

**SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR *GRITS* PARA A FABRICAÇÃO DE
ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO**

ALINE AZEVEDO DUNCAN LIMA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO –
UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO - 2022

SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR *GRITS* PARA A FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO

ALINE AZEVEDO DUNCAN LIMA

“Dissertação apresentada ao PPGEC
– Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro como parte das exigências
para obtenção do título de mestre em
Engenharia Civil.”

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO –
UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO - 2022

SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR GRITS PARA A FABRICAÇÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO

ALINE AZEVEDO DUNCAN LIMA

“Dissertação apresentada ao PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.”

Aprovado em: 21 de fevereiro de 2022.

Comissão Examinadora:



Prof. Elie Chahdan Mounzer, D. Sc., UFF



Prof. Joadelio Chagas Soares, D. Sc., IFF



Prof. Jonas Alexandre, D. Sc., UENF



Prof. Dylmar Penteado Dias, D. Sc., UENF (Orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de ter realizado a pesquisa, por todas as dificuldades as quais passei, que foram necessárias ao meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço a minha família, minha mãe Sônia Regina Rodrigues de Azevedo, meu pai Emanuel Duncan Lima, meu irmão Leonardo Azevedo Duncan Lima e minha prima Gabriela Azevedo Linhares por todo apoio e confiança durante todo o processo de preparo e desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço as minhas amigas, Laimara da Silva Barroso, por todo incentivo a participar do processo seletivo do mestrado e parceria durante esses anos de estudo. As amigas que conquistei na universidade que tanto me apoiaram a permanecer e auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa, como Helloá Gomes Ferreira, Yasmin Cruz Gomes, Maurício Menezes de Faria Filho, Tulane Rodrigues da Silva e Jheyce de Souza Moreira Oliveira.

Agradeço ao meu orientador, Dylmar Penteado Dias, pela sua disponibilidade para me direcionar e proporcionar a conclusão da pesquisa. Agradeço pela paciência e competência em me auxiliar a encontrar soluções mediante as dificuldades encontradas no decorrer do trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE GRÁFICOS	xii
LISTA DE SIGLAS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Geral.....	17
1.2.2 Específicos	17
1.3 Justificativas	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Argamassas de múltiplo uso	19
2.1.1 Argamassa para assentamento	20
2.1.2 Argamassa de revestimento	21
2.2 Reaproveitamento de resíduos sólidos	22
2.2 Ciclo produtivo da celulose e geração de resíduos	24
2.3 Resíduo <i>Grits</i>	28
2.4 Produção e aplicação do resíduo <i>Grits</i>	30
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	34
3.1 Materiais	34
3.1.1 Cimento	35
3.1.2 Agregado miúdo	36
3.1.2.2 <i>Areia</i>	39
3.1.2.3 <i>Água destilada</i>	40
3.1.3 Massas específicas dos componentes	40
3.1.3.1 <i>Massas específicas dos agregados</i>	41
3.1.3.2 <i>Massa específica do cimento (Le Chatelier)</i>	42

3.2 Métodos	43
3.2.1 Dosagem	43
3.2.2 Mistura	44
3.3 Estado fresco	45
3.3.1 Calorimetria por condução isotérmica	45
3.3.3 Densidade da massa no estado fresco	47
3.3.4 Retenção de água	49
3.3.5 Teor de ar incorporado	50
3.4 Estado endurecido	51
3.4.4 Resistência mecânica	52
3.4.4.1 Compressão axial	52
3.4.4.2 Tração por compressão diametral	53
3.4.4.3 Resistência potencial de aderência à tração	53
3.4.4.4 Resistência à tração na flexão e à compressão	55
3.4.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio	56
3.4.6 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	58
3.4.7 Densidade da massa aparente no estado endurecido	59
3.5 Análise estatística	60
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
4.1 Estado fresco e endurecido	61
4.1.1 Consistência	61
4.1.2 Densidade da massa no estado fresco e teor de ar incorporado	62
4.1.3 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade	63
4.1.4 Retenção de água	64
4.1.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio	65
4.1.6 Calorimetria por condução isotérmica	67
4.1.7 Densidade da massa aparente no estado endurecido	69
4.2 Resistência Mecânica	70
4.2.1 Compressão axial	70
4.2.2 Tração por compressão diametral	72
4.2.3 Resistência potencial de aderência à tração	74
4.2.4 Tração na flexão e compressão	76

4.3 Análise comparativa da ARG20 com as comerciais _____	79
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____	81
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	83

LISTA DE FIGURAS

- Figura: 2.1** Ciclo de Economia Linear
- Figura: 2.2** Ciclo de Economia Circular
- Figura: 2.3** Linha Verde – Circuito da Polpa
- Figura: 2.4** Linha Verde – Circuito da Polpa
- Figura: 2.5** Linha Vermelha – Circuito de recuperação do licor negro
- Figura: 2.6** Linha Azul – Circuito de recuperação do licor branco
- Figura: 3.1** Pasta de cimento com CPII-E
- Figura: 3.2** Resíduo *grits* (a) e areia natural (b)
- Figura: 3.3** Micrografias do *grits* – (a) aumento em 500x; (b) aumento em 2000x
- Figura: 3.4** Ensaio de Le Chatelier
- Figura: 3.5** Misturador de bancada utilizado na confecção das argamassas
- Figura: 3.6** Ilustração do funcionamento do calorímetro
- Figura: 3.7** Calorímetro isotérmico
- Figura: 3.8** Ensaio de Consistência (*Flow Table*)
- Figura: 3.9** Ensaio para determinação da densidade das argamassas no estado fresco
- Figura: 3.10** Funil de Buchner modificado acoplado à bomba a vácuo
- Figura: 3.11** Equipamento para ensaio de teor de ar incorporado
- Figura: 3.12** Corpos de prova para determinação das resistências à compressão e à tração por compressão diametral
- Figura: 3.13** Ensaio de compressão diametral

- Figura: 3.14** Argamassas com pastilhas metálicas coladas para determinação da resistência potencial de aderência à tração
- Figura: 3.15** Corpo de prova prismático durante o ensaio de tração na flexão
- Figura: 3.16** Corpo de prova durante o ensaio de compressão
- Figura: 3.17** Porosímetro de intrusão de mercúrio
- Figura: 3.18** Ensaio de absorção de água por capilaridade
- Figura: 4.1** Presença de poros abertos nas argamassas

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Cimentos e suas adições
Tabela 2.2	Classificação das argamassas cimentícias
Tabela 2.3	Funções e propriedades da argamassa de assentamento
Tabela 2.4	Trabalhos relacionados ao uso de resíduos sólidos em materiais cimentícios
Tabela 3.1	Parâmetro experimental
Tabela 3.2	Tempo de início e fim de pega do cimento Portland CPIIE 32
Tabela 3.3	Caracterização física do <i>grits</i> e da areia
Tabela 3.4	Composição química do resíduo <i>grits</i>
Tabela 3.5	Massa específica dos agregados
Tabela 3.6	Massa específica do cimento
Tabela 4.1	Relação a/c das argamassas com substituições propostas
Tabela 4.2	Densidade das argamassas no estado fresco
Tabela 4.3	Teor de ar incorporado
Tabela 4.4	Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade
Tabela 4.5	Retenção de água das argamassas no estado fresco
Tabela 4.6	Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio
Tabela 4.7	Calorimetria das argamassas

- Tabela 4.8** Densidade de massa aparente no estado endurecido
- Tabela 4.9** Teste Tukey das argamassas para resistência à compressão axial aos 28 dias
- Tabela 4.10** Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral
- Tabela 4.11** Resistência potencial de aderência à tração aos 28 dias
- Tabela 4.12** Análise de variância da resistência potencial de aderência à tração
- Tabela 4.13** Análise de variância da resistência de tração na flexão
- Tabela 4.14** Comparação da ARG20 com argamassas comerciais

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 3.1** Curva granulométrica do *grits* e da areia
- Gráfico 4.1** Porosimetria da ARG0
- Gráfico 4.2** Porosimetria da ARG20
- Gráfico 4.3** Porosimetria da ARG100
- Gráfico 4.4** Estágio de hidratação das argamassas ARG0 e ARG20
- Gráfico 4.5** Densidade de massada ARG0 e ARG20
- Gráfico 4.6** Resistência à compressão axial das argamassas aos 28 e 90 dias
- Gráfico 4.7** Resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 90 dias
- Gráfico 4.8** Resistência à tração na flexão aos 28 e 60 dias
- Gráfico 4.9** Resistência à compressão axial em corpos de prova prismáticos aos 28 e 60 dias

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ANOVA	Análise de Variância
CENIBRA	<i>Celulose Nipo-Brasileira S.A</i>
CPII-E	Cimento Portland de classe II – com adição de escoria
<i>DREGS</i>	Um dos resíduos/rejeito do processo químico celulósico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
<i>GRITS</i>	Um dos resíduos/rejeito do processo químico celulósico
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
<i>KRAFT</i>	Processo químico celulósico
LAMAV	Laboratório de Engenharia de Materiais Avançados - UENF
LECIV	Laboratório de engenharia civil – UENF
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
TUKEY	Teste de Comparação de Médias
UENF	Universidade Federal Norte Fluminense

RESUMO

A geração de resíduos sólidos provenientes do ciclo produtivo da celulose é um entrave. No Brasil, o volume de resíduo produzido pelo processo químico, o Kraft, é elevado, em torno de 3,5 milhões toneladas produzidas em 2018, e o direcionamento a aterros sanitários é dispendioso; portanto, o tratamento e redirecionamento a novos setores como a Construção Civil é uma solução viável. Um dos rejeitos produzidos é o *grits*, material granular obtido por meio da vitrificação que não reagiu na calcinação da lama de cal. Logo, o objetivo, inicialmente, deste trabalho foi avaliar a substituição total da areia natural de rio lavada por resíduo *grits* em argamassas de cimento, a fim de verificar sua viabilidade na produção de argamassa de revestimento e assentamento no mercado construtivo. Contudo, as argamassas modificadas indicaram uma elevada redução da resistência mecânica aos 28 dias, em 51%, assim como, o aumento da relação de a/c variando de 0,7 a 1,17; além da redução mais acentuada das densidades de argamassas. Diante disso, foi introduzida à pesquisa uma nova substituição em 20% de *grits*. Nas argamassas de referência, ARG0, e substituição parcial, a ARG20, foram realizados ensaios no estado fresco: consistência, densidade de massa, retenção de água, teor de ar incorporado, calorimetria; e no estado endurecido: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e à compressão, aderência e capilaridade. Em seguida, com os resultados aferidos, foram observadas proximidades de resultados e, posteriormente, conferidos através análise de variância (ANOVA).

Palavras-chave: resíduo *grits*; areia; argamassa.

ABSTRACT

The generation of solid waste from the pulp production cycle is an obstacle. In Brazil, the volume of waste produced by the chemical process, Kraft, is high, around 3.5 million tons produced in 2018, and sending it to landfills is expensive; therefore, the treatment and redirection to new sectors such as Civil Construction is a viable solution. One of the wastes produced is grits, a granular material obtained through vitrification that did not react in the calcination of lime mud. Therefore, the objective, initially, of this work was to evaluate the total replacement of natural river sand washed by grits residue in cement mortars, in order to verify its viability in the production of coating and laying mortar in the construction market. However, the modified mortars indicated a high reduction in mechanical strength at 28 days, by 51%, as well as an increase in the w/c ratio ranging from 0.7 to 1.17; in addition to a more accentuated reduction in mortar densities. Therefore, a new substitution in 20% of grits was introduced to the research. In the reference mortars, ARG0, and partial replacement, the ARG20, tests were carried out in the fresh state: consistency, mass density, water retention, incorporated air content, calorimetry; and in the hardened state: compressive strength, tensile strength by diametral compression, tensile strength in bending and compression, adhesion and capillarity. Then, with the measured results, proximities of results were observed and, later, checked through analysis of variance (ANOVA).

Key words: *grits* residue; sand; mortar

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A fabricação celulósica está em constante expansão. Segundo a Indústria Brasileira de Árvore (IBÁ, 2018), a produção de celulose no Brasil sofreu crescimento de 13,1%, correspondendo a 3,5 milhões de toneladas produzidas. Alinhada a esta realidade, o mercado interno brasileiro registrou avanço de 6,4% nas vendas domésticas de madeira.

O crescimento dos investimentos nas indústrias de celulose trouxe consigo seus efeitos colaterais, dado que a produção celulósica é grande responsável por gerar resíduos sólidos, que devem ser tratados de forma adequada para posterior reaproveitamento e/ou ser direcionado a aterros sanitários, com vida útil correspondente a 20 anos (CUSMA, 2015).

Os principais resíduos sólidos formados durante o *Kraft* – processo produtivo da celulose – são os *grits*, *dregs* e *lama de cal*. Tais resíduos são gerados na terceira etapa do processo produtivo, conhecida por *Linha Azul – Circuito de Recuperação do Licor Branco*.

Segundo Santo *et al.* (2020), a preocupação quanto à geração de resíduos da indústria celulósica está na sua quantidade e, portanto, apesar de ser considerado um resíduo comercial, o custo para tratamento e correto direcionamento é um entrave para as indústrias.

Alinhado a isto, há estudos voltados à Construção Civil objetivando contribuir para a redução da disposição de resíduos celulósicos em aterros sanitários e, simultaneamente, favorecer o campo da Engenharia Civil por meio da inserção dos resíduos *grits* e/ou *dregs* como agregado miúdo e/ou aglomerante na confecção de concretos e argamassas. Tais estudos vêm ganhando espaço, visto que os materiais modificados apresentam bom comportamento mecânico quando comparados às argamassas e concretos convencionais. Outras opções de aplicação dos resíduos são: aplicação no solo para correção do pH, pavimentação de estradas e produção de peças cerâmicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo inicial deste trabalho foi avaliar a influência do resíduo *grits* na substituição total do agregado miúdo natural na produção de argamassa de múltiplo uso. Mediante os resultados primários obtidos, considerou-se também a inserção de uma substituição intermediária em 20% à pesquisa.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- avaliar o efeito da substituição total da areia natural pelo *grits* em argamassas ainda em estado fresco pelos ensaios de massa específica, retenção de água e teor de ar incorporado, comparando os resultados com as amostras de referência;
- avaliar o efeito da substituição total nas argamassas modificadas comparando com as de referência, por meio do ensaio de compressão axial aos 28 dias e, ainda, atestar se há coerência nos resultados realizados nos estados fresco e endurecido.
- avaliar por teste estatístico, análise de variância (ANOVA) e teste de comparação de médias (Teste Tukey), se há significância dentre os resultados obtidos da argamassa referência com a modificada e, assim, definir, caso necessário, uma substituição parcial com o intuito de dar seguimento ao programa experimental.

1.3 Justificativas

A areia é um recurso natural não renovável indispensável à vida moderna (BENAHSINA *et al.*, 2021). Esta é encontrada nos mais diversos ramos comerciais, sendo necessária à confecção de vidros, chips de silício e significativamente presente na construção civil, em concretos, argamassas e asfaltos de estradas.

O agregado miúdo é imprescindível; contudo, é um material muito mal monitorado, ainda que muito utilizado, pelas instâncias reguladoras que apresentam pesquisas e valores superficiais quanto ao seu consumo, estimando em torno de 50 bilhões de toneladas ao ano, uma vez que, apesar de muitas vezes ser obtida por meio da trituração de rochas, a areia artificial, seu consumo excessivo se tornou caso de corrupção em diversas regiões (PNUMA, 2019).

A *Made for Minds* (2021) publicou que a escavação de areia causa instabilidade das margens de rios, poluição e acidez, acarretando em mortes de peixes, além de reduzir a disponibilidade de água à população e plantações. Ademais, o consumo de areia natural é “oculto a plena vista”, logo a percepção de seu uso indevido passa despercebido por algum tempo.

À vista disso, os estudos acadêmicos (CARRASCO *et al.*, 2017; AL-FAKIH *et al.*, 2019) acerca de materiais alternativos ao uso do agregado miúdo natural são ainda mais recorrentes, dado que a Construção Civil é a área que exige elevado consumo de areia anualmente (BENAHSINA *et al.*, 2021). Neste cenário é apresentado o resíduo *grits*, rejeito granular obtido a partir do ciclo produtivo da celulose, a fim de ser inserido como material com potencial de substituir a areia natural.

As pesquisas de Zanella *et al.* (2014), Mesquita *et al.* (2015) e Oliveira Júnior *et al.* (2019) verificaram a caracterização e desempenho mecânico de argamassas, contudo, tais pesquisas ainda são superficiais para qualificá-lo como um resíduo com potencial a ser inserido no mercado civil.

Portanto, essa pesquisa se configura de caráter imprescindível a melhor compreensão do comportamento deste resíduo e até mesmo inédito, visto que os estudos publicados até o momento relatam substituições parciais do agregado miúdo, de no máximo 20% e, o presente estudo buscou avaliar a possibilidade da substituição total do agregado miúdo pelo resíduo *grits*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi abordado o conceito de argamassa de múltiplo uso, assim como as de assentamento e revestimento. A revisão ainda confere um breve apanhado quanto às questões de gerenciamento de resíduos sólidos e seus efeitos sobre a economia (linear e circular), além de apresentar pesquisas relativas à introdução de rejeitos em materiais cimentícios. Por fim, foi elaborada uma sucinta explicação relativa ao processo produtivo da celulose, o *Kraft*, e a geração de resíduos, enfatizando nesta fase trabalhos com aplicação do *grits*.

2.1 Argamassas de múltiplo uso

Segundo Azevedo (2015), a argamassa é um material monolítico empregado para fins de assentamento e revestimento de paredes. As argamassas devem primordialmente apresentar boa aderência à sua base e endurecimento; para tanto, por mais que a NBR 13281 (ABNT, 2005) não mencione a presença de aditivos que favoreçam o desempenho das argamassas, a norma também não cita empecilho ao uso.

De acordo com Gonçalves (2021), os aditivos como, por exemplo: incorporador de ar, inibidor de retração, impermeabilizantes, aceleradores e redutores de pega são dados como materiais químicos introduzidos às misturas, em pequena quantidade, sem que haja interferência na velocidade da hidratação ou alteração nas propriedades ligantes da mistura cimentícia. Por outro lado, as adições são composições minerais inseridas ao cimento para que suas propriedades sejam modificadas e este apresente características singulares (Tabela 2.1).

A classificação das argamassas depende do aglomerante utilizado e propriedades de plasticidade e consistência além do preparo e fornecimento (PCZIECZEK, 2017) como, por exemplo, as argamassas mistas de cimento e cal podem ou não ser introduzidas em alvenarias estruturais, enquanto as argamassas de cimentos são priorizadas em aplicações que demandam impermeabilização, ou seja, obras hidráulicas e revestimentos de caixas d'água.

Tabela 2.1: Cimento e suas adições (Portal ABCP, 2021).

Cimento	Adição	Porcentagem
CPI	Pozolana/Escória/Material Carbonático	5 a 10%
CPI-S	Material Carbonático	6 a 10%
CPII-E	Escória	Não informado
CPII-Z	Pozolana	Não informado
CPII-F	Fíler	Não informado
CPIII	Escória	35 a 75%
CPIV	Pozolana	15 a 50%

Conforme pode ser observado na Tabela 2.2, existe ampla classificação das argamassas quanto ao seu uso; no entanto, essa pesquisa se aterá à discussão sobre as misturas de assentamento e revestimento.

Tabela 2.2: Classificação de argamassas cimentícias (adaptado de Gonçalves, 2021).

Função	Tipo
Construção de alvenaria	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)
	Argamassa de fixação (encunhamento) (alvenaria de vedação)
Revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco
	Argamassa de emboço
	Argamassa de reboco
	Argamassa de camada única
	Argamassa de revestimento decorativo monocamada
Revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso
	Argamassa de alta resistência para piso
Revestimento cerâmico (paredes e pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas- colante
	Argamassa de rejuntamento
Recuperação da estrutura	Argamassa de reparo

2.1.1 Argamassa para assentamento

As argamassas de assentamento são aplicadas a elevações de alvenaria (Tabela 2.2). Neste caso, seu uso está vinculado à união de blocos cerâmicos,

convencionais ou de outra natureza, a fim de elevar paredes e muros (CARASEK, 2010; GONÇALVES, 2021). As misturas para assentamento são, inclusive, as mais empregadas no ramo da construção civil (CARASEK, 2017; ROSA, 2021).

De acordo com Carasek (2017), as argamassas de assentamento devem exercer funções e propriedades singulares para seu bom desempenho, conforme pode ser observado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Funções e propriedades da argamassa de assentamento (adaptado de CASAREK, 2017).

Função	Propriedade
Unir tijolos e blocos	Aderência
Distribuir uniformemente as cargas	Trabalhabilidade
Garantir a estanqueidade das juntas	Retenção de água
Absorver deformações naturais	Resistência mecânica

Conforme Rosa (2021), as juntas de amarração da alvenaria promovidas pela argamassa de assentamento favorecem a redistribuição das tensões verticais, deformações ocasionadas pela umidade ou calor e, ainda, favorecem ao desempenho resistente – cisalhamento, fogo e conforto termoacústico.

2.1.2 Argamassa de revestimento

A NBR 13749 (ABNT, 2013) classifica a argamassa de assentamento como uma mistura de aglomerante, agregado e água que pode ou não conter aglomerante inorgânico; esse material deve apresentar textura uniforme, sem manchas e eflorescências.

De acordo com Azevedo (2015) e Pczieczek (2017), as argamassas de revestimento devem conferir as seguintes funções:

- proteger a estrutura trabalhando como material de vedação, evitando a ação direta de agentes agressivos, inibindo sua degradação e auxiliando na redução de custos relativos à manutenção da estrutura;

- conferir boa vedação, elevando seu desempenho resistente, função de isolante termoacústico, estanqueidade à água e gases;
- servir de base regularizadora ao recebimento de outros revestimentos;
- favorecer a estética, valorizando a construção.

2.2 Reaproveitamento de resíduos sólidos

Desde a Idade Média, com o intuito de inibir o mau cheiro, sujeira e doenças; os lixos produzidos pela sociedade eram alocados em sítios distantes da civilização, a céu aberto. Contudo, com a chegada da revolução industrial e a crescente geração de rejeitos, a problemática dos resíduos sólidos e suas iminentes consequências ao meio ambiente ganharam visibilidade ao homem.

Segundo Lavnitcki, Baum e Bacegato (2018), apenas com a formulação do Projeto de Lei nº 354/89, dispondo as diretrizes de condicionamento, coleta, tratamento, transporte e destinação final dos resíduos sólidos, condicionou a elaboração da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), consolidada pela Lei nº 12305 em agosto de 2010.

De acordo com o Portal Economia Circular (2021), o modelo econômico linear estruturado pela extração da matéria prima, consumo e descarte do rejeito (Figura 2.1) é impossível de ser mantido, dado que a preservação desse modelo econômico traz consigo o iminente esgotamento de recursos não renováveis. Em contrapartida, a economia circular (Figura 2.2), é um modelo inteligente de manutenção do resíduo que promove faturamento financeiro e, simultaneamente, reduz o descarte de rejeitos. Por meio deste modelo, o resíduo retorna como nutriente em novos processos produtivos e, assim, materiais são reparados, reutilizados, atualizados ou reinseridos, podendo apresentar um produto final de qualidade superior ao esperado sem a sua presença (SILVA *et al.*, 2021).



Figura 2.1: Ciclo de economia linear (Portal IDEIA CIRCULAR, 2021).

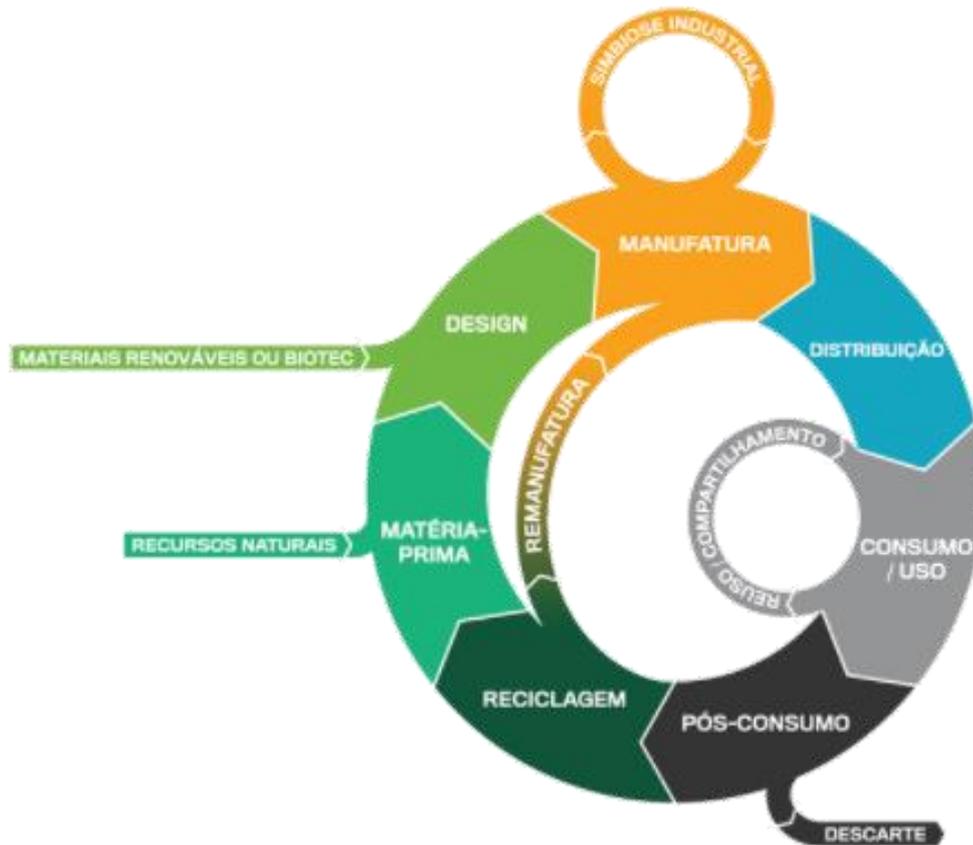


Figura 2.2: Ciclo de economia circular (Portal IDEIA CIRCULAR, 2021).

De acordo com Silva *et al.* (2021), a construção civil consome 30% dos recursos não renováveis e gera 25% do rejeito mundial. Tal realidade trouxe consigo a necessidade de investir em pesquisas (Tabela 2.4) direcionadas à inserção de resíduos devidamente tratados ao setor da construção civil, a fim de reduzir a disposição de rejeitos em aterros, lixões e incineração.

Tabela 2.4: Trabalhos relacionados ao uso resíduo sólido em materiais cimentícios

Resíduo sólido	Título	Referência
Lodo primário da produção de papel	Estudo de viabilidade na incorporação de resíduo da indústria de papel na produção de argamassa de múltiplo-uso.	(AZEVEDO, 2015)
Resíduo de vidro	Influência do resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante.	(SANTOS, 2016)
Resíduo de PET	Caracterização tecnológica do PET-Polietileno Tereftalato – adicionado ao tijolo solo cimento.	(SILVA <i>et al.</i> , 2021)
Resíduo lama de cal	Substituição da cal hidratada por lama de cal, resíduo da indústria de celulose, na produção de argamassas de múltiplo uso.	(GONÇALVES, 2021)

2.2 Ciclo produtivo da celulose e geração de resíduos

O processo *Kraft* é o mais implementado em indústrias ao redor do mundo, porquanto permite a recuperação de reagentes introduzidos celulósicas na primeira etapa do processo químico, a Linha Verde – Circuito da polpa, a fim de separar as fibras de madeira e diluir a lignina para formar o licor negro com maior eficiência. O ciclo de recuperação ainda permite a preservação da resistência das fibras, sendo assim, muito empregado na produção de sacos de cimento, cal hidratada, sílica e metacaulim (SOUZA., 2020; PEDROSO., 2020).

De acordo com a Embrapa (2010), a prática do *Kraft* está presente em cerca de 90% das fábricas de celulose no Brasil. Segundo Mendonça (2018), o processo químico é dividido em três etapas: a *Linha Verde – Circuito da Polpa*; a *Linha Vermelha – Circuito de Recuperação do Licor Negro*; e a *Linha Azul – Circuito de Recuperação do Licor Branco*.

Linha Verde - Circuito da polpa

O processo *Kraft* inicia com o cozimento de cavacos de madeira nos digestores, com objetivo de separar e diluir a lignina. Em seguida, é adicionado o *Licor Branco* ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$) e, assim, as fibras são individualizadas nos difusores. As reações que ocorrem no digestor resultam na produção de um licor

preto e na polpa *Kraft*. Posteriormente, essa mistura passa pela depuração para, enfim, os elementos serem separados, conforme mostra a Figura 2.3.

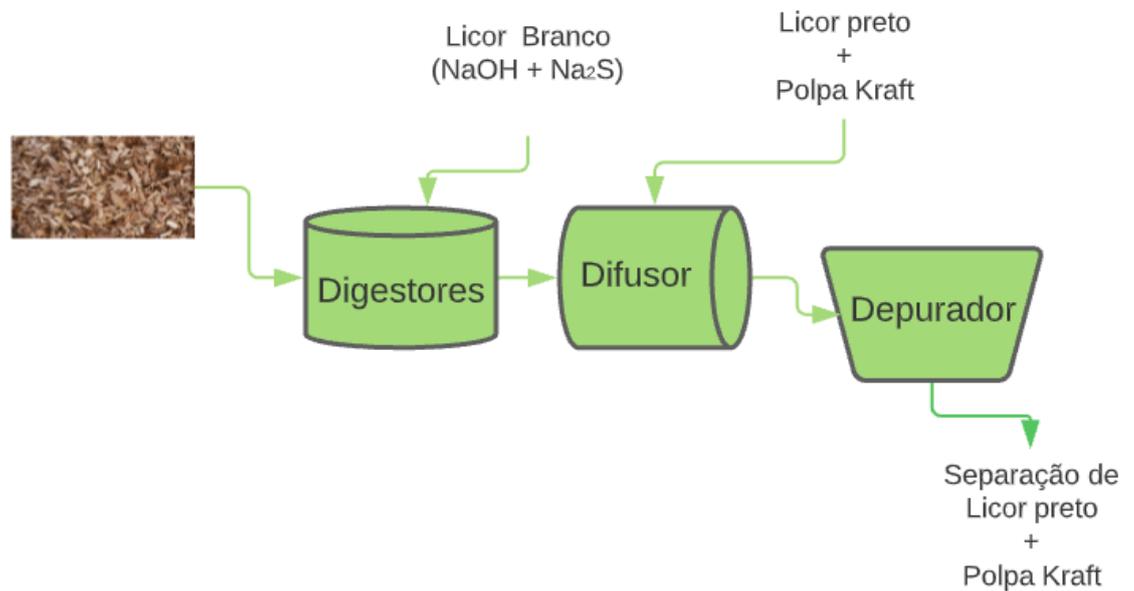


Figura 2.3: Linha Verde - Circuito da polpa (adaptado de Mendonça, 2018).

A massa de celulose produzida é enviada a uma série de etapas de branqueamento para atingir a alvura desejada. Em seguida, a massa é peneirada a fim de separar as impurezas presentes nas fibras da polpa de celulose e, posteriormente, ocorre a secagem, deixando a massa com 10% de umidade. Assim, o material formado é cortado, enfardado, pesado e expedido, como mostra a Figura 2.4.

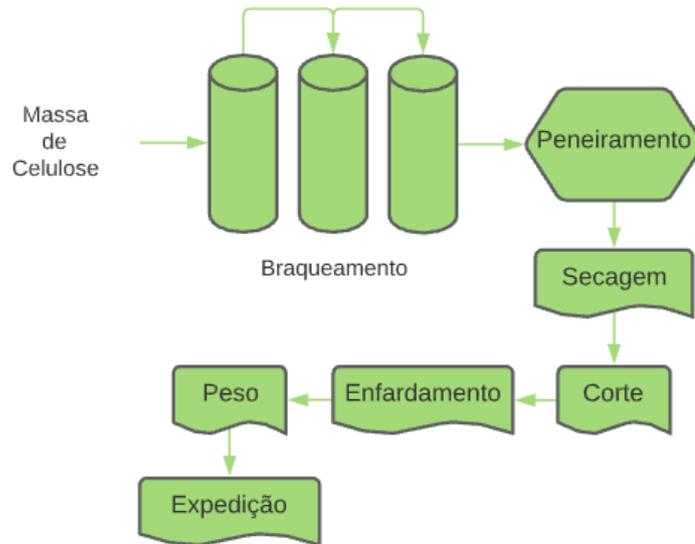


Figura 2.4: Linha Verde - Circuito da polpa (adaptado de Mendonça, 2018).

Linha Vermelha – Circuito de recuperação do licor negro

Segundo Martins (2006), após a depuração, o licor preto concentrado sofre a evaporação e, posteriormente, passa pela queima na caldeira, com intuito de combuster os elementos orgânicos presentes e então recuperar o sódio (Na) e o enxofre (S) presentes no composto. De acordo com Mendonça (2018), o produto da combustão é o carbonato de sódio ($NaCO_3$), alinhado a isto, a conversão de elementos ligados ao sódio (Na) e a presença do enxofre (S) pode formar o sulfato de sódio (Na_2SO_4). Então, pela combinação dos sais fundidos é formado o *smelt*, conforme mostra a Figura 2.5.

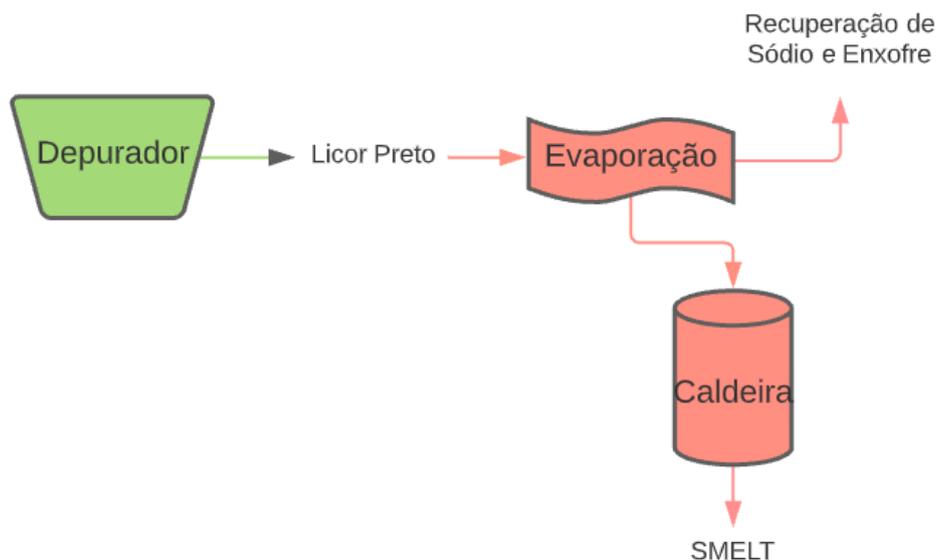


Figura 2.5: Linha Vermelha - Circuito de recuperação do licor negro (adaptado de Martins, 2006).

Linha Azul – Circuito de recuperação do licor branco

O *smelt* é dissolvido em água; logo é obtido o *Licor Verde* ($Na_2S + NaCO_3$). A coloração verde é proveniente de íons de cobre e ferro. O *Licor Verde* passa pelo decantador com dois objetivos: i) ser clarificado; ii) precipitação das impurezas inertes, separando o resíduo “*dregs*” do sistema. Posteriormente, é misturado a cal e, paralelamente a isto é recuperado o *Licor Branco* ($NaOH + Na_2S$), além de ser formado o resíduo *lama de cal* ($CaCO_3$). A cal que não reage é sedimentada formando o resíduo *grits*.

Wolff (2008), para separar a lama de cal do *Licor Branco*, a mistura segue por gravidade para os caustificadores e, depois, aos clarificadores, onde ocorre a dissociação do resíduo com o *Licor Branco*. A lama de cal é lavada em presença de água, diluindo assim o $NaOH$. Em seguida, para diluição do *smelt*, o *Licor Branco* é enviado à caldeira de recuperação, como pode ser observado na Figura 2.6.

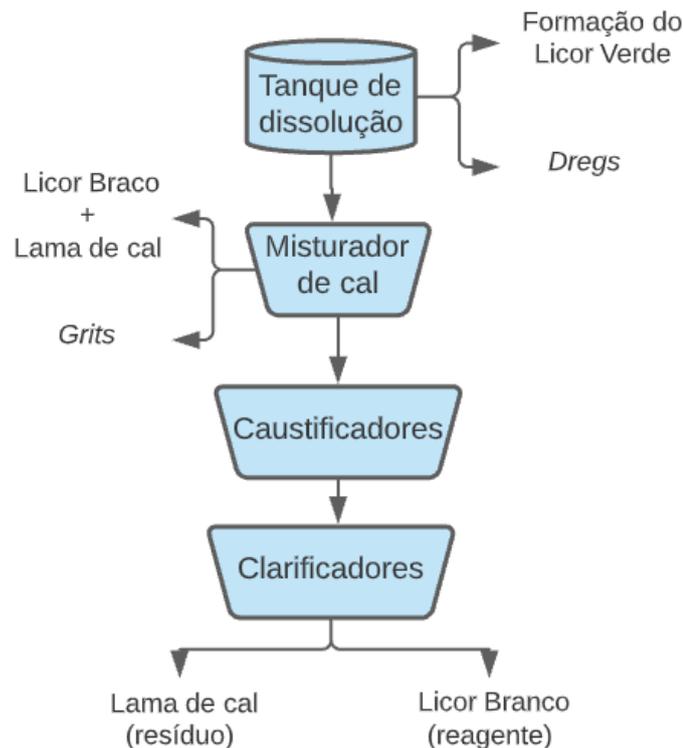


Figura 2.6: Linha Azul – Circuito de recuperação do licor branco (adaptado de Martins, 2006).

2.3 Resíduo *Grits*

A cal produzida no processo de calcinação da lama de cal não reage por completo; parte deste material apresenta impurezas e vitrifica como a areia e, assim, esse composto carbonático não reativo é retirado do processo e convencionado pelo nome *grits* (GONÇALVES, 2021).

De acordo com os dados apresentados pela NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos provenientes da celulose são classificados como – **Resíduo de Classe IIA** – não apresentam periculosidade, não biodegradáveis, podendo reagir com o meio ambiente. Segundo Souza (2020), os resíduos sólidos possuem como destinações principais o aterro controlado, incineração e reciclagem.

Aterro Controlado

A disposição em terrenos os quais não recebem tratamento em sua superfície como, por exemplo, a impermeabilização, são denominados aterros

controlados. Estes recebem os resíduos os quais são classificados como não contaminantes, não oferecendo perigo imediato ou futuro ao solo e as águas superficiais ou subterrâneas.

Contudo, a disposição de rejeitos em aterros controlados demanda cuidados geotécnicos, garantindo a estabilidade e segurança do solo. Neste caso, o armazenamento dos resíduos deve encadear possíveis processos erosivos, que acarretassem a contaminação de águas superficiais. Portanto, a destinação de rejeitos a aterros controlados é dispendiosa, uma vez que, além de necessitar ser alocado em sítio de relevo adequado, apresentando estabilidade e grande extensão, este ainda exige o acompanhamento especializado, maquinário adequado e manutenção rotineira do lençol, a fim de garantir ao órgão público a devida estabilidade do solo evitando qualquer contaminação as águas subterrâneas.

Incineração

A incineração é a opção mais inadequada aos resíduos da celulose, visto que estes não apresentam característica inflamável, além de conterem bastante matéria orgânica em sua composição.

Reciclagem

A inserção de um rejeito ao ambiente industrial ao qual foi gerado ou a algum outro fim é dado como reciclagem. Esta é a via de destinação mais adequada aos resíduos, visto que por este meio é reduzido o seu acúmulo em espaços físicos e evita qualquer possível contaminação ao meio ambiente.

Estudos relativos ao uso do resíduo *grits* e *dregs* na agricultura, por exemplo, alegam que o rejeito atua de forma efetiva inibindo o crescimento de plantas e reduzindo a atividade microbiana, além de promover o aumento do pH do solo, favorecendo assim sua neutralização (Castro *et al*, 2009).

2.4 Produção e aplicação do resíduo *Grits*

Segundo Souza (2020), produziu-se no ano de 2018 cerca de 20.085 milhões de toneladas de celulose, e para cada tonelada produzida, foram gerados 12kg de resíduo *grits*. Portanto, naquele mesmo ano foram produzidos 253.020kg de rejeito. Em virtude da necessidade de redirecionar tal resíduo, pesquisas estão sendo realizadas ao longo das últimas décadas almejando novas aplicações ao *grits*.

Castro *et al.* (2009) estudaram a aplicação dos resíduos *grits* e *dregs* como matéria-prima na produção de clínquer. Os resultados mostraram na composição química forte presença de CaCO_3 em ambos os resíduos; o difratograma de raios X apresentou fases cristalinas (inertes): calcita, predominantemente, aragonita e carbonato de sódio. A granulometria dos resíduos mostrou que os dois poderiam ser inseridos na produção de clínquer, como matéria-prima sem prévia redução no tamanho das partículas. A composição química do clínquer não sofreu alterações com a adição de ambos os resíduos. A análise de emissão de gases ao meio ambiente demonstrou valores similares comparados à produção de clínquer convencional. Os resultados de lixiviação mostraram que o clínquer modificado não é perigoso. Contudo, os níveis de TOC - total de carbono orgânico -, e AOX – haletos orgânicos adsorvidos -, eram muito elevados no *dregs*, sendo classificado como inerte e não perigoso. O ensaio mecânico mostrou aumento da resistência do clínquer modificado nos períodos de 2, 7 e 28 dias em relação ao de referência.

Lima (2010) avaliou a inserção do resíduo *grits*, no concreto pela substituição da brita 1 gnaisse em frações mássicas de 0, 25, 50, 75 e 100%. Inicialmente, o resíduo passou por uma lavagem em água corrente, para eliminação do *NaOH* residual. Em seguida, o *grits* foi seco por 24h em estufa. Foram definidos seis traços, visto que para a substituição de 100%, C100, foram definidos: C100.1 e C100.2, com relações de a/c diferentes. Como resultado do ensaio de compressão axial simples, observou-se que o melhor comportamento mecânico obtido foi com a substituição de 50%, visto que sua resistência elevou 25% em comparação a de referência. Os traços com inserção total de *grits*, variando sua relação de a/c de 0,944 para 1,044, apresentaram o menor valor. Concluiu-se que a introdução do resíduo ao concreto é possível, dado que as

resistências de compressão axial se elevaram. Foi concluído também que os resultados obtidos nos traços C100.1 e C100.2 eram esperados, dado que o grau de adensamento e relação de a/c são fatores determinantes na avaliação da resistência à compressão.

Siqueira e Holanda (2013) estudaram a substituição parcial do cimento pelo *grits* nos teores de 0, 10, 20 e 30% para confecção de tijolo de solo-cimento. Foram observadas fases cristalinas calcítica, predominantemente, além da pirassonita, portlandita e carbonato de sódio. A composição química comprovou a predominância de CaO. Foi constatada perda ao fogo igual a 29,1%. Tal resultado foi atribuído à liberação de calor da reação $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \uparrow\text{CO}_2$. A condutividade elétrica foi de $18,4 \mu\text{Scm}^{-1}$ e, portanto, o resíduo foi classificado como não pozolânico. Constatou-se também que a retração volumétrica de todas as amostras foi positiva, variando de 0,29 a 0,60%. O ensaio de absorção de água mostrou que para substituições superiores a 20% a absorção de água diminuiu, dado que tal ocorrência está diretamente relacionada à densificação microestrutural da matriz cimentícia. Por fim, pelo ensaio de resistência mecânica, todas as amostras contendo resíduo obtiveram resultados superiores aos de referência.

Zanella *et al.* (2014) estudaram a durabilidade da argamassa, através da substituição de areia de rio pelo resíduo *dregs/grits*, em frações de 0, 10, 20%. Constatou-se pelo teste de termogravimetria que para a argamassa de referência, a perda de água até a temperatura de 230°C foi igual a 10,06%, enquanto para os traços com 10 e 20% de resíduo apresentaram perdas de 10,76% e 10,67%, respectivamente. Pôde-se concluir que a presença do *dregs/grits* não afetou a durabilidade da argamassa em altas temperaturas. O *salt spray test*, névoa salina, realizado nos períodos de 0, 7 e 10 dias, constatou-se uma perda mássica das argamassas com *grits* superior ao de referência. Tal comportamento deve-se a permeabilidade das soluções salinas e subsequente cristalização do sal. A cristalização do cloreto de sódio, NaCl, dentro das microfissuras pode ter favorecido a crescente perda mássica dos corpos-de-prova modificados. Concluiu-se que as argamassas modificadas em 10 e 20% apresentam uma durabilidade similar às comerciais, apesar de apresentarem comportamento menos resistente, quando submetidos a ambientes salgados.

Mesquita *et al.* (2015) estudaram o potencial do resíduo *grits* como agregado miúdo na produção de argamassas. Observou-se que a massa específica saturada e absorção foram de 2,52 g/cm³ e 2,46%, respectivamente, resultados próximos aos da areia natural. Contudo, a concentração de material pulverulento foi igual a 27,5%, ou seja, elevada. Entretanto, este fato foi atribuído ao preparo do resíduo no moinho de bolas. A caracterização química do *grits* mostrou grande quantidade de Ca e Na, devido ao CaCO_3 e NaOH , respectivamente. Os ensaios de lixiviação e solubilidade do material demonstraram baixa concentração de elementos químicos e, portanto, verificou-se não ter excedido o máximo permitido. Assim, resultados obtidos mostraram que o *grits* pode substituir a areia natural em proporções de 0 a 100%, desde que se mantenham as características do resíduo próximas às da areia natural.

Siqueira e Holanda (2018) estudaram o desenvolvimento de revestimento cerâmico poroso, utilizando resíduo *grits*. A pesquisa propôs a incorporação do resíduo, em substituição ao calcário, na formulação do revestimento cerâmico, o azulejo. Neste caso, as variações foram de 0; 5; 10; 15%. Observou-se, através do ensaio de difração de raios X, a presença dos cristais: caulinita, quartzo e calcita como as fases predominantes. Contudo, na formulação referência, o MF0, apresentou picos de dolomita, enquanto na M15, dosagem com 15%, foram identificadas as fases pirassonita e portlandita. Tal resultado obtido, na formulação com presença de resíduo confirma os resultados obtidos, na composição mineralógica do *grits*, através do ensaio de fluorescência de Raios-X. Cada distribuição granulométrica apresentou resultados similares para todas as formulações propostas, apresentando, predominantemente, uma variação de 150 a 250 μm . O comportamento mecânico obtido nos ensaios de deformação à flexão e ao cisalhamento elevaram-se, à medida que os corpos-de-prova apresentavam maior presença de resíduo. Tal comportamento está associado a dois fatores: i) a presença da fase cristalina remanescente, a anortita e, ii) a baixa absorção de água observada no ensaio de deformação à flexão.

Oliveira Júnior *et al.* (2019) estudaram a influência da substituição parcial do agregado natural (areia) pelo resíduo *grits* com quatro frações volumétricas diferentes, 0, 10, 15 e 30%, nas propriedades mecânicas de argamassas de cimento. Constatou-se que o resíduo não apresentou atividade pozolânica e, como referido no Capítulo 2 (item 2.3), a composição química do *grits* apresentou

grande porcentagem de CaO, além de óxido de ferro e álcalis em menores proporções. O índice de fluidez da argamassa diminuiu devido à elevada absorção de água pelo resíduo. O ensaio de compressão revelou que as argamassas modificadas, para todas as substituições, foram mais resistentes quando comparadas à argamassa de referência para todas as idades (3, 7 e 28 dias). O ensaio de flexão mostrou a elevada eficiência da argamassa modificada em até 29,2%, contudo, foi relatado que os melhores resultados em ambos os ensaios mecânicos foram das argamassas com 10 e 15% de resíduo.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A pesquisa buscou avaliar o desempenho de argamassas de múltiplo uso confeccionadas a partir da substituição da areia natural de rio lavada pelo resíduo *grits*, proveniente do processo de produção da celulose, o Kraft.

O programa experimental verificou as argamassas, de referência e modificadas, em seu estado fresco e endurecido, por meio de ensaios de consistência, compressão axial e tração por compressão diametral aos 28 e 90 dias, densidade de massa, teor de ar incorporado, retenção de água, resistência potencial de aderência à tração e tração na flexão aos 28 e 60 dias.

Para se executar o programa experimental foi necessário desenvolver um planejamento, dado que dessa forma foi possível criar metas a serem cumpridas, além de melhor organizar o que deveria ser feito para alcançar os resultados almejados. Para tanto, definiu-se os parâmetros fixos e variáveis referentes aos experimentos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Parâmetro experimental

Parâmetros Fixos	Parâmetros variáveis	Variáveis resposta
Mistura	Agregado miúdo	Densidade de massa
Dosagem volumétrica (1:3)	Relação água/cimento	Retenção de água
Consistência		Teor de ar incorporado
		Resistência mecânica

3.1 Materiais

Para o procedimento experimental da pesquisa fez-se uso de cimento Portland, resíduo *grits* (rejeito proveniente do processo produtivo da celulose), areia natural de rio lavada e água destilada.

3.1.1 Cimento

O cimento Portland escolhido foi o CII-E 32, uma vez que, este é o mais comumente utilizado nas obras do município de Campos dos Goytacazes-RJ e a adição de escória é baixa, variando de 6 a 35%.

A fim de caracterizar o cimento Portland, fez-se uso do ensaio de Vicat, cuja finalidade é aferir os tempos de início e fim de pega. A importância deste ensaio está em compreender o período pelo qual a pasta de cimento se mantém trabalhável (Figura 3.1).



Figure 3.1: Pasta de cimento com CII-E

Para tanto, confeccionou-se uma pasta de cimento e esta foi posicionada abaixo da sonda Tetmajer e, a cada 10 min, esta sonda era destravada e, com seu próprio peso, perfurava a pasta. O processo foi repetido até que a sonda não conseguisse ultrapassar uma profundidade máxima de 5 mm e, assim, foi aferido o início de pega. Após a definição do início de pega, as aferições passaram a ocorrer de forma mais espaçada, a cada 40 min, até que a sonda não penetrasse mais na pasta de cimento (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Tempo de início e fim de pega do cimento Portland CII-E 32

Pega	Início	Fim
(Lima, 2022)	2h 11 min	3h 40 min
Norma ABNT	≥ 1h	≤10

Mediante os resultados apresentados (Tabela 3.2), a pasta de cimento manteve-se trabalhável pelo período de 2h 11min até alcançar seu fim de pega após 3h 40min. A ABNT, por sua vez, esclarece que o período para a pasta de cimento começar a transitar do estado trabalhável para o estado endurecido por meio de uma crescente liberação de calor é de no mínimo 1h e, que o tempo para a mistura atingir seu estado enrijecido é de no máximo 10h. Assim sendo, os tempos de início e fim pega obtidos através do ensaio de Vicat estão dentro dos períodos normalizados.

3.1.2 Agregado miúdo

Foram realizados ensaios de caracterização da areia natural de rio lavada e do resíduo *grits*, obtendo os resultados mostrados pela Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Caracterização física do *grits* e da areia.

Propriedade	<i>Grits</i>	Areia	Norma
Massa unitária no estado solto (kg/dcm³)	1,22	1,35	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa unitária no estado compactado (kg/dcm³)	1,33	1,51	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Massa específica real (g/cm³)	2,75	2,48	NBR 6458 (ABNT, 2017)
Absorção de água (%)	3,92	1,99	NM 30 (ABNT, 2001)
Módulo de finura (mm)	1,37	1,30	NBR 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máxima característica (mm)	1,18	1,18	NBR 248 (ABNT, 2003)

No presente estudo, foi adotada a granulometria passante na peneira #16, de abertura igual a 1,18 mm e retida na peneira #50, de abertura igual a 0,3 mm, dado que nesta faixa o *grits* apresentou maior rendimento quanto à sua obtenção (Figura 3.2).

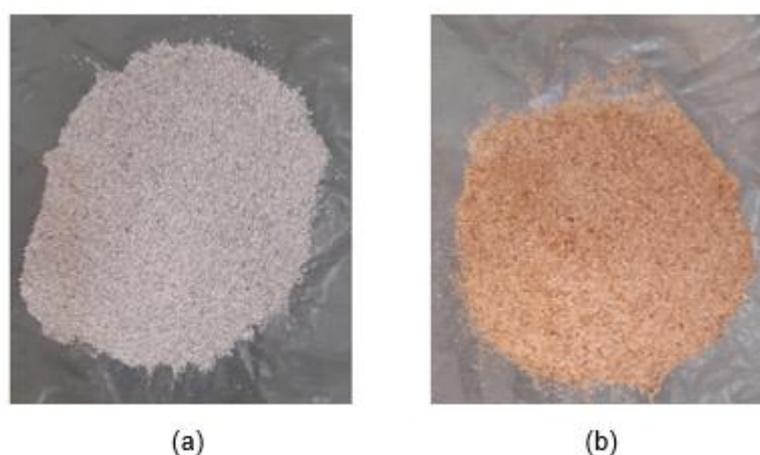


Figura 3.2: Resíduo *grits* (a) e areia natural (b).

3.1.2.1 Resíduo grits

O resíduo que substituiu a areia é um material insolúvel e inerte, ou de baixa reatividade, obtido pela hidratação da cal (CaO), formando o hidróxido de cálcio Ca(OH)₂. O *grits* utilizado na confecção das argamassas foi doado pela empresa CENIBRA – Celulose Nipo-Brasileira S.A, localizada no município de Belo Oriente, Minas Gerais.

Realizou-se o ensaio de fluorescência de raios X (Tabela 3.3) no *grits* no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF, em um equipamento da marca Shimadzu, modelo EDX-700, obtendo-se a composição química mostrada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Composição química do resíduo *grits*.

Composição química	
Óxidos	Quantidade (%)
CaO	93,92
Fe ₂ O ₃	0,38
K ₂ O	1,02
SrO	0,24
ZrO ₂	0,01
SO ₃	1,72
SiO ₂	2,72

Observa-se que o componente predominante na composição do resíduo *grits* foi o óxido de cálcio, encontrado com um percentual de 93,92% (Tabela 3.4). Esta mesma alta presença de CaO também foi evidenciada por Mesquita *et al* (2015), Siqueira e Holanda (2018) e Oliveira Júnior *et al.* (2019). É válido ressaltar que o óxido de cálcio pode vir a influenciar diretamente nas características do cimento Portland, implicando, assim, na ocorrência de instabilidade volumétrica da argamassa. No entanto, é importante considerar a possibilidade de agregar o resíduo mesmo que porcentagens mínimas, visto que dessa forma, além de reduzir a disposição do rejeito ao meio ambiente, este

também pode ser um material com potencial de ganhar espaço na indústria da Construção Civil, dado que argamassas que apresentam substituições mínimas (em até 20%) de agregado miúdo pelo rejeito *grits* tendem a conferir resultados reológicos e mecânicos próximos aos da argamassa de referência.

3.1.2.1.1 Microscopia eletrônica de varredura do resíduo *grits*

A análise morfológica das partículas do resíduo *grits* foi realizada a partir da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para tanto, utilizou-se um microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX 550 do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF. A Figura 3.3 mostra a micrografia do resíduo com aumentos de 500x e 2000x.

As micrografias permitiram verificar o contorno anguloso das partículas de *grits*, característica intrínseca de elementos calcínicos. Este resultado era esperado, pois o ensaio de fluorescência de raios X mostrou elevada quantidade do óxido de cálcio, assim como a revisão bibliográfica do Capítulo 2, em que diversos pesquisadores explicitaram essa composição química.

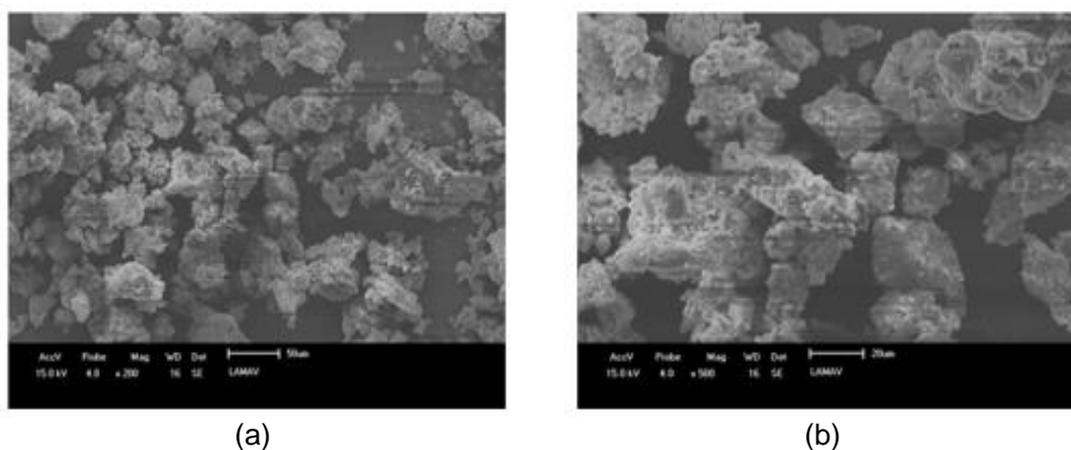


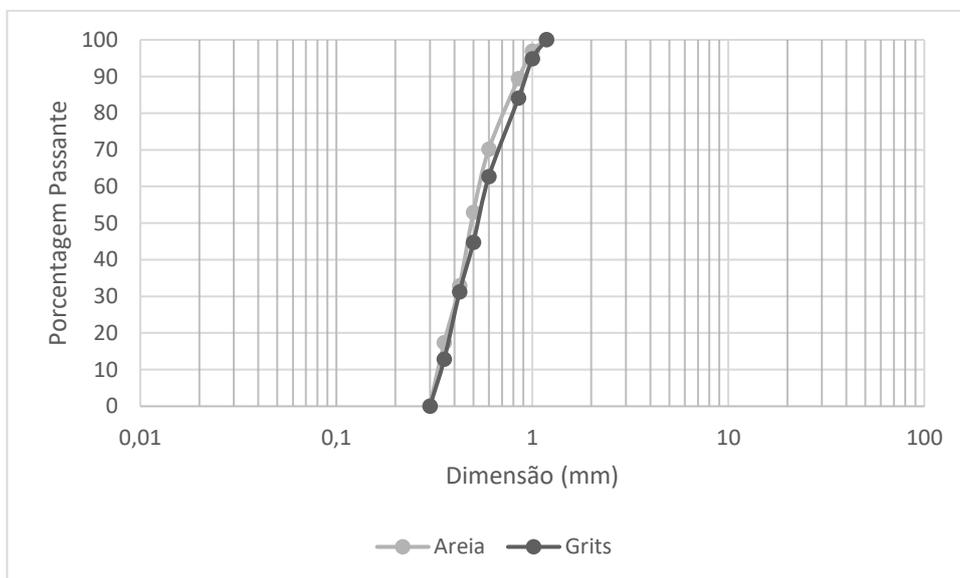
Figura 3.3: Micrografias do *grits* - (a) aumento de 500x; (b) aumento de 2000x.

3.1.2.2 Areia

A areia utilizada foi a areia de rio lavada. Para confecção das argamassas foi escolhida a mesma faixa granulométrica do resíduo, a distribuição granulométrica seguiu as prescrições da NBR 248 (ABNT, 2003). Os dois

materiais avaliados apresentaram curvas semelhantes, como mostra o Gráfico 3.1.

Gráfico 3.1 Curva granulométrica do *grits* e da areia.



3.1.2.3 Água destilada

A água utilizada na confecção das argamassas foi a destilada. A escolha foi realizada com os seguintes objetivos: (i) normalizar os ensaios e evitar a distorção de resultados e (ii) evitar a influência da variação da composição química da água de mistura proveniente da rede de abastecimento nas propriedades do produto final.

3.1.3 Massas específicas dos componentes

Para obtenção das massas específicas de cada componente sólido das argamassas fez-se uso de dois ensaios distintos: picnometria para aferição das densidades da areia natural e resíduo *grits* e, devido à finura do cimento, foi necessário utilizar outra técnica, o ensaio de Le Chatelier.

3.1.3.1 Massas específicas dos agregados

A massa específica do resíduo e do agregado miúdo foram obtidos pelo ensaio no picnômetro, conforme NBR 6458 (ABNT, 2017). A princípio foram pesadas massas iguais a 10 gramas de cada material, sendo seco em estufa pelo período de 24h e, posteriormente, colocados em picnômetros, que em seguida foram preenchidos parcialmente com água destilada e deixados em banho-maria pelo período de 10 a 15 minutos; após o início da fervura do banho. Posteriormente, os picnômetros foram preenchidos até o limite do recipiente e aferidas as variações mássicas para três temperaturas diferentes. A determinação massa específica do resíduo e da areia foram obtidos pela média das três massas específicas obtidas pela Equação 3.1.

$$\rho = \frac{ms}{mp + ms - mps} \quad (3.1)$$

em que:

ρ é a massa específica, em g/cm³;

ms é a massa do material analisado seco, em gramas;

mp é a massa do picnômetro com água, em gramas;

mps é a massa do picnômetro com material analisado e água, em gramas

Pelo ensaio de picnometria foram aferidos os valores mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Massa específica dos agregados

Componente	Massa específica (g/cm ³)
Areia natural	2,48
Resíduo <i>grits</i>	2,75

O rejeito possui massa específica superior ao agregado natural, contudo, as densidades em estado fresco e endurecido das argamassas modificadas foi inferior a argamassa de referência, tendo em vista que o resíduo *grits* é um material seco e, portanto, a relação de a/c da mistura em presença do rejeito é

superior a de referência, logo como a massa específica da água é o mais baixo de todos os constituintes da mistura, a densidade da mistura com relação de a/c mais elevada tende a apresentar argamassas de densidade reduzida.

3.1.3.2 Massa específica do cimento (Le Chatelier)

O ensaio para obtenção da massa específica do cimento seguiu as prescrições estabelecidas pela NBR 16605 (ABNT, 2017).

Inicialmente, o material foi pesado com uma massa de 60 ± 5 g. Em seguida, o frasco de Le Chatelier foi preenchido com o auxílio de um funil de haste longa até a marca de 1 ml com querosene e, posteriormente, deixado em repouso no recipiente com água, sob temperatura ambiente (Figura 3.4).



Figura 3.4: Ensaio de Le Chatelier

Posteriormente, o frasco foi retirado e foi definida a primeira leitura, $N1$ e, em seguida, com um funil de haste curta, inseriu-se o cimento e, com a finalidade de eliminar as bolhas, foram realizados leves movimentos circulares no frasco.

Finalmente, o recipiente foi deixado em repouso para posterior aferição da segunda leitura, $N2$. Foi possível, assim, obter a massa específica do cimento por meio do uso da Equação 3.2.

$$\mu = \frac{M}{N2 - N1} \quad (3.2)$$

em que:

μ corresponde a massa específica, em g/cm³;

M massa de agregado, em g;

N1 e N2 correspondem as leituras realizadas, durante o ensaio, em ml.

Pelo ensaio Le Chatelier foi obtido o valor apresentado pela Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Massa específica do cimento

Componente	Massa específica (g/cm ³)
CPII- E	2,99

3.2 MÉTODOS

Após a caracterização química das matérias-primas, iniciou-se o estudo de dosagem e os ensaios para avaliar a viabilidade técnica das argamassas produzidas com *grits*.

3.2.1 Dosagem

Estudos anteriores obtiveram bons resultados quando da substituição parcial da areia por *grits*. Ahmadi e Al-Khaja (2000), Zanella et al. (2014), Mesquita et al. (2015) e Oliveira Júnior et al. (2019) expõem que a presença do *grits*, em até 20%, conferem desempenho semelhante aos das argamassas de referência.

Logo, o presente estudo, inicialmente, pretendia avaliar a substituição total da areia por *grits*, visando a produção de argamassas mais sustentáveis. Assim, definiu-se a proporção cimento:agregado miúdo de 1:3, a fim de facilitar a comparação dos resultados com os de outros pesquisadores. A nomenclatura adotada foi ARG0 para a argamassa de referência (com 100% areia como agregado miúdo) e ARG100 (com 100% *grits* como agregado miúdo). Como os resultados obtidos para a ARG100 não foram satisfatórios, optou-se pela realização de uma interpolação linear a fim de verificar qual o teor de substituição proporcionaria a mesma resistência à compressão da ARG0. Então, o valor

obtido foi de 20% e, portanto, a nova argamassa recebeu a nomenclatura ARG20.

3.2.2 Mistura

Consoante Oliveira Júnior (2019), à medida que se aumenta o teor de substituição da areia pelo *grits*, as argamassas perdem trabalhabilidade. Assim, o presente estudo não seguiu prescrições normatizadas para preparo das misturas.

O misturador de bancada utilizado no preparo das argamassas era da marca Solotest, modelo AG5 Metal Cair (Figura 3.5). O preparo das argamassas consistiu inicialmente em depositar o cimento na cuba e, posteriormente, a água destilada, marcando no cronômetro o tempo de 2 minutos de mistura na velocidade 1 (velocidade baixa). Em seguida, com o misturador em funcionamento, adicionou-se a areia ou o *grits*, despejando o material de forma contínua por cerca de 30 segundos. Posteriormente, o equipamento foi mantido em velocidade baixa por mais 1 minuto e, em seguida, mudou-se para velocidade 2 (alta), permanecendo assim por mais 3 minutos. Ao final deste processo, a cuba era retirada do equipamento e por mais 30 segundos a argamassa era misturada manualmente, com o auxílio de uma espátula, visando retirar a parcela da argamassa retida nas paredes da cuba.



Figura 3.5: Misturador de bancada utilizado na confecção das argamassas.

3.3 Estado fresco

Com o intuito de melhor avaliar a viabilidade de aplicação comercial das argamassas confeccionadas, foram realizados ensaios no seu estado fresco, a fim de avaliar com as prescrições normatizadas pela NBR 13281 (ABNT, 2005).

3.3.1 Calorimetria por condução isotérmica

A calorimetria é a técnica de condução isotérmica realizada na argamassa ainda em estado fresco. Tal registro é definido pelo desenvolvimento das reações químicas recorrentes durante o processo de hidratação do material (Figura 3.6).

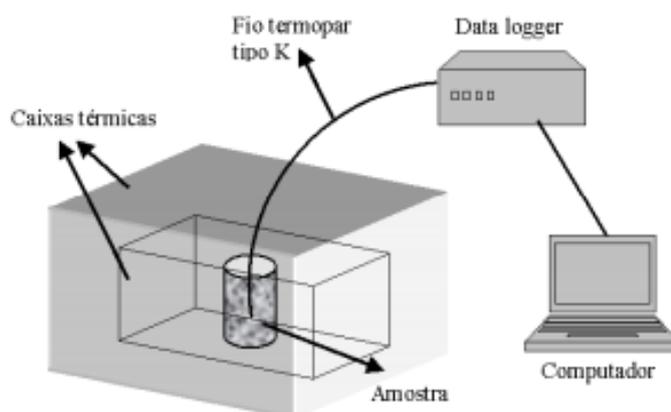


Figura 3.6: Ilustração do funcionamento do calorímetro (ANDRADE, 2008)

No presente estudo as reações químicas medidas foram as que ocorreram no período de 72 horas, a partir do instante em que o cimento entra em contato com a água de amassamento. Para tanto, fez-se uso do calorímetro de marca Calorimetrix modelo I-Cal 2000 HPC (Figura 3.7).



Figura 3.7: Calorímetro isotérmico.

3.3.2 Consistência

De acordo com Pczieczek (2017), a consistência é uma propriedade atrelada à capacidade da argamassa sofrer deformações mediante a ação de cargas. É válido ressaltar que a relação água/cimento e o comportamento trabalhável da mistura interferem diretamente na sua consistência. Diz-se que a consistência define o quão rígida ou frágil a argamassa se apresenta (ROSA, 2021).

A consistência da argamassa é definida pela NBR 13276 (ABNT, 2016) através do espalhamento de uma porção da mistura que, por sua vez, a norma convencionou o diâmetro entre 260 ± 5 mm.

Após efetuar-se a mistura, as argamassas foram depositadas no molde cônico sobre a mesa de espalhamento, cuja compactação foi feita em três camadas: a primeira com 15 golpes, a segunda com 10 golpes e a terceira e última com 5 golpes, todas com o auxílio de uma soquete padrão. Em seguida, o molde foi rasado com auxílio de uma régua metálica e, ao término deste processo, o molde foi retirado verticalmente e a mesa acionada, efetuando-se 30 golpes; por fim, com o auxílio de um paquímetro, foi medido o diâmetro em três posições ortogonais entre si, a fim de aferir o espalhamento da argamassa (Figura 3.8).



Figura 3.8: Ensaio de consistência (Flow Table).

De acordo com Rosa (2021), a argamassa, para ser considerada trabalhável, deve apresentar propriedades específicas como, por exemplo, fácil manuseio e espalhamento sobre a superfície; ter adesão e, assim, favorecer a formação de juntas verticais; manter sua consistência por um intervalo de tempo e, após aplicada, a base deve permanecer aderida de modo a não escorrer.

3.3.3 Densidade da massa no estado fresco

A massa específica de uma argamassa é uma propriedade que varia de acordo com as matérias-primas utilizadas. Quanto menor for a relação encontrada de massa por volume, pressupõe-se que o produto final é mais leve e, conseqüentemente, com capacidade de permanecer trabalhável por mais tempo.

A massa específica é o indicativo de compactidade (ROSA, 2021). A densidade da argamassa depende da massa específica de seus constituintes. Diz-se que o teor de ar incorporado obtido pelo processo da mistura ou pela presença de aditivos incorporadores de ar interfere no seu desempenho, conferindo à argamassa baixa aderência e, portanto, deficiência no contato da mesma para com a alvenaria. Assim sendo, foi de interesse da pesquisa avaliar os resultados obtidos sem a interferência de aditivos.

A determinação da densidade da massa no estado fresco é definida pela NBR 13278 (ABNT, 2005). Neste caso, inicialmente, calculou-se o volume do

recipiente (Figura 3.9) e, em seguida, avaliou-se seu volume com o resultado na Equação 3.3.

$$V_r = \frac{M_t - M_r}{\rho_a} \quad (3.3)$$

sendo,

V_r o volume do recipiente, em cm^3 ;

M_t a massa do recipiente completamente cheio de água, em g;

M_r a massa do recipiente vazio, em g;

ρ_a a densidade da água destilada, igual a $1,0 \text{ g/cm}^3$.



Figura 3.9: Ensaio para determinação da densidade das argamassas no estado fresco.

Em seguida, com o volume do recipiente definido em 400 cm^3 , a argamassa ainda em seu estado fresco foi adicionada em três camadas com alturas aproximadamente iguais. As camadas sofreram 20 golpes com a espátula na posição vertical. Posteriormente, aplicou-se 3 golpes na mesa de adensamento, *flow table*, e com uma régua os recipientes foram rasados e, então, pôde-se aferir a densidade do material por meio do uso da Equação 3.4.

$$d = \frac{M_c - M_r}{V_r} \cdot 1000 \quad (3.4)$$

sendo,

d a densidade da massa no estado fresco, em kg/cm^3 ;

M_c a massa do recipiente com argamassa, em g;

M_r a massa do recipiente umedecido, em g;

V_r o volume do recipiente, em cm^3 .

3.3.4 Retenção de água

A retenção de água é a propriedade que afere a capacidade da argamassa se manter trabalhável mesmo quando submetida a situações que provoquem perda de água na mistura, seja por evaporação, seja por absorção pelo substrato (CARASEK, 2017). A perda de água favorece o rápido enrijecimento e, portanto, o seu assentamento é comprometido, além de interferir na retração plástica.

Para determinar o quanto de água é liberada da argamassa ainda no estado fresco, utilizou-se a NBR 13277 (ABNT, 2005). O procedimento é executado com auxílio de um funil de filtragem, estando acoplado à uma bomba a vácuo que visa sugar a água (Figura 3.10). A fim de simular o revestimento de argamassa, foi utilizado um prato com espessura igual a 20 mm.



Figura 3.10: Funil de Buchner modificado acoplado à bomba de vácuo.

Inicialmente, o prato foi posicionado sobre o funil no equipamento e acima deste foi colocado um disco de papel filtro umedecido com água. Em seguida, a

bomba permaneceu acionada por 90 segundos e, assim, o excesso de água no filtro removido. Então mediu-se a massa do conjunto - prato e papel filtro -. Posteriormente, a argamassa fresca foi inserida ao prato e, então, a mesma sofreu golpes com um soquete-padrão, 16 ao longo do perímetro e 21 no centro da amostra, para que o material fosse adensado. O prato foi rasado e, por fim, aferiu-se a massa do conjunto com a argamassa. Por fim, a bomba a vácuo foi acionada por mais 15 minutos e novamente medida a massa do conjunto com argamassa.

O cálculo para definir a retenção de água é feito por meio do uso das Equações 3.5 e 3.6.

$$Ra = \left[1 - \frac{m_0 - m_{15}}{AF \cdot (m_0 - m_v)} \right] \quad (3.5)$$

$$AF = \frac{m_a}{m + m_a} \quad (3.6)$$

sendo,

Ra a retenção de água, em %;

m_0 a massa inicial do conjunto com a argamassa, em g. O termo "conjunto" refere-se ao prato com papel filtro;

m_{15} a massa do conjunto com a argamassa aferida após sucção por 15 minutos, em g;

m_v a massa do conjunto, em g;

AF refere-se à relação de água/argamassa fresca;

m_a a massa de água da argamassa, em g;

m_0 somatório de massa dos componentes anidros da argamassa, em g;

3.3.5 Teor de ar incorporado

De acordo com Santos (2016), é possível que a argamassa forme em seu interior duas formas de espaços vazios: com bolhas de ar incorporado e/ou vazios de ar aprisionado. É válido ressaltar que a porosidade na argamassa

interfere no comportamento da argamassa no estado fresco como, por exemplo, na redução da adesão à base, na densidade de massa e, ainda, no estado endurecido, visto que a elevada porosidade compromete a resistência mecânica da argamassa (CARASEK, 2017; ROSA, 2021).

O ensaio de teor de ar incorporado seguiu as prescrições da NBR NM 47 (2002) e seu resultado é expresso em porcentagem.

Para tanto, um recipiente da Solotest (Figura 3.11) foi preenchido em três camadas e, em seguida, com o auxílio de uma haste padrão, foi submetido a 25 golpes em cada. Após esse processo, rasou-se a superfície do recipiente e, então, com o posicionamento da tampa sob o recipiente, a água foi injetada pela torneira de entrada até que a mesma saísse pelo lado oposto do equipamento, na torneira de saída. Com o fechamento de ambas as torneiras, com uma bomba manual injetou-se ar ao recipiente devidamente fechado e, posteriormente, pelo visor do equipamento foi possível medir o teor de ar das argamassas.



Figura 3.11: Equipamento para ensaio de teor de ar incorporado

3.4 Estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido foram realizados a fim de avaliar o desempenho das argamassas e a viabilidade de sua aplicação comercial, fazendo uso de testes estatísticos para aferir a significância dos resultados obtidos.

3.4.4 Resistência mecânica

A resistência mecânica pode variar quando o material é submetido a uma diversidade de solicitações. A argamassa deve suportar as movimentações transmitidas pela base, visto que a estrutura pode sofrer: recalques, variação dimensional por umedecimento e/ou secagem, dilatações ou retrações do revestimento. Essas movimentações podem ocasionar aparecimento de fissuras e falha na aderência da argamassa com o substrato; assim, para evitá-las, é necessário a certificação do bom desempenho mecânico do material (PCZIECZEK, 2017).

Os ensaios de resistência mecânica preliminares foram os de compressão axial e de tração por compressão diametral, aos 28 e 90 dias e cura submersa em água saturada com cal. O ensaio de resistência potencial de aderência à tração seguiu o período estipulado por norma, com 28 dias de cura. Por fim, os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão foram realizados aos 28 e 60 dias de cura.

3.4.4.1 Compressão axial

Para determinação da resistência à compressão axial foram moldados corpos de prova cilíndricos de diâmetro igual a 50 mm e altura de 100 mm (Figura 3.12). O ensaio seguiu as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2005).



Figure 3.12:Corpos de prova para determinação das resistências à compressão e à tração por compressão diametral.

3.4.4.2 *Tração por compressão diametral*

O estudo de tração por compressão diametral visa compreender o desempenho do concreto ou argamassa quando submetido a cargas de compressão verticais, estas provocam no material tensões horizontais em sentidos opostos, ou seja, tração, que, por sua vez, ocasionam a abertura de fissuras verticais. Quando a tensão de tração gerada é superior ao desempenho resistente do material, ocorre rompimento de uma extremidade a outra (Figura 3.13).



Figura 3.13: Ensaio de compressão diametral

Corpos de prova com as mesmas dimensões relatadas para o ensaio de compressão axial foram confeccionados para a determinação da resistência à tração por compressão diametral.

3.4.4.3 *Resistência potencial de aderência à tração*

O ensaio normalizado pela NBR 13528 (ABNT, 2019) visa aferir a capacidade da argamassa se manter aderida ao substrato quando submetida a esforços perpendiculares de tração com carregamento constante pelo equipamento de marca Solotest (Figura 3.14). A norma ainda prescreve parâmetros avaliativos relativos ao tipo de ruptura dos corpos de prova.



Figura 3.14: Argamassa com pastilhas metálicas coladas para determinação da resistência potencial de aderência à tração.

O substrato confeccionado para este ensaio atendeu os padrões normalizados pela NBR 14081-2 (ABNT, 2015). A execução do ensaio iniciou com o posicionamento do substrato no sentido horizontal, sobre uma base plana e firme. Em seguida, para garantir a aderência ao substrato, utilizou-se um pincel limpo e seco para remover as impurezas presentes. Com o auxílio de uma régua foi aferida a profundidade do assentamento da argamassa em 18 ± 2 mm. A argamassa com espessura aproximada de 5 mm foi aplicada sobre a superfície do substrato, sendo pressionada com a espátula para eliminar os vazios. Posteriormente, foi executada a segunda camada de argamassa, e para eliminar excessos fez-se a rasadura com o auxílio de uma régua metálica.

A Equação 3.7 foi utilizada para se determinar a resistência potencial de aderência à tração.

$$R = \frac{P}{A} \quad (3.7)$$

sendo,

R a resistência potencial à tração, em MPa;

P a carga de ruptura, em N;

A a área da pastilha metálica, em mm².

3.4.4.4 Resistência à tração na flexão e à compressão

O ensaio de resistência à tração na flexão tem por objetivo proporcionar maior entendimento do mecanismo resistente da argamassa quando submetida à ação da compressão constante sob o corpo de prova prismático com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm. A execução do ensaio de resistência à tração na flexão e de compressão seguiu as prescrições da NBR 13279 (ABNT, 2005).

Tração na flexão

Para este ensaio o corpo de prova foi posicionado no equipamento (Figura 3.15) e a velocidade de carregamento foi de aproximadamente 50 ± 10 N/s, até ser alcançada a ruptura do material.



Figura 3.15: Corpo de prova prismático durante o ensaio de tração na flexão.

Após a realização do ensaio, o cálculo para obtenção da resistência à tração na flexão é feito por meio da Equação 3.8.

$$Rf = \frac{1,5 \cdot F \cdot L}{40^3} \quad (3.8)$$

sendo,

R_f a resistência à tração na flexão, em MPa;

F o carregamento vertical aplicado no meio do vão livre, em N;

L a distância entre os apoios, em mm.

Compressão

Após o ensaio de tração na flexão, as metades dos corpos de prova foram submetidas à compressão axial com dimensão de 80 mm (aproximadamente) x 40 mm x 40 mm. Assim, as metades de cada corpo de prova foram posicionadas sobre o suporte metálico de 40 mm x 40 mm e aplicada sobre estas uma força equivalente a 500 ± 50 N/s (Figura 3.16).



Figura 3.16: Corpo de prova durante o ensaio de compressão.

3.4.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio é baseado na premissa de que um fluido ao ser submetido à pressão externa acaba por intrudir os poros do material. Neste caso, como o mercúrio é um fluido que não penetra a amostra de forma espontânea, faz-se necessária a aplicação da pressão externa.

Quando o fluido apresenta tensão superficial inferior à do material do capilar, o ângulo de contato do fluido com a amostra deve ser menor que 90° , visto que o equilíbrio entre as tensões superficiais favorece a penetração do fluido aos poros da amostra. No entanto, se o fluido possui uma tensão superior ao material do capilar, então, neste caso, o ângulo de contato será maior que 90° e, assim, o equilíbrio de forças é contrário à entrada do fluido no capilar, a qual só se dará por meio da aplicação de uma força externa (IBEIRO, 2016).

As problemáticas quanto ao uso da técnica de intrusão de mercúrio são: (i) a possibilidade de que poros originalmente fechados à rede porosa interconectada sejam alcançados pelo mercúrio devido à destruição de paredes dos poros durante a intrusão; (ii) imprecisão quanto ao valor do ângulo de contato adotado; (iii) a questão da equação de Washburn (desenvolvedor da expressão matemática para aplicação do método de intrusão por mercúrio) admitir como hipótese fundamental que os poros sejam cilíndricos de seção transversal circular.

Nesta pesquisa, fez-se uso da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio presente na Oficina de Geotecnia da UENF, por meio do uso de um equipamento de marca Micromeritics, modelo AutoPore IV (Figura 3.17).



Figura 3.17: Porosímetro de intrusão de mercúrio.

3.4.6 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Este ensaio indica o quanto de água é absorvido por capilaridade no corpo de prova por meio da medição da variação de massa. A capilaridade aponta a permeabilidade da argamassa; portanto, quanto menor for a capilaridade, menos permeável é o material. A norma prevista para execução deste ensaio é a NBR 15259 (ABNT, 2005).

O ensaio consiste na confecção de corpos de prova prismáticos de medidas iguais a 160 mm x 40 mm x 40 mm. Aos de 28 dias de cura e, neste caso, à temperatura ambiente, os mesmos foram lixados com lixa fina e pincelados, a fim de nivelá-los e deixá-los limpos. Em seguida, os corpos de prova foram pesados, definindo assim seu peso inicial (m_0), ainda secos e, posteriormente marcada em suas bases uma altura referente a 5 ± 1 mm (Figura 3.18). Dando seguimento ao ensaio, adicionou-se água ao nível marcado nos corpos de prova. O nível de água foi mantido constante durante o ensaio e, em seguida, nos períodos de 10 e 90 minutos, m_{10} e m_{90} , foram aferidas suas massas; contudo, antes da pesagem dos corpos de prova, cada um foi seco com pano úmido para retirar o excesso de água.

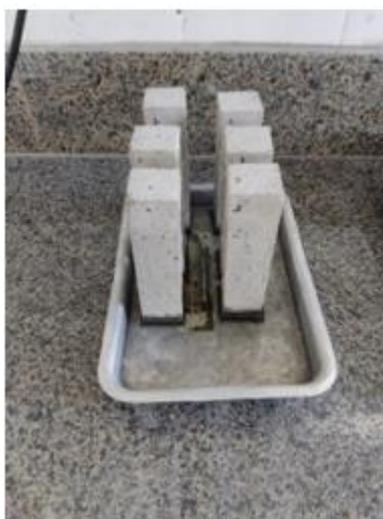


Figura 3.18: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

A determinação da absorção de água por capilaridade é obtida utilizando-se a Equação 3.9.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (3.9)$$

sendo,

A_t a absorção de água por capilaridade no tempo t , em g/cm²;

m_0 corresponde a massa inicial do corpo de prova, em g;

m_t a massa de cada corpo de prova determinada no tempo t , em g;

A a área da face do corpo de prova em contato com a água, em cm².

Conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005), o coeficiente de capilaridade (C_n) corresponde à diferença média entre as massas nos períodos de 10 e 90 minutos aferida em cada corpo de prova (Equação 3.10).

$$C_n = m_{90} - m_{10} \quad (3.10)$$

sendo,

C_n o coeficiente de capilaridade, em g/dm²·min^{1/2};

m_{90} a massa do corpo de prova aferida aos 90 min de ensaio, em g;

m_{10} a massa do corpo de prova aferida aos 10 min de ensaio, em g.

3.4.7 Densidade da massa aparente no estado endurecido

O ensaio para aferição da densidade de massa aparente no estado endurecido é normalizado pela NBR 13280 (ABNT, 2005). Na execução deste ensaio confeccionou-se corpos de prova prismáticos, que foram aferidos com o auxílio de um paquímetro – altura (h), largura (l) e comprimento (c). Em seguida, por meio do uso da Equação 3.11, determinou-se a densidade de massa aparente no estado endurecido.

$$\rho_{ap} = 1000 \cdot \frac{m}{h \cdot l \cdot c} \quad (3.11)$$

sendo,

ρ_{ap} a densidade aparente no estado endurecido, em kg/m³;

m a massa do corpo de prova, em g;

$h \cdot l \cdot c$ o volume do corpo de prova, em cm³.

3.5 Análise estatística

A análise estatística é a ciência que avalia dados apresentados por uma amostra, ou seja, com o propósito de verificar os resultados obtidos em cada ensaio, considerando influência dos parâmetros controláveis: teor de substituição e idade sobre as variáveis respostas: propriedades avaliadas.

Para tanto, o programa experimental fez uso de dois testes estatísticos: a ANOVA e o teste Tukey, com um nível de confiabilidade de 95%. A ANOVA, análise de variância, é um teste estatístico que apresenta implicitamente duas hipóteses: a hipótese nula que, por sua vez, qualifica a verificação como não havendo variação e, por outro lado, caso a hipótese resultado da análise seja alternativa, isso significa que houve alguma variação nos resultados.

Apesar da análise de variância apresentar se há ou não variação, ela não verifica se esta é significativa, relevante. À vista disso, aplicou-se o teste Tukey, que a partir da ANOVA, avalia se a variação obtida pode ser considerada significativa ou não.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é possível acompanhar a discussão de resultados obtidos a partir dos ensaios descritos no capítulo anterior. Nos itens detalhados a seguir pode-se observar que os ensaios iniciais das argamassas da ARG0 e ARG100 apresentaram características do resíduo como alta absorção de água, ser um material seco e ainda friável e de baixo módulo de elasticidade. Sendo assim, foi introduzida a pesquisa uma dosagem intermediária, por meio de uma interpolação linear, optou-se por prosseguir os estudos utilizando o teor de substituição de areia por *grits* igual a 20% (ARG20), sendo esperado um comportamento muito próximo da argamassa de referência.

