Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Ezequiel Breno Rodrigues Reis

Estudo da viabilidade da substituição do agregado miúdo comercial por chamote de porcelanato na produção de argamassas de assentamento

Belo Horizonte
Setembro de 2022

Ezequiel Breno Rodrigues Reis

Estudo da viabilidade da substituição do agregado miúdo comercial por chamote de porcelanato na produção de argamassas de assentamento

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de pesquisa em Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Dr. Claudinei Rezende Calado

Belo Horizonte
Setembro de 2022

Reis, Ezequiel Breno Rodrigues.
R375e Estudo da viabilidade da substituição do agregado miúdo comercial por chamote de porcelanato na produção de argamassas de assentamento / Ezequiel Breno Rodrigues Reis. – 2022.
80 f. : il.

Orientador: Claudinei Rezende Calado

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2022.
Bibliografia.

1. Argamassa. 2. Cerâmica - Resíduo. 3. Reciclagem de resíduos urbanos. I. Calado, Claudinei Rezende. II. Título.

CDD: 620.14

Ficha elaborada pela Biblioteca - Campus Nova Suiça – CEFET-MG
Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga CRB6 - 3261

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 33/2022 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.050313/2022-01

Belo Horizonte-MG, 29 de setembro de 2022.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO COMERCIAL POR CHAMOTE DE PORCELANATO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO"

Autor: Ezequiel Breno Rodrigues Reis

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 07 de fevereiro de 2022 esta Dissertação:

Prof. Dr. Claudinei Rezende Calado (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Cleverson Fernando Garcia (EXAMINADOR EXTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

(Assinado digitalmente em 28/11/2022 09:55)
CLAUDINEI REZENDE CALADO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEQUI (11.55.09)
Matrícula: ###304#3

(Assinado digitalmente em 28/11/2022 13:21)
CLEVERSON FERNANDO GARCIA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEQUI (11.55.09)
Matrícula: ###504#8

(Assinado digitalmente em 05/12/2022 13:42)
SIDNEY NICODEMOS DA SILVA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DF (11.56.10)
Matrícula: ###199#7

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **33**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **29/09/2022** e o código de verificação: **8c2c9df3e**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, e a essa energia maior, pelo dom da vida e por iluminar meus passos, me enchendo de bênçãos e forças para buscar sabedoria.

Aos meus amados e queridos pais, Terezinha Paixão dos Reis Rodrigues e Josemar Pinto Rodrigues, por sempre me apoiarem e estarem presentes, de alguma forma, em todos os momentos da minha vida. Por acreditarem em mim, me incentivarem e me proporcionarem as condições necessárias para seguir em frente.

A toda minha família, irmãos, primos, tios, avós e agregados. Obrigado por estarem presentes na minha vida e por serem o meu alicerce.

Aos amigos e parceiros de vida Laís, Alix, Tchu, Dentista, entre outros não menos importantes, que fazem dos meus dias mais leves. Agradeço especialmente ao Eduard, parceiro de tantos momentos e que me auxiliou no tratamento de dados desta pesquisa.

A meu orientador, Claudinei Rezende Calado, pