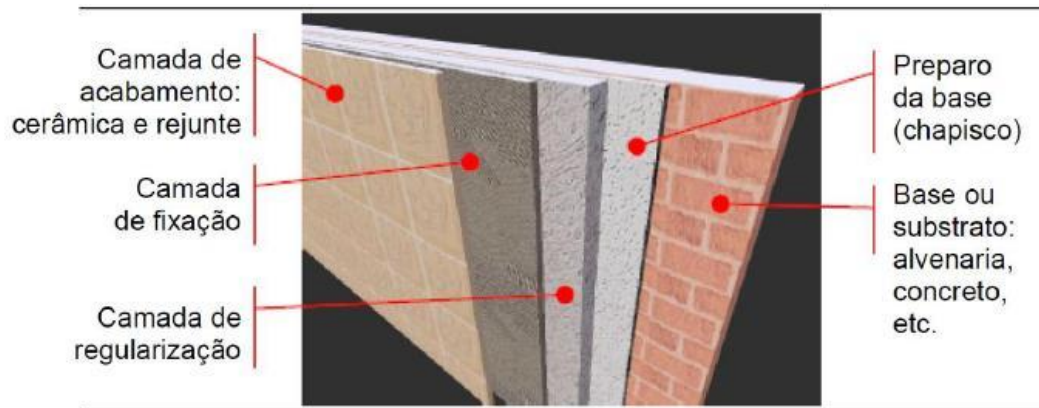
2.5 ARGAMASSA COLANTE

Segundo Fiorito (2010) a argamassa colante começou a ser desenvolvida pós-segunda guerra mundial nos Estados Unidos, com intuito de minimizar os serviços de instalação de revestimentos cerâmicos e oferecer um alto ganho de produtividade nestes processos. Este ganho de produtividade se fazia necessário uma vez que os processos tradicionais estavam ultrapassados, demandando serviços múltiplos e simultâneos, causando atrasos no desenvolvimento da obra.

O assentamento de placas cerâmicas sob substratos, é feito com auxílio de uma camada de argamassa colante, o que resulta na formação de duas interfaces, sendo elas: argamassa colante/ substrato e argamassa colante/ placa cerâmica. Devendo cada interface apresentar parâmetro de aderência adequado que garanta ao sistema o devido desempenho (COSTA, CINCOTTO, PILEGGI, 2005).

Segundo Junginger (2003) a estrutura de um sistema de revestimento é composta por cinco camadas, são elas: base/ substrato são as superfícies sobre as quais são aplicadas as camadas de revestimento, camada de preparo da base/ chapisco esta camada é responsável por fornecer maior área de aderência entre à camada de regularização e o substrato, camada de regularização tem como objetivo fornecer uma camada sem depressões e saliências indesejáveis para a aplicação do revestimento cerâmico, camada de fixação é a camada que tem como função manter de manter o revestimento cerâmico indiretamente aderido ao substrato, esta camada é composta pela argamassa colante, e por último tem-se a camada de revestimento cerâmico. Estas camadas podem ser visualizadas na Figura 9, abaixo:

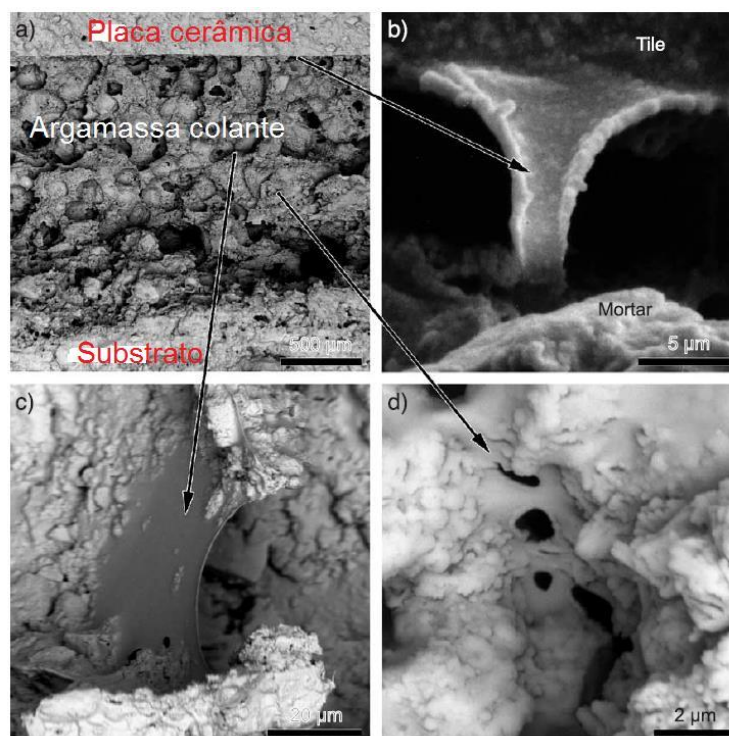
Figura 9 - Estrutura de sistema de revestimento



Fonte: Junginger (2003)

Em comparação com o concreto comum, a argamassa colante tem altas taxas de relação água/ cimento, cerca de 0,8, porém devido às suas altas relações superfície/ volume tendem a secar mais rápido. Como resultado disto o cimento tem um baixo grau de hidratação, menos de 30%, enquanto no concreto pode chegar à 90%, argamassas colantes geralmente tem um alto teor de ar incorporado, 25%, se comparado ao concreto comum por volta de 5% (JENNI et al, 2005).

Figura 10 – MEV sistema placa ceramica/ argamassa colante/ substrato



Fonte: Jenni et al (2005)

Para Ferrari et al (2011), a diferença entre uma argamassa colante e uma argamassa convencional deve-se aos aditivos em sua composição, afim de melhorar o desempenho adesivo deste material. Sendo os principais aditivos utilizados: os poliméricos de poliacetato de vinila-etileno (PVA) e ésteres de celulose (HEC ou MHEC). Os aditivos à base de PVA são para melhorar as características adesivas das argamassas colantes, enquanto os aditivos à base de ésteres de celulose são para melhorar a retenção de água do material, trazendo ganhos de trabalhabilidade.

Aditivos à base de ésteres de celulose em argamassas colantes, causam um aumento substancial na porosidade do material, devido ao aumento de ar incorporado. Os vazios representam cerca de 25% a 30% do volume total de uma argamassa colante, o índice de vazios é responsável pelo melhor desempenho da argamassa colante no estado fresco, de modo a facilitar a aplicação de placas cerâmicas na argamassa colante. No estado endurecido, o índice de vazios, influencia a ligação entre o substrato e a argamassa colante, principalmente na retração do material, sendo assim, a dosagem de uma argamassa colante deve ser feita de maneira apropriada para que a mesma não apresente perda de desempenho desproporcional (WYRZYKOWSKI et al, 2015).

Silva (2001) descreve que a presença de PVA na composição de pastas de cimento Portland causa um aumento na porosidade total do material, podendo este aumento chegar a 40%. Porém quando há a presença HEC, a adição PVA causa menores mudanças na porosidade total. Concluindo que a distribuição dos poros da pasta de cimento Portland depende da interação entre esses dois polímeros.

Segundo Dias et al (2016), a argamassa colante é principalmente empregada para a fixação de placas cerâmicas em substratos verticais e horizontais, e tem como exigência atender a dois tópicos de desempenho sendo eles, exposição durante a aplicação e as condições permanentes que é submetido durante a vida útil da placa cerâmica. Porém diante da larga utilização deste material para fixação de revestimentos cerâmicos, percebe-se o elevado consumo de materiais não renováveis em sua composição, tornando o desenvolvimento de novas tecnologias uma necessidade.

As argamassas colantes são definidas como um produto, composto por cimento Portland, agregado miúdo mineral e aditivos químicos, que quando adicionado água nesta composição seca, gera um material viscoso, plástico e

aderente, aplicado geralmente para assentamento de placas cerâmicas de revestimento. As argamassas colantes são distribuídas em 3 grupos, sendo eles: AC I, AC II e AC III. As argamassas colantes do tipo I, tem características de resistência às solicitações mecânicas e termo higrométricas, típicas de revestimentos internos. Já as argamassas do tipo II, tem características de adesividade que permitem adsorver os esforços existentes em revestimentos de pisos e paredes, internos e externos, sujeitos a exposição de variação termo higrométrica e/ou ação do vento. As argamassas do tipo III apresentam aderência superior se comparadas as do tipo I e II, normalmente são recomendadas para placas cerâmicas de dimensões maiores (ABNT, 2012).

A atual norma brasileira não prescreve a quantidade de água à ser utilizada na composição da argamassa colante, tão pouco um critério para a dosagem e escolha dos materiais, sendo os mesmo escolhidos e dosados conforme o fabricante, e comumente preparado com cimento Portland, agregado miúdo e aditivo polimérico (OLIVEIRA, 2016).

Oliveira (2015) determinou o teor de finos, ou seja, passante na peneira com abertura de 0,075 mm, para os tipos de argamassa colante industrializadas AC I, AC II e AC III pesquisadas em seu trabalho, de três diferentes fornecedores. Chegando à conclusão de que a AC I tem aproximadamente 14% de finos em sua composição, já a AC II tem aproximadamente 19% de finos, e a AC III tem aproximadamente 30% de finos em sua composição. Mostrando a tendência de maior quantidade de finos, conforme a necessidade de maiores resistências de aderência à tração da argamassa colante industrializada.

Sendo que para os tipos de argamassas colantes industrializadas, pesquisadas por Oliveira (2015), a maioria dos grãos ficam retidos na peneira #100, com abertura de 0,149 mm, com uma média de 60,56% da composição granulométrica destas argamassas colantes industrializadas ficando retida nesta peneira. A segunda maior parcela da granulometria dos grãos das argamassas colantes industrializadas do tipo AC I, ficam retiradas na peneira #50, com abertura de 0,297 mm, com média de 26,58%. Já para os tipos AC II e AC III, a segunda maior parcela da granulometria dos grãos são menores que 0,075 mm.

Para Maranhão, Loh e John (2011) o substrato com revestimento cerâmico é um sistema complexo, sendo que cada camada possui propriedades e características distintas, com ligações rígidas entre elas. Existem vários tipos de

agentes agressivos à estes sistemas, sendo estes sistemas mais afetados quando externos, o vento, sol, chuva, entre outros, são os principais agentes agressivos, para conseguir um bom desempenho destes sistemas, a argamassa colante é de suma importância, pois este material realiza a aderência entre o substrato e o revestimento cerâmico.

Em edificações altas com revestimento cerâmico, estes agentes agressivos são mais relevantes, seja pela maior dimensão das placas cerâmicas, ou a esbeltez da estrutura, fenômenos de fadiga, ou por pura negligência de atividades de manutenção da argamassa colante, afim de diminuir estas tensões e melhorar o desempenho deste material, novas argamassas colantes vem sendo desenvolvidas ultimamente (MARANHÃO; LOH; JOHN, 2011).

Beltran et al (2016) descrevem que existe uma escassez de literatura, ou seja, falta de informação sobre o comportamento mecânico de argamassas colante, contendo cinzas pesadas, ou subprodutos de outros setores industriais, em sua composição. Tornando o desenvolvimento de novas tecnologias nessa área uma necessidade para transformar um setor que tem como característica o alto consumo de matérias primas, mais amigável com o meio ambiente. Por isso, alguns pesquisadores vem investigando o desempenho de argamassas colante com diferentes aditivos/ substituições minerais e diferentes métodos de misturas.

Azevedo et al (2017) realizaram um estudo sobre a incorporação de resíduo de vidro, proveniente de estações de tratamento de esgotos, na argamassa colante, como substituição parcial do cimento e do agregado miúdo, eles descobriram que ao utilizar resíduos de vidro na composição da argamassa colante, o material tende a perder trabalhabilidade na sua aplicação. Winnefeld et al (2012) investigaram a durabilidade da argamassa colante sob várias condições de cura, eles observaram que os eventos de molhagem e secagem causaram manifestações patológicas, principalmente ao revestimento cerâmico, provocando microfissuras na borda dessas placas cerâmicas.

Almeida e Sichieri (2007) utilizaram sílica ativa na composição de uma argamassa colante com polímeros, a adição de sílica ativa causou uma diminuição dos vazios do material, resultando em um material mais resistente as tensões e mais resistente aos agentes agressivos. Modolo et al (2014) investigaram o potencial da cinza pesada de leitos fluidizados como alternativa para substituição parcial e total do agregado miúdo, nas proporções de 25%, 50% e 100% em massa, os resultados

deste estudo demonstraram que a substituição do agregado miúdo por cinzas pesadas levou a uma diminuição da demanda de água da argamassa colante, e também, conforme a substituição do agregado miúdo por cinza pesada aumenta, o material desenvolvido também adquire maior resistência de aderência.

A argamassa colante é um produto técnico, confeccionado através da mistura de cimento, areia, água e aditivos. Este produto deve assegurar a perfeita adesão entre revestimentos cerâmicos e o substrato no qual for aplicado, porém nos últimos anos com o crescimento da indústria de revestimentos cerâmicos, a confecção deste material vem se tornando desafiadora, pois cada vez mais as placas cerâmicas são maiores e mais densas, fazendo que cada vez mais o desempenho da argamassa colante esteja intimamente ligada as matérias primas utilizada em sua confecção (WETZEL et al, 2012).

As argamassas colantes à base de cimento Portland têm um sistema de aderência mecânica, onde a mesma em estado fresco tende a penetrar entre os poros do revestimento cerâmico e os poros do substrato, formando uma espécie de ancoragem entre o substrato e o revestimento cerâmico. Porém a baixa porosidade do revestimento cerâmico ou do substrato, causa problemas a este sistema, podendo levar ao deslocamento de placas cerâmicas ou até mesmo da argamassa colante (SILVA; PONTES; SILVA, 2016).

Este material tem a capacidade de aguentar bem as condições externas, como choque térmicos, devido as ações do intemperismo, caso aplicado de maneira errônea, este material após a secagem pode ocasionar manifestações patológicas, como rachaduras e expansões indesejadas formando fissuras. A argamassa colante submetida a temperaturas extremas ou em contato com o solo, também pode ocorrer a perda de desempenho (JENNI et al, 2006).

Uma desvantagem deste material é de que o mesmo precisa de um maior cuidado com a substrato, que não pode apresentar imperfeições de planicidade e nivelamento, já que a espessura de aplicação da argamassa colante é muito pequena, por isso este material demanda maior sensibilidade no assentamento do substrato, podendo causar uma diminuição da produtividade e na conclusão do substrato (PÓVOAS, 1999).

2.5.1 Tempo em aberto

Segundo Póvoas (1999) o tempo em aberto, é o tempo em que ocorre a perda de água da argamassa colante, seja por sucção da base, ou por evaporação ao ambiente. Essa perda de água ocorre imediatamente após a aplicação da argamassa colante no substrato, e causa a redução progressiva da resistência à aderência da argamassa colante.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a perda de água de um material à base de cimento Portland, apresenta resultados que afetam diretamente o processo de hidratação do cimento, que depende da quantidade disponível de água, e por consequência reduzem as propriedades mecânicas de um determinado material.

Conforme a ABNT (2012), o tempo em aberto representa o maior intervalo de tempo no qual uma placa cerâmica pode ser assentada sobre a argamassa colante. Porém segundo a ABNT (2017) existem dois tipos de tempo em aberto: o teórico e o real. Sendo o teórico descrito anteriormente. Já o tempo em aberto real, representa o tempo em aberto nas condições de obra da argamassa colante, onde este tempo pode ser inferior ao tempo em aberto teórico, já que o mesmo não leva em consideração as influências impostas pelas condições atmosféricas, principalmente pela umidade relativa do ar, vento e sucção do substrato de aplicação.

O tempo em aberto da argamassa colante está ligado também à perda de resistência de aderência à tração, pois segundo Póvoas (1999), o assentamento de placas cerâmicas após o período de tempo em aberto determinado, entram em contato com uma película que se forma na superfície da argamassa colante. Esta película é resultado da dessecação superficial causada pela sucção e evaporação da água da argamassa, e conseqüentemente causa a perda de aderência entre as interfaces da argamassa e da placa cerâmica.

Modolo et al (2014) reforça que para argamassas colantes o parâmetro mais importante é o tempo em aberto, pois ao final deste tempo surge uma película na superfície da argamassa colante, fazendo com que o conjunto argamassa colante mais placa cerâmica perca a aderência.

Em seu estudo, Póvoas (1999) determinou a influência dos aditivos HEC e PVA, quanto a formação desta película, O aditivo HEC se mostrou mais efetivo na retenção de água, quando comparado ao aditivo à base de PVA, pois o mesmo melhora a propriedade de retenção de água da argamassa colante, e

consequentemente retarda a dessecação superficial da argamassa colante em contato com o ambiente, assim retardando o surgimento desta película. O aditivo à base de PVA, como citado anteriormente, tem desempenho de retenção de água inferior ao aditivo à base de HEC, porém quando os dois aditivos agem em conjunto tendem a aumentar o desempenho de retenção de água da argamassa colante.

A combinação dos dois aditivos, HEC + PVA, resulta em uma argamassa de maior capacidade de retenção de água tanto por evaporação como por sucção do substrato, se comparado à argamassas colante com a utilização de somente um destes aditivos. Esta combinação também retarda o início e o final da dessecação superficial e aumenta significativamente o tempo em aberto da argamassa colante (PÓVOAS, 1999).

Póvoas, Pileggi, John (2005) mostraram que a velocidade de formação desta película, depende de fatores como, quantidade de água e da quantidade de polímeros adicionados na mistura da argamassa colante, além de condições climáticas, como vento, temperatura e umidade relativa do ar. Um tempo em aberto adequado faz com que o assentador de placas cerâmicas tenha o tempo necessário para realizar esta função, a argamassa com o tempo em aberto excedido deve ser descartada, pois suas propriedades estarão fragilizadas.

2.5.2 Resistência de aderência à tração

A aderência é a propriedade da argamassa de resistir às tensões atuantes na interface entre a argamassa e o substrato, portanto a aderência não é uma propriedade da argamassa em si, mas sim uma propriedade da interação do sistema argamassa/ substrato. Já a resistência de aderência à tração de um sistema argamassa/ substrato é a tensão máxima suportada por uma área limitada de revestimento, no caso o corpo-de-prova, na interface de avaliação quando submetido a um esforço normal de tração (ABNT, 2010).

A aderência entre a interface da placa cerâmica e a argamassa colante é de fundamental importância para a estabilidade global do sistema, sendo essa interface o resultado de vários fenômenos, físicos e químicos. A resistência interfacial é afetada por alguns fatores, entre eles, a absorção de água da placa cerâmica e do substrato, quantidade e composição do cimento, relação água/ cimento, entre outros fatores de menor relevância. O desempenho desta interface, não pode ser

influenciada somente por aspectos normativos, mas sim também por fatores que evoluem de acordo com o clima local, onde a retração, seja, química ou relacionada à secagem, é uma das principais manifestações patológicas apresentada por esses sistemas (PETIT et al, 2015).

A resistência de aderência à tração, assim como a extensão de aderência entre a argamassa e o substrato, são resultados da ancoragem mecânica da argamassa nas reentrâncias e saliências macroscópicas do substrato, sendo influenciadas pelas características da argamassa, do substrato e pela técnica de aplicação. Quando a argamassa entra em contato com o substrato, parte da água de amassamento que contem em dissolução os componentes do cimento penetra nos poros e cavidades do substrato, ocorrendo a precipitação de géis de silicatos. Este material precipitado irá, ao longo do tempo, proporcionar a ancoragem da argamassa ao substrato (KAZMIERCZAK; BREZEZINSKI; COLLATTO, 2007).

Segundo Kazmierczak, Brezezinski e Collatto (2007) a aderência está intimamente ligada à distribuição dos poros do substrato onde a argamassa é aplicada, pois a resistência a aderência é a razão entre a área de argamassa aplicada e a área total do substrato. Os poros tem função de grande influência na capacidade de absorção capilar de água do substrato, sendo os maiores poros responsáveis pela absorção de água do substrato, enquanto os menores são responsáveis pela retração e fluência.

Conforme Kazmierczak, Brezezinski e Collatto (2007), relataram em seu estudo, que a aplicação de chapisco altera a distribuição dos poros em uma argamassa, concluindo que além de aumentar a resistência de aderência à tração, também pode influenciar a durabilidade do revestimento, em função do comportamento do revestimento em frente a gradientes de temperatura.

A resistência à aderência como citado anteriormente, está ligado a área superficial de contato entre dois materiais, no caso entre a argamassa e o substrato, quando a porosidade do substrato for maior, maior será a resistência à aderência da argamassa, pois com um substrato de maior porosidade, também haverá maior área superficial para o contato entre argamassa e substrato (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Também segundo Carasek (1996), a aderência na interface substrato/ argamassa está ligada à um fenômeno mecânico, que é caracterizado basicamente pela transferência de água que ocorre entre estes dois materiais, possibilitando a entrada da pasta cimentícia nos poros do substrato, que ao hidratar, ou seja,

formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) nos poros, forma uma espécie ancoragem entre estes dois tipos de materiais.

A ligação entre a argamassa colante e o substrato, é o resultado de dois mecanismos, sendo eles, físico e químico. O mecanismo químico é baseado em forças covalentes que constituem a aderência entre a interface substrato/ argamassa colante, que é resultado dos produtos de hidratação do cimento. O mecanismo físico é resultado da ligação mecânica dos produtos de hidratação do cimento, com a área superficial do substrato. Sendo a contribuição do mecanismo físico muito maior, se comparada a contribuição do mecanismo químico, em muitos estudos, a contribuição do mecanismo químico, é desprezada (BOTAS; VEIGA; VELOSA, 2017).

Segundo Costa (2014), o mecanismo químico é responsável pela ancoragem em substratos lisos, resultantes das forças de atração moleculares entre as fases. Porém na prática, sabemos que nenhum substrato é perfeitamente plano, geralmente as superfícies são compostas de várias escalas de rugosidade, e afim de aumentar esta rugosidade fazemos uso de chapisco e outras técnicas, para melhorar o desempenho de argamassas.

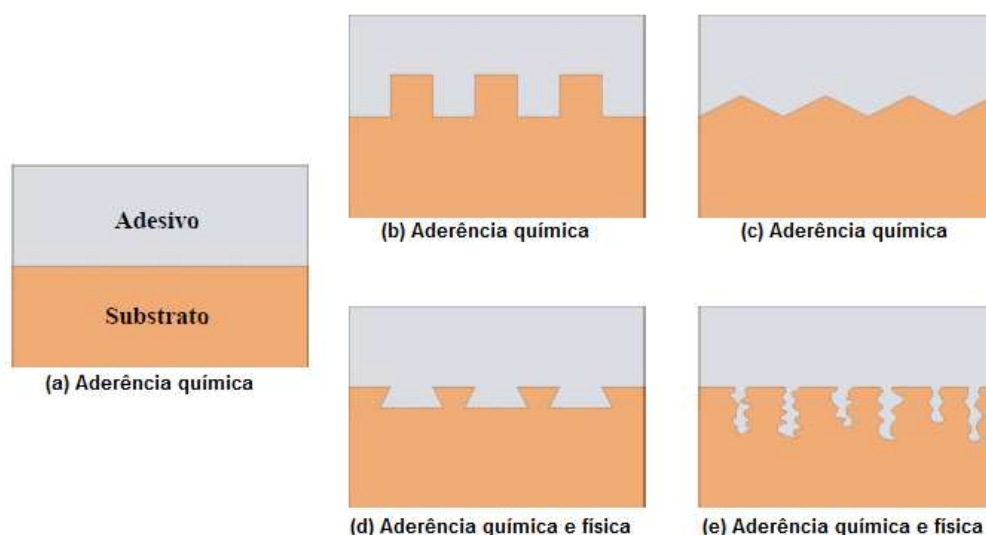
Atualmente, como os substratos empregados para a construção são menos porosos, principalmente avaliando argamassas colantes, que normalmente são aplicadas em cima de substratos revestidos com argamassa, neste tipo de substrato, o mecanismo químico é o principal responsável pela aderência, pois em um substrato com pouca porosidade a baixa absorção de água, não permite a entrada da argamassa colante que promove a ancoragem física (PEREIRA, SILVA, COSTA, 2013).

Segundo Moses (1949), a aderência é de natureza predominantemente química, resultante de forças de atração molecular entre as fases, ligações primárias – iônicas, covalentes e metálicas – e secundárias, formam forças intermoleculares denominadas de forças de Van Der Waals.

As forças intermoleculares na interface argamassa/ substrato, são responsáveis pela aderência entre as superfícies, sendo esta aderência influenciada pelas características superficiais do substrato, como rugosidade e porosidade, e pelas características reológicas e geométricas da argamassa empregada. As ligações primárias ocorrem se for utilizado polímeros como aditivos (COSTA, 2014),

como no caso de argamassas colantes, onde estes polímeros são empregados como aditivos em sua composição.

Figura 11 – Exemplos de mecanismos químicos e físicos de ancoragem



Fonte: Costa, 2014.

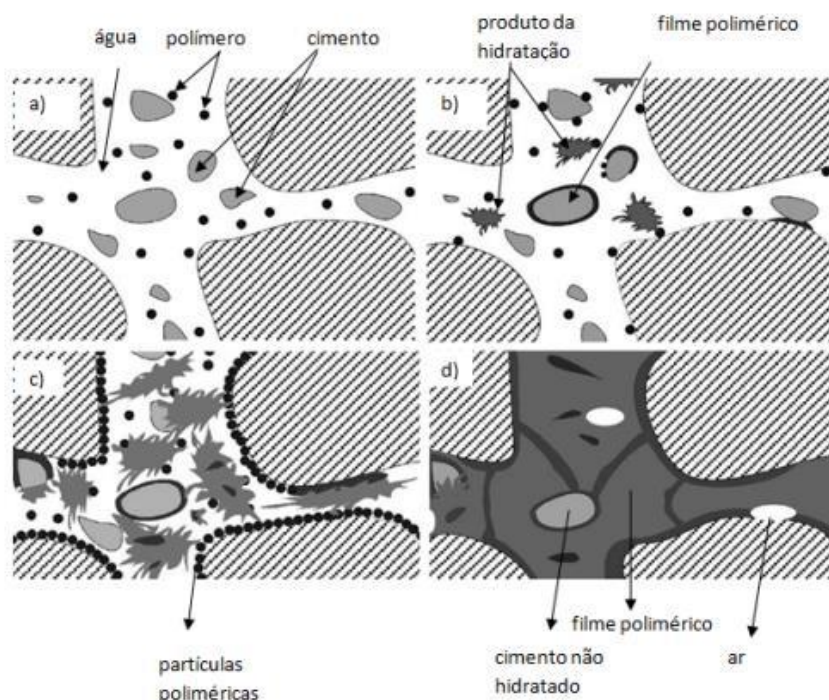
Segundo Winnefeld et al (2012), as condições climáticas, principalmente a umidade e a temperatura, aumentam a complexidade do sistema substrato/ argamassa colante/ placa cerâmica, porque eles variam durante o dia e em ciclos anuais. Portanto, segundo os autores, as condições locais causam umidade e gradientes de hidratação, que influenciam o comportamento do sistema no estado endurecido, que com expansões e retrações, pode ocasionar na micro fissuração da do sistema, levando conseqüentemente à uma perda de aderência.

A interface argamassa colante/ placa cerâmica, segundo Winnefeld et al (2012), é geralmente a parte mais fraca do sistema, durante a hidratação da argamassa colante podem ocorrer fenômenos físicos de secagem e molhagem, que também levam à uma diminuição da aderência e possíveis manifestações patológicas no sistema.

Segundo Carvalho (2012), após a realização da mistura, as partículas de cimento e as partículas do polímero (PVA) encontram-se dispersas na água, iniciando o processo de hidratação do cimento, provocando uma solução básica nos poros. As partículas do polímero começam a interagir com o agregado e o cimento, o polímero começa a criar um filme contínuo que envolve as partículas do cimento. Este filme polimérico é o principal contribuinte para o aumento das propriedades

elásticas e de resistência, também pode contribuir para a não hidratação completa do cimento.

Figura 12 – Reações provocadas pela adição de PVA



Fonte: Geemert et al, 2005 apud Carvalho, 2012

A norma europeia EN 1015-12: 2000 – *Methods of test for mortar for masonry – part 12*, descreve os procedimentos para a determinação da resistência de aderência à tração, de argamassas aplicadas em um substrato de alvenaria. De acordo com os autores Botas, Veiga e Velosa (2017), normalmente este ensaio é utilizado em argamassas à base de gesso, sendo este ensaio normativo muito agressivo para argamassas à base de cal, e tem como consequência, o uso desta norma para outros tipos de argamassas, a falta de confiabilidade nos resultados encontrados.

A norma europeia EN 12004: 2007 + A1: 2012 – *Adhesive for tiles - Requirements, evaluation of conformity, classification and designation*, aplica-se para argamassas colantes com propriedades físicas menos porosas, e químicas com a presença de sais solúveis, utilizadas em substratos, internos e externos. Tem como resistência de aderência à tração mínima especificada de $\geq 0,5$ MPa, conforme apresentado na Tabela 1.

A também norma europeia EN 1348: 2007 – *Adhesives for tiles – Determination of tensile adhesion strenght for cementitious adhesives*, define os procedimentos para a determinação da resistência de aderência à tração, os resultados são interpretados através da norma europeia EN 12004: 2007, em relação ao valor mínimo de resistência.

Os procedimentos de ensaio descrito pela Fe Pa36 – *Pull-out test* – define os ensaios realizados em Portugal, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Segundo Botas, Veiga e Velosa (2017), este documento apresenta procedimentos semelhantes aos da norma europeia EN 1015-12: 2000. Os procedimentos de ensaio descrito pela ETAG 004 – *Guideline dor European technical approval of external termal insulation composite system (ETICS) with rendering*, define os métodos e requisitos para a determinação da resistência de aderência à tração de argamassas colantes em substratos.

Os autores Botas, Veiga e Velosa (2017) fizeram uma compilação de algumas exigências de normas de argamassas, no quesito de resistência de aderência à tração, sendo apresentados na Tabela 1, abaixo:

Tabela 1 - Requisitos de normas

Norma/ método	Resistencia de aderência à tração (MPa)	Duração (dias)
EN 1015 – 12: 2000	Não há requisitos, depende da velocidade do carregamento	28
EN 12004: 2007 + A1: 2012	Requisito mínimo $\geq 0,5$	28
Fe Pa36	Sem limites	28
ETAG 004	Requisito mínimo $\geq 0,25$	28
NBR 14081-4: 2014	Requisito mínimo $\geq 0,5$	28
EN 1348: 2007	Refere-se à EN 12004: 2007 + A1: 2012	28

Fonte: adaptado BOTAS; VEIGA; VELOSA, 2017, p. 211

Conforme Póvoas, John e Cincotto (2002) a resistência de aderência à tração, é influenciada negativamente pela perda de água por evaporação, em seu estudo a argamassa colante foi aplicada sobre um substrato de vidro, para que não haja

perda de água por sucção. Os autores chegaram à conclusão que a perda de água por evaporação foi o principal responsável pela perda de resistência, indicando que 0,22% de perda de água por evaporação, corresponde à perda de 0,07 MPa da resistência de aderência à tração, ou, mais de 10% da resistência de aderência em seu estudo.

Em contrapartida, o aumento da relação a/c, causa um afastamento das partículas de cimento, dificultando a formação de C-S-H. Além disso, a água excedente da hidratação é expurgada do material, criando pontos de fragilidade susceptíveis à agentes agressivos exteriores (KUDO, CARDOSO, PILEGGI, 2013).

2.5.3 Absorção de água por capilaridade

A água é um dos principais agentes nocivos à durabilidade de argamassas em geral, pois suas moléculas são muito pequenas e, conseqüentemente, conseguem penetrar em poros extremamente finos, causando danos às pastas cimentícias. Assim, há necessidade de observância deste parâmetro. Portanto, confeccionar uma pasta cimentícia somente com materiais finos, e com baixa relação a/c (como diferentemente das argamassas colantes), torna o material mais resistente à esse agente de deterioração, aumentando a vida útil estimada do sistema em que é empregado. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para Winnefeld et al (2012), a questão chave do uso de revestimento está além do aspecto estético, mas sim em uma baixa absorção de água, tanto pela placa cerâmica como pela argamassa colante, a absorção de água dos materiais este intimamente ligada à durabilidade do sistema.

Para Pacheco (2016), o ensaio de absorção de água por capilaridade é importante para se determinar a taxa de absorção de água de um material, pois a mesma pode estimar de forma empírica a porosidade do material, sendo que o material com menor taxa de absorção de água por capilaridade, tende a ter maior durabilidade e menor porosidade. Portanto este parâmetro tem características de indicio do potencial da durabilidade do material.

Pereira (2017), realizou uma comparação entre a taxa de absorção de água por capilaridade pela resistência à compressão de compósitos cimentícios avançados, no caso, concreto de pós reativos. Concluindo que quanto maior a taxa de absorção de água por capilaridade, conseqüentemente menor será a resistência

à compressão do material. Mostrando que a absorção de água por capilaridade de um determinado material, está intimamente ligada à porosidade do mesmo.

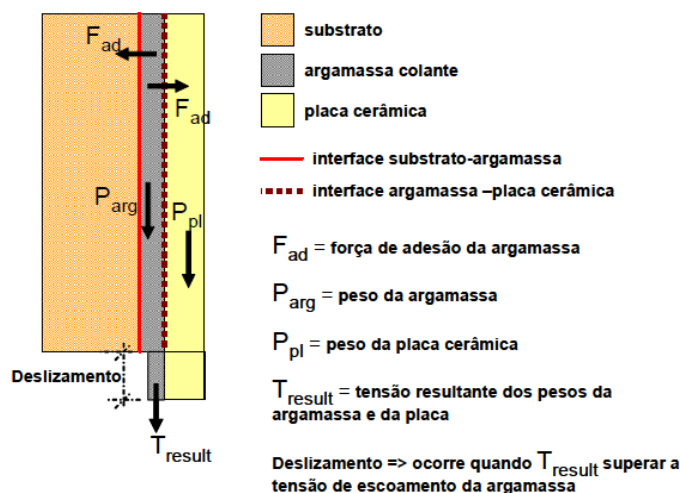
O teor de finos de um material está intimamente ligado à porosidade de compósito cimentício, materiais mais finos tendem à gerar compósitos menos porosos, enquanto materiais mais grossos tendem à gerar compósitos mais porosos. Um exemplo dessa maximização do empacotamento são os concretos de ultra alto desempenho, sua composição em maioria apresenta somente grãos com diâmetros inferiores à 75 μm , resultando em um material extremamente resistente e pouco poroso (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.5.4 Deslizamento

De acordo com a ABNT NBR 14081-1 (ABNT, 2012), o deslizamento em argamassas colante, é o deslocamento vertical de uma placa cerâmica, aplicada sob a argamassa ainda fresca, devido ao seu peso próprio.

O deslizamento, é o escorregamento da placa cerâmica devido ao deslizamento da argamassa colante. A capacidade da argamassa de resistir a este esforço é o resultado da sua capacidade de adesão e capacidade de suportar o peso próprio da placa cerâmica. O deslizamento da argamassa ocorrerá caso a sua tensão de escoamento for menor que a resultante dos pesos próprios da argamassa colante mais a placa cerâmica. O deslizamento máximo de uma argamassa colante é estabelecido por norma (COSTA; CINCOTTO; PILEGGI, 2007).

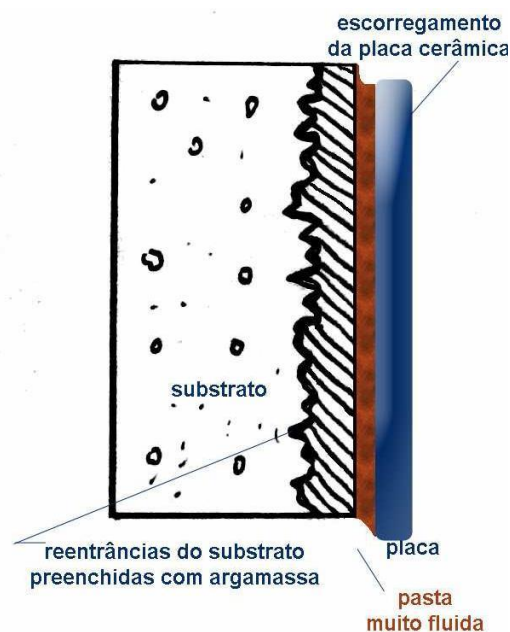
Figura 13 - Forças aplicadas no deslizamento da argamassa colante



Fonte: Costa, Cincotto, Pileggi, 2007.

Sendo a argamassa colante um material aplicado no estado fluido, a mesma em um estado muito fluido fará com que o revestimento cerâmico tenda à aumentar o deslizamento, ou seja, causando escorregamentos excessivos entre as interfaces. Podendo ocasionar algumas manifestações patológicas, como fissuras na superfície do revestimento cerâmico (COSTA; CINCOTTO; PILEGGI, 2007).

Figura 14 - Deslizamento do revestimento cerâmico



Fonte: Costa, Cincotto, Pileggi, 2007

O estudo realizado por Costa, Cincotto e Pileggi (2007), mostra que quanto maior a tensão de escoamento da argamassa colante no estado fresco, menor será o deslizamento da placa cerâmica. Porém segundo os autores, para um melhor entendimento do deslizamento em argamassas colante, é necessário maiores pesquisas sobre a reologia do material.

2.5.5 Preenchimento dos vazios

A utilização de materiais com granulometria mais fina, denominados de filler, em argamassas, resulta em um preenchimento dos vazios, principalmente os vazios do agregado miúdo, assim consequentemente aumentado a compacidade da argamassa. Porém o aumento da proporção de finos em uma argamassa caso não seja bem dimensionado, pode ocasionar em um aumento da relação água/ cimento,

pela maior superfície específica do filer em comparação com o agregado miúdo (HARBI; DERABLA; NAFA, 2017).

A compactidade pode ser definida como a seleção correta das proporções e de tamanhos de materiais, para que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, e por consequência os vazios menores sejam preenchidos por partículas ainda menores, e assim consequentemente. Tendo influência direta nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido (OLIVEIRA; BRITO; VEIGA, 2013).

De acordo com Oliveira, Brito e Veiga (2013), o efeito filer, basicamente é o preenchimento dos vazios existentes em um compósito cimentício qualquer, tornando este novo material mais compacto. A distribuição granulométrica e a forma do agregados utilizados, estão ligados a quantidade e dimensão dos vazios em uma argamassa, o que influencia diretamente o desempenho da argamassa.

A trabalhabilidade de uma argamassa, também depende da quantidade de grãos com dimensões inferiores à 0,075 mm. Esses grãos melhoram a coesão da argamassa, deste modo materiais com elevada superfície específica, melhoram a trabalhabilidade da argamassa (ESHIKAWA, 2003).

Gonçalves (2000) o agregado miúdo normalmente tem diâmetro médio entre 50 e 150 μm , e tem como característica preencher os vazios existentes pela descontinuidade do agregado graúdo. Por outro lado, o efeito filer, tem um diâmetro médio inferior à 50 μm , e tem como característica preencher os poros deixados pelos produtos de hidratação do cimento.

A utilização de filer de areia de britagem como adição em argamassas de revestimento, de acordo com Kazmierczak, Rosa e Arnold (2016), é uma alternativa para melhorar a trabalhabilidade deste material. A adição de finos quanto ao cimento resulta em uma menor necessidade de água de amassamento, maior resistência mecânica, menor exsudação, menor índice de vazios e menor absorção de água. Porém em contrapartida ocorre um aumento na densidade de massa da argamassa, e também um aumento na retração da mesma.

Segundo Sato, Galina e Teixeira (2018), LBRO em estado natural, utilizado após um processo de secagem, utilizada em seus estudos, apresenta características físicas e químicas de um material com poder de efeito filer. A caracterização química da LBRO, apontou para um material cristalino sílico-aluminoso, portanto com baixa possibilidade de atividade reativa, além da caracterização física mostrar que a LBRO

utilizada possui uma elevada área superficial específica, característica de materiais com poder de efeito filer, sendo a área superficial (método blaine) da LBRO estudada de 6179,3 cm²/g.

Gonçalves (2000) concluiu em seu estudo, sobre a utilização de resíduo do corte de granito como adição mineral em concretos, quanto à resistência à tração, os materiais com 10% de adição obtiveram um ganho de resistência à tração médio de 7,2%, enquanto os concretos com adição de 20% de resíduo do corte de granito obteve um decréscimo de resistência à tração médio de 5,8%. Gonçalves (2000) conclui que, o ganho de resistência à tração do material desenvolvido deve-se à distribuição das partículas, o refinamento dos poros (efeito filer), além da possível dispersão e aceleração da hidratação, comprovando assim o efeito filer da adição deste resíduo em concretos.

2.6 REOLOGIA DAS ARGAMASSAS COLANTES

De acordo com Glatthor e Schweizer (1994) a reologia de um material é a ciência que estuda o fluxo e a deformação do mesmo, avaliando parâmetros como: a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada, e a deformação em um determinado intervalo de tempo. Segundo Cardoso, Pileggi e John (2005) o comportamento reológico dos materiais é expressado pela relação entre o fluxo/deformação com as cargas aplicadas. Segundo Banfill (2005), independente da complexidade envolvida neste estado, o comportamento reológico dos materiais são normalmente descritos através de equações matemáticas entre a tensão aplicada (σ) e sua respectiva deformação (γ) ao longo do tempo (s).

Oliveira (2015) realizou um estudo sobre o comportamento reológico de argamassas colantes, e verificou que ainda é pouco discutido como as argamassas colantes são aplicadas fluidas. Enfatiza também que o desempenho reológico é de suma importância, tanto na aplicação como na formação dos cordões de aderência da argamassa colante na placa cerâmica. O entendimento deste assunto pode evitar problemas futuros, como deslocamentos no estado endurecido.

Para Schramm (2006) os sólidos ideais se deformam elasticamente, sendo que a energia aplicada para esta deformação pode ser recuperada quando o esforço aplicado é retirado. Por outro lado, os fluidos ideais, sejam eles líquidos ou gasosos, se deformam de uma maneira plástica, ou seja, de uma maneira que mesmo o

esforço aplicado sendo retirado a deformação será irreversível, e os mesmos fluíram, a energia aplicada para a deformação destes materiais é dissipada em forma de calor.

Porém materiais cimentícios não são sólidos ideais e nem fluidos ideais, são materiais que quando aplicados cargas de altas magnitudes podem causar deformações plásticas, e em magnitudes menores causa deformações elásticas, este tipo de material é denominado de sólidos reais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para Cardoso, Pileggi e John (2005) o comportamento de materiais com alta concentração de partículas, como as argamassas, faz com que as partículas passem a interagir mais intensamente, fazendo com que o comportamento reológico destes materiais saiam de um modelo linear, como o proposto por Newton, e entrem em um modelo não-linear, muito mais complexo, como pseudoplásticos, em que a viscosidade da suspensão diminui com o aumento da tensão de cisalhamento, e dilatante, em que é o aumento da viscosidade do sistema com a tensão de cisalhamento. Portanto materiais com comportamento não-lineares são aqueles que a tensão de cisalhamento não é proporcional à deformação, e sua viscosidade não é constante.

Em tese, as argamassas devem apresentar um comportamento pseudoplástico, ou seja, quando submetido à uma tensão, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada, pois facilitará o espalhamento, nivelamento e acabamento da mesma sobre um substrato, porém também deve apresentar uma considerável tensão de escoamento, para manter-se estável durante os processos mencionados. Contudo o comportamento ideal para uma argamassa é limitado, pois cada método de aplicação pode exigir diferentes características deste material (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

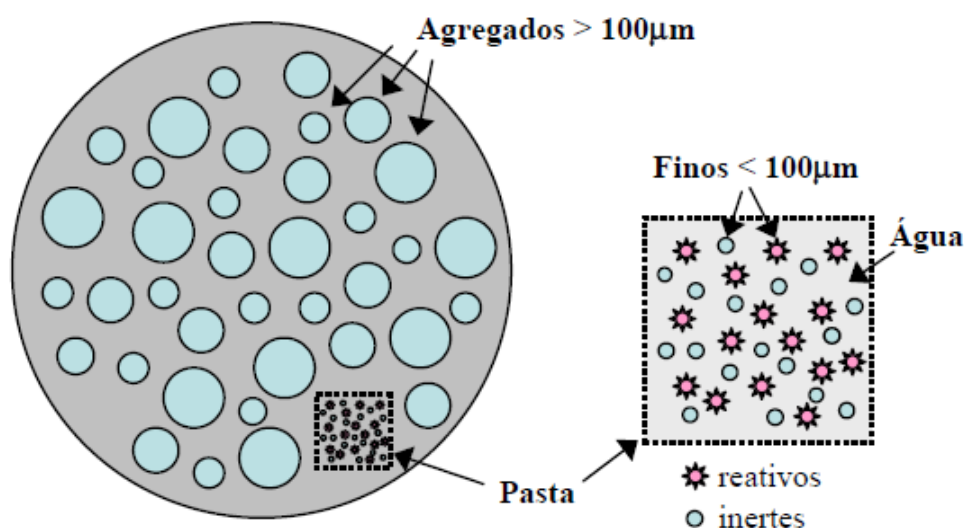
Segundo Costa (2006), a viscosidade é definida como a tendência de um líquido qualquer em resistir ao escoamento, como resultado da interação interna provocada pela tensão de cisalhamento. Também segundo o autor, quanto menor a viscosidade de um fluido, menor será a tensão de cisalhamento necessário para submete-lo a uma determinada taxa de cisalhamento.

As argamassas colantes são resultados da misturas de materiais finos, tendo partículas maiores e menores de acordo com o material utilizado, por isso podem ser denominadas como suspensões bifásicas concentradas compostas por uma fração

grossa inerte, no caso o agregado miúdo e uma fração fina, composta pela pasta cimentícia, que se trata de um material altamente reativo (AZEVEDO et al, 2017).

Segundo Cardoso, Pileggi e John (2005) a argamassa submetida à cisalhamento no estado fresco, a fração das partículas grosseiras é predominantemente submetida à fenômenos mássicos, como atrito e impacto, enquanto a fração fina, $<100\ \mu\text{m}$, é submetida à fenômenos de superfície e reações de hidratação, principalmente pelas reações entre a água e o cimento, porém entre os finos ainda existem partículas que são inertes em contato com a água.

Figura 15 - Macro e microestrutura de uma argamassa



Fonte: Cardoso, Pileggi e John (2005)

No estado fresco, a argamassa submetida à tensões de cisalhamento, a fração grossa inerte é basicamente submetida à fenômenos de atrito e impacto, enquanto a fração fina e reativa é submetida à fenômenos de superfície e reações de hidratação. Devido ao fenômeno de hidratação do cimento com a água, as argamassas passam do estado fluido para o sólido elástico, durante este período o comportamento reológico da argamassa se modifica em função dos diversos fenômenos que ocorrem (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

Cappellari, Daubresse e Chaouche (2013) mostraram que, a viscoelasticidade de uma argamassa está ligada ao tipo de aditivo utilizado em sua composição, aditivos usualmente utilizados em argamassas colantes, principalmente aditivos à base de ésteres de celulose, diminuem a viscosidade do material, indicando que este tipo de aditivo altera a distribuição dos poros do material. Por outro lado, os

aditivos à base de ésteres de celulose, por serem incorporadores de ar nas misturas, causam uma retenção de água maior para o material, causando modificações no tempo em aberto da argamassa colante.

A aplicação de argamassa colante ocorre no estado fresco, ou seja, anterior ao início da pega do cimento, as características que este material apresenta neste estado, exercem grandes influencias no estado endurecido (COSTA, CINCOTTO, PILEGGI, 2005).

Sato, Galina e Teixeira (2018), realizaram em seu estudo a utilização de LBRO como adição mineral em pastas de cimento. Obtendo resultados que apontam para quanto maior for esta adição de LBRO na composição maior será a tensão de cisalhamento da pasta, por causa da maior quantidade de sólidos em relação aos líquidos da composição, trazendo consigo uma menor trabalhabilidade deste material. Também mostraram que a tensão de cisalhamento está intimamente ligada à relação água/ cimento utilizada na composição de pastas de cimento, concluindo que quanto maior está relação, menor será a tensão de cisalhamento do material.

A viscosidade, na reologia de argamassas, é relacionada com a facilidade de escoamento do fluido, determinando a trabalhabilidade de seu espalhamento, e a sua penetração nas rugosidades do substrato. A argamassa colante também deve desenvolver tensão de escoamento suficiente para suportar o peso da placa cerâmica e seu peso próprio, sem deslizamentos excessivos (OLIVEIRA et al, 2000).

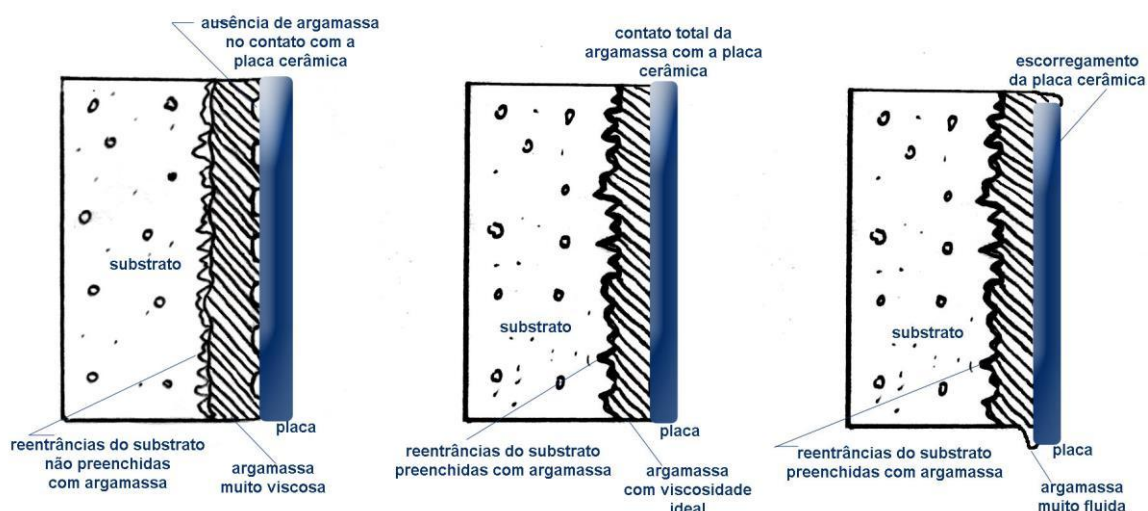
A aderência de uma argamassa colante, tanto na interface argamassa colante/ substrato, como na interface argamassa colante/ placa cerâmica, está intimamente ligada à extensão de aderência entre essas interfaces. Esta extensão de aderência é influenciada pelas características reológicas deste material, como a viscosidade e a tensão de escoamento. Uma argamassa colante muito viscosa, faz com que as reentrâncias do substrato não sejam corretamente preenchidas por este material, assim como resulta em uma ausência de contato entre a argamassa colante e a placa cerâmica, que tem como consequência uma diminuição significativa da aderência entre as interfaces. Assim como uma argamassa colante com tensão de escoamento baixo, causa deslizamentos indesejados (COSTA, CINCOTTO, PILEGGI, 2005).

De acordo com Cardoso, Pileggi e John (2005), uns dos métodos existentes para a caracterização reológica de uma argamassa, é o ensaio de mesa de consistência (*flow-table*). Este ensaio consiste em determinar o espalhamento da

argamassa moldada em um cone padrão, após sucessivos golpes e frequências pré-determinados. Este ensaio apresenta a vantagem de ser dinâmico e de fácil execução, também considera em seus resultados a viscosidade do sistema e não somente a tensão de escoamento, como geralmente é utilizado. Porém em contrapartida os resultados obtidos neste ensaio não dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), além de não serem apresentados em unidades reológicas fundamentais.

Cardoso, Pileggi e John (2005), concluem em seu estudo, que a caracterização reológica de argamassas, pelo ensaio de *squeeze-flow* mostra-se bastante sensível e versátil, sendo o ensaio capaz de detectar pequenas alterações nas características reológicas do material. E ao contrário de ensaios tradicionais, fornece um perfil de comportamento de acordo com as solicitações impostas, sendo um ensaio mais robusto para a caracterização reológica de argamassas.