4.1 Estado fresco e endurecido

4.1.1 Consistência

Devido a variação de *grits* nas dosagens das argamassas, fez-se necessária a definição de uma relação de água/cimento (a/c) específica, em função do teor de substituição, para se atingir o espalhamento exigido por norma de 260 ± 5 mm, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Relação a/c das argamassas com substituições propostas.

Argamassa	Dosagem	Relação a/c	Espalhamento (mm)
ARG0	1:3	0,70	265
ARG20	1:3	0,85	261
ARG100	1:3	1,17	258

De acordo com os resultados de relação de água/cimento obtidos pelo ensaio de consistência (Tabela 4.1), pode-se observar que a presença do *grits* interferiu diretamente na consistência padrão de cada argamassa confeccionada.

Oliveira Júnior *et al.* (2019) ao estudar a influência da substituição de areia natural pelo resíduo *grits* (0% 10%, 15% e 20%, respectivamente); constatou

que, as argamassas modificadas apresentavam uma crescente redução de sua fluidez, à medida que a substituição de agregado aumentava. O espalhamento encontrado pelo autor foi de 270mm, 265mm, 262mm e 258mm, respectivamente.

4.1.2 Densidade da massa no estado fresco

Os resultados aferidos pelo ensaio de densidade de massa no estado fresco estão mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Densidade das argamassas no estado fresco.

Argamassa	Densidade no estado fresco (kg/m ³)	Classificação segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005)
ARG0	1980,50	
ARG20	1872,25	D5
ARG100	1846,25	

Os resultados de densidade da argamassa estão em desacordo com os obtidos pela massa específica dos componentes sólidos, uma vez que o *grits* se apresentou mais denso que a areia e, portanto, as densidades das argamassas modificadas deveriam, por consequência, apresentar valores mais elevados que a da referência.

Tal ocorrência foi explicada por Carasek *et al.* (2018) que estudaram o comportamento de argamassas de assentamento e revestimento com presença de resíduo de demolição. Tais pesquisadores verificaram que independente da massa específica do resíduo inserido, a introdução de materiais secos as misturas tendem a reduzir a densidade da argamassa, visto que a massa específica da água é o mais baixo de todos os componentes da mistura, logo, o aumento da relação a/c tem por consequência a diminuição da densidade da argamassa.

Ainda que a redução da densidade seja um indicativo negativo, uma vez que a densidade é um parâmetro diretamente proporcional à porosidade, a ABNT, Associação Brasileira de Cimento Portland, classifica o teor de ar

incorporado em argamassas variando de 8% a 18% como aceitável e adequado as aplicações de argamassas (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Teor de ar incorporado

Argamassas	Classificação da ABNT	Teor de ar incorporado (%)
ARG0	Menor que 8% - grupo A	10
ARG20	De 8% a 18% - grupo B Maior que 18% - grupo C	13

Legenda:
*Grupo A - Valor recomendável
*Grupo B – Valor aceitável
*Grupo C – Valor elevado

A substituição parcial da areia pelo rejeito propiciou um aumento de 3%. O teor de ar incorporado é um indicativo que influencia a trabalhabilidade da argamassa, ou seja, quanto mais leve a argamassa, por mais tempo consegue manter-se trabalhável. No entanto, este mesmo parâmetro aponta a existência de poros e, conseqüentemente, pode comprometer o desempenho mecânico da argamassa (SANTOS, 2016).

4.1.3 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade foram moldados seis corpos de prova, sendo três para cada tipo de argamassa. Aos 28 dias as argamassas foram ensaiadas e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Absorção de água por capilaridade e coeficiente capilaridade.

Argamassa	At (g/cm ²)	C (g/dcm ² ·min ^{1/2})	NBR 13281 (ABNT, 2005)
ARG0	At ₁₀ = 0,28	5,83	C5
	At ₉₀ = 0,64		
ARG20	At ₁₀ = 0,36	6,77	
	At ₉₀ = 0,79		

Legenda:

*At₁₀ – Absorção de água no tempo de 10 min;

*At₉₀ - Absorção de água no tempo de 90 min;

*C – Coeficiente de capilaridade.

A partir da Tabela 4.4 têm-se que os valores de absorção da argamassa ARG0 aos 10min é de 0,28 g/cm³ e aos 90 min de 0,64 g/cm³. Pode-se observar que ao avaliar a ARG20, verificou-se aumento considerável de 30% no período 10min e aos 90min houve elevação de 25% quando comparado aos valores obtidos pela argamassa referência. No entanto, é válido considerar que a curva granulométrica do agregado natural e resíduo foram muito semelhantes, sendo assim, classificadas como “uniformes”, já que os grãos, neste caso, apresentaram dimensões muito próximas e, portanto, é mais favorável a ocorrência de aparecimento de poros na argamassa.

A compreensão da alta permeabilidade das argamassas traz consigo a intrínseca conclusão de que a argamassa é também porosa, dado que para que haja permeabilidade no material é preciso existir poros interconectados. Logo, a argamassa para ser dita permeável, é também porosa; contudo, o elemento poroso não é necessariamente permeável (GONÇALVES, 2021).

4.1.4 Retenção de água

De acordo com a Tabela 4.5, todas as argamassas foram classificadas como U5, indicando elevada retenção de água. O resultado obtido evidencia a capacidade das argamassas com *grits* não perderem água para o meio externo. Contudo, é válido ressaltar que mediante os resultados de consistência, densidade de massa e o referencial teórico (PCZIECZEK, 2017; CARASEK, 2017; MESQUITA *et al.*, 2019; ROSA, 2021), a elevada absorção pode interferir

no comportamento reológico da argamassa e, por consequência, intervir no seu desempenho mecânico.

Tabela 4.5: Retenção de água das argamassas no estado fresco.

Argamassa	Retenção de água (%)	Classificação da ABCP	Classificação segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005)
ARG0	96	Mínimo 75%	
ARG20	97	De 80% a 90% (Normal)	U5
ARG100	97	A partir de 90% (Elevada)	

Conforme Mesquita *et al.* (2015), a absorção de água da areia natural é de aproximadamente 2% e a *grits* é de 2,46%, ou seja, variação de 23%. Por conseguinte, no presente estudo foi necessário utilizar diferentes relações água/cimento para as argamassas ARG0, ARG20 e ARG100, com vistas a manter a consistência padrão em todas.

4.1.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

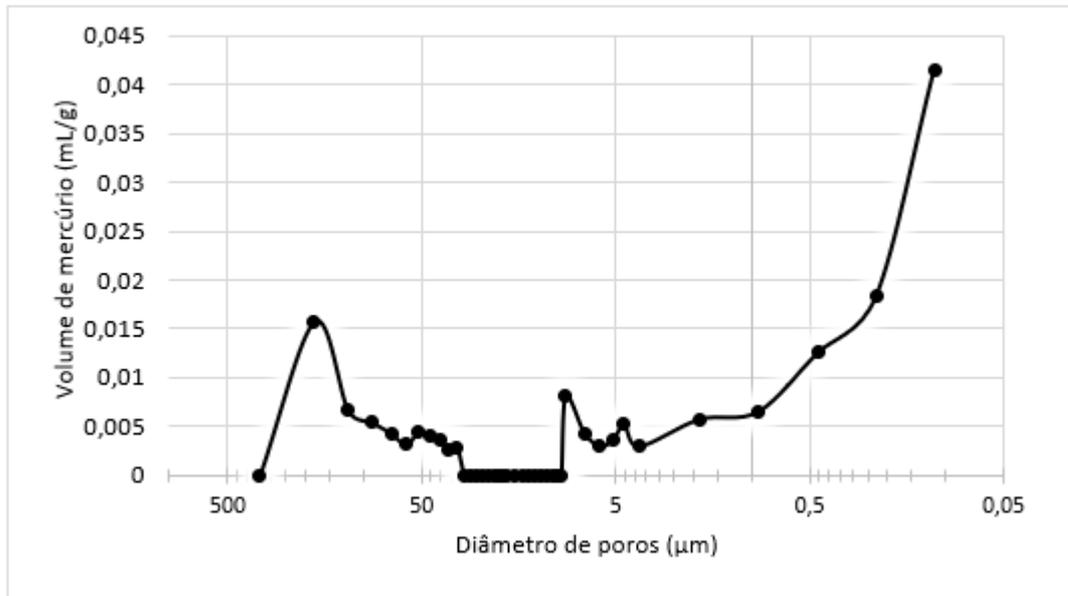
A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio foi aplicada nas três argamassas avaliadas no presente estudo - ARG0, ARG20 e ARG100 (Tabela 4.6).

Tabela 4.6: Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Argamassa	Volume total intrudido (ml/g)	Diâmetro médio do poro (μm)	Porosidade (%)
ARG0	0,0358	0,4434	1,0
ARG20	0,0837	3,0629	1,0
ARG100	0,1313	0,4240	1,0

Todas as argamassas apresentaram porosidade, resultado este coerente com o teor de ar incorporado e o coeficiente de capilaridade. Conforme pode ser observado no Gráfico 4.6, na ARG0 o mercúrio intrudiu nos macroporos até os microporos.

Gráfico 4.1: Porosimetria da ARG0.



Por outro lado, as paredes dos microporos foram destruídas nas amostras com *grits* (Gráficos 4.7 e 4.8), ARG20 e ARG100. Portanto, o ensaio foi interrompido, uma vez que a pressão externa exercida para intrusão do fluido danificou os materiais, criando uma rede de conexão entre os microporos. Tais resultados estão de acordo com as seguintes premissas: (i) a pressão exercida no ensaio pode danificar o material; (ii) o resíduo *grits* é um material menos resistente quando comparado à areia natural.

Gráfico 4.2: Porosimetria da ARG20.

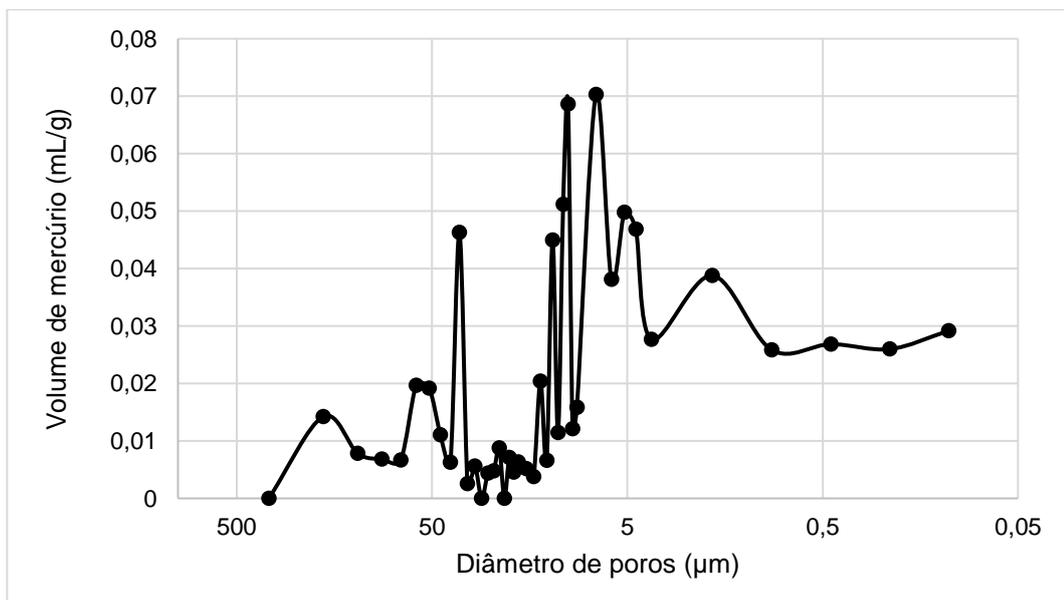
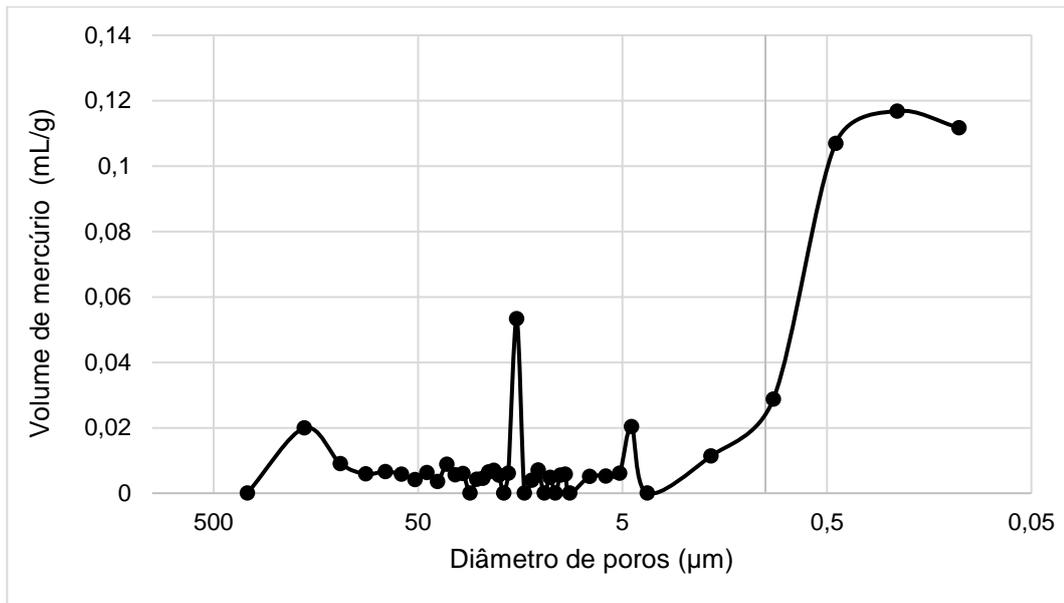


Gráfico 4.3: Porosimetria da ARG100.



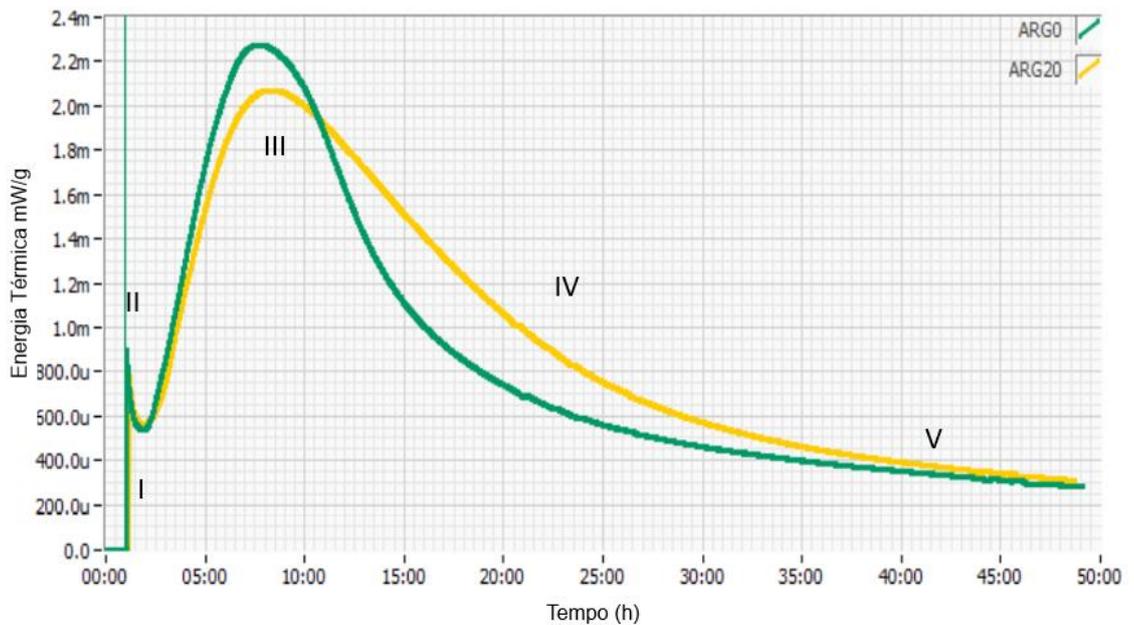
De acordo com Quarcioni *et al.* (2009), a porosidade está associada ao aumento da relação água/cimento da argamassa, uma vez que a água adicional demandada para manter a consistência, que não é consumida na hidratação do cimento, permanece livre no sistema e, então, quando ocorre a evaporação, tem-se como consequência o aumento de poros no estado endurecido.

Pelo ensaio de calorimetria, foi possível observar que a argamassa ARG20 se comportou de maneira semelhante à ARG0 apenas no estágio I e, portanto, isso tem relação com o processo de hidratação e liberação de calor, pois ao liberar calor mais gradativamente, a argamassa com *grits* manteve água livre em seu sistema por mais tempo e, assim, contribuiu a formação de poros em seu estado endurecido.

4.1.6 Calorimetria por condução isotérmica

Pelo ensaio de calorimetria são expostos os mecanismos de hidratação separados por estágios (I, II, III, IV e V), que mostram as reações de químicas de hidratação, evidenciando as ocorrências contínuas e exotérmicas de calor ao longo de um dado tempo (Gráfico 4.4).

Gráfico 4.4: Estágios de hidratação das argamassas ARG0 e ARG20



O estágio I acontece nos primeiros minutos da hidratação, evidenciado pela rápida liberação de calor após o primeiro contato da água com o cimento. Tal ocorrência se deve à dissolução dos álcalis, sulfato de cálcio ou íons como K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} e Ca^{2+} . O estágio II é conhecido como o período de indução, neste momento as reações de hidratação ocorrem mais lentamente devido à formação de um gel, o C-S-H, ao redor das partículas de cimento. Este estágio pode durar minutos ou horas, variando de acordo a presença de adições e/ou aditivos à mistura. Após o rompimento do gel, as reações de hidratação são mais rápidas. No estágio III, ocorre saturação iônica e a formação de C-S-H e CH; tal fato é caracterizado pelo alcance da máxima liberação de calor da amostra e posterior redução gradual da liberação de energia no estágio IV, até se estabilizar no estágio V.

Durante o estágio I, o comportamento das argamassas é semelhante. Este dado pode ser verificado pelas linhas sobrepostas no Gráfico 4.4; contudo, os estágios II e III apresentam comportamentos diferentes, onde a argamassa modificada (ARG20) libera menos calor até atingir seu pico, além de evidenciar perda de calor mais gradativa (Tabela 4.7) até alcançar a estabilização no estágio V.

Tabela 4.7: Calorimetria das argamassas

Argamassa	Máxima Liberação de Calor (mW/g)	Tempo (h)	CPII-E (g)	Relação a/c
ARG0	2,8	7:30	225,00	0,7
ARG20	2,08	8:30	203,090	0,85

Partindo do pressuposto da ocorrência de variação cinética das reações de hidratação do cimento Portland na argamassa com resíduo *grits*, é importante verificar a influência no tempo decorrido, desde o lançamento do ensaio até atingir a máxima liberação de calor. Pela curva de calorimetria (Gráfico 4.1), percebe-se que a presença do *grits* na ARG20 conferiu uma suave elevação no tempo de indução até atingir sua máxima liberação de calor. O valor médio do tempo foi de 7:30h para a ARG0 e 8:30h para a ARG20. Mesmo com essa diferença de 01 hora, os valores de pico encontrado nos ensaios de calorimetria foram próximos.

4.1.7 Densidade da massa aparente no estado endurecido

Os resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa aparente no estado endurecido (Tabela 4.8) mostram que, em função da perda mássica das argamassas aos 28 dias, as mesmas se enquadram na classe M5, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005).

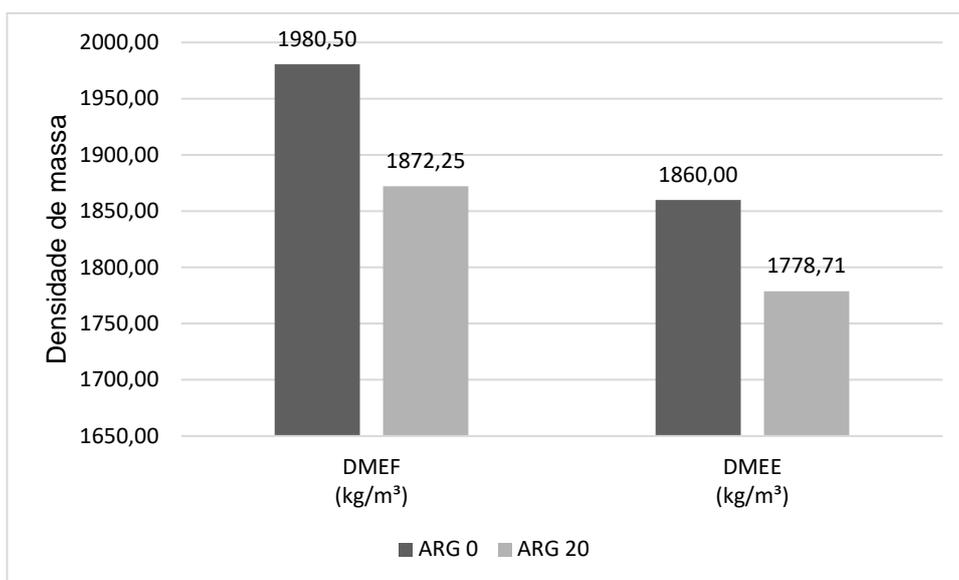
Tabela 4.8: Densidade de massa aparente no estado endurecido

Corpo de Prova	Densidade (kg/m ³)	Classificação NRB 13281 (ABNT, 2005)
ARG0	1860,51	M5
(kg/m ³)		
ARG20	1778,71	
(kg/m ³)		

Assim, baseado nos resultados de densidade das argamassas nos estados fresco e endurecido, ambas estão inseridas numa classe elevada, D5 e M5, respectivamente. A variação de resultados para as ARG0 e ARG20 nos

estados fresco e endurecido foi de redução de 7% e 6% (Gráfico 4.5); isto se deve à perda de água por evaporação, uma vez que a cura realizada para a execução deste ensaio foi a ambiente (GONÇALVES, 2021). Este indicativo é também explicado pela alta retenção de água, que propiciou o aparecimento de vazios interconectados e, portanto, coeficiente de capilaridade elevado, além de indicar um comprometimento da resistência mecânica da argamassa.

Gráfico 4.5: Densidade de massa da ARG0 e ARG20



*DMEF – Densidade de massa no estado fresco.

*DMEE – Densidade de massa no estado endurecido

4.2 Resistencia Mecânica

4.2.1 Compressão axial

O ensaio de compressão axial foi realizado nas argamassas ARG0 e ARG100 utilizando-se, inicialmente, dois tipos de cura: ambiente e submersa em água saturada de cal aos 28 dias. Os resultados obtidos foram: a) cura ambiente - $f_{ck} = 9,92$ MPa (ARG0) e $f_{ck} = 2,30$ MPa (ARG100); b) cura submersa em água saturada de cal - $f_{ck} = 8,17$ MPa (ARG0) e $f_{ck} = 3,70$ MPa (ARG100).

Logo, as resistências à compressão axial das argamassas com substituição total da areia por *grits* foram nitidamente inferiores (aproximadamente 50%) as das argamassas de referência, independentemente

do tipo de cura adotado. Aplicando-se a Análise de Variância, ANOVA, obteve-se p-valor < 0,05, ou seja, o resultado obtido se enquadra na hipótese alternativa de que as argamassas diferem entre si. Contudo, a ANOVA não mostra se esta diferença é significativa. Assim, fez-se necessária a aplicação do Teste Tukey, como mostra a Tabela 4.9.

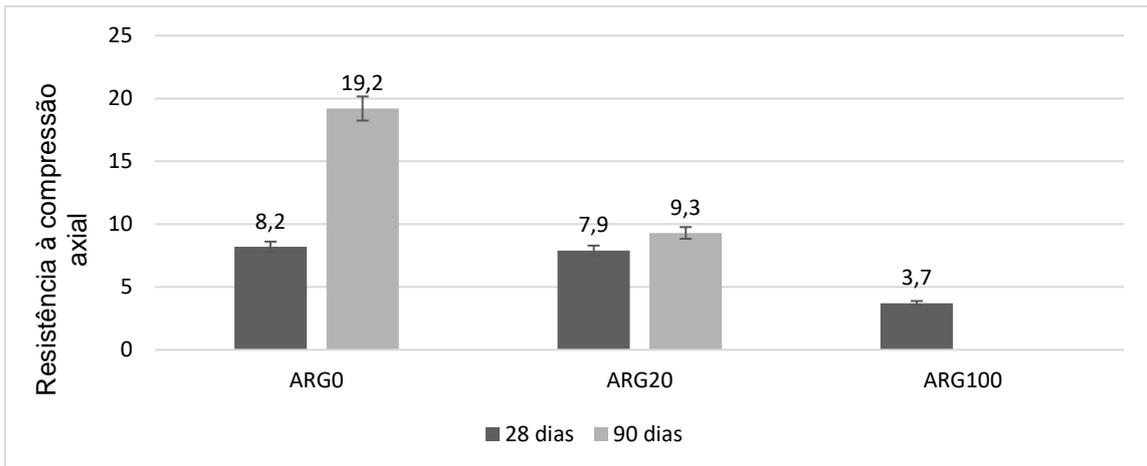
Tabela 4.9: Teste Tukey das argamassas para resistência à compressão axial aos 28 dias.

Cura ambiente					Análise de dados
Resistência à compressão axial					
Argamassa	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	CP 3 (MPa)	Rc MPa	DIC
ARG 0	9,39	9,94	10,44	9,92	Significativo
ARG 100	2,25	2,20	2,45	2,30	
Cura submersa em água saturada de cal					Análise de dados
Resistência à compressão axial					
Argamassa	CP 1 (MPa)	CP 2 (MPa)	CP 3 (MPa)	Rc MPa	DIC
ARG 0	8,04	8,39	8,09	8,17	Significativo
ARG 100	3,50	3,90	3,70	3,70	

Logo, a Tabela 4.9 mostra que os resultados foram significativos, ou seja, ARG0 apresentou melhor desempenho quando comparada à ARG100. Portanto, com base nessa tabela, verificou-se a necessidade de se fazer uma interpolação linear a fim de verificar qual teor de substituição alcançaria a resistência mínima requerida pelo teste estatístico; e, assim, chegou-se ao teor de 20% (ARG20) com cura submersa em água saturada de cal, a saber, f_{ck} igual a 7,86 MPa.

Posteriormente, objetivando aferir o comportamento das argamassas ARG0 e ARG20, repetiu-se o ensaio de compressão axial aos 90 dias, a fim de verificar o desempenho a longo prazo (Gráfico 4.6).

Gráfico 4.6: Resistência à compressão axial das argamassas aos 28 e 90 dias.

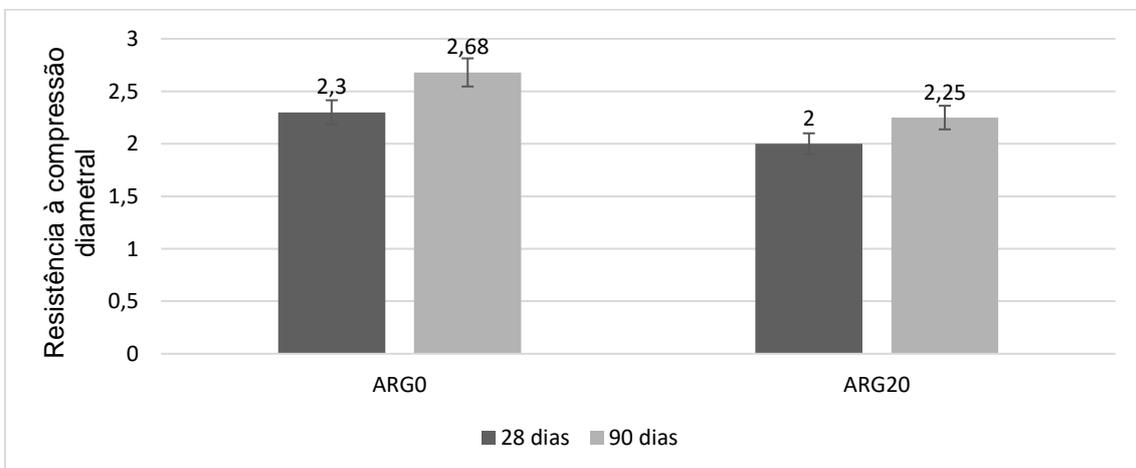


Observa-se que as resistências da ARG0 e ARG20 são bem próximas aos 28 dias. Entretanto, é perceptível que o ganho de resistência de cada argamassa é destoante entre 28 e 90 dias (35 e 15% para ARG0 e ARG20, respectivamente). Essa diferença pode ser atribuída ao módulo de elasticidade dos materiais utilizados.

4.2.2 Tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de tração por compressão diametral mostram que a ARG0 possui desempenho satisfatório, com ganho de resistência de 28 para 90 dias de aproximadamente 16,5%. No caso da ARG20 o acréscimo foi semelhante, alcançando 12,5% (Gráfico 4.7).

Gráfico 4.7: Resistência à tração por compressão diametral aos 28 e 90 dias.



A fim de melhor compreender os resultados obtidos, foi aplicada a análise de variância, a ANOVA (Tabela 4.10). A análise de variância do ensaio de tração por compressão diametral avaliou as idades de ruptura e os teores de substituição da areia por *grits* (0 e 20%), sendo p-valor superior a 5% em ambas as análises, ou seja, não houve diferença entre os resultados obtidos.

Tabela 4.10: Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	p-valor	F crítico
Idades	0,0992	1	0,0992	23,4852	0,1295	161,4476
Entre substituições	0,1332	1	0,1332	31,5325	0,1122	161,4476
Erro	0,0042	1	0,0042			
Total	0,2367	3				

Legenda:

*SQ – Soma dos quadrados;

*GL – Grau de liberdade;

*MQ – Quadrado médio;

*F – Estatística F (F de Fisher-Snedecor);

*P-valor – Parâmetro de leitura e interpretação da análise (seu resultado indica em qual hipótese o estudo se enquadra).

Mesquita *et al.* (2015) utilizaram *grits* moído em moinho de bolas durante 30 minutos. O processo conferiu ao resíduo diminuição do diâmetro das partículas bem superior à esperada. Este fenômeno levou à conclusão de que o *grits* possui baixa dureza e, conseqüentemente, baixo módulo de elasticidade, fato este que pode ter contribuído para a diminuição da resistência mecânica quando há aumento do teor de substituição da areia pelo resíduo.

O módulo de elasticidade, por sua vez, é uma medida da rigidez do material em questão. Os valores do módulo de elasticidade são definidos a partir do: (i) tipo ensaio realizado, (ii) características das misturas e (iii) critério de avaliação. Diz-se que os ensaios à flexão apresentam como módulos de elasticidade valores mais baixos quando comparados aos de compressão axial. Portanto, as características do agregado (dureza e granulometria), assim como o grau de compactação e tempo de cura são parâmetros que interferem no módulo de elasticidade e, conseqüentemente, no desempenho mecânico da argamassa.

4.2.3 Resistência potencial de aderência à tração

A Tabela 4.11 mostra que todas as argamassas apresentaram resistência média ao arrancamento inferior a 0,2 MPa, classe A1, ou seja, a mais baixa classificação adotada na NBR 13281 (ABNT,2005). Logo, as argamassas do presente estudo não podem ser utilizadas como revestimento, visto que é de suma importância neste tipo de aplicação a adesão, para que as mesmas se mantenham aderidas ao substrato. Isso explica o tipo de ruptura do sistema nos ensaios, que ocorreu na interface argamassa-substrato.

Tabela 4.11: Resistência potencial de aderência à tração aos 28 dias.

Corpo de Prova	ARG0 (MPa)	Ruptura	ARG20 (MPa)	Ruptura
1	0,17	Ruptura na interface argamassa-substrato	0,12	Ruptura na interface argamassa-substrato
2	0,23		0,12	
3	0,20		0,14	
4	0,16		0,11	
5	0,19		0,12	
6	0,19		0,13	
7	0,18		0,13	
8	0,18		0,12	
9	0,18		0,13	
10	0,17		0,12	
Média	0,17		0,12	

Conforme referenciado anteriormente, através dos resultados obtidos no ensaio de consistência, retenção de água, compressão axial e tração por compressão diametral; argamassas com presença de resíduo *grits* tendem a apresentar um comportamento aderente comprometido, visto que a elevada absorção de água causa o enrijecimento precoce da argamassa e, assim, implica na acentuada redução de seu desempenho resistente. É válido ressaltar que a aceleração no processo de hidratação de misturas cimentícias interfere no comportamento ligante dos aglomerantes (GONÇALVES, 2021; ROSA, 2021).

As argamassas com resíduo *grits* se apresentaram friáveis, consolidando a compreensão de que sua alta retenção de água prejudicou a adesão entre os

materiais sólidos da argamassa. O fácil “esfarelamento” corroborou a presença de poros abertos, perceptíveis a “olho nu” (Figura 4.1).



Figura 4.1: Presença de poros abertos nas argamassas.

Com a finalidade de verificar se os diferentes valores de resistência obtidos neste ensaio foram significativos, aplicou-se a análise de variância (Tabela 4.12).

Tabela 4.12: Análise de variância da resistência potencial de aderência à tração.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	0,1332	1	0,1332	2,5756	0,2497	18,5128
Dentro dos grupos	0,1035	2	0,0517			
Total	0,2367	3				

Legenda:

*SQ – Soma dos quadrados;

*GL – Grau de liberdade;

*MQ – Quadrado médio

*F – Estatística F (F de Fisher-Snedecor);

*P-valor – Parâmetro de leitura e interpretação da análise (seu resultado indica em qual hipótese o estudo se enquadra).