Figura 16 – Aderência x reologia da argamassa colante



Fonte: COSTA, CINCOTTO, PILEGGI, 2005

Oliveira (2015), realizou ensaios para a determinação do tempo de consolidação de argamassas colante através de métodos reológicos, no caso pelo método do *squeeze-flow*. Observando que, no tempo de 180 minutos após a mistura do material, houve uma alteração no perfil reológico da argamassa colante. A partir deste tempo, as argamassas colantes sofreram perdas em suas características reológicas, o que causa dificuldades na aplicação de argamassas colante em substratos, e possivelmente na aplicação de placas cerâmicas.

2.7 CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O calor de hidratação de um compósito cimentício qualquer, é o resultado da interação química entre o cimento e a água, este fenômeno ocorre algumas horas após estes dois materiais entrarem em contato. Mehta e Monteiro (2014) definem o calor de hidratação, como a liberação de energia em decorrência da reação exotérmica, que ocorrem em uma pasta de cimento. Também definem que quanto maior a massa de pasta de cimento, maior será o calor de hidratação deste material, este calor liberado pela mistura, pode ser dissipado na atmosfera ou absorvido pela própria massa da pasta.

Neville (2015) cita que a adição de materiais inertes, ou seja, materiais que não entram em reação química com a água, em compósito cimentícios, fará com que a temperatura máxima do calor de hidratação, tenda a diminuir. No caso de uma argamassa, o material inerte comumente utilizado, é o agregado miúdo, no caso a areia natural.

As matérias primas utilizadas para a produção de cimento são: calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Esses compostos químicos simples, ao passarem pelo processo de queima, se combinam e se transformam em compostos mais complexos e se alcança um estado de equilíbrio químico (NEVILLE, 2015). Quatro compostos se destacam como principais constituintes químicos do cimento Portland, conforme Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Principais constituintes químicos do cimento

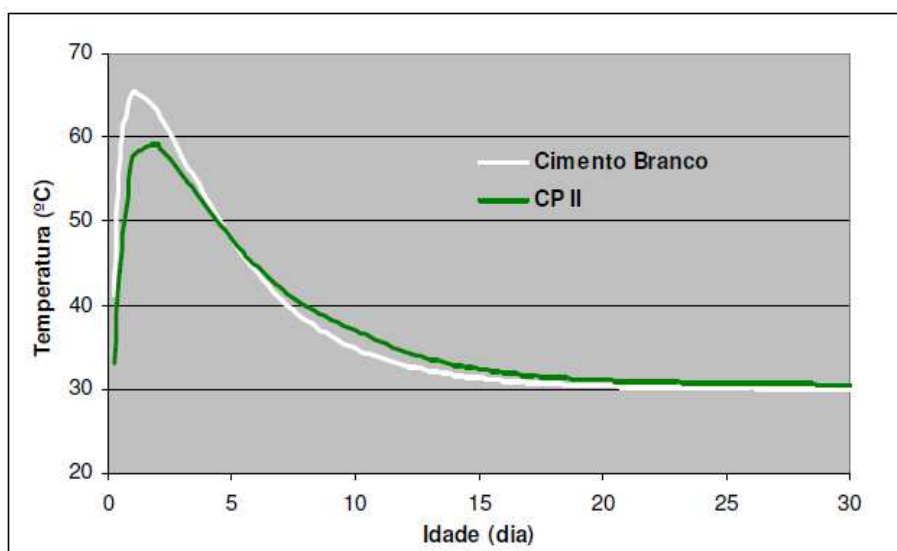
Nome do Composto	Composição em Óxidos	Abreviação
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville (2015)

Os silicatos C_3S e C_2S são responsáveis pela resistência mecânica da pasta de cimento hidratada, sendo o C_3S o principal responsável pela resistência nos primeiros dias de idade, e também responsável pela temperatura de calor de hidratação, já que está obtém a temperatura máxima nos primeiros dias de idade. Já

o silicato C_2S é responsável pela resistência da pasta hidratada nas idades mais avançadas, pois tem uma hidratação mais lenta se comparada a do C_3S (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 17 – Temperatura de calor de hidratação do cimento em função do tempo



Fonte: GAMBALE; BITTENCOURT, 2008

A fase silicato de cálcio hidratado (C-S-H), representa de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada, e fornece a maioria da resistência e durabilidade deste material. Embora a estrutura exata do C-S-H não seja conhecida, vários modelos têm sido propostos para explicar as propriedades dos materiais. Entre eles, o modelo de *Powers-Brunauer*, afirmando que essa fase tem uma estrutura em camadas com uma elevada área superficial, na ordem de 100 – 700 m²/g, sendo a resistência do material atribuída, principalmente, às forças de van der Waals (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

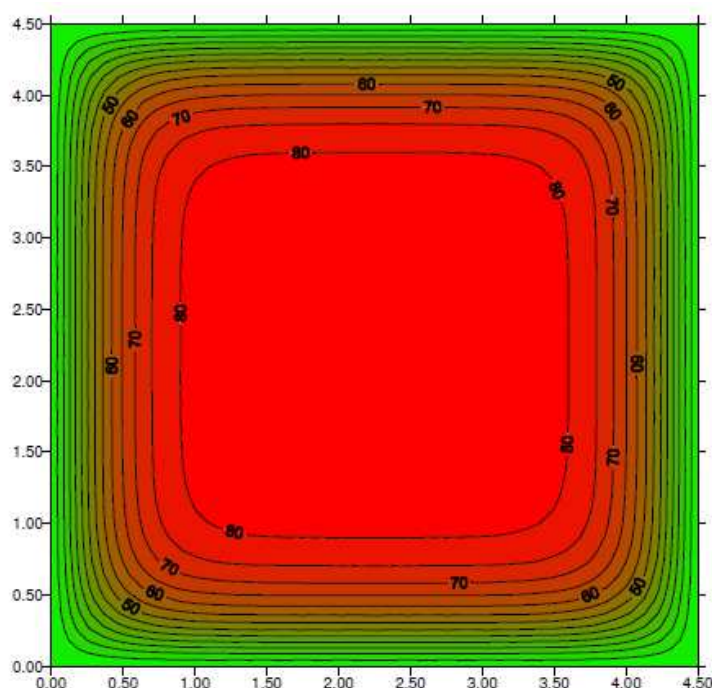
Os cristais de hidróxido de cálcio (CH ou portlandita), constituem 20 – 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, este composto tende a causar a formação de grandes cristais, com morfologia prismática hexagonal distinta, se comparado ao C-S-H, a potencial contribuição à resistência mecânica do CH é limitada devido à área superficial consideravelmente menor. Os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume total de sólidos da pasta de cimento hidratada, este composto possui apenas um papel secundário nas relações de microestrutura, não contribuindo para a resistência mecânica do material. Também

são responsáveis pela formação de etringita, que forma cristais prismáticos na forma ecicular (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Gambale et al (2009), a temperatura máxima referente ao calor de hidratação, depende entre outros fatores, da quantidade de cimento empregada no material. Portanto traços mais ricos em cimento, ou seja, traço com maior quantidade de cimento, acarretará em uma temperatura máxima mais elevada. Também segundo seu estudo as maiores temperaturas estão concentradas no centro da peça, seja ela de concreto, ou qualquer compósito cimentício. Assim que as reações internas de hidratação do cimento acabam, a peça tende a estabilizar sua temperatura com a do ambiente.

As temperaturas apresentadas em uma peça de concreto, podem alcançar 80° C, conforme identificado por Gambale et al (2009).

Figura 18 – Temperaturas de calor de hidratação



Fonte: GAMBALE et al, 2009

Devido as elevadas temperaturas atingidas durante a hidratação do cimento, e consequente queda de temperatura da peça, existe a possibilidade de causar uma retração do material, possibilitando o surgimento de fissuras na superfície do material. Essas fissuras são responsáveis pela entrada de agentes agressivos ao

compósito cimentício, diminuindo seriamente a durabilidade do material desenvolvido (CARNEIRO; GIL; NETO, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) ao ser adicionado um material à composição de compósitos cimentícios, deve se ter o cuidado com os componentes químicos deste material, principalmente com o zinco, que segundo os autores é um agente que interage diretamente com o calor de hidratação e o tempo de pega do compósito cimentício.

Vargas, Masuero, Vilela (2004), adicionaram um material que contém em sua composição zinco em seu estudo, com ordem de grandeza de aproximadamente 13%, sendo este material o pó de aciaria elétrica, nas proporções de 5%, 15% e 25%, em relação à massa de cimento, além do traço referência. O traço com 5% de adição, apresentou uma temperatura máxima de hidratação de 66° C, na idade de 24 horas. O traço com 15% de adição, apresentou uma temperatura máxima de hidratação de 60° C, na idade de 58 horas. O traço com 25% de adição, apresentou uma temperatura máxima de hidratação de 45° C, na idade de 77 horas. Já o traço referência, apresentou uma temperatura máxima de hidratação de 78° C, na idade de 12 horas. Mostrando como uma simples adição de um material pode causar profundas alterações quanto a suas propriedades básicas. Porém a LBRO e a LC não apresentam zinco em suas composições, de forma consistente, tendendo à não apresentar essas variações em seus resultados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A LBRO foi gentilmente cedida, pela empresa Ranzan Mármore e Granitos, da cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul. Enquanto a LC foi cedida pelo Núcleo de Caracterização de Materiais – NucMat, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

O cimento empregado para a confecção da argamassa colante, foi do tipo CP IV - 32, dada a sua disponibilidade no atual mercado. A argamassa colante desenvolvida durante a pesquisa foi do tipo AC II.

O traço utilizado para a confecção da argamassa colante foi 1:2 (cimento: agregado miúdo, em massa). O teor de aditivo utilizado variou de acordo com a recomendação do fabricante, ficando em 0,4% de MHEC e 5% para PVA, com uma relação água/ aglomerante (a/a) de 1, resultando em um teor de água igual à 33,33%.

A LBRO e a LCC, passaram por uma caracterização físico-química, sendo os ensaios realizados: granulometria à laser, granulometria por via seca, ensaio de área superficial específica (BET), análise térmica, picnometria à gás, difração por raios-x e fluorescência de raios-x.

Os teores de substituição foram de 5% e 10% sobre os finos do agregado miúdo, ou seja, pelo material passante pela peneira *Mesch* #100, com abertura de 0,149 mm ou 149 μ m. Sendo o retido nesta mesma peneira, inalterado.

A argamassa colante desenvolvida, foi testada por diversos ensaios tanto no estado fresco como no estado endurecido, sendo os métodos descritos pelas respectivas normas brasileiras. Para o estado fresco serão realizados os seguintes ensaios: ensaio de determinação do tempo em aberto, de acordo com a ABNT NBR 14081-3: 2012, ensaio de determinação do deslizamento, de acordo com a ABNT NBR 14081-5: 2012, além da caracterização reológica da argamassa colante, através da medição do índice de consistência.

Para o estado endurecido foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de determinação da resistência de aderência à tração, de acordo com a norma ABNT NBR 14081-4: 2012, ensaio de determinação do tempo em aberto, segundo os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 14081-3: 2012, além do ensaio da absorção de água por capilaridade, descritos pelo método da RILEM TC 116 PCD.

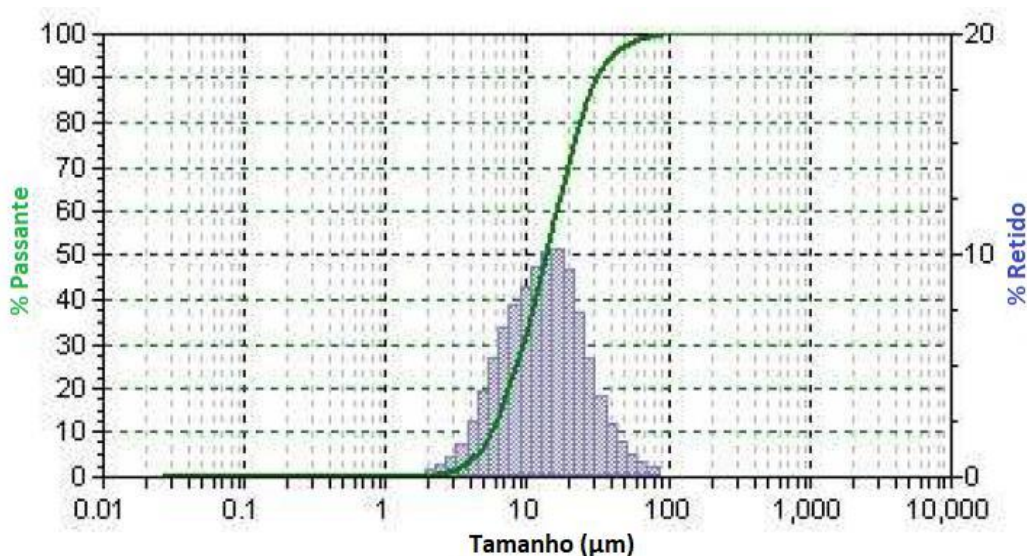
3.1 MATERIAIS

Serão empregados nesta pesquisa, materiais de uso cotidiano na confecção de argamassa colante, além de LBRO e LCC, em substituições parciais ao agregado miúdo.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP IV - 32. O cimento foi caracterizado no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat, a partir do ensaio de granulometria à laser e picnometria à gás, para determinar a curva granulométrica do material, o resultado está apresentado na Figura 19, abaixo:

Figura 19 – Distribuição granulométrica do cimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo o diâmetro médio do cimento CP IV - 32 de 15,33 μm , Além dos diâmetros característicos, D10, D50 e D90, conforme Tabela 3, abaixo:

Tabela 3 - Diâmetros característicos do cimento D10, D50 e D90

Material	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Cimento	5,58	13,64	30,84

Fonte: Elaborado pelo autor

A massa específica do cimento CP IV - 32 utilizado nesta pesquisa, foi determinada com o ensaio de picnometria à gás, utilizando o gás Hélio, e apresentou a massa específica de 2,75 g/cm³.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo desta pesquisa, foi caracterizado no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat, onde foram realizados os ensaios: de granulometria à laser, para determinar a curva granulométrica do material, picnometria de gás, para determinar a densidade do material, além do ensaio de área superficial específica (BET).

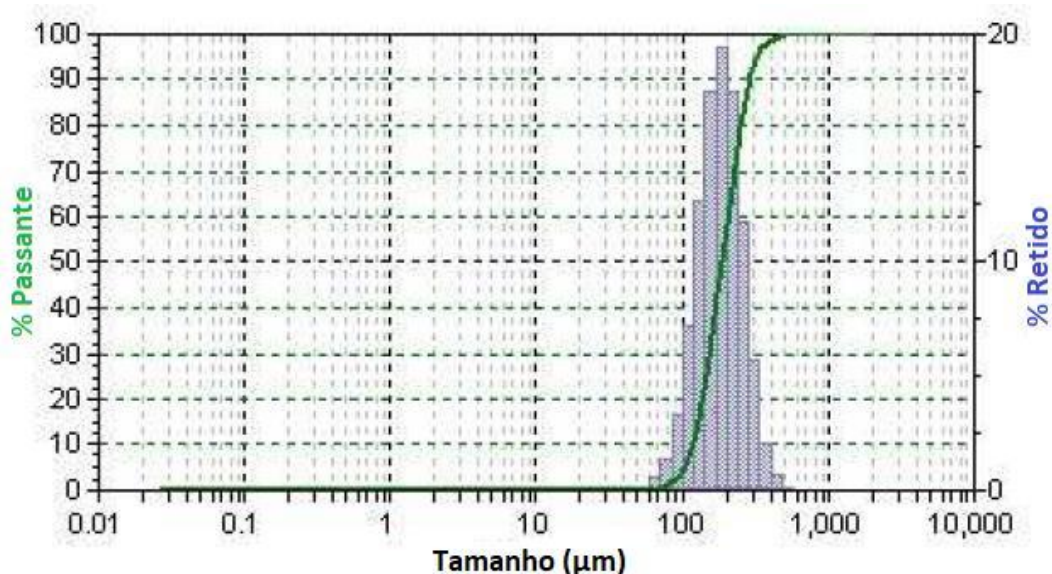
3.1.2.1 Peneiramento do agregado miúdo

Primeiramente o agregado miúdo passou por um processo de peneiramento e divisão dos grãos, onde a peneira referência foi a *Mesch* #100, com abertura de 0,149 mm ou 149 µm. A substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LC, ocorreu no percentual passante de 35,26%, nas proporções de 5% e 10%. As proporções de substituição foram mais baixas para minimizar os impactos na água de amassamento da argamassa colante.

3.1.2.2 Granulometria à laser do agregado miúdo

O agregado miúdo empregado nesta pesquisa, passou pelo ensaio de granulometria à laser, para análise da curva granulométrica do material. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat, sendo o resultado apresentado, na Figura 20, abaixo:

Figura 20 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo o diâmetro médio do agregado miúdo de 194 μm , Além dos diâmetros característicos, D10, D50 e D90, e uma comparação entre os materiais utilizados, conforme Tabela 4, abaixo:

Tabela 4 – Comparação entre os diâmetros característicos

Material	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Cimento	5,58	13,64	30,84
Agregado Miúdo	118,30	187,90	288,60
LBRO	5,68	27,59	92,26
LCC	8,41	20,47	43,96

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme pode ser observado na Tabela 4, o agregado miúdo apresenta os maiores grãos, se comparado aos demais materiais. Sendo a LBRO e LCC, materiais mais finos, se comparados ao agregado miúdo utilizado, reforçando Modolo et al (2014), Uliana (2014), Damineli et al (2017).

3.1.2.3 Granulometria por via seca do agregado miúdo

Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção (LMC), na UNISINOS. Primeiramente o agregado miúdo passou por um processo de secagem

em estufa com temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$, após à secagem de 48 horas, apresentou uma umidade de 5,52%.

O processo de peneiramento foi realizado com auxílio de um agitador de peneiras, da fabricante Solotest. Para este ensaio foram utilizadas as peneiras de *Mesch* #4", #10, #16, #30, #60, #100, #200, além do fundo para armazenar o material passante pela peneira de *Mesch* #200. Chegando aos seguintes resultados apresentados na Tabela 5 abaixo:

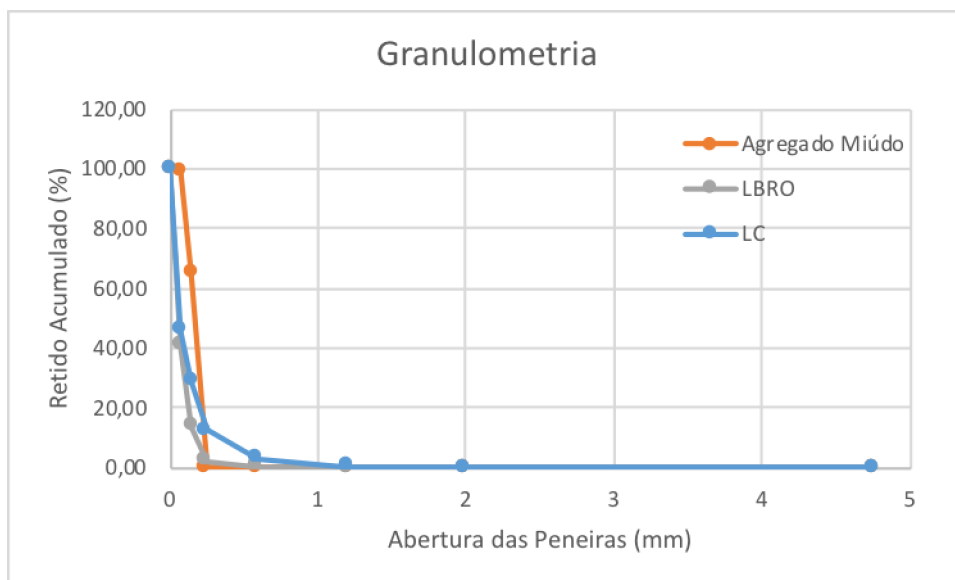
Tabela 5 - Granulometria por via seca agregado miúdo

Peneira (<i>Mesch</i>)	Abertura da Peneira (mm)	Retido na Peneira (g)	Retido na Peneira (%)	Retido Acumulado (%)
4	4.76	0	0	0
10	2	0	0	0
16	1.19	0	0	0.04
30	0.59	0	0	0.13
60	0.25	0.3	0.06	24.09
100	0.149	323.4	64.68	79.45
200	0.074	173.5	34.70	99.72
<200 (FUNDO)	<0.074	2.8	0.56	100
TOTAL		500	100	

Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo os resultados apresentados na Figura 21, Juntamente com uma comparação entre os materiais (agregado miúdo, LBRO e LCC):

Figura 21 – Comparação granulometria entre agregado miúdo, LBRO e LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 21, os materiais LBRO e LCC possuem uma granulometria mais fina, se comparados com o agregado miúdo. Fato este que pode ser evidenciado na revisão bibliográfica pelos autores Modolo et al (2014), Uliana (2014), Rodrigues et al (2016) e Damineli et al (2017).

3.1.2.4 Massa específica do agregado miúdo

A massa específica do agregado miúdo utilizado nesta pesquisa, foi determinada com o ensaio de picnometria à gás, utilizando o gás Hélio, e apresentou o resultado de 2,62 g/cm³. Valor este próximo dos valores encontrados por Damineli et al (2017), em quatro ensaios realizados, os resultados encontrados foram os seguintes: 2,62 g/cm³, 2,64 g/cm³, 2,64 g/cm³ e 2,77 g/cm³.

3.1.2.5 Área superficial específica (BET) do agregado miúdo

O método de BET, desenvolvido por Brunauer-Emmett-Teller, permite determinar a área superficial específica das amostras através da verificação do volume e distribuição do tamanho dos poros por adsorção de nitrogênio. Foram analisados 20 pontos por adsorção em cada amostra. O ensaio foi realizado no equipamento da marca Micromeritics, modelo TriStar II Plus, sendo as amostras previamente preparadas através de secagem em estufa a 105 ± 5° C. Ambos

procedimentos ocorreram no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat.

O resultado do ensaio de área superficial específica (BET), apontaram um resultado de 1,02 m²/g, ou seja um material mais fino, que os três tipos de agregado miúdo utilizados na pesquisa de Damineli et al (2017), onde os resultados foram de 0.21, 0.34 e 0.24 m²/g.

3.1.3 Aditivos

3.1.3.1 Aditivo polimérico

O aditivo polimérico utilizado foi o VINNAPAS 4023, à base de acetato de vinil e etileno. O aditivo foi gentilmente doado pelo Grupo Saint-Gobain de Portugal.

3.1.3.2 Aditivo à base de éter de celulose

O aditivo à base de éter de celulose usado foi o W20000. O aditivo foi gentilmente doado pelo Grupo Saint-Gobain de Portugal.

3.1.4 Lama do beneficiamento de rochas ornamentais

A LBRO empregada nesta pesquisa, foi fornecida pela empresa Ranzan Mármore e Granitos, da cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul. Os ensaios que foram realizados na LBRO, estão listados abaixo da Tabela 6, juntamente com o local de realização:

Tabela 6 - Ensaio para caracterização físico-química da LBRO

Norma/ método	Parâmetro	Local
Granulometria por via úmida (laser)	Determinação da curva granulométrica do material	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Granulometria por via seca	Determinação da curva granulométrica do material	Laboratório de materiais de construção - LMC

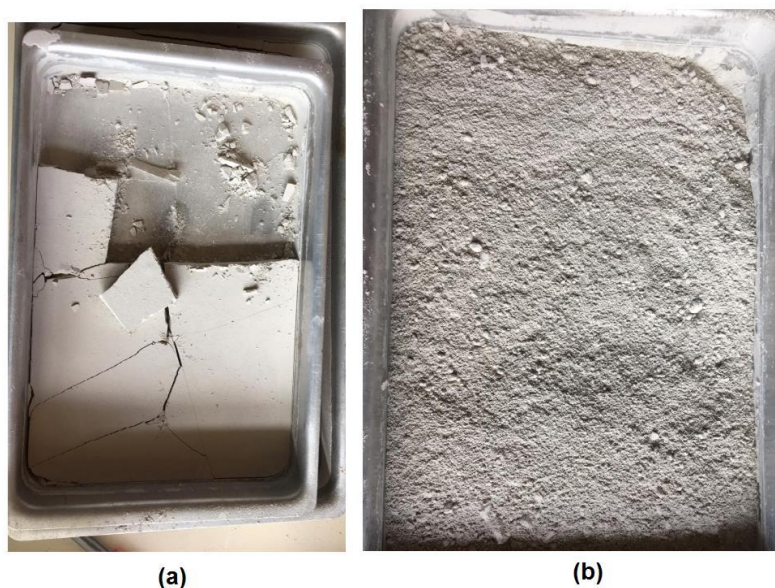
Ensaio de área superficial específica (BET)	Determinação da área específica do material	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Análise térmica	Determinar a variação de massa	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Picnometria à gás	Determinação da densidade do material	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Difração por raios - X	Determinar a estrutura das fases cristalinas/ amorfas do material	CICECO/Universidade de Aveiro
Fluorescência de raios – X, quantitativo (FRX)	Determinar a composição química do material	CICECO/Universidade de Aveiro

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4.1 Secagem da lama de beneficiamento de rochas ornamentais

Primeiramente a LBRO foi disposta em bandejas de alumínio, com aproximadamente 1,5 cm de altura, conforme Figura 22, após deixada para secar em temperatura ambiente, secagem esta que pode variar de 10 à 15 dias, dependendo das condições climáticas neste período. Após a LBRO seca, a mesma passa por um processo de moagem manual com auxílio de espátulas, para fazer a separação dos grãos.