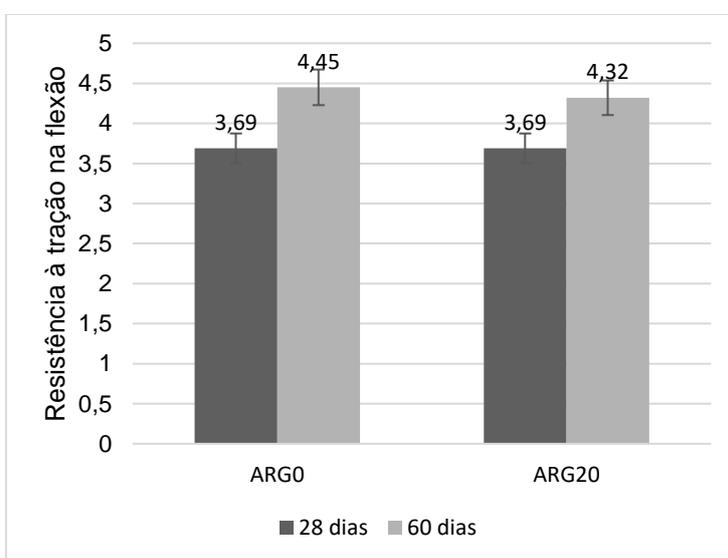
Apesar da Tabela 4.11 apresentar considerável diferença de resistência entre todos os 20 corpos de prova ensaiados (dez de cada argamassa), pode se

observar que o teste estatístico (Tabela 4.12) conferiu ao ensaio p-valor de 24,97%, ou seja, ainda que exista variação entre a argamassa ARG0 e a ARG20, tal diferença não é considerada significativa.

4.2.4 Tração na flexão e compressão

Os valores de resistência à tração na flexão de cada argamassa foram bem próximos aos 28 e 60 dias (Gráfico 4.8).

Gráfico 4.8: Resistência de tração na flexão aos 28 e 60 dias.



Pelo Gráfico 4.8 é possível aferir que a substituição de areia por *grits* atribuiu a argamassa modificada um comportamento resistente muito positivo, dado que a diferença entre as argamassas ARG0 e ARG20 não atingem 5%. Oliveira Júnior *et al.* (2019) avaliaram em sua pesquisa que a substituição de agregado natural por *grits*, a partir deste estudo foi constatado que a argamassa com substituição em 15% conferiu os melhores resultados, já que tal porcentagem atribuiu uma eficiência de 29,24% quando comparada a argamassa de referência.

A análise de variância deste ensaio (Tabela 4.13) foi de p-valor superior a 5%, indicando não haver diferença estatística entre os resultados obtidos, ou seja, a diferença não é significativa. Em seguida, verificou-se que as

argamassas, por apresentarem resistência superior a 3,5 MPa, são classificadas como R6, segundo as prescrições da NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 4.13: Análise de variância da resistência de tração na flexão.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Idades	0,0992	1	0,0992	23,4852	0,1295	161,4476
Substituições	0,1332	1	0,1332	31,5325	0,1122	161,4476
Erro	0,0042	1	0,0042			
Total	0,2367	3				

Legenda:

*SQ – Soma dos quadrados;

*GL – Grau de liberdade;

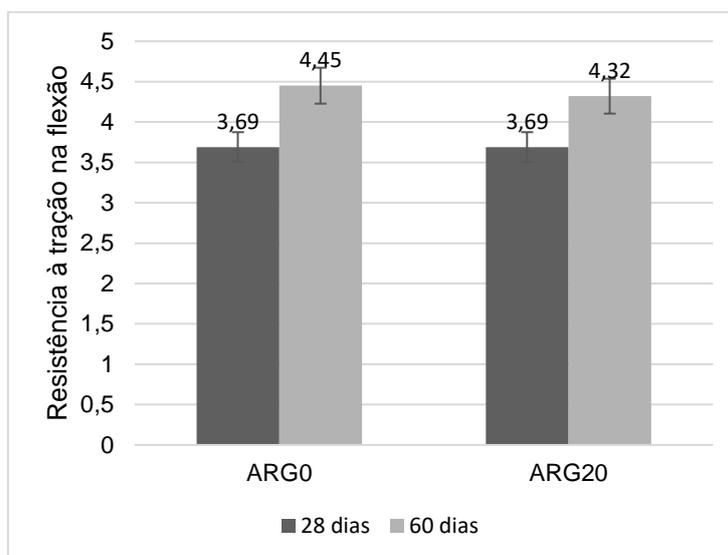
*MQ – Quadrado médio;

*F – Estatística F (F de Fisher-Snedecor);

*P-valor – Parâmetro de leitura e interpretação da análise (seu resultado indica em qual hipótese o estudo se enquadra).

Prosseguindo com os ensaios prescritos por essa mesma norma, as metades dos corpos de prova rompidos por tração na flexão foram submetidas ao ensaio de compressão axial, cujos resultados são mostrados no Gráfico 4.9.

Gráfico 4.9: Resistência à compressão axial em corpos de prova prismáticos aos 28 e 60 dias.



O ganho de resistência para ambas as argamassas foram proporcionais e, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), estão inseridas na classe mais alta, a P6, sendo esta ideal a aplicação de assentamento estrutural. Observa-se, também, que as mesmas apresentaram excelente desempenho, tanto de resistência à tração na flexão quanto de compressão axial.

4.3 Análise comparativa da ARG20 com as comerciais

Mediante o estudo da argamassa modificada de múltiplo uso e classificada de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), é valido apresentar a tabela comparativa da ARG20 com argamassas comerciais (Tabela 4.14).

Pelos resultados obtidos através de ensaios nos estados fresco e endurecido com a ARG20, é possível constatar que, apesar de não se enquadrar em sua totalidade com nenhuma das argamassas comerciais, é válido considerar que a argamassa modificada se aproxima bastante em muitas exigências mecânicas e reológicas de argamassas comerciais apresentadas.

Tabela 4.14: Comparação da ARG20 com argamassas comerciais

Ensaio	Lima (2022)	Votomassa	Votomassa	Votomassa	Votomassa de
	ARG20	(Múltiplo Uso)	Assentamento Estrutural (5MPa)	Assentamento Estrutural (7MPa)	Encunhamento e Assentamento
Densidade De Massa (estado fresco)	D5 (1872,25) (kg/m ³)	D4 (1600 a 2000) (kg/m ³)	D5 (1880 a 2100) (kg/m ³)	D5 (1880 a 2100) (kg/m ³)	D4 (1600 a 2000) (kg/m ³)
Retenção De Água	U5 (96) (%)	U3 (80 a 90) (%)	U2 (73 a 84) (%)	U2 (73 a 84) (%)	U3 (80 a 90) (%)
Resistência à Compressão	P6 (9,77) (MPa)	P4 (4 a 6,5) (MPa)	P4 (4 a 6,5) (MPa)	P6 (10 a 12) (MPa)	P3 (2,5 a 4,5) (MPa)
Resistência à Tração na Flexão	R6 (3,96) (MPa)	R3 (1,5 a 2,7) (MPa)	R3 (1,5 a 2,7) (MPa)	R5 (2,9 a 4,3) (MPa)	R2 (1,0 a 2,0) (MPa)
Aderência	A1 (0,12) (MPa)	A3 (≥0,3) (MPa)	*****	*****	
Coefficiente de Capilaridade	C5 (6,77) (g/dm ² ·min ^{1/2})	C5 (5,0 a 12) (g/dm ² ·min ^{1/2})	C5 (5 a 12) (g/dm ² ·min ^{1/2})	C4 (4 a 6) (g/dm ² ·min ^{1/2})	C5 (5 a 12) (g/dm ² ·min ^{1/2})
Densidade De Massa (estado endurecido)	M5 (1778,71) (kg/m ³)	M4 (1400 a 1800) (kg/m ³)	M5 (1650 a 1950) (kg/m ³)	M5 (1650 a 1950) (kg/m ³)	M4 (1400 a 1800) (kg/m ³)

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos no programa experimental do presente estudo, foi possível concluir que:

- a composição química do *grits* demonstra que o resíduo é composto majoritariamente por CaO;
- a presença do resíduo na argamassa conferiu aumento considerável de água à sua composição e, portanto, não houve possibilidade de manter a mesma relação a/c para as três frações volumétricas avaliadas;
- a argamassa ARG100 apresentou alta redução de resistência mecânica após os 28 dias e, portanto, foi inviável dar continuidade ao programa experimental com tal substituição;
- a substituição de areia natural por resíduo *grits* propiciou pequena redução de densidade nos estados frescos e endurecido, uma vez que o rejeito é, neste caso, um material seco e, portanto, tende a reduzir a densidade da argamassa;
- o ensaio de resistência à compressão axial mostrou que as argamassas ARG20 e ARG100 possuem comportamento friável e, assim, foi verificado o aparecimento de poros perceptíveis a “olho nu”;
- o ensaio de absorção de água mostrou que a ARG20 é mais permeável que a de referência e, portanto, mais porosa, como também verificado no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio;
- a retenção de água das argamassas foi muito elevada, devido à capacidade de absorção de água do resíduo, indicando que as argamassas com rejeito tendem a não perder água para o meio externo; contudo, este mesmo dado compromete o comportamento da argamassa ao causar diminuição do desempenho mecânico.

São sugeridos para estudos futuros os seguintes temas:

- avaliar novas dosagens e faixa granulométrica “bem graduada” do resíduo;
- Fixar uma relação de a/c com uso de aditivos a fim de compreender seus efeitos sob os ensaios de aderência, retenção de água, densidade e até mesmo na coesão dos agregados à mistura;
- Realizar ensaios com o intuito de avaliar o módulo de elasticidade do resíduo *grits*;
- aplicar técnicas analíticas como difração de raios X, termogravimetria, microscopia eletrônica de varredura, entre outras, a fim de fundamentar de maneira mais eficiente as diferenças físicas, químicas e mecânicas entre as argamassas;
- avaliar o desempenho das argamassas com substituição parcial da areia por *grits* com relação à durabilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anuário Brasileiro da Silvicultura. Abril/2016. Disponível <<http://www.abaf.org.br/wp-content/uploads/2016/04/anuario-de-silvicultura-2016.pdf>> Acesso em 15 de Jun. 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) – Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10004 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) – Argamassas para assentamento de paredes e tetos: NBR 13276 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos: NBR 13281 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) – Argamassas para assentamento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água: NBR 13277 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade no estado endurecido: NBR 13280 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade: NBR 15259 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) – Concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico: NBR 5739 – Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) – Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios: NBR 14081-2 – Rio de Janeiro.

AGUIRRE, A.B, HENNIES, W.T. Logistics for aggregates (gravel and sand) in large urban centers. **Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, MG. Ano, 2010

ANDRADE, L.B. Análise da influência da substituição de agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais na fase plástica do concreto. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Florianópolis, SC – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2008.

AZEVEDO, A. R. G. Estudo da viabilidade na incorporação de resíduo da indústria de papel na produção de argamassas de múltiplo uso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes, RJ – Universidade Estadual Norte Fluminense (UENF), 2015.

BENAHSINA, A., TAHA, Y., BOUACHERA, R., ELOMARI, M., BENNOUNA, A. B. Manufacture and characterization of fired bricks from gold mine waste rocks. **Minerals**. Marrocos, 2021.

CARASEK, H. Argamassas. In.: ISAIA, G.C. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, 3ª ed., v. 2, São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGELIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. *Cerâmica*, 64, 2018, p. 288-300.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. *Revista Matéria*, v.21, n.3, 2016, p. 714 –732.

CASTRO, F., VILARINHO, C., TRANCOSO, D., FERREIRA, P., NUNES, F., MIRAGAIA, A. Utilisation of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clincker production. **Journal Materials Engineering**. Portugal, v. 1, n. 1. Ano, 2009

CUSMA, D.F. Compósitos à Base de Resíduos da Recuperação Química da Produção Kraft de Celulose. Dissertação (Mestrado em Engenharia Materiais) – Curitiba, PR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UFV), 2015.

MAEDA, S., COSTA, E. R. O., SILVA, H. D. Uso de resíduos da fabricação da celulose e papel e de reciclagem de papel. **Embrapa Florestais**. Colombo, PR: Embrapa, 2010.

FARAGE, R. M. P., QUINA, M. J., FERREIRA, G. L., SILVA, C.M., SOUZA, J. J. L. L., TORRES, C. M. M. E. Kraft pulp mill dregs and *grits* as a permeable reactive barrier for removal of copper and sulfate in acid mine drainage. **Nature Research**. Viçosa, MG. Ano, 2020

GONÇALVES, H. S. Substituição da cal hidratada por lama de cal, resíduo da indústria de celulose, na produção de argamassas de múltiplo uso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes, RJ – Universidade Estadual Norte Fluminense (UENF), 2021

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. O Setor em números. Junho/2016. Disponível em <http://iba.org/images/shared/Cenarios/Cenarios_Junho.pdf> Acesso em 15 de jun. 2020.

IBEIRO, L. S. (2016) - Estudo Da Distribuição Dimensional De Poros E Da Condutividade Hidráulica De Solos Arenosos Compactados Tratados Com Cal E

Cimento. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Porto Alegre, RS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE divulga as estimativas da população dos municípios para 2019. Agosto/2019. Disponível em <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25278-ibge-divulga-as-estimativas-da-populacao-dos-municipios-para-2019>> Acesso em 20 de Set 2020.

LAVNITCKI, L., BAUM, C. A., BACEGATO, V. A., Política nacional dos resíduos sólidos: abordagem da problemática no Brasil e a situação na região sul. **Ambiente e Educação**. Santa Catarina, 2018.

LIMA, E.S. (2010) – Utilização de Resíduo *Grits* da Fabricação de Kraft como Agregado Graúdo para Concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Coronel Fabriciano, MG – Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (Unileste).

MADE FOR MINDS – Demanda mundial por areia gera crises ambientais e corrupção. Maio/2021. Disponível em < <https://www.dw.com/pt-br/demanda-mundial-por-areia-gera-criises-ambientais-e-corrup%C3%A7%C3%A3o/a-57573606> > Acesso em 08 de Dez de 2021

MARTINS, F. M. Caracterização Química e Mineralógica dos Resíduos Sólidos Industriais do Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Química) – Curitiba, PR – Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2006.

MENDONÇA, A.C. Incorporação do Resíduo *Grits* na Produção de Argamassa para uso na Construção Civil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Viçosa, MG – Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2018.

MESQUITA, L.C., ALVARENGA, R.C.S.S., SANTOS, C.F.R., ALVARES, A.N.O., REZENDE, A.A.P., GRAVINO, M.L., CARVALHO, J.M.F., PEDROTI, L.G. Evaluation of the potential of waste from pulp production (*Grits*) in its use in

mortar: physical and chemical characterization. **Materials Science Fórum**. Viçosa, MG. Junho, 2015.

MODOLO, R. C. E. Valorização de resíduos do sector de pasta e papel em produtos da construção civil. 2006. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cerâmica e do Vidro). Universidade de Aveiro, Portugal, 2006.

PCZIECZEK, A. Analise das propriedades físicas e mecânicas da argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Joinville, SC - Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017.

QUARCIONI, V.A., CHOTOLI, F. F., ÂNGULO, S. C., GUILGE, M. S., CAVANI, G. R., CASTRO, A. L., CINOCOTTO, M. A. Porosity estimation of cement-lime mortar through the volume calculation method. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre, 2009

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Environmental Governance Update. 2019. Disponível em <<https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/atualizacao-sobre-governaca-ambiental-agosto-2019>> Acesso em 23 de Nov 2021.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.L., PEDROTI, L.G., OLIVEIRA, J.A., FERNANDES, W.E.H., FINEZA, A.G., MONTEIRO, S.G., NALON, G.H. The influence of partial replacement of natural sand aggregates by *grits* residues on the mechanical properties of an ecological mortar. **Journal of Building Engineering**. Viçosa, MG. Agosto, 2019

Portal Economia Circular – O que é economia circular. Disponível em <<http://economiacircular.fiesp.com.br/pt/index.html>> Acesso em 10 de Dez 2021.

RIBEIRO, A. P. Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia

Metalúrgica e de Materiais), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ROSA, L. P. Estudo da potencialidade técnica do resíduo da nefelina sienito como agregado miúdo para a produção de argamassas de assentamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Tubarão, SC - Universidade do Sul de Santa Catarina, 2021.

SANTOS, D. P. Influência do resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Campos dos Goytacazes, RJ – Universidade Norte Fluminense, 2016

SILVA, T. R., CECCHIN, D., AZEVEDO, A. R. G., VALADÃO, I., ALEXANDRE, J., SILVA, F. C., MARVILA, M. T., GUNASEKARAN, M., GARCIA, F., MONTEIRO, S. N. Caracterização tecnológica do PET- Polietileno Tereftalato – adicionado ao tijolo solo cimento. **Materials**. Campos dos Goytacazes, RJ. Agosto, 2021

SIQUEIRA, F.B., HOLANDA, J.F.N. Reuse of *grits* waste for the production of soil-cement bricks. **Journal of Environment Management**. Campos dos Goytacazes, RJ. Outubro, 2013.

SIQUEIRA, F.B., HOLANDA, J.F.N. Application of *grits* as a renewable carbonate material in manufacturing wall tiles. **Ceramics International**. Campos dos Goytacazes, RJ. Julho, 2018.

SOUZA, S. V. M. Produção de emplastro de gesso com substituição parcial do resíduo *grits* proveniente da indústria de celulose. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias dos Materiais) – Presidente Prudente, SP – Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2020.

TORRES, C.M.E. Incorporação de Dregs e *Grits* de Fábricas de Polpas Celulósicas Kraft ao Clínquer para Produção de Cimento Portland. Dissertação

(Mestrado em Ciência Florestal) – Viçosa, MG – Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2016.

WOLFF, E. O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, *grits* e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha. 2008. 188 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

ZANELLA, B.P., SÁ, N.O., ACORINTI, I.C.B., TRANIN, I.C.B., SIMÕES, S.J.C. Durability of mixed mortar lining containing dregs/*grits*. **American Journal of Environmental Science**. Guaratinguetá, SP. Fevereiro, 2014.