Figura 22 - LBRO seca (a) e moída (b)

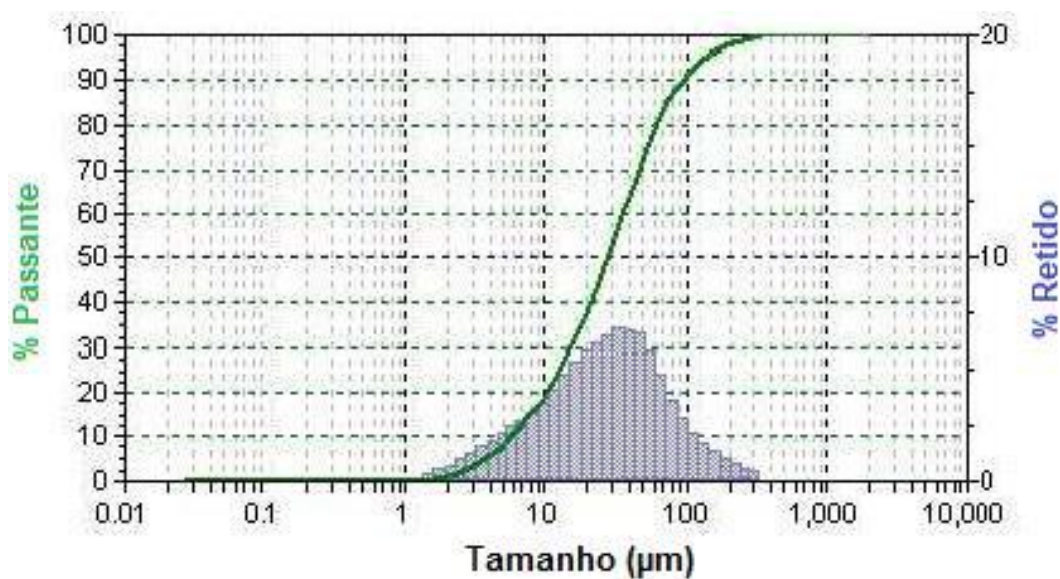


Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4.2 Granulometria à laser da LBRO

A LBRO empregada nesta pesquisa, passou pelo ensaio de granulometria à laser, para posterior análise da curva granulométrica deste material. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat, sendo o resultado apresentado, na Figura 23, abaixo.

Figura 23 - Distribuição granulométrica da LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo o diâmetro médio da LBRO de 35,24 μm , de acordo Gonçalves (2000), a LBRO utilizada neste programa experimental é considerada filer. A Tabela 7, abaixo apresenta os diâmetros característicos D10, D50 e D90:

Tabela 7 - Diâmetros característicos da LBRO D10, D50 e D90

Material	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
LBRO	5,68	27,59	92,26

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4.3 Granulometria por via seca da LBRO

Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção (LMC), na UNISINOS. Primeiramente a LBRO passou por um processo de secagem em estufa com temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$, com uma massa inicial de 300g, após à secagem de 48 horas, apresentou a massa final de 298,88g, resultando em uma umidade de 0,37%.

O processo de peneiramento foi realizado com auxílio de um agitador de peneiras, da fabricante Solotest. Para este ensaio foram utilizadas as peneiras de *Mesch* #4", #10, #16, #30, #60, #100, #200, além do fundo para armazenar o material passante pela peneira de *Mesch* #200. Chegando aos seguintes resultados apresentados na Tabela 8 abaixo:

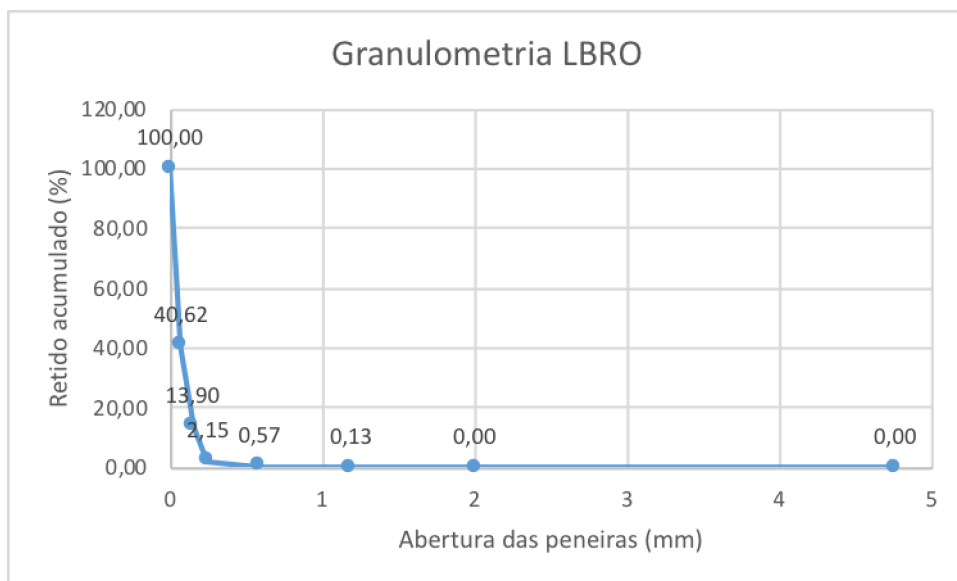
Tabela 8 – Granulometria por via seca LBRO

Peneira (<i>Mesch</i>)	Abertura da Peneira (mm)	Retido na Peneira (g)	Retido na Peneira (%)	Retido Acumulado (%)
4	4.76	0	0	0
10	2	0	0	0
16	1.19	0.38	0.13	0.13
30	0.59	1.33	0.44	0.57
60	0.25	4.73	1.58	2.15
100	0.149	35.1	11.74	13.90
200	0.074	79.87	26.72	40.62
<200 (FUNDO)	<0.074	177.47	59.39	100
TOTAL		298.88	100	

Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo os resultados apresentados também apresentados na Figura 24:

Figura 24 - Granulometria por via seca LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4.4 Massa específica da LBRO

A massa específica da LBRO utilizada nesta pesquisa, foi determinada com o ensaio de picnometria à gás, utilizando o gás Hélio, e apresentou o resultado de 2,68 g/cm³. Para Uliana (2014) as massa específicas da LBRO utilizada em sua pesquisa foram de 2,48 g/cm³ e 2,53 g/cm³, para a LBRO com e sem granalha, respectivamente. Mostrando a variabilidade da massa específica da LBRO, quanto ao processo de beneficiamento das rochas ornamentais.

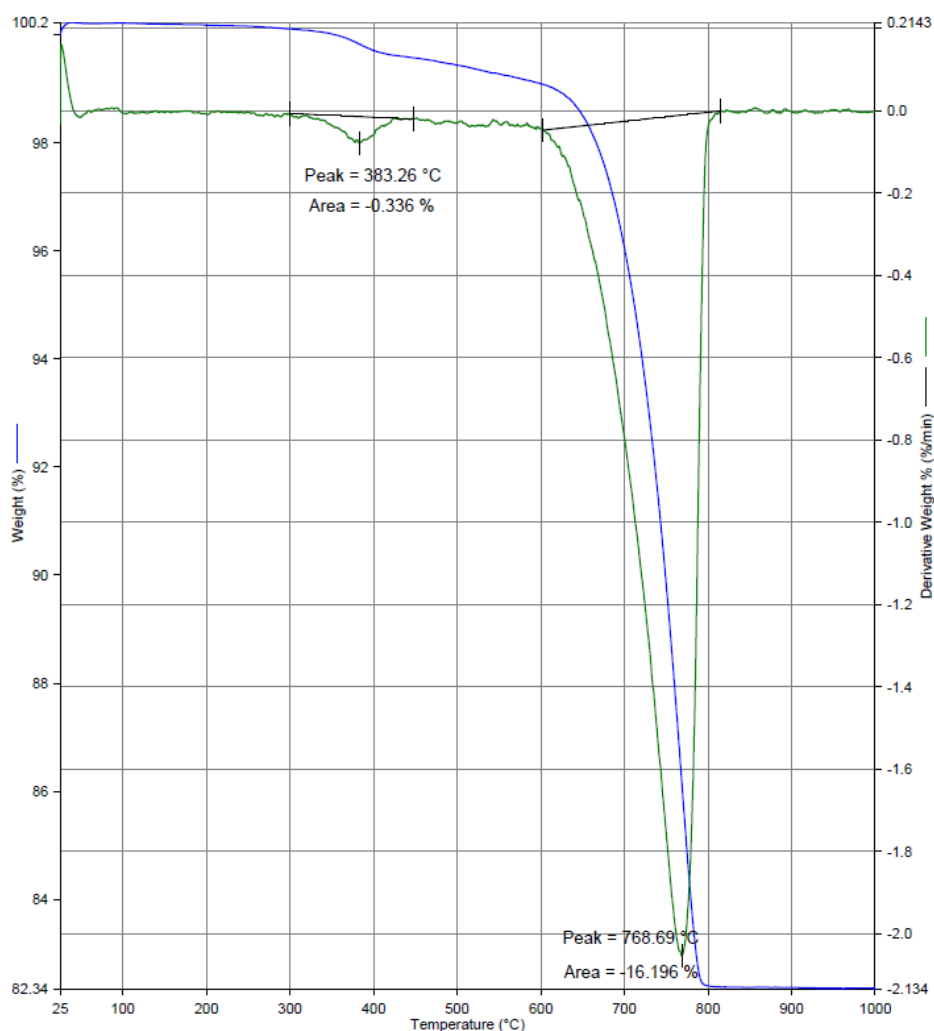
3.1.4.5 Área superficial específica (BET) da LBRO

O método de BET, desenvolvido por Brunauer-Emmett-Teller, permite determinar a área superficial específica das amostras através da verificação do volume e distribuição do tamanho dos poros por adsorção de nitrogênio. Foram analisados 20 pontos por adsorção em cada amostra. O ensaio foi realizado no equipamento da marca Micromeritics, modelo TriStar II Plus, sendo as amostras previamente preparadas através de secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ \text{C}$. Ambos procedimentos ocorreram no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat.

O resultado do ensaio de área superficial específica (BET), apontaram para um resultado de 2,48 m²/g, ou seja um material mais fino, que os três tipos de areias naturais utilizadas na pesquisa de Damineli et al (2017), onde resultados foram de 0.21, 0.34 e 0.24 m²/g. E o resultado também aponta para um material mais fino que a LBRO utilizada por Uliana et al (2013), onde o material apresentou a área superficial específica de 0.62 e 0.73 m²/g.

3.1.4.5 Análise térmica da LBRO

Figura 25 – Imagem da análise térmica da LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a análise térmica da LBRO, é possível observar um halo exotérmico, logo na temperatura de 25 - 40° C, juntamente com um pequeno ganho

de massa do material, de aproximadamente 0,2%. Após é observado um pequeno pico endotérmico, na temperatura de 300 - 450° C, seguido de um grande pico também endotérmico, na temperatura de 600 – 820° C, característico da decomposição de carbonatos, conforme também constatado por Uliana (2014), e uma perda de massa associada de 16,196%. Os resultados apontaram para uma perda ao fogo de 17,66%.

3.1.4.6 Composição química da LBRO

A caracterização química do material foi realizada com o equipamento de fluorescência de raios – x, este ensaio foi realizada na CICECO/ Universidade de Aveiro, em Portugal. Os resultados são apresentados na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Composição química da LBRO

Elemento químico	Proporção (%)
MgO	4,33
Al ₂ O ₃	9,41
SiO ₂	42,57
Cl	0,03
K ₂ O	3,16
CaO	18,04
TiO ₂	1,05
MnO	0,06
Fe ₂ O ₃	4,60
Na ₂ O	1,62
Perda ao fogo	14,17

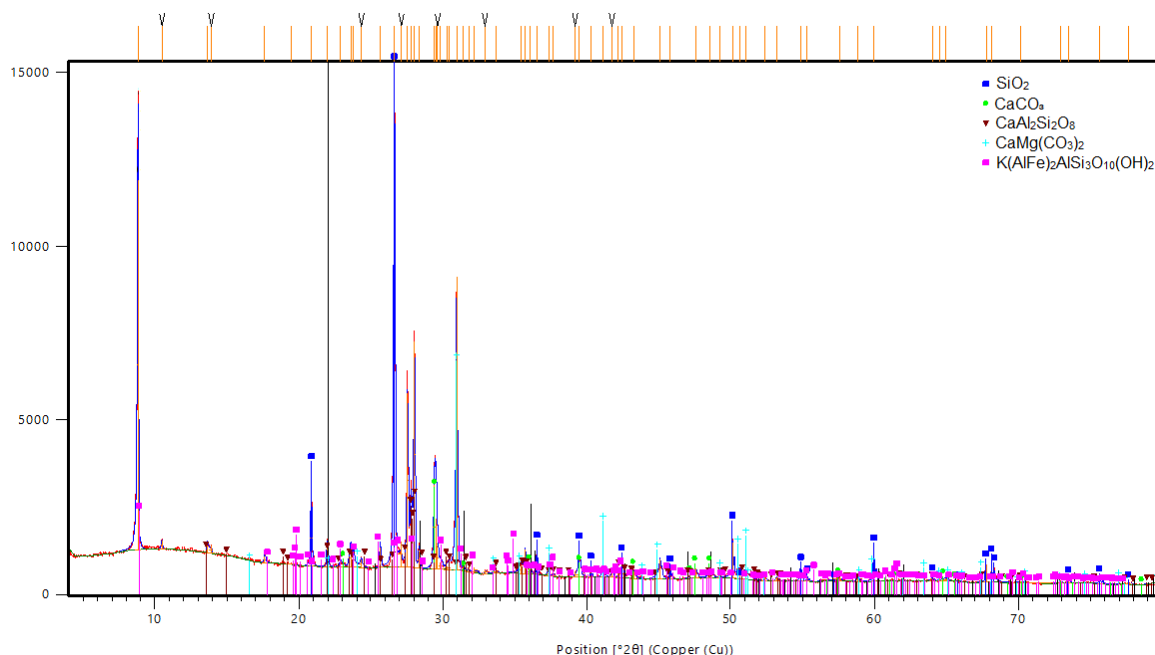
Fonte: Elaborado pelo autor

Além de outros elementos em proporções menores, como o P₂O₅, SO₃, Ni, Cu, Sr, Rb, Zr, Ba, Ce, Cl.

3.1.4.7 Difração por raios – x da LBRO

A difração por raios – x da LBRO foi realizada na Universidade de Aveiro – Portugal. Os resultados são apresentando na Figura 26 abaixo:

Figura 26 – Difração de raios – x LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 26, a estrutural mineralógica da LBRO é caracterizada por picos cristalinos bem definidos, principalmente de SiO_2 , ou seja não apresenta halos amorfo, também há a presença de CaCO_3 , além de $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) e $\text{K}(\text{AlFe})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Conforme constatado por Uliana et al (2014), a LBRO é principalmente constituída por SiO_2 na forma cristalina, portanto sem a presença de atividade pozolânica neste material.

3.1.5 Lama de carbonato de cálcio

A LCC empregada nesta pesquisa, passou pelos ensaios que estão listados abaixo da Tabela 10, juntamente com o local de realização:

Tabela 10 - Ensaio para caracterização físico-química da LC

Norma/ método	Parâmetro	Local
Granulometria por via úmida (laser)	Determinação da curva granulométrica do material	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Granulometria por via seca	Determinação da curva granulométrica do material	Laboratório de materiais de construção - LMC

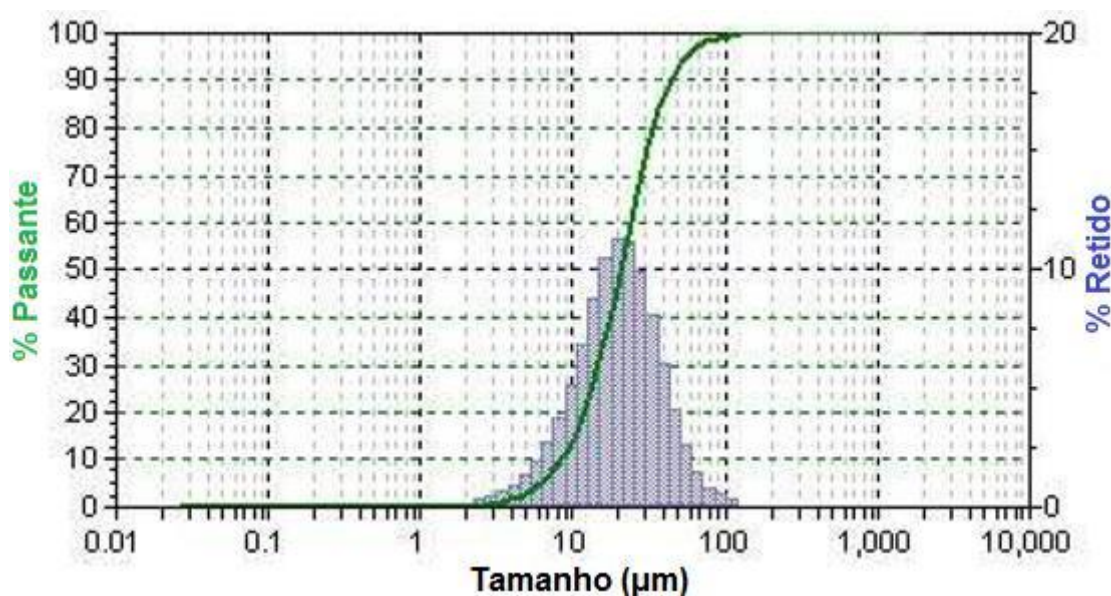
Ensaio de área superficial específica (BET)	Determinação da área específica do material	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Análise térmica	Determinar a variação de massa	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Picnometria à gás	Determinação da densidade do material	Laboratório de caracterização de valorização dos materiais – LCVMat
Difração por raios - X	Determinar a estrutura das fases cristalinas/ amorfas do material	CICECO/Universidade de Aveiro
Fluorescência de raios – X, quantitativo (FRX)	Determinar a composição química do material	CICECO/Universidade de Aveiro

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.5.1 Granulometria à laser da LCC

A LC empregada nesta pesquisa, passou pelo ensaio de granulometria à laser, para posterior análise da curva granulométrica do material. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat, sendo o resultado apresentado, na Figura 27, abaixo.

Figura 27 - Distribuição granulométrica da LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo o diâmetro médio da LCC de 22,70 μm , de acordo com Gonçalves (2000), a LCC utilizada neste programa experimental é considerada filler. A Tabela 11, abaixo apresenta os diâmetros característicos D10, D50 e D90:

Tabela 11 - Diâmetros característicos LCC D10, D50 e D90

Material	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
LCC	8,41	20,47	43,96

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.5.2 Granulometria por via seca da LCC

Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção (LMC), na UNISINOS. Primeiramente a LCC passou por um processo de secagem em estufa com temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$, com uma massa inicial de 300g, após à secagem de 48 horas, apresentou a massa final de 271,81g, resultando em uma umidade de 9,40%.

O processo de peneiramento foi realizado com auxílio de um agitador de peneiras, da fabricante Solotest. Para este ensaio foram utilizadas as peneiras de *Mesch* #4", #10, #16, #30, #60, #100, #200, além do fundo para armazenar o material passante pela peneira de *Mesch* #200. Chegando aos seguintes resultados apresentados na Tabela 12 abaixo:

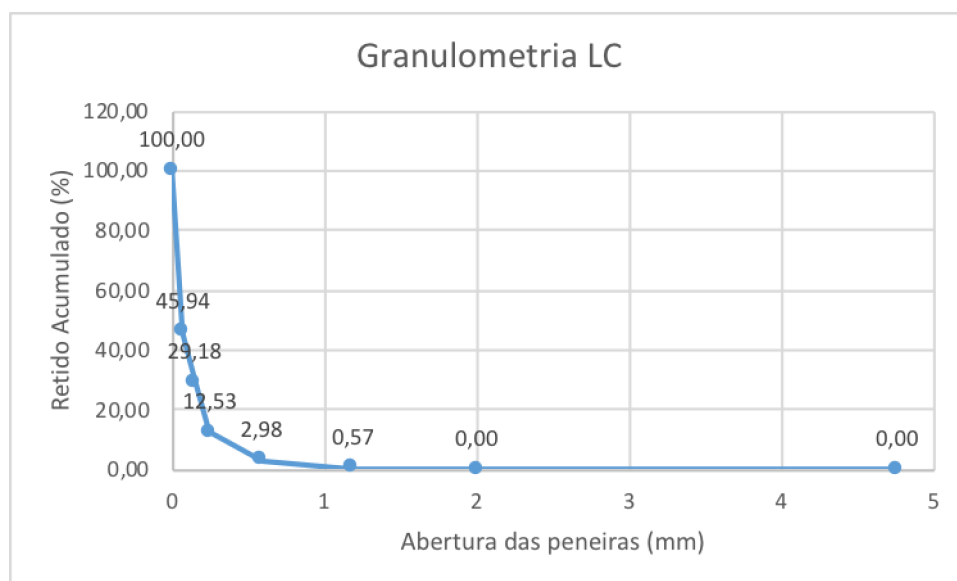
Tabela 12 - Granulometria por via seca LCC

Peneira (<i>Mesch</i>)	Abertura da Peneira (mm)	Retido na Peneira (g)	Retido na Peneira (%)	Retido Acumulado (%)
4	4.76	0	0	0
10	2	0	0	0
16	1.19	1.56	0.57	0.57
30	0.59	6.55	2.41	2.98
60	0.25	25.95	9.55	12.53
100	0.149	45.26	16.65	29.18
200	0.074	45.54	16.75	45.94
<200 (FUNDO)	<0.074	146.95	54.07	100
TOTAL		271.81	100	

Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo os resultados apresentados também na Figura 28:

Figura 28 - Granulometria por via seca LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.5.3 Massa específica da LCC

A massa específica da LCC utilizada nesta pesquisa, foi determinada com o ensaio de picnometria à gás, utilizando o gás Hélio, e apresentou o resultado de 2,58 g/cm³. Para Modolo et al (2014) a massa específica da LCC encontrada em sua

pesquisa, foi de 2,83 g/cm³, mostrando a variabilidade quanto ao processo operacional para a obtenção de celulose.

3.1.5.4 Área superficial específica da LCC

O método de BET, desenvolvido por Brunauer-Emmett-Teller, permite determinar a área superficial específica das amostras através da verificação do volume e distribuição do tamanho dos poros por adsorção de nitrogênio. Foram analisados 20 pontos por adsorção em cada amostra. O ensaio foi realizado no equipamento da marca Micromeritics, modelo TriStar II Plus, sendo as amostras previamente preparadas através de secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ$ C. Ambos procedimentos ocorreram no Laboratório de Caracterização e Valorização dos Materiais – LCVMat.

O ensaio de área superficial específica (BET), apontaram um resultado de 1,26 m²/g, ou seja um material mais fino, que os três tipos de areias naturais utilizadas na pesquisa de Damineli et al (2017), onde resultados foram de 0.21, 0.34 e 0.24 m²/g. Segundo o estudo desenvolvido por Modolo et al (2014) a superfície específica da LCC foi de 5,17 m²/g, novamente mostrando a variação deste material quanto ao processo utilizado para realizar a extração da celulose, principalmente no formato e tamanho dos grãos.

A Tabela 13, abaixo mostra uma comparação entre a área superficial específica dos materiais utilizados neste programa experimental:

Tabela 13 – Comparação entre a área superficial específica

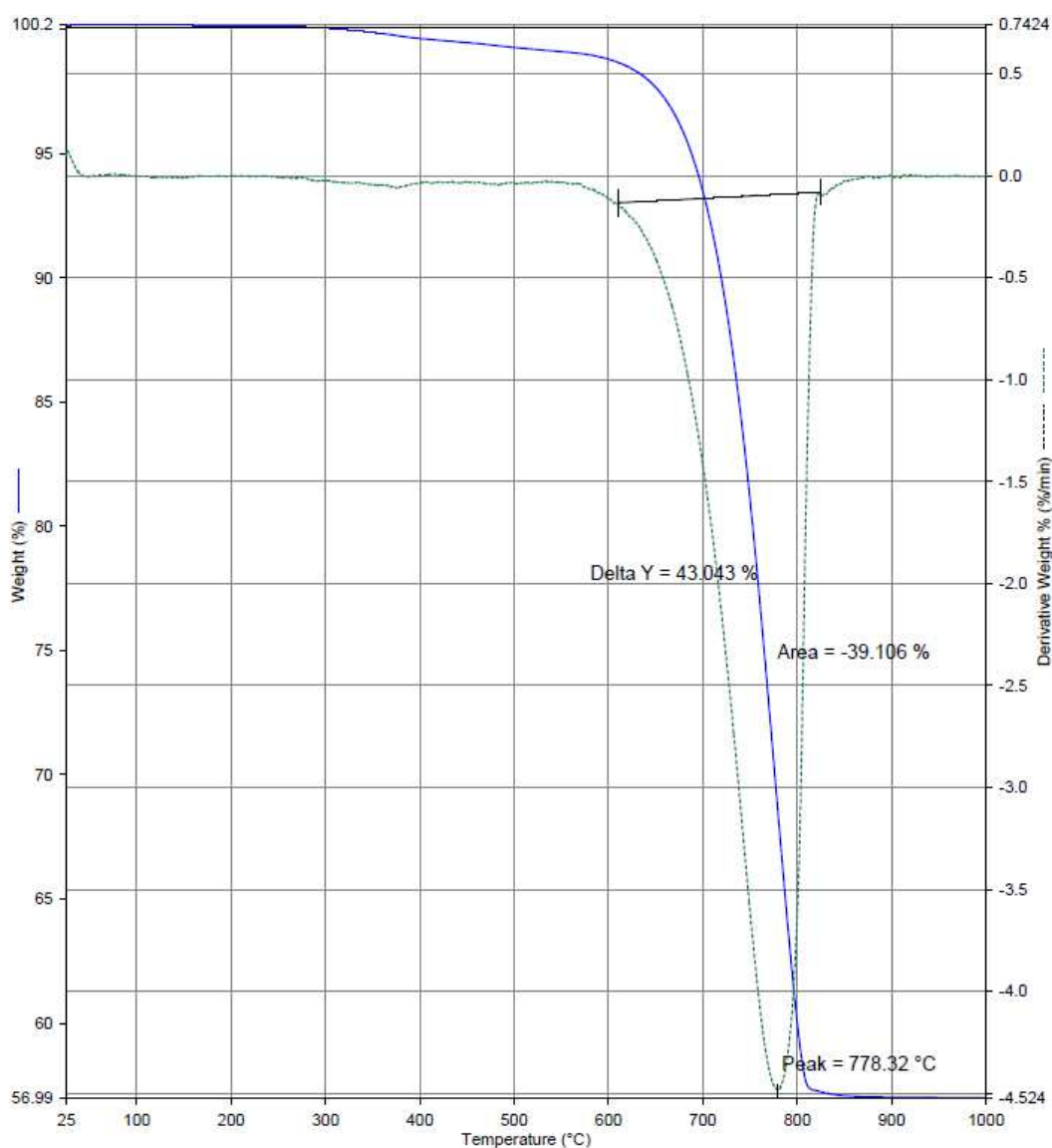
Material	Área Superficial Específica (m²/g)	Variação (%)
Agregado miúdo	1,02	0
LBRO	2,48	143%
LCC	1,26	23%

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme pode ser observado na Tabela 13, o material mais fino utilizado neste programa experimental foi a LBRO, sendo 143% mais fino do que o agregado miúdo. A LCC mostrou-se ser 23% mais fino do que o agregado miúdo.

3.1.5.5 Análise da análise térmica da LCC

Figura 29 - Imagem da análise térmica da LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a decomposição termogravimétrica da LCC, é possível observar um halo exotérmico, logo na temperatura de 25 - 40° C, juntamente com um pequeno ganho de massa do material. Após é observado um pequeno pico endotérmico, na temperatura de 250 - 550° C, halo este associado a perda de matéria orgânica. Seguido de um grande pico também endotérmico, na temperatura de 610 – 820° C, característico da decomposição de carbonatos, conforme também constatado por Rodrigues et al (2016), e uma perda de massa associada de 39,106%. Os resultados apontaram para um perda ao fogo de 43,01%, ou seja, uma

perda ao fogo maior se comparada à LBRO, que apresentou uma perda ao fogo de 17,66%.

3.1.5.6 Composição química da LCC

A caracterização química do material foi realizado com o equipamento de fluorescência de raios – x, este ensaio foi realizada na CICECO/Universidade de Aveiro, em Portugal. Os resultados estão apresentados na Tabela 14 abaixo:

Tabela 14 – Composição química da LC

Elemento químico	Proporção (%)
Na ₂ O	0,55
MgO	0,26
SiO ₂	0,30
P ₂ O ₅	0,31
CaO	56,13
Perda ao fogo	41,98

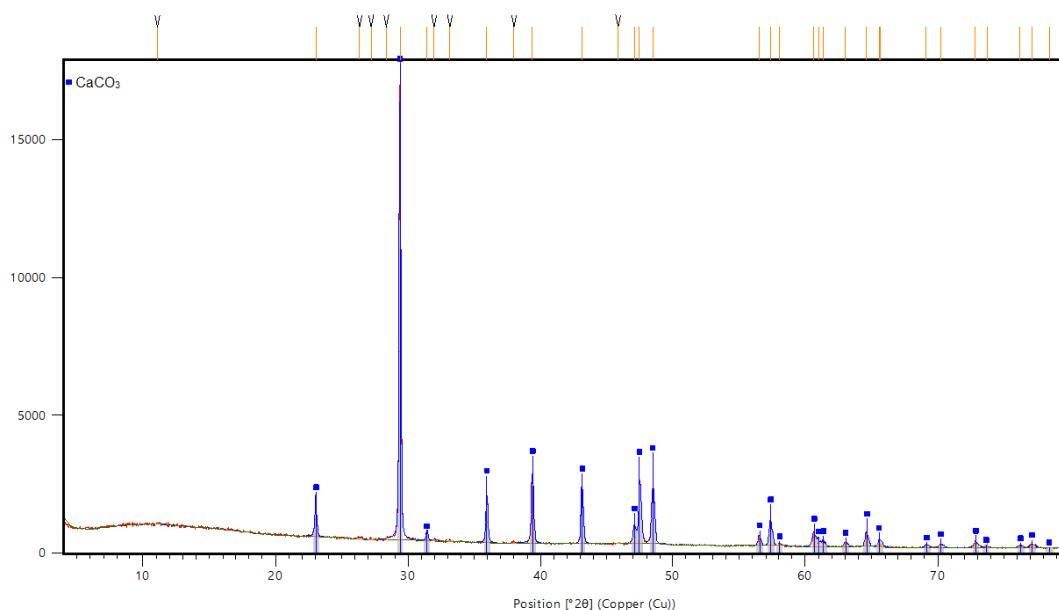
Fonte: Elaborado pelo autor

Além de outros elementos em proporções menores, como o Al₂O₃, SO₃, K₂O, MnO, Fe₂O₃, Ni, Cu, Sr, Ba, Ce e Cl.

3.1.5.7 Difração por raios – x da LCC

A difração por raios – x da LCC foi realizada na Universidade de Aveiro – Portugal. Os resultados são apresentando na Figura 30 abaixo:

Figura 30 – Difração por raios – x LCC



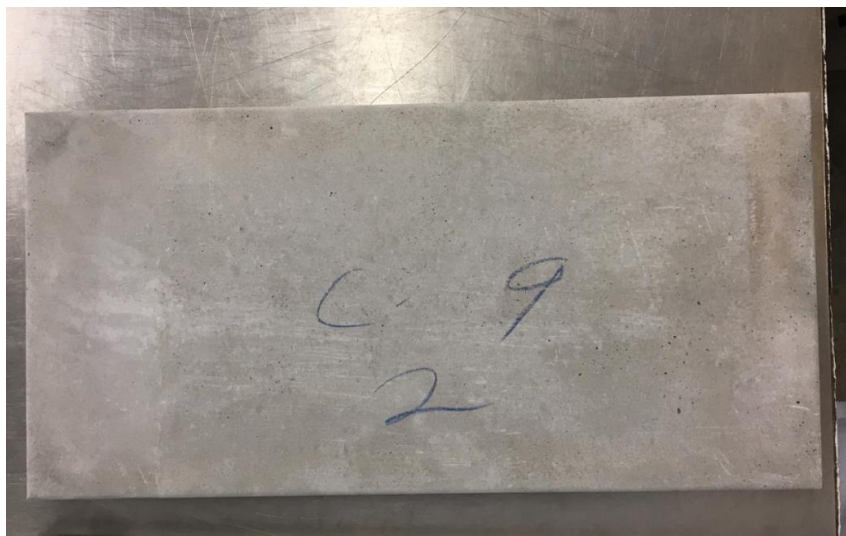
Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 30, a estrutural mineralógica da LCC é caracterizada por picos cristalinos bem definidos, principalmente de CaCO_3 , assim como constatado na literatura a LC é constituída basicamente de CaCO_3 no estado cristalino (MODOLO et al, 2014; RODRIGUES et al, 2016).

3.1.6 Substrato padrão

O substrato padrão apresenta uma espessura mínima de 20 mm, e dimensões mínimas de 25 cm x 50 cm, de modo que as placas cerâmicas de cada ensaio caibam em um mesmo substrato. O substrato padrão deve permanecer com a superfície de aplicação exposta, por 48h em condições ambientais de laboratório, além de apresentar superfície livre de qualquer partícula sólida e isento de óleo, tintas, ou outras condimentações que possam modificar sua aderência. O substrato padrão deve ser imprimado, com uma mistura simples de cimento, areia e água, e após este processo a argamassa colante deve ser aplicada em sua superfície (ABNT, 2012).

Figura 31 - substrato padrão

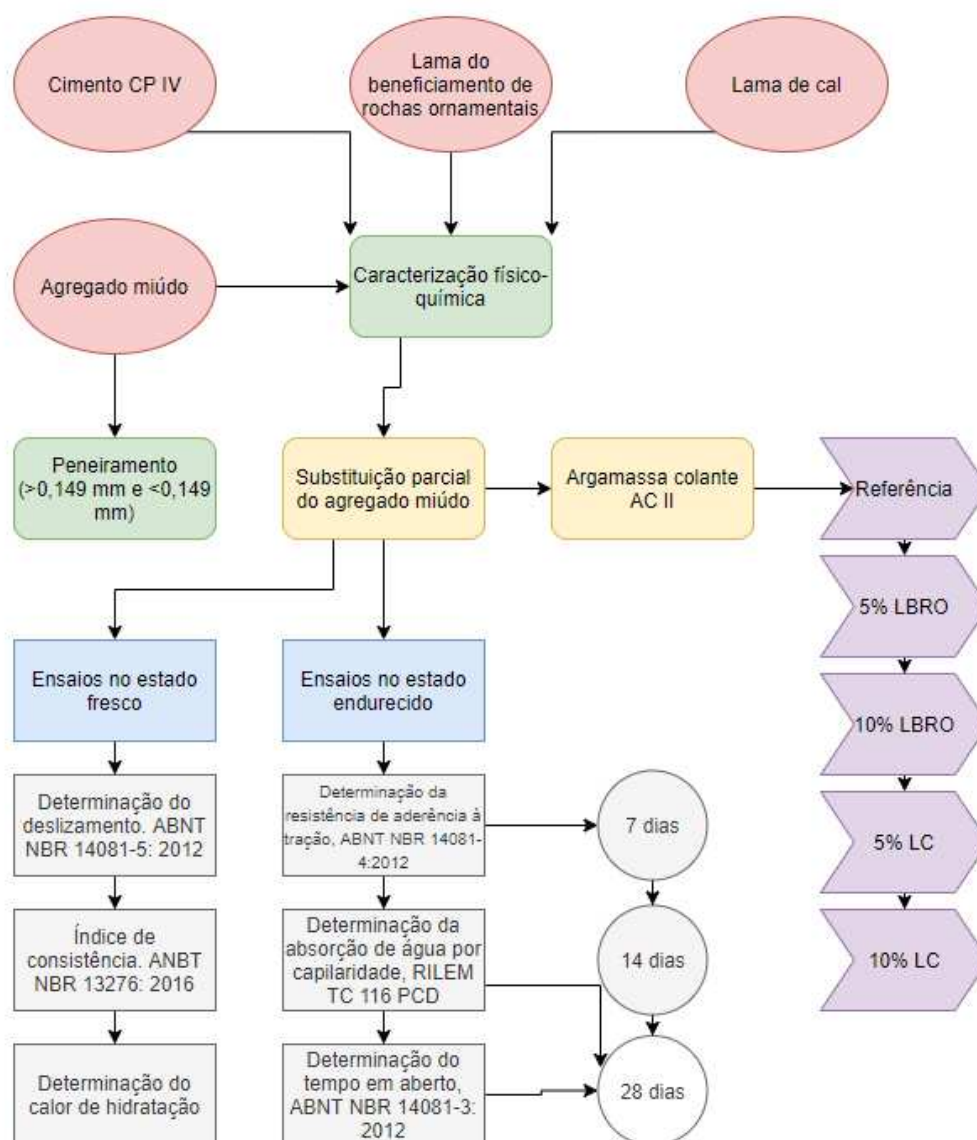


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 MÉTODOS

Os métodos de ensaios para caracterização da argamassa colante, serão divididos em duas etapas, sendo os ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido. O fluxograma abaixo, apresentado na Figura 32, sintetiza os métodos que foram utilizados durante a pesquisa, assim como a porcentagem de substituição em massa do agregado miúdo, por LBRO e LCC.

Figura 32 - Programa experimental



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Confeção da argamassa colante

A argamassa colante foi confeccionada de acordo com os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 14081-2: 2015. Primeiramente os materiais foram separados e pesados (a) de acordo com o traço proposto, após é feita uma homogeneização dos materiais com um auxílio de saco plástico (b), agitando o material por aproximadamente 3 minutos, até que ocorra a separação e homogeneização dos grãos.

Figura 33 – Materiais constituintes da argamassa colante



Fonte: Elaborado pelo autor

A argamassa colante foi misturada com auxílio de uma argamassadeira (conforme descrição da norma ABNT NBR 14081-2: 2015), na velocidade lenta, com rotação em torno do eixo igual à 140 ± 5 rpm e movimento planetário igual à 62 ± 5 rpm. Para o preparo, primeiramente foi adicionado a água em sua totalidade, após um período máximo de 30 segundos, o material seco foi adicionado à mistura. A mistura é feita em um primeiro momento por 2 minutos, após a argamassadeira é desligada para remover a argamassa colante que ficou aderida nas laterais da cuba metálica e da pá, após é novamente ligada por 2 minutos até a conclusão do processo. Concluído este processo a argamassa colante é colocado em um período de maturação de aproximadamente 10 minutos, com a proteção de um tecido úmido, para não ocorrer a perda de água para o ambiente.

Figura 34 – Argamassadeira utilizada para a confecção da argamassa colante



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.2 Ensaios realizados no estado fresco

3.3.2.1 Ensaio de determinação do deslizamento

O ensaio de determinação do deslizamento da argamassa colante, foi realizado seguindo os procedimentos propostos pela norma brasileira ABNT NBR 14081-5: 2012. Para este ensaio foram utilizadas três placas cerâmicas do grupo Bla, ou seja, absorção menor que 0,5%, além de apresentar seção quadrada com arestas de (100 ± 1) mm e massa individual de (195 ± 5) g.

Figura 35 – Ensaio de deslizamento em andamento



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.2.2 Ensaio de índice de consistência

A caracterização reológica das argamassas colantes foi realizada de acordo com a ABNT NBR 13276: 2016, com auxílio de uma mesa de consistência, onde é moldado um cone com 10 centímetros de diâmetro na base, e 5 centímetros de diâmetro no topo. Este cone conta com 3 camadas de espessuras iguais de argamassa colante, sendo na primeira camada deferidos 15 golpes para o adensamento, na segunda camada 10 golpes e na terceira e última camada 5 golpes. O índice de consistência foi medido horizontalmente, após 30 golpes com o auxílio da mesa de consistência, disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção – LMC, nas dependências da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Figura 36 – Mesa de consistência



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.2.3 Ensaio de calorimetria

Para a realização deste ensaio utilizou-se o software PicoLog que captava os dados emitidos através de termopares acoplados nos corpos-de-prova, a temperatura era medida em intervalos de 10 minutos, durante um total de 100 horas. Os corpos-de-prova foram moldados em recipientes cilíndricos com volume de 350 ml, sendo o termopar alocado no meio deste volume de argamassa colante. Este ensaio foi realizado a fim de se obter os dados de temperatura durante a hidratação do cimento, e as possíveis alterações que as substituições parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC na argamassa colante podem causar durante este processo.

3.4.3 Ensaios realizados no estado endurecido

3.4.3.1 Ensaio de determinação da resistência de aderência à tração

O ensaio de determinação da resistência de aderência à tração da argamassa colante, foi realizado seguindo os procedimentos propostos pela norma brasileira ABNT NBR 14081-4: 2012. As placas cerâmicas foram utilizadas eram do grupo

BIIa, com absorção de $(4 \pm 1) \%$, além de apresentar seção quadrada com aresta de $(50 \pm 1) \text{ mm}$. Após a aplicação da argamassa colante foi necessário esperar 5 minutos, para assentar as placas cerâmicas.

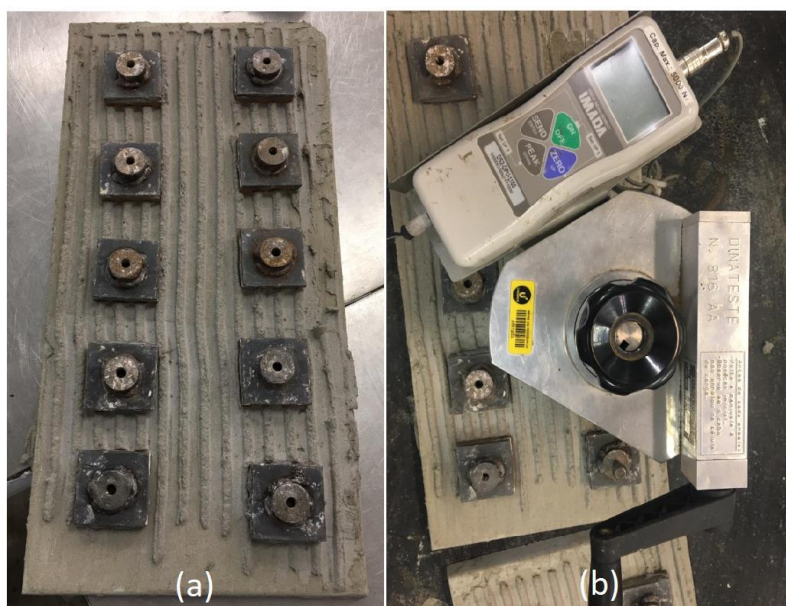
Figura 37 - Placas cerâmicas assentadas na argamassa colante



Fonte: Elaborado pelo autor

As idades de arrancamento das placas cerâmicas foram: 7, 14 e 28 dias, em um período de 72h antes do ensaio foi colocado pastilhas metálicas em cada placa cerâmica. As pastilhas metálicas foram fixadas às placas cerâmicas com auxílio de uma cola epóxi, conforme Figura 38, abaixo:

Figura 38 – Pastilhas metálicas (a) e ensaio de resistência de aderência à tração em andamento (b)



Fonte: Elaborado pelo autor

O ensaio de determinação da resistência de aderência à tração foi realizado com auxílio do equipamento IMADA, com capacidade máxima de carregamento de 5000 N.

3.4.3.2 Ensaio de determinação do tempo em aberto

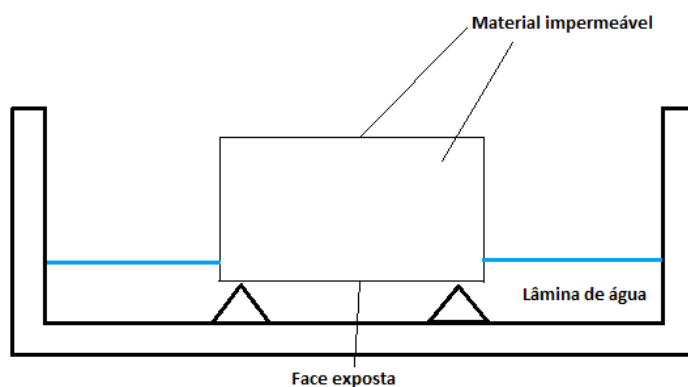
O ensaio de determinação do tempo em aberto da argamassa colante, foi realizado seguindo os procedimentos propostos pela norma brasileira ABNT NBR 14081-3: 2012. A placa cerâmica para a aplicação na argamassa colante pertencia ao grupo BII, conforme ABNT NBR 13817: 1997, apresentando uma absorção de água de $(15 \pm 3) \%$, além de seção quadrada com arestas de $(50 \pm 1) \text{ mm}$.

As placas cerâmicas foram aplicadas à argamassa após o tempo em aberto de 20 minutos, o arrancamento dessas placas cerâmicas ocorreram na idade de 28 dias.

3.4.3.3 Ensaio da absorção de água por capilaridade

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade, foi realizado seguindo os procedimentos descritos pela RILEM TC 116 PCD. O ensaio consiste em confinar o corpo de prova (CP) com somente uma face exposta e em contato com a água, com suas faces externas envolvidas por algum material impermeável. O consumo de água por sucção capilar foi determinado pelo peso do CP, após estar exposto a uma lâmina de água. Antes dos CP's entrarem em contato com esta lâmina de água, foram devidamente secados, onde os CP's ficaram por 48h em uma estufa à temperatura de $100 \pm 5^\circ \text{C}$.

Figura 39 - Esquema para determinação da absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 – Ensaio de absorção de água por capilaridade em andamento



Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos no programa experimental.

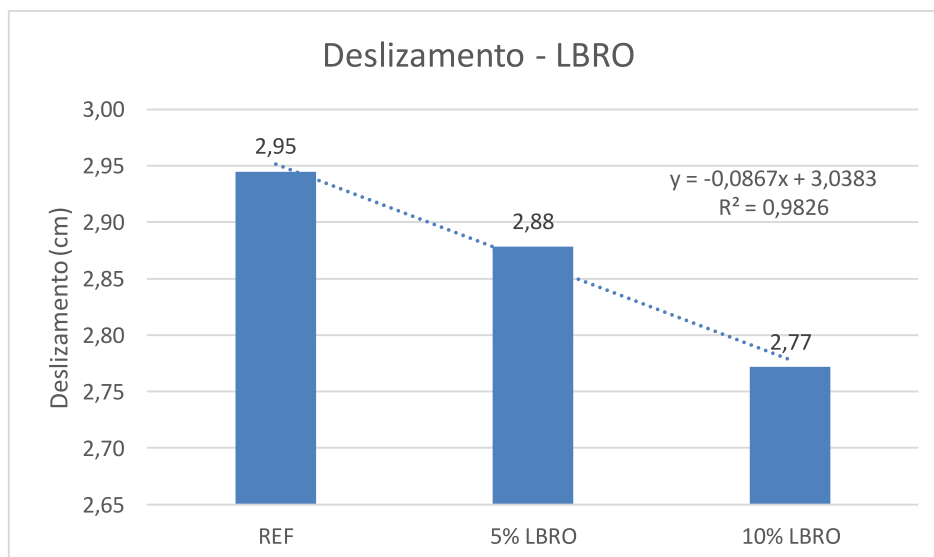
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO FRESCO

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos pelos ensaios da argamassa colante no estado fresco.

4.1.1 Ensaio de determinação do deslizamento

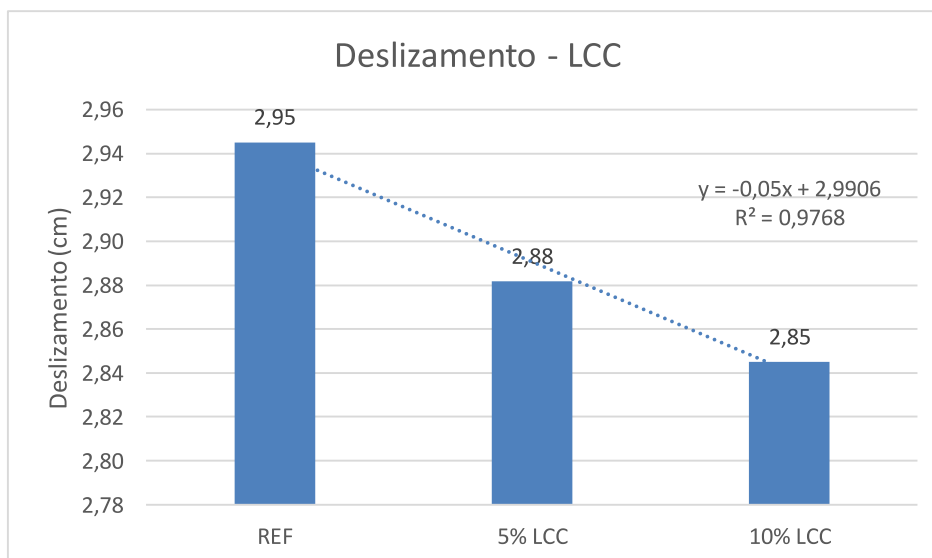
Como descrito no subcapítulo 3.3.2.1, este ensaio baseou-se nos procedimentos descritos na ABNT NBR 14081-5: 2012. Os valores do parâmetro deslizamento para as formulações testadas são apresentados nos Gráfico 1 e Gráfico 2. A Tabela 15 complementa a apresentação dos resultados.

Gráfico 1 – Deslizamento - LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 2 – Deslizamento - LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 – Deslizamento (cm)

Traço							Média	Desvio
							(cm)	Padrão
REF	2,90	2,87	3,05	3,02	2,92	2,91	2,95	0,07
5% LBRO	2,87	2,92	2,85	2,86	2,88	2,89	2,88	0,02
10% LBRO	2,82	2,81	2,70	2,73	2,79	2,78	2,77	0,05
5% LCC	2,90	2,88	2,88	2,86	2,89	2,88	2,88	0,01
10% LCC	2,85	2,82	2,86	2,87	2,85	2,82	2,85	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado nos Gráfico 1 e Gráfico 2, complementados pela Tabela 15, o traço que apresentou o maior deslizamento foi o traço referência, com 2,95 cm, após os traços 5% LBRO e 5% LCC, com deslizamentos de 2,88 cm, os traços que apresentaram o menor deslizamento foram 10% LBRO e 10% LCC, com deslizamentos de 2,77 cm e 2,85 cm respectivamente.

O Gráfico 1 mostra que a incorporação de LBRO como substituição parcial do agregado miúdo em argamassas colantes para os traços analisados, causa uma perda de trabalhabilidade na argamassa colante, conforme o percentual de substituição aumenta. Este resultado permite verificar que o percentual de substituição é inversamente proporcional ao deslizamento, apresentando uma correlação entre o deslizamento e o percentual de substituição parcial de 98,26%.

Os resultados apresentados no Gráfico 2 também mostram que a incorporação de LCC como substituição parcial do agregado miúdo em argamassas colantes para os traços analisados, causa uma perda de trabalhabilidade na argamassa colante, conforme o percentual de substituição aumenta. Este resultado permite verificar que o percentual de substituição é inversamente proporcional ao deslizamento, apresentando uma correlação entre o deslizamento e o percentual de substituição de 97,68%.

Os resultados indicam uma maior diminuição da trabalhabilidade com a incorporação de LBRO, principalmente com a substituição parcial do agregado miúdo na proporção de 10%, onde se comparado à referência há uma perda de trabalhabilidade de 1,8 mm. A diminuição de trabalhabilidade com a incorporação de LCC é maior na proporção de 10% de substituição parcial do agregado miúdo, se comparado à referência, esta diminuição é de 1 mm. Enquanto as substituições parciais do agregado miúdo nas proporções de 5% LBRO e 5% LCC apresentam uma diminuição de trabalhabilidade de 0,7 mm.

O acréscimo do teor de finos tende a aumentar a relação água/ cimento do material, pois materiais mais finos tendem a ter maior área superficial específica (ANGELIM; ANGELIM; CARASEK, 2003). Portanto, para manter a trabalhabilidade do material deve-se por consequência aumentar a relação água/ cimento.

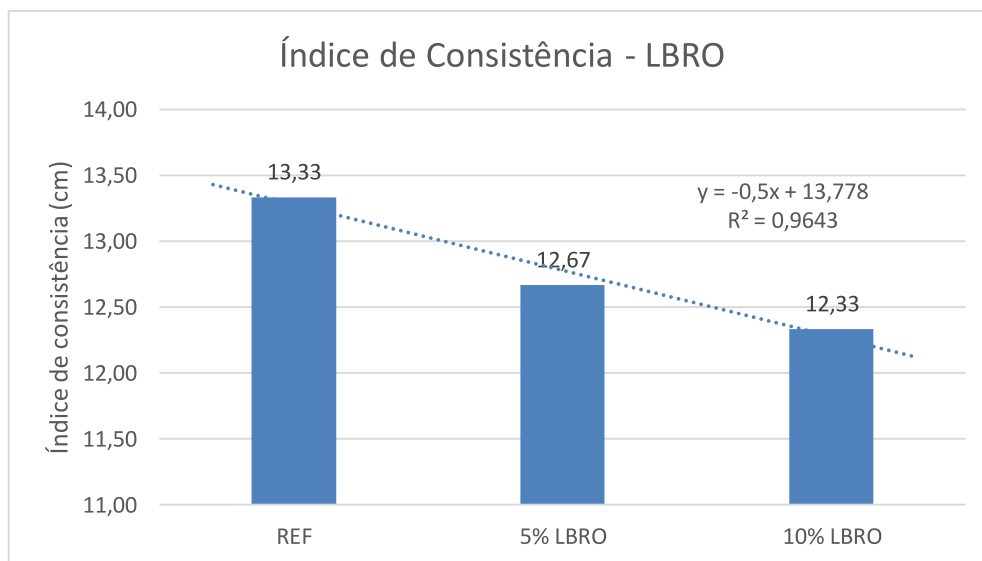
A utilização de materiais finos pode auxiliar no preenchimento dos vazios de um determinado compósito cimentício, pois facilita o envolvimento do agregado pela pasta cimentícia. Porém se houver um excesso de materiais pulverulentos na confecção de compósitos cimentícios, também exigirá a adição de uma maior quantidade de água para a hidratação do cimento, causando consequências no estado fresco desses materiais (OLIVEIRA, 2002).

Segundo Wyrzykowski et al (2015), o índice de vazios é o responsável direto pelo melhor desempenho da argamassa colante no estado fresco. Podendo assim supor que o traço de argamassa colante com maior índice de vazios é a referência, e observamos que com a medida da proporção de substituição do agregado miúdo por LBRO e LC aumenta, o índice de vazios diminui, causando consequências no estado fresco do material.

4.1.2 Índice de consistência

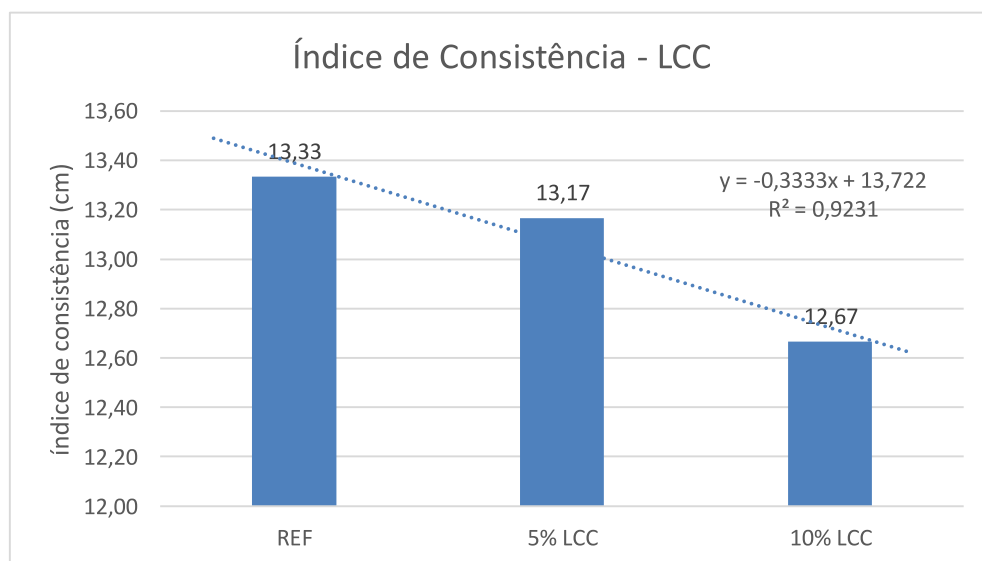
Os resultados referentes ao parâmetro índice de consistência são apresentados nos Gráficos 3 e 4. A Tabela 16 complementa a apresentação dos resultados.

Gráfico 3 – Índice de consistência - LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 – Índice de consistência - LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 16 – Índice de consistência (cm)

Traço	Índices de Consistência (cm)			Média (cm)	Desvio Padrão
REF	13	13	14	13,33	0,58
5% LBRO	12,5	12,5	13	12,67	0,29
10% LBRO	12	12	13	12,33	0,58
5% LCC	13	13,5	13	13,17	0,29
10% LCC	13	13	12	12,67	0,58

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme pode ser observado nos Gráficos 3 e 4, complementados pela Tabela 16, o traço que apresentou o maior índice de consistência foi o traço referência, com 13,33 cm. Já os traços 5% LBRO e 5% LCC apresentaram índices de consistência de 12,67 cm e 13,17cm, respectivamente. Enquanto os traços 10% LBRO e 10% LCC, apresentaram índices de 13,33 cm e 12,67 cm, respectivamente.

A incorporação de LBRO como substituição parcial do agregado miúdo em argamassas colantes para os traços analisados, causa uma diminuição do índice de consistência a medida que o teor de substituição é aumentado, indicando que o percentual de substituição é inversamente proporcional ao índice de consistência. A correlação encontrada entre os eixos foi de 96,43%. O mesmo comportamento foi observado nos traços com incorporação de LCC, porém nesse caso, a correlação verificada foi de 92,31%.

Tanto a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC em argamassas colantes, para os traços analisados, tendem à reduzir a trabalhabilidade das argamassas colantes produzidas, sendo a LBRO o resíduo que causa a maior diminuição na proporção de 10% LBRO, com uma diminuição de 1 cm. Já o traço com 5% LBRO, este apresentou uma diminuição de 0,66 cm. Os traços com 5% LCC e 10% LCC, apresentaram uma trabalhabilidade de 0,16 cm e 0,66 cm, respectivamente.

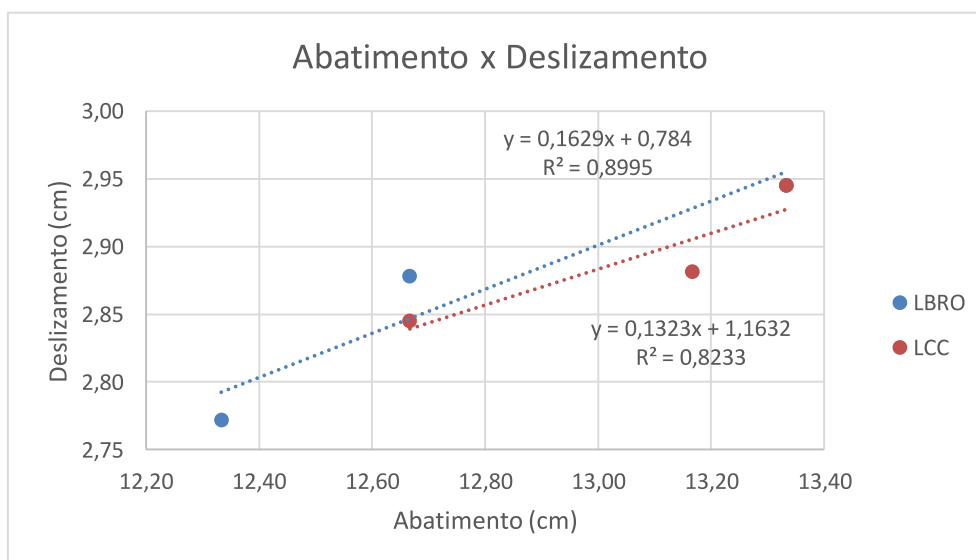
Para Carasek et al (2016), a consistência de uma argamassa tem correlação com o agregado miúdo utilizado na confecção, principalmente no que refere aos parâmetros: ângulo de atrito e fator de empacotamento. O empacotamento tem elevada influência no índice de vazios, na porosidade e na massa unitária do material desenvolvido, sendo principalmente influenciado pela forma e geometria

das partículas dos materiais empregados. Por isso uma alteração no comportamento do índice de consistência de acordo com a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC, já era esperado.

Conforme citado anteriormente, para Harbi, Derabla e Nafa (2017), a utilização de materiais com granulometria mais fina, denominados de filler, em argamassas, resulta em um preenchimento dos vazios, principalmente os vazios do agregado miúdo. Assim, conduz a um aumento da compacidade da argamassa. Porém o aumento da proporção de finos em uma argamassa, caso não seja bem dimensionado, pode promover a necessidade de um aumento da relação água/cimento, devido a presença de uma maior superfície específica referente ao filler em comparação com o agregado miúdo.

4.1.2.1 Correlação entre o deslizamento e o índice de consistência

Gráfico 5 – Correlação entre o deslizamento e o índice de consistência



Fonte: Elaborado pelo autor

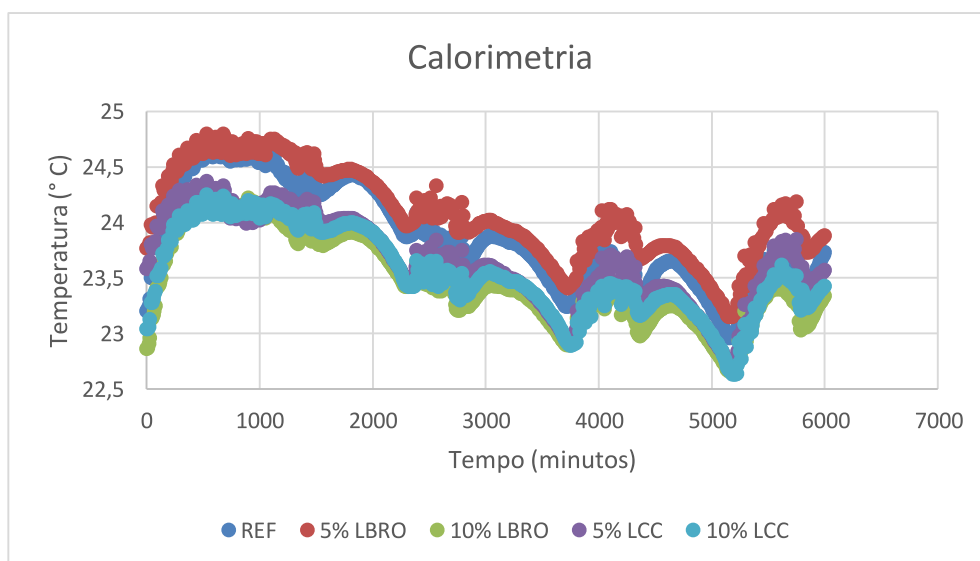
Conforme os resultados apresentados no Gráfico 5 em relação a correlação entre o índice de consistência e o deslizamento, se observa que os eixos são proporcionais para os resíduos LBRO e LCC, mostrando que para as argamassas colantes produzidas e testadas, quanto maior o índice de consistência, maior será o deslizamento da argamassa colante. A correlação encontrada entre os eixos foi de 89,95% para a LBRO e 82,33% para a LCC.

Para Mehta e Monteiro (2014) a maior presença de finos em um material tem como consequência uma menor trabalhabilidade do mesmo no estado fresco, ou seja, quando aumenta-se o teor de finos em um compósito cimentício, o material tende a ficar com menor trabalhabilidade, dificultando o lançamento deste material na prática.

4.1.3 Ensaio de calorimetria

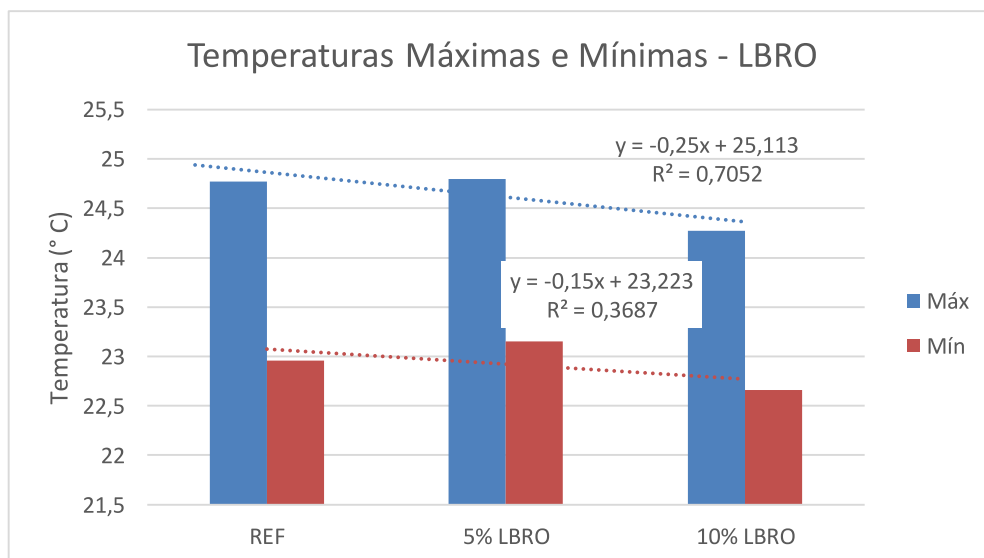
Os resultados de variação da temperatura em função do tempo são apresentados no Gráfico 6. Já as temperaturas máximas e mínimas de cada traço são apresentadas nos Gráfico 7 e 8, a Tabela 17 complementa a apresentação dos resultados.

Gráfico 6 – Calorimetria



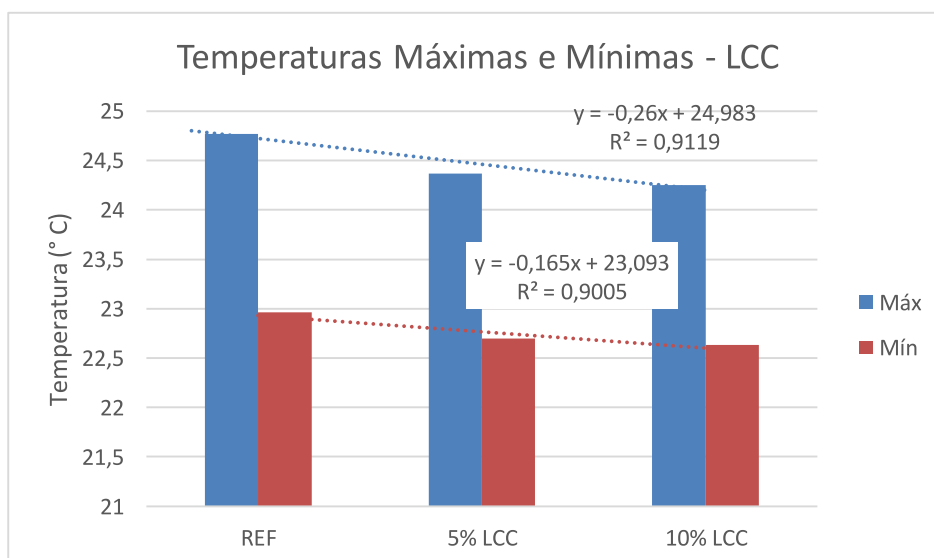
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 – Temperaturas máximas e mínimas LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 – Temperaturas máximas e mínimas LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 – Temperaturas máximas e mínimas LBRO e LCC

Temperatura	REF	5% LBRO	10% LBRO	5% LCC	10% LCC
Máxima (° C)	24,77	24,80	24,27	24,37	24,25
Mínima (° C)	22,96	23,15	22,66	22,70	22,63
Desvio	0,46	0,41	0,40	0,39	0,39
Padrão					

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme o Gráfico 6, é possível observar que a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC nas proporções analisadas não causam efeitos acentuados em relação ao comportamento dos materiais durante o processo de hidratação do cimento quando comparados com o traço referência, para todos os traços analisados.

De acordo com Jenni et al. (2006), um aditivo à base de éter de celulose apresenta como principal característica a elevada capacidade de reter água. Ainda segundo os autores, há um efeito secundário, pois, esses aditivos podem alterar o início de pega do cimento, reduzir a consistência das argamassas e causar uma excessiva incorporação de ar, caso a argamassa seja superdosada.

Carvalho (2012) refere que a adição de partículas poliméricas, no caso específico do PVA, cria um filme polimérico sobre as partículas de cimento, dificultando a interação entre a água e o cimento, resultando no retardamento ou até mesmo na interrupção da hidratação do cimento.

As temperaturas máximas e mínimas em relação a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO (Gráfico 7), mostram que a incorporação de LBRO tende à diminuir as temperaturas máximas de hidratação à medida que há o aumento da substituição. A correlação encontrada entre os eixos foi de 70,52%. Ainda observando os resultados apresentados no Gráfico 7, é possível verificar que a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO, em relação as temperaturas mínimas a incorporação de LBRO, há pouca correlação entre os eixos (cerca de 36,87%).

Os resultados referentes as temperaturas máximas e mínimas apresentadas no Gráfico 8, relacionados a substituição parcial do agregado miúdo por LCC, mostram que a incorporação de LCC tende à reduzir as temperaturas máximas e mínimas de hidratação à medida em que se aumenta a proporção de substituição, com uma correlação entre os eixos de 91,19% para as temperaturas máximas e 90,05% para as temperaturas mínimas, mostrando que há correlação entre os eixos.

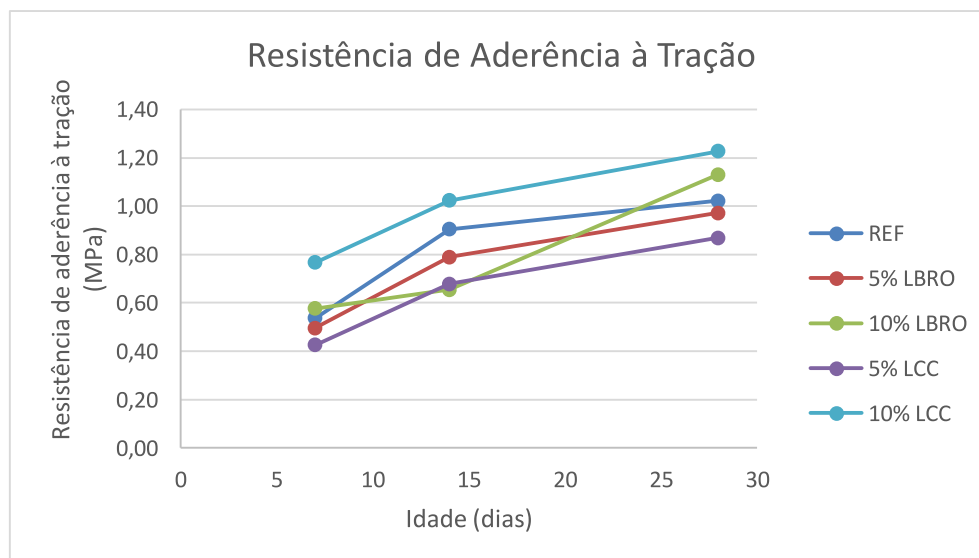
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios das argamassas colantes no estado endurecido.

4.2.1 Ensaio de determinação da resistência de aderência à tração

Os resultados obtidos em relação a resistência de aderência à tração são apresentados no Gráfico 9. A Tabela 18 complementa a apresentação dos resultados.

Gráfico 9 – Resistência de aderência à tração



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 18 - Resistência de aderência à tração

Idade (dias)	REF (MPa)	5% LBRO (MPa)	10% LBRO (MPa)	5% LCC (MPa)	10% LCC (MPa)
7	0,54	0,50	0,58	0,43	0,77
14	0,91	0,79	0,65	0,68	1,02
28	1,02	0,97	1,13	0,87	1,23
DP (28 dias)	0,24	0,27	0,14	0,14	0,12

Fonte: Elaborado pelo autor

Os traços 10% LBRO e 10% LCC apresentaram uma resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade de 1,13 MPa e 1,23 MPa, respectivamente, tendo uma resistência de aderência superiores ao do traço referência, que apresentou uma resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade de 1,02 MPa, mostrando que a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC causa um aumento na

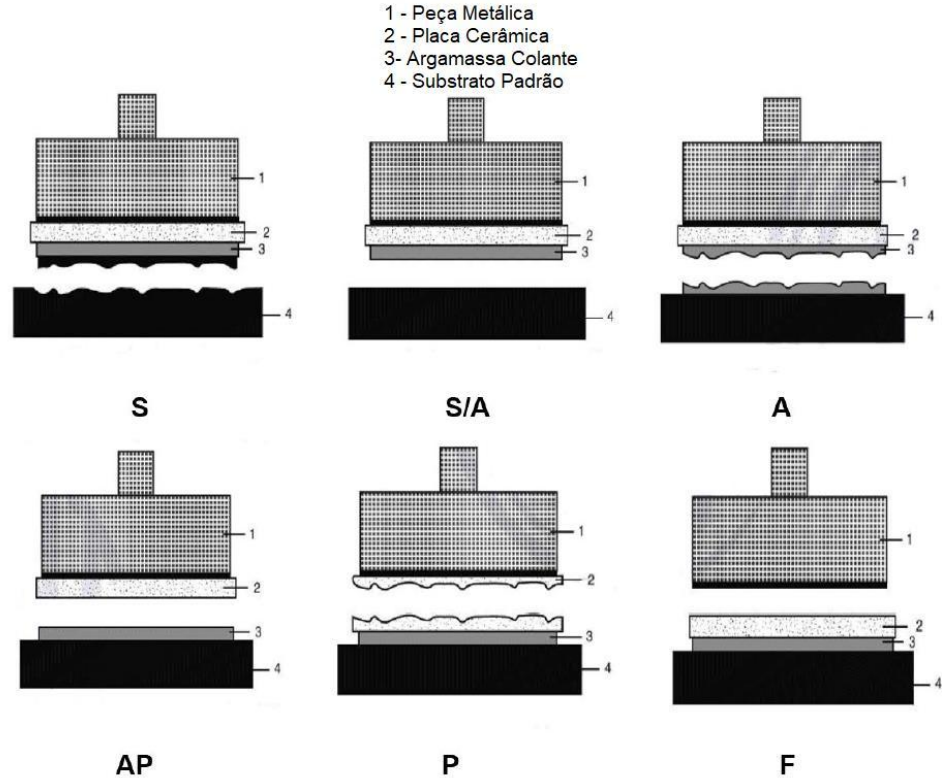
resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade (Gráfico 9). Os resultados obtidos corroboram com os resultados encontrados por Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010) que ao avaliarem o comportamento de argamassas com utilização de resíduo do corte de rochas ornamentais após queima a 700° C, como substituto parcial do cimento e do agregado miúdo, nos teores de 5%, 10% e 15%, observaram potencial no uso deste resíduo em argamassas, sendo que a resistência a tração teve um aumento de desempenho para todos os teores analisados. Colangelo, Marroccoli e Cioffi (2010) também avaliaram argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de mármore, com substituição nos teores de 10%, 20% e 30%. Os autores concluíram que há uma melhora na resistência a tração da argamassa em todos os teores analisados.

Enquanto os traços 5% LBRO e 5% LCC apresentaram uma resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade de 0,97 MPa e 0,87 MPa, respectivamente. Comparados ao traço referência, causam uma diminuição da resistência de aderência à tração. Sendo a resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade mínima exigida para AC II, de acordo com a ABNT NBR 14081-1: 2012 de 1 MPa, para uma cura normal, ou seja, os traços REF, 10% LBRO e 10% LC conferem valores adequados aos estabelecidos pela ABNT (2012), diferentemente dos traços 5% LBRO e 5% LC os quais não cumprem com os requisitos mínimos da ABNT (2012).

Para Carasek (1996), a aderência na interface substrato/ argamassa está ligada à sucção do substrato, que é caracterizado basicamente pela transferência de água que ocorre entre estes dois materiais, possibilitando a entrada da pasta cimentícia nos poros do substrato, que ao hidratar, ou seja, formar C-S-H nos poros, forma uma espécie ancoragem entre estes dois tipos de materiais. Sendo uma argamassa com partículas mais finas tendo uma tendência a melhorar a aderência.

Para Carasek, Cascudo e Scartezini (2001), materiais inertes com altos teores de finos, principalmente partículas inferiores à 75 µm, podem prejudicar a aderência de argamassas, e em relação a esta afirmação, sugerem duas hipóteses. Quanto a sucção exercida pelo substrato, as partículas muito finas podem penetrar no interior dos poros do substrato, tomando o lugar de produtos de hidratação do cimento. Um material inerte com grãos muito finos produziria uma argamassa com poros de raio médio pequeno, argamassas com poros menores do que os poros do substrato dificultam a sucção da argamassa pelo substrato.

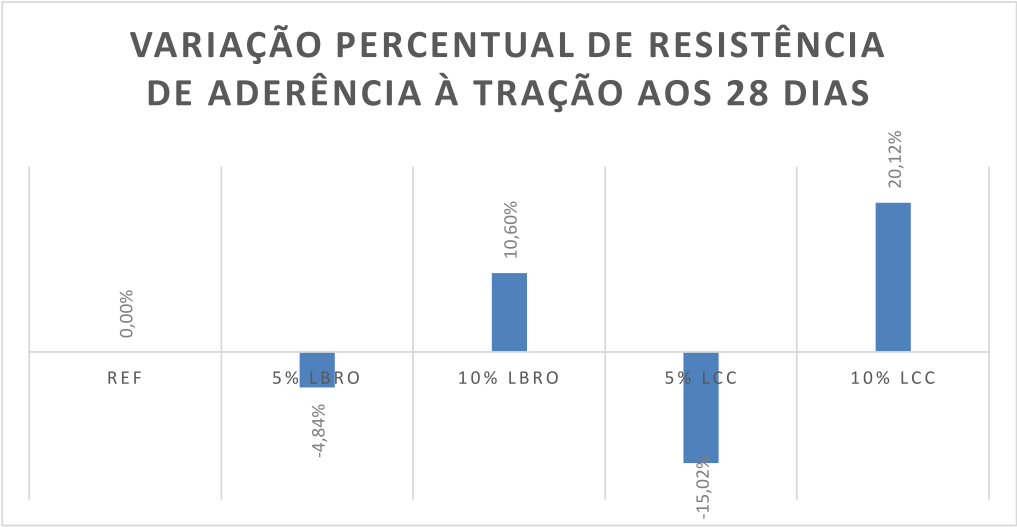
Figura 41 – Tipos de ruptura



Fonte: Adaptado ABNT (2012)

A ruptura do sistema ocorreu com integralidade na argamassa colante, na opção (A) conforme esquema apresentado na Figura 41. Portanto, pode-se concluir que o ponto frágil dos sistemas foi a argamassa colante.

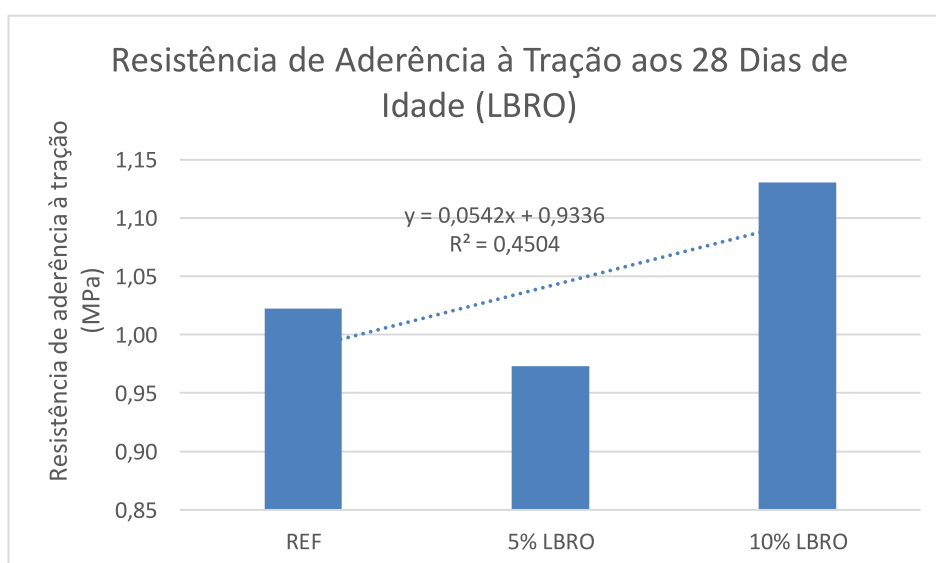
Gráfico 10 – Variação percentual de resistência de aderência à tração aos 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor

No Gráfico 10 é apresentada a comparação dos traços com a referência, mostra que a perda de resistência de aderência à tração dos traços 5% LBRO e 5% LCC é de -4,84% e -15,02%, respectivamente. Enquanto para os traços 10% LBRO e 10% LCC há um ligeiro aumento de resistência de aderência à tração, em cerca de 10,60% e 20,12%, respectivamente.

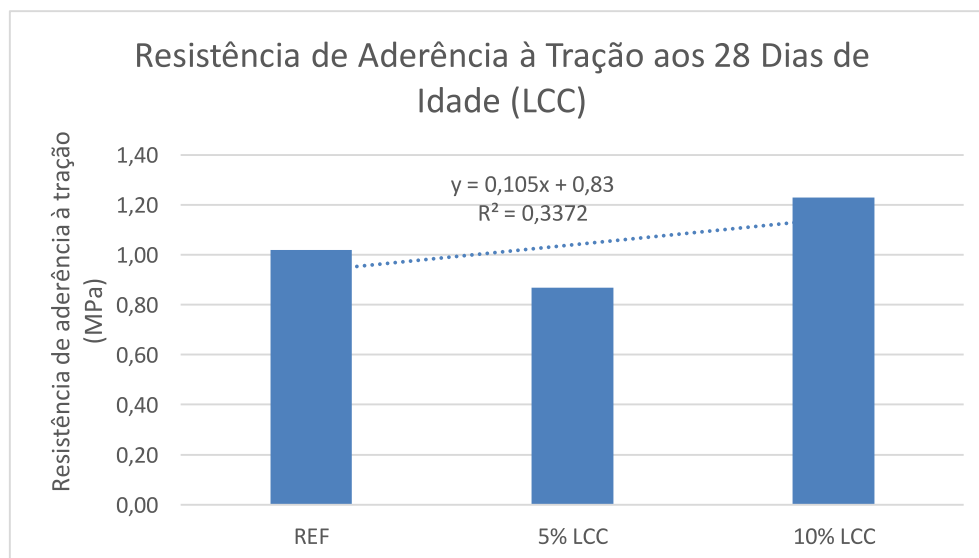
Gráfico 11 – Resistência de aderência à tração LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme pode ser observado no Gráfico 11, a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO em argamassas colantes, para os traços avaliados, há uma tendência ao aumento da resistência de aderência à tração do material, apresentando uma correlação de 45,04%, ou seja, não há correlação entre os parâmetros de substituição e resistência para estes traços. Porém, é observado que o traço 5% LBRO causa uma diminuição da resistência de aderência à tração do material. Segundo Vinco et al (2010) a incorporação de resíduos de rochas ornamentais em argamassas tem como consequência a melhora do desempenho mecânico, quanto a compressão e tração, devido principalmente pelo efeito filler proporcionado por este subproduto.

Gráfico 12 – Resistência de aderência à tração LCC



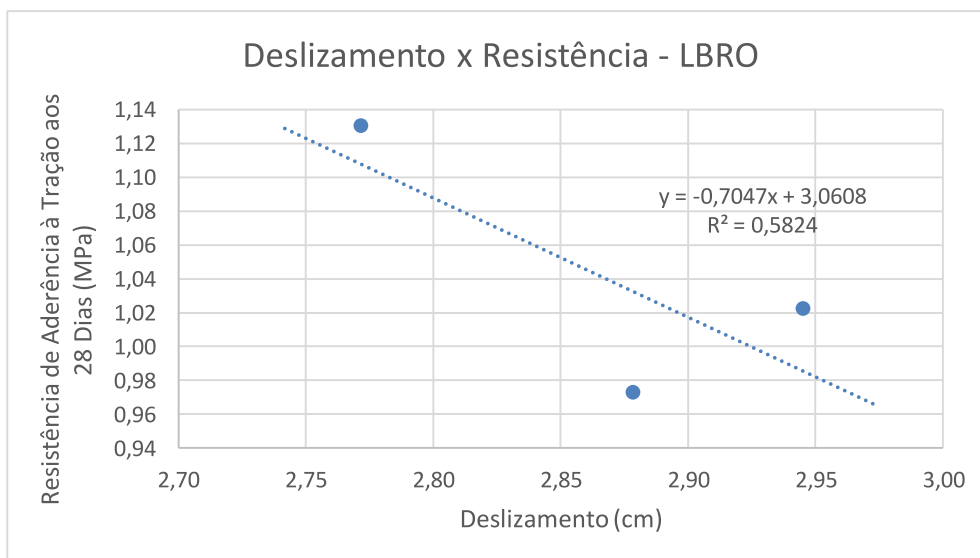
Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme pode ser observado no Gráfico 12, a substituição parcial do agregado miúdo por LCC em argamassas colantes, para os traços estudados, há uma tendência à elevação da resistência de aderência à tração do material, com uma correlação de 33,72%, ou seja, não há correlação entre os parâmetros de substituição e resistência para estes traços. Porém, é observado que o traço 5% LC causa uma diminuição da resistência de aderência à tração do material.

4.2.1.1 Deslizamento x resistência de aderência à tração

Neste subcapítulo foi traçado uma linha de tendência entre o deslizamento (cm) e a resistência de aderência à tração (MPa) aos 28 dias de idade, para cada resíduo, LBRO e LCC. Os valores apresentados resultam nos gráficos de deslizamento x resistência presentes nos Gráfico 13 e Gráfico 14.

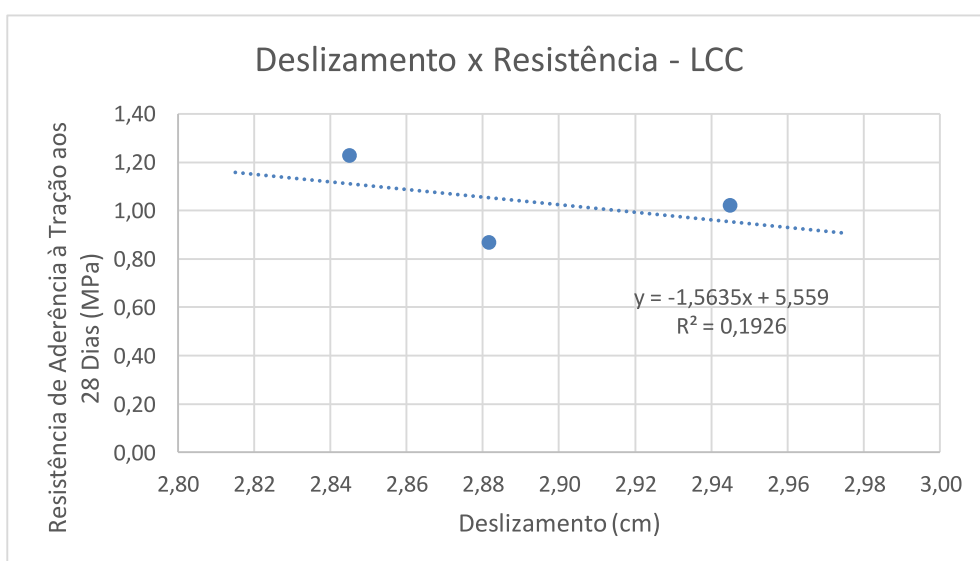
Gráfico 13 – Deslizamento x resistência LBRO



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Gráfico 13, há uma tendência do deslizamento ser inversamente proporcional à resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade para os traços com substituição parcial do agregado miúdo por LBRO, ou seja, quanto maior o deslizamento, menor será a resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade, para os traços analisados. O Gráfico 13 mostra que há uma correlação entre os eixos de 58,24%.

Gráfico 14 – Deslizamento x resistência LCC



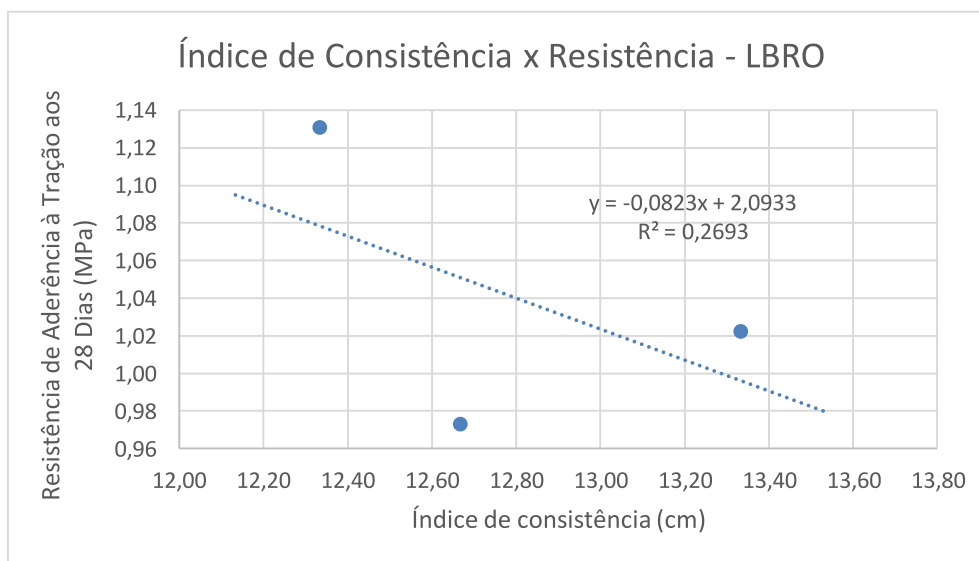
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Gráfico 14, há uma tendência do deslizamento ser inversamente proporcional à resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade para os traços com substituição parcial do agregado miúdo por LCC, ou seja, quanto maior o deslizamento, menor será a resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade, para os traços analisados. O Gráfico 14 mostra que não há uma correlação entre os eixos, com um percentual de correlação de 19,26%.

4.2.1.2 Índice de consistência x resistência de aderência à tração

Neste subcapítulo foi traçado uma linha de tendência entre o índice de consistência (cm) e a resistência de aderência à tração (MPa) aos 28 dias de idade, para cada resíduo, LBRO e LCC. Os valores apresentados resultam nos gráficos de deslizamento x resistência presentes nos Gráfico 15 e Gráfico 16.

Gráfico 15 – Índice de consistência x resistência LBRO

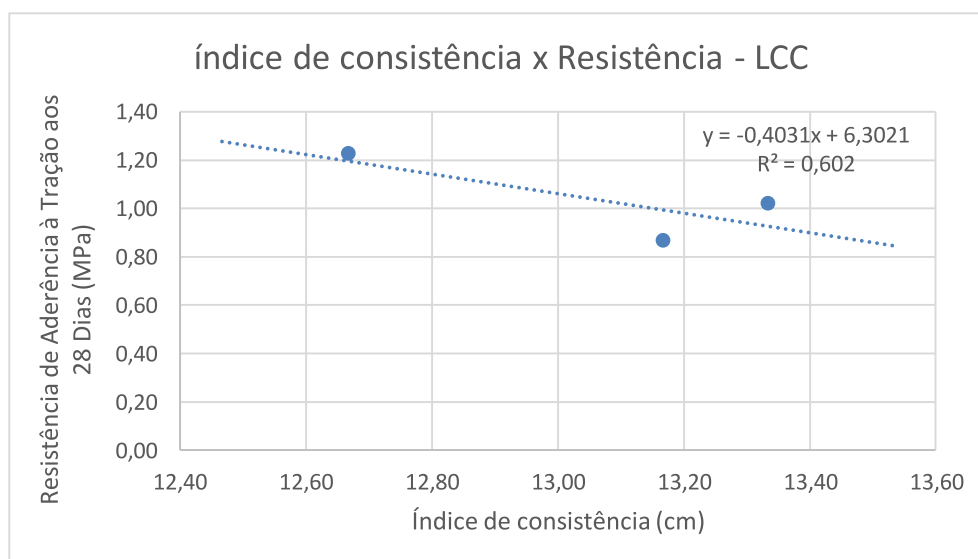


Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado no Gráfico 15, há uma tendência ao índice de consistência ser inversamente proporcional à resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade para os traços com substituição parcial do agregado miúdo por LBRO, ou seja, quanto maior o índice de consistência, menor será a resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade, para os traços analisados. Porém, o

Gráfico 15 mostra que não há uma correlação entre os eixos, com um percentual de correlação de 26,93%.

Gráfico 16 – Índice de consistência x resistência LCC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Gráfico 16, há uma tendência ao índice de consistência ser inversamente proporcional à resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade para os traços com substituição parcial do agregado miúdo por LCC, ou seja, quanto maior o índice de consistência, menor será a resistência de aderência à tração aos 28 dias de idade, para os traços analisados. O Gráfico 16 mostra que há uma correlação entre os eixos, de 60,20%.

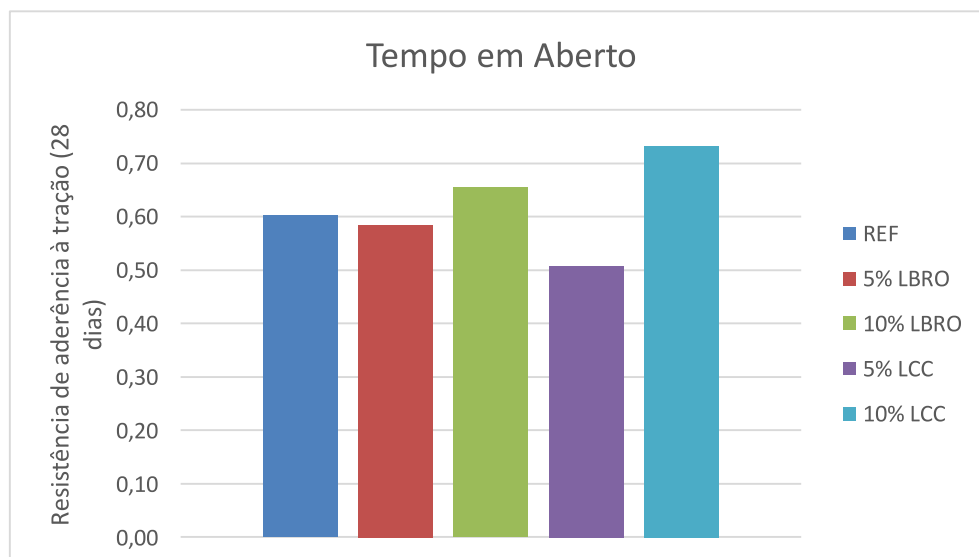
4.2.2 Ensaio de determinação do tempo em aberto

Segundo Póvoas (1999) o tempo em aberto, nada mais é do que o tempo da perda de água da argamassa colante, seja por sucção da base, ou por evaporação ao ambiente, essa perda de água ocorre imediatamente após a aplicação da argamassa colante no substrato, e causa a redução progressiva da resistência à aderência da argamassa colante.

Conforme pode ser observado no Gráfico 17, a substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC em argamassas colantes, para os traços estudados, não apresenta influência sobre o tempo em aberto do material desenvolvido. Porém, observa-se que há uma ligeira redução na resistência de

aderência à tração, evidenciando que o traço adotado pode ter sido a causa desta diminuição.

Gráfico 17 – Tempo em aberto



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19 – Tempo em aberto

	REF	5% LBRO	10% LBRO	5% LCC	10% LCC
Resistência de aderência à tração (MPa)	0,60	0,58	0,65	0,51	0,73
Desvio padrão	0,15	0,06	0,14	0,11	0,16

Fonte: Elaborado pelo autor

O traço que apresentou maior resistência de aderência à tração após 20 minutos em aberto, foi o 10% LCC, que obteve um aumento percentual de 21,78% se comparado ao traço referência, o traço 10% LBRO, obteve um aumento percentual de 8,85% se comparado ao traço referência. Enquanto os traços 5% LBRO e 5% LCC tiveram uma diminuição na resistência de aderência à tração de - 2,93% e -15,66%.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a perda de água de um material à base de cimento Portland, apresenta resultados que afetam diretamente o processo de

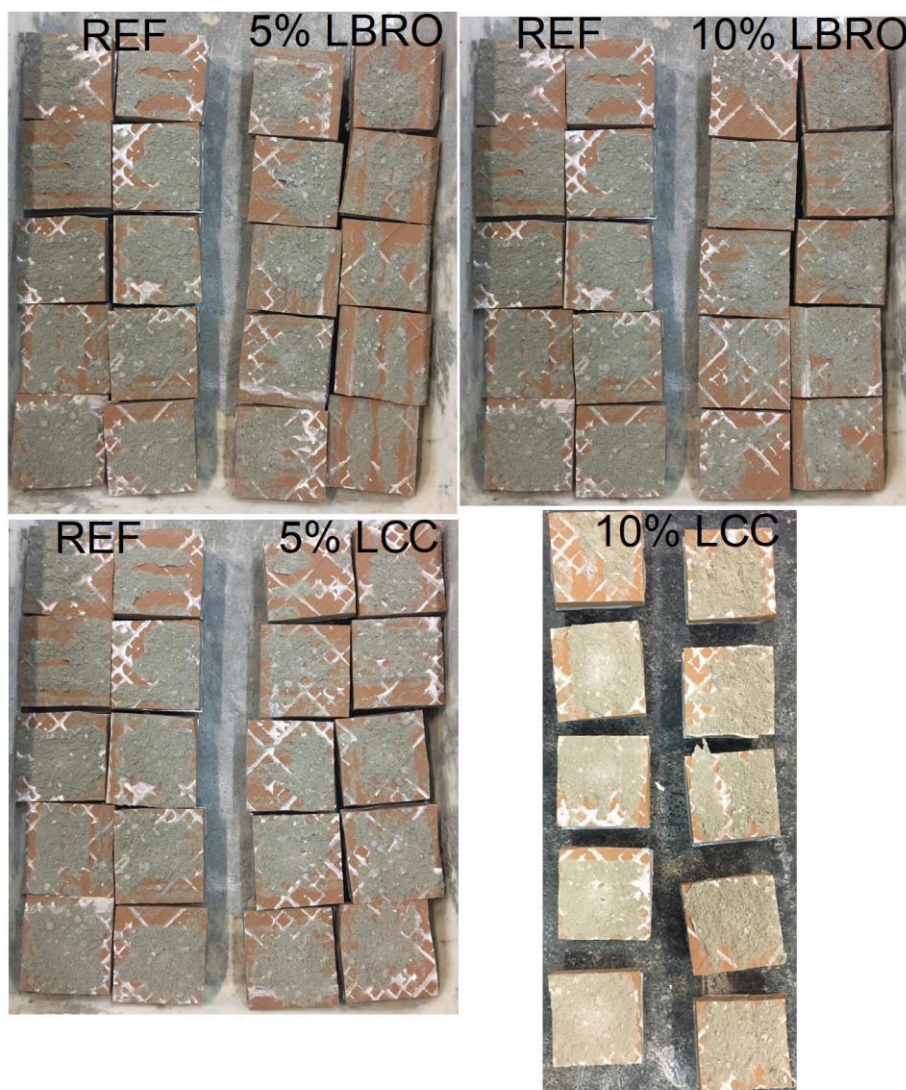
hidratação do cimento, que depende da quantidade disponível de água, e por consequência reduzem as propriedades mecânicas de um determinado material.

O tempo em aberto da argamassa colante está relacionado também à perda de resistência de aderência à tração, pois segundo Póvoas (1999), o assentamento de placas cerâmicas após o período de tempo em aberto determinado, entra em contato com uma película que se forma na superfície da argamassa colante. Esta película é resultado da dessecação superficial causada pela sucção e evaporação da água da argamassa, e conseqüentemente causa a perda de aderência entre as interfaces da argamassa colante e da placa cerâmica.

A resistência de aderência apresenta uma elevada correlação, com a perda de água por evaporação. Por isso é possível sugerir que os fenômenos relacionados ao tempo em aberto sejam devidos à dessecação superficial por evaporação, que tem como uma das conseqüências a perda de resistência de aderência da argamassa (PÓVOAS; JOHN; CINCOTTO, 2002).

De acordo com os requisitos mínimos da ABNT NBR 14081-1 (2012), a argamassa colante do tipo AC II tem de apresentar 20 minutos de tempo em aberto sem perda de desempenho, ou seja, apresentando resistência de aderência à tração $\geq 1,0$ MPa, fazendo com que todos os traços desenvolvidos neste programa experimental não cumprissem com este requisito.

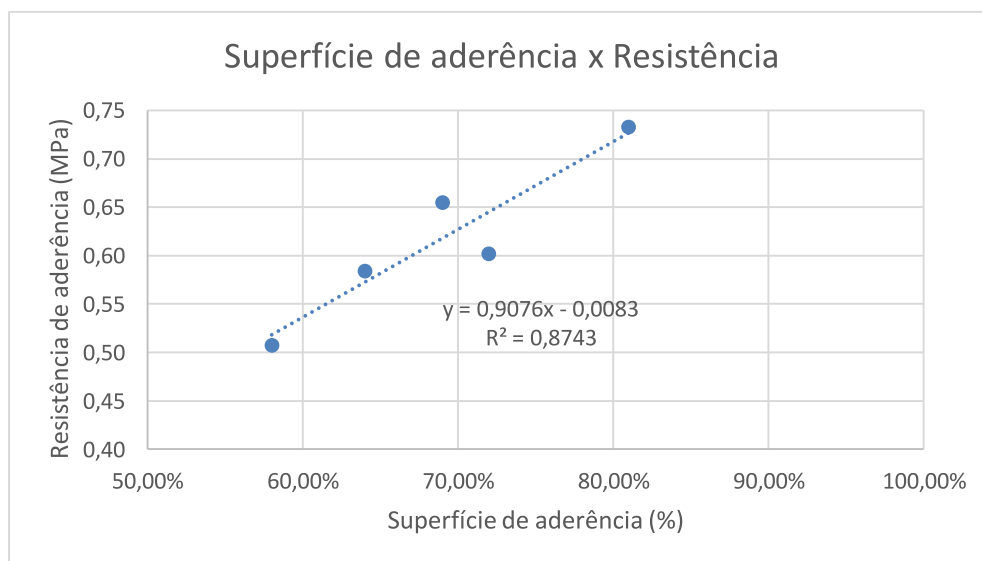
Figura 42 – Área de aderência argamassa colante/ placa cerâmica



Fonte: Elaborado pelo autor

A área superfície de aderência entre a argamassa colante e a placa cerâmica foi mensurada com o auxílio do software AutoCad, sendo o máximo 100% e o mínimo 0%. O traço referência apresentou um resultado médio de aproximadamente 72%, enquanto o traço 5% LBRO apresentou o valor de aproximadamente 64% em média, o traço 10% LBRO apresentou o valor de aproximadamente 69% em média. Já os traços contendo LCC de 5% e 10%, o resultado obtido foi de 58% e 81%, respectivamente. A partir desses resultados, fez-se a determinação da correlação entre resistência de aderência à tração e a área de aderência, conforme mostra o Gráfico 18.

Gráfico 18 – Superfície de aderência x resistência



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme é possível observar no Gráfico 18, a resistência de aderência à tração está correlacionada com a superfície de aderência entre a argamassa colante e a placa cerâmica, com uma correlação entre eixos de 87,43%.

Conforme Gonçalves (2004), o processo de aderência é acompanhado por um fator preponderante para o desempenho do sistema, a superfície de aderência. Essa superfície é a medida que corresponde à razão entre a área de contato efetiva e a área total possível de ser unida entre a argamassa e uma base porosa, essa superfície tende a diminuir à medida que aumenta a ocorrência de falhas de contato na interface.

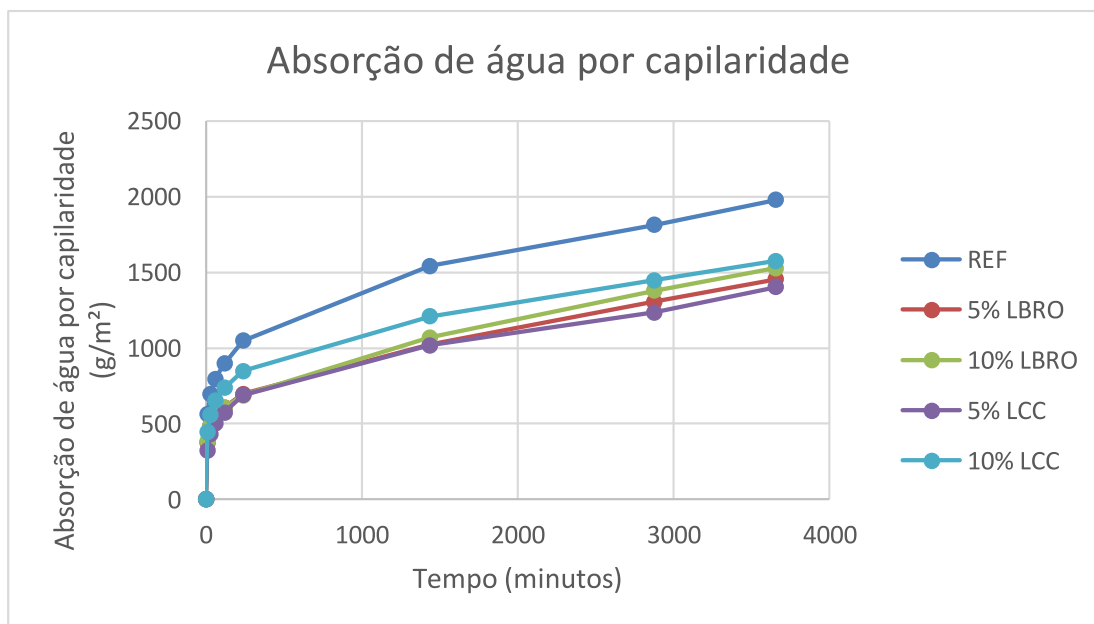
Para Carasek (1996), blocos cerâmicos propiciam os menores níveis de superfície de aderência, devido às ondulações propositalmente colocadas durante o processo de confecção dos mesmos. Normalmente as argamassas não conseguem penetrar totalmente nos poros do bloco cerâmico, e por consequência, reduz a área de contato entre a argamassa e o bloco cerâmico.

Gonçalves (2004), afirma que, o grau de superfície de aderência é dependente do nível de rugosidade da superfície a ser aderida, além de características reológicas da argamassa. Uma boa superfície de aderência, ou seja, um maior contato entre as interfaces, beneficia os mecanismos de aderência.

4.2.3 Ensaio da absorção de água por capilaridade

Os resultados da absorção de água apontaram para um argamassa colante com baixa absorção de água por capilaridade nas argamassas colantes com substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC.

Gráfico 19 – Absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 20 – Absorção de água por capilaridade

Traço	0 min	10 min	30 min	60 min	120 min	240 min	1440 min	2880 min	3660 min	DP
REF (g/m²)	0	563,73	697,42	796,09	897,95	1048,83	1542,21	1814,37	1978,61	636,23
5% LBRO (g/m²)	0	375,61	487,01	553,86	607,34	696,78	1023,68	1306,34	1454,99	462,10
10% LBRO (g/m²)	0	381,97	487,01	553,86	606,38	686,91	1070,16	1378,28	1527,57	491,38
5% LCC (g/m²)	0	323,40	431,63	501,66	574,87	688,82	1017,96	1235,68	1403,75	454,82
10% LCC (g/m²)	0	445,32	556,72	652,22	736,25	848,93	1209,26	1447,99	1576,27	504,35

Fonte: Elaborado pelo autor

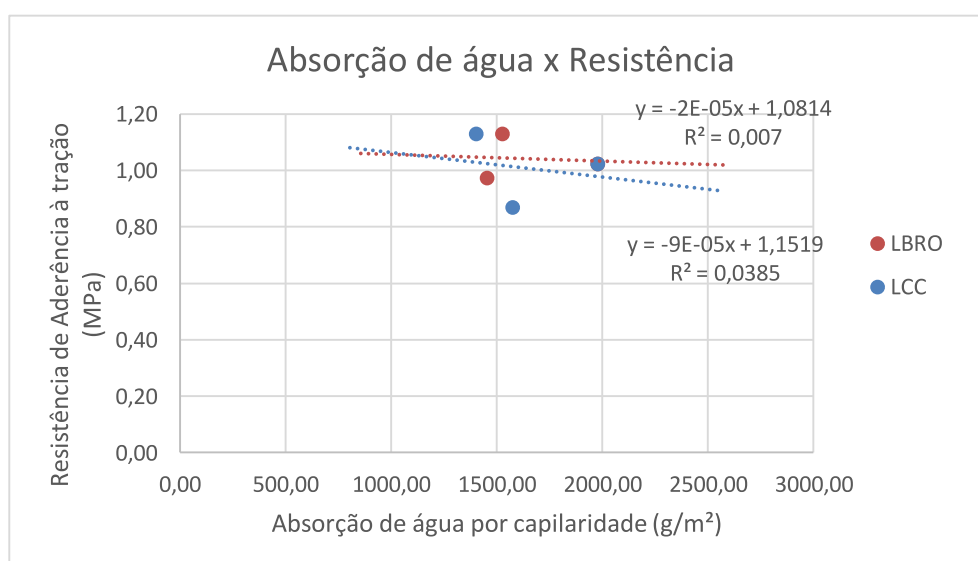
De acordo com Pacheco (2016), materiais cimentícios com absorção de água por capilaridade mais elevadas tendem a serem mais porosos, e consequentemente, com menor vida útil. Para este programa experimental todos os traços contendo LBRO e LCC obtiveram uma menor absorção de água por capilaridade, portanto, tendendo à ser materiais menos porosos e com maiores durabilidades, se comparados ao material referência. A menor absorção de água por capilaridade ocorreu com o traço 5% LCC com 1403,75 g/m² após 3660 minutos de ensaio, sendo a maior absorção de água por capilaridade ocorreu com o traço referência.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a utilização de insumos com maior teor de finos tendem a gerar compósitos cimentícios mais coesos. Com o melhor empacotamento das partículas o compósito cimentício apresenta uma seção transversal menos porosa, sendo a água o principal agente nocivos que tem como meio de entrada os poros do material, consequentemente uma matriz mais coesa tende a ser mais durável pela maior dificuldade de penetração da água.

4.2.1.3 Absorção de água x resistência de aderência à tração

Neste subcapítulo foi traçado uma linha de tendência entre a absorção de água (g/m²) e a resistência de aderência à tração (MPa) aos 28 dias de idade, para cada resíduo, LBRO e LCC. Os valores apresentados resultam no gráfico de deslizamento x resistência presente no Gráfico 20.

Gráfico 20 – Absorção de água x resistência



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme observado no Gráfico 20 os traços com substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC tendem a ter uma relação inversamente proporcional entre a resistência de aderência à tração, e a absorção de água por capilaridade. Também é possível observar que para os traços de argamassas colantes usados neste programa experimental, não há uma correlação entre os eixos.

Segundo Pereira (2017), existe uma correlação inversamente proporcional entre a resistência mecânica e a absorção de água, em compósitos cimentícios avançados. Porém como observado neste estudo, para os traços de argamassas colantes estudados, não há esta correlação entre resistência e absorção de água.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), em geral, quando a relação a/c é elevada, conforme a utilizada neste programa experimental, o grau de hidratação do cimento é baixo, tendo como consequência uma porosidade capilar elevada. O material terá um número relativamente alto de poros grandes, resultado assim, em um coeficiente de permeabilidade alto, consequentemente diminuindo a resistência do material.

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2014), para concretos a resistência está diretamente ligada com a porosidade do material, quanto maior for essa porosidade, consequentemente menor será a resistência. Porém para as argamassas colantes estudadas neste programa experimental observamos que, os traços 5% LBRO e 5% LCC, que apresentaram menor absorção de água por capilaridade, também apresentaram menores resistências, enquanto que os traços 10% LBRO e 10% LCC apresentaram uma maior absorção de água por capilaridade e uma maior resistência se comparados com os respectivos traços de 5%, mostrando que a porosidade está ligada com a resistência da argamassa colante, porém de uma maneira diferente de comparado ao concreto.

Conforme Scartezini e Carasek (2003) relatam em seu estudo, o substrato utilizado é o principal responsável pela resistência de aderência, uma elevada rugosidade superficial do mesmo confere uma maior resistência de aderência à tração à argamassa, consequentemente, diminuindo a importância da porosidade da argamassa colante para o parâmetro de resistência de aderência.

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi estudada a substituição parcial do agregado miúdo por lama do beneficiamento de rochas ornamentais e lama de carbonato de cálcio em argamassas colantes. Através deste programa experimental, buscou-se um método para transformar resíduos em matéria prima alternativa para a produção de argamassas colantes. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) a LBRO e a LCC são materiais cristalinos com maior área superficial específica, se comparados ao agregado miúdo, portanto com melhor desempenho quanto ao empacotamento dos grãos.
- b) Sendo o composto químico com maior presença no agregado miúdo o SiO_2 , na LBRO o SiO_2 e na LCC o CaCO_3 .
- c) a substituição do agregado miúdo por LBRO e LCC causa a diminuição do deslizamento da argamassa colante, conforme o percentual de substituição aumenta para os percentuais testados.
- d) a substituição do agregado miúdo por LBRO e LCC causa a diminuição do índice de consistência da argamassa colante, conforme o percentual de substituição aumenta para os percentuais testados.
- e) a substituição do agregado miúdo por LBRO e LCC não altera o comportamento calorimétrico de hidratação do cimento da argamassa colante nos percentuais testados;
- f) as proporções de 10% de substituição do agregado miúdo por LBRO e LCC, mostraram-se com maior resistência de aderência à tração, se comparados ao traço referência.
- g) enquanto as proporções de 5% de substituição do agregado miúdo por LBRO e LCC, mostraram-se com menor resistência de aderência à tração, se comparados ao traço referência.
- h) A superfície de aderência influencia diretamente à resistência de aderência à tração das argamassas colantes testadas.
- i) todos os traços contendo substituição parcial do agregado miúdo por LBRO e LCC mostraram-se com menor absorção de água por capilaridade, portanto menos porosos.

- j) os traços com 5% de substituição do agregado miúdo por LBRO e LCC apresentaram a menor absorção de água por capilaridade em relação aos demais traços.
- k) para a argamassas colantes a absorção de água por capilaridade, mostrou-se não ter correlação com a resistência de aderência à tração.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento deste trabalho são sugeridos outras frentes de pesquisa relacionados com a substituição do agregado miúdo por LBRO e LC em argamassas colantes. Dentre as questões mais relevantes que possam motivar novos estudos, elencam-se as seguintes sugestões:

- aumento da proporção de substituição do agregado miúdo por LBRO e LCC;
- análise microscópica da argamassa colante desenvolvidas;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS – Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2017. Brasília. Distrito Federal. Brasil. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13528**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânicas - determinação da resistência de aderência à tração - Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13755**: Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante - Projeto, execução, inspeção e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 13817**: Placas cerâmicas para revestimento - Classificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 14081-1**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-2**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-3**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 3: Determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-4**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14081-5**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 5: Determinação do deslizamento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. São Paulo: ABRELPE, 2015.

ABRUKERSH, S. A.; FAIRFIELD, C. A. Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. **Construction and Building Materials** **25**. P - 4088 – 4094. 2011. Tradução nossa.

AİTCIN, P. C.; FLATT, R. J. (Ed.). Science and Technology of Concrete Admixtures. **Cambridge: Elsevier**, p. 503–523, 2016. Tradução nossa.

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

ALMEIDA, A. E. F. S.; SICHIERI, E. P. Experimental study on polymer-modified mortars with silica fume applied to fix porcelain tile. **Building and Environment** **42**. P – 2645 – 2650. 2007. Tradução nossa.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos. Em: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia – Argamassas**. 5 Edição. São Paulo, 11 a 13 de Junho de 2003. São Paulo, 2003.

Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento - ASPACER – 2015 <<http://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/especial-publicitario/aspacer/ceramica-de-revestimento/noticia/2016/10/revestido-de-brasilidade.html>> Acesso em: 17 mai. 2018.

AZEVEDO, A. R. G. et al. Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. **Construction and Building Materials** **148**. P - 359 – 368. 2017. Tradução nossa.

BANFILL, P. F. G.; The reology of fresh mortar - a review. Em: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**. 6 Edição. Florianópolis, 23 a 25 de Maio de 2005. Florianópolis, 2005.

BECKER, G. Y. R. S.; VALÉRIO FILHO, M. A exploração de areia na região metropolitana do vale do paraíba e litoral norte e a gestão minerária nos municípios de são josé dos campos e jacareí – sp. **Revista Univap**, **V. 24**, **N. 44**. Julho, 2018.

BEHERA, M. et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and building materials**, Roorkee, India, v. 68, p. 501-516, out. 2014. Tradução nossa.

BELTRÁN, M. G. et al. Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash. **Construction and Building Materials** **112**. P - 699 – 707. 2016. Tradução nossa.

BEZERRA, I. M. T. et al. Aplicação de cinza de casca de arroz em argamassa de assentamento. Campina Grande, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2011.

BORTOLETTO, M. et al. Avaliação do resíduo cinza da madeira de eucalipto como substituição parcial da areia em argamassas de cimento. **Revista Científica ANAP Brasil – v. 10**, **n. 18**. P – 80 – 93. 2017.

BOTAS, S.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Bond strength in mortar/ceramic tile interface – testing procedure and adequacy evaluation. **Materials and structures**, p- 02 – 13. RILEM, 2017. Tradução nossa.

BRAGA, F. S. et al. Caracterização ambiental de lamelas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Eng sanit ambiente**, v. 15, n. 3, p- 237 – 244. 2010.

CAPPELLARI, M.; DAUBRESSE, A.; CHAOUICHE, M. Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: Relationship with water-retention. **Construction and Building Materials** 38. Pg. 950 - 961. 2013. Tradução nossa.

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

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: **IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, IV SBTA, p. 43 - 67. Anais. Brasília. 2001.

CARASEK, H.; et al. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, vol. 21, n. 03, p. 714 - 732. Brasil, 2016.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. **VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. I international symposium on mortars technology**. Florianópolis, 23 a 25 de Maio, 2005.

CARNEIRO, G. V. H. S.; GIL, L. K. S.; NETO, M. P. C. Calor de hidratação. **Universidade Federal de Goiás – UFG**. Trabalho de conclusão de curso, Goiânia. 2011.

CARVALHO, P. J.; Betões e argamassas modificadas com incorporação de PVA. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Braga, Portugal, 2012.

CHAVES, L. A. A.; Estudo das propriedades de argamassas com a substituição parcial da areia pela cinza do lodo de ete. **Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD**. Trabalho de conclusão de curso. Dourados, Mato Grosso do Sul. Brasil. 2019.

CHEAH, C. B.; RAMLI, M. Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials** 30. P - 320 – 329. 2012. Tradução nossa.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R.; Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes. **RILEM Proceedings Pro**, v. 40, p. 580-589, 2010.

COSTA, E. B. C. C. Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. SP. Brasil. 2014.

COSTA, M. R. M. M.; Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

COSTA, M. R. M. M.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado e o seu comportamento. **VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas**. Brasil, Florianópolis, 23 a 25 de Maio. 2005.

COSTA, M. R. M. M.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. **Análise do deslizamento da argamassa colante através do seu comportamento reológico**. Brasil, 2007.

DAMINELI, B. L. et al. Influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, Volume 10, número 5. São Paulo. Setembro/ Outubro. 2017.

DEGEN, M. K. et al. Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial do cimento. **Anais do 55º congresso brasileiro do concreto – CBC2013**. Brasil, 2013.

DIAS, L. S. et al. Rejeitos de mineração de quartzo para produção de argamassa colante. **22º CBECiMat – congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais**. 06 a 10 de Novembro, Natal, RN, Brasil, 2016.

EN 1015 – 12. Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. **European Standard**, 2016.

EN 1347 – Adhesives for tiles. Determination of wetting capability. **European Standard**, 2007.

EN 1348 – Adhesives for tiles. Determination of tensile adhesion strength for cementitious adhesives. **European Standard**, 2007.

EN 12004:2007 + A1:2012 - Adhesives for tiles. Requirements, evaluation of conformity, classification and designation.

ETAG 004 - External thermal insulation composite systems (ETICS) with rendering. **EOTA – European Organisation for technical approvals**, 2013.

FOELKEL, C. Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose kraft de eucalipto – Parte 5: Resíduos minerais. **Eucalyptus online book e newsletter**. <http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25_ResiduosMinerais.pdf> Acesso em: 25 dez. 2018.

FE PA36 - LNEC (1986) Bond strength test method. LNEC, Lisboa, Portugal, 1986.

FERRARI, S. et al. Análise da retenção de água em argamassas colantes de mercado. In: **IV Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassa**. Anais do IV SBTA. Belo Horizonte. 2011.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 2ed. São Paulo: PINI, 2010.

GAMBALE, E. A.; BITTENCOURT, R. M. Análise do fenômeno térmico em concreto com cimento Portland branco. **Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2008**, IBRACON, Setembro, 2008.

GAMBALE, E. A. et al. Simulação numérica e verificação in loco das temperaturas da viga munhão da UHE Foz do Chapecó. **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC200**, IBRACON, 2009.

GONÇALVES, J. P.; Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, S. R. C. Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – Estudo de caso. Dissertação de mestrado, **Universidade de Brasília – UNB**, Brasília, 2004.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D.; Rheological Lab Testing of Building Formulations. **ConChem Conference, Düsseldorf**, 1994, <<http://www.baustoffchemie.de/en/rheology>> Acesso em: 18 nov. 2018.

GUASQUES, A. C. F. et al. Impactos ambientais dos materiais da construção civil: breve revisão teórica. **Revista tecnologia**, v. 23, Maringá, p. 13 – 24, Brasil, 2014.

HARBI, R.; DERABLA, R.; NAFA, Z. Improvement of the properties of a mortar with 5% of kaolin fillers in sand combined with metakaolin, brick waste and glass powder in cement. **Construction and Building Materials** 152, pag 632 – 641. 2017. Tradução nossa.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual 2016**. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acessado em: 04 de Julho de 2018.

ISHIKAWA, P. Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, São Paulo, Brasil, 2003.

JENNI, A. et al. Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. **Cement and concrete research** 35, p. 35 -50. 2005.

JENNI, A. et al. Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage. **Cement and concrete research** 36, p. 79 -90. 2006.

JUNGINGER, M.; Rejuntamento de sistema cerâmico: influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da **Universidade de São Paulo**, São Paulo, SP. 2003.

JUNGINGER, M.; MEDEIROS, J. S. Ação da eflorescência de carbonatos de cálcio sobre o vidrado de placas cerâmicas. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, USP, 2002.

KAZMIERCZAK, C. S.; BREZEZINSKI, D. E.; COLLATTO, D. Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa. **Estudos tecnológicos**, vol. 3, n. 1, p. 47 – 58. Brasil, 2007.

KAZMIERCZAK, C. S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 7 – 19, Abril/ Junho, 2016.

KUDO, E. K.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação de argamassas colantes por reometria rotacional. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, V. 13, n. 2, p. 125 - 137. 2013.

KULAIF, Y. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Sumário Mineral 2014**. São Paulo, 2014.

KURKLÜ, G.; GÖRHAN, G. Investigation off usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymers adhesive mortar production. **Construction and Building Materials**, vol. 217, p. 498-506, 2019. Tradução Nossa.

LIMA, M. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. de A.; NASCIMENTO, J. W. B.; LEAL, A. F. Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação. **Revista Escola de Minas**, v.61, p.285-290, 2008.

MARANHÃO, F. L.; LOH, K.; JOHN, V. M. The influence of moisture on the deformability of cement-polymer adhesive mortar. **Construction and Building Materials** 325. P. 2948 - 2954. 2011. Tradução nossa.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Editora IBRACON, 2 edição, São Paulo, 2014.

MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: Evolução dos Conceitos Teóricos e os Problemas da Mensuração Prática. **Revista Economia e Desenvolvimento**, Pernambuco, n. 16, p. 22-41, 2004.

MITTRI, S. H. M. Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade. **Universidade Federal do Espírito Santo**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. ES. Brasil. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME – **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. 2018.

MODOLO, R. C. E. et al. Lime mud from cellulose industry as raw material in cement mortars. **Materiales de Construcción**, vol. 64, Outubro – Dezembro, 2014. Tradução Nossa.

MODOLO, R. C. E. et al. Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 192-202. 2015. Tradução nossa. Tradução nossa.

MONTE, M. C. et al. Waste management from pulp and paper production in the European Union. **Waste Management**, vol. 29, p. 293 -308, 2009. Tradução Nossa.

MOSES, S. The nature of adhesion. **Industrial and Engineering Chemistry**, Vol. 41, No. 10, P. 2338 – 2342. 1949.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OLIVEIRA, I.; et al. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. 18 ed. São Paulo, Fazenda Arte, 2000.

OLIVEIRA, M. J. E. Materiais descartados pelas obras de construção civil: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem. Tese (**Universidade Estadual Paulista - USP**). São Paulo. 2012.

OLIVEIRA, M. J. D. Avaliação do tempo de consolidação de argamassas colantes através de métodos reológicos. **Universidade Federal de Santa Maria**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, Brasil, 2015.

OLIVEIRA, G. C. Desenvolvimento de argamassas colante utilizando resíduo de caulim. **Universidade Federal de Campina Grande**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Campina Grande, PB, Brasil, 2016.

OLIVEIRA, R.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporação de agregados finos de vidro em argamassas. **Teoria e Prática da Engenharia Civil**, n. 21, pag. 25 -39, Maio, 2013.

PACHECO, F. Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade. **Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, São Leopoldo, RS, 2016.

PEREIRA, E.; SILVA, I. J.; COSTA, M. R. M. M. Avaliação dos mecanismos de aderência entre argamassas colantes e substratos não porosos. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, V. 13, n. 2, p. 139 – 149. 2013.

PEREIRA, G. Análise de compósitos cimentícios avançados com substituição parcial do cimento por cinza de acácia-negra. **Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS**, São Leopoldo, RS, 2017.

PETIT, J. Y. et al. Effect of formulation parameters on adhesive properties of ANSI 118-15 and 188-11 compliant tile adhesive mortars. **International journal of adhesion & adhesives**, v. 66, p. 73 – 80. 2016. Tradução nossa.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, Durabilidade e Vida Útil das edificações: Abordagem Geral. **Revista Técnico-científica do CREA-PR**, v. 1, n.1, p. 1-14, out. 2013.

PÓVOAS, Y. V. Tempo em aberto da argamassa colante: método de medida e influencia dos aditivos HEC e resina PVAc. **Universidade de São Paulo**, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, SP, 1999.

PÓVOAS, Y. V.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Influência da perda de água por evaporação na resistência de aderência entre argamassa colante e placa cerâmica. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 2, p. 7 – 18, Porto Alegre, RS, Brasil, 2002.

PÓVOAS, Y, V. PILEGGI, R. G. JOHN, V. M. Análise do filme superficial da argamassa colante no estado fresco. In: **VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas**. Anais do VI SBTA. Florianópolis. 2005.

REIS, C. F.; CASTRO, N. F.; Aproveitamento dos resíduos de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. **IV jornada do programa de capacitação interna – CETEM**, 2015.

RILEM TC 116 PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability. Concrete durability – an approach towards performance testing. **Materials and Structures**, v. 32, n. 4, p. 174-179, 1999. Tradução nossa.

RODRIGUES, M. A. C. O.; et al. Caracterização de resíduos sólidos da indústria de celulose tipo kraft visando sua aplicação no desenvolvimento de materiais cerâmicos. **22º CBECiMat – Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais**. Natal, RN, Brasil. 06 a 10 de Novembro, 2016.

RODRIGUES, L. H. C. H. Análise da incorporação do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente na composição do cimento portland. **Universidade Federal do Espírito Santo**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. ES. Brasil. 2018.

SABOYA, F.; XAVIER, G. C.; ALEXANDRE, J. The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1950 – 1960, 2007.

SARDOU FILHO, R. et al. Atlas de rochas ornamentais do estado do espírito santo: projeto geologia e recursos minerais do estado do espírito santo. CPRM – **Serviços Geológicos do Brasil**, Brasil, 2013.

SATO, V. Y.; GALINA, A. P. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Contribuição ao estudo reológico de pastas cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. Volume 11, Número 6, p. 1284 – 1307, Dezembro. Brasil. 2008

SCARTEZINI, L. M. B.; CARASEK, H. O tipo e preparo da alvenaria na prevenção do deslocamento em revestimentos de argamassa. **CONPAT** – Congresso Latinoamericano de patologia de la Construcción, **7**, 2003.

SCHRAMM, G. Reologia e reometria - fundamentos teóricos e práticos. **Artliber**, São Paulo, 2006.

SCRIVENER, K.L.; KIRKPATRICK R. J. **Cement and Concrete Research - Innovation in use and research on cementitious material**. Volume 38, páginas 128 – 136, 2008. Tradução nossa.

SENEFF, L. et al. The influence of TiO₂ nanoparticles and poliacrilonitrile fibers on the rheological behavior and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 315 – 330, 2015.

SIBILIA, P. **O homem pós-orgânico: corpo, subjetividade e tecnologias digitais**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2002.

SILVA, D. A.; Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGE, **Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC**, Florianópolis, 2001.

SILVA, A. C. M.; PONTES, R. B.; SILVA, R. F. Aspectos normativos (ABNT – NBR 14081 – 2012) na avaliação da aderência de duas argamassas industrializadas. **Revista CIENTEC**, v. 9, n. 1, p. 141 – 159, 2017.

SILVEIRA, L. L. L.; VIDAL, F. W. H.; SOUZA, J. C. Beneficiamento de rochas ornamentais. **Centro de Tecnologia Mineral – CETEM**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

SPADOTTO, A. et al. Impactos ambientais causados pela construção civil. **Unoesc & Ciência – ACSA**, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 173 – 180, 2011.

ULIANA, J. G. Tratamento térmico da lama do beneficiamento de rochas ornamentais: aplicação como pozolana em matrizes cimentícias. **Universidade Federal do Espírito Santo**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. ES. Brasil. 2014.

ULIANA, J. G. et al. Estudo comparativo da caracterização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais com e sem granalha de aço. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2013**, Brasil, 2013.

VARGAS, A. S.; MASUERO, A. B.; VILELA, A. C. F. Estudo microestrutural e determinação do calor de hidratação em pastas de cimento Portland com pó de aciaria elétrica (PAE). **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 7 – 18, Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.

VINCO, L. J. F. G. et al. Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais.

Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 165 – 182, Outubro/ Dezembro, 2017.

WETZEL, A. et al. Influence of shrinkage and water transport mechanisms on microstructure and crack formation of tile adhesive mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 39 – 50, 2012.

WINCKLER, J. R. Caracterização física e química de cinza de *pinus spp.* para a adição em produtos de cimento Portland: concreto e argamassa. 98p. Dissertação (**Instituto de Engenharia do Paraná**). Curitiba. 2015.

WINNEFELD, F. et al. Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 426 – 438, 2012.

WYRZYKOWSKI, M. et al. Pore structure of mortars with cellulose ether additions – Study of the air-void structure. **Cement & Concrete Composites**, v. 62, p. 117 – 124, 2015.

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NÄÄS, I. A. Sustentabilidade na construção civil. INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 3., 2011, São Paulo. Anais... São Paulo, 2011. pp. 1-10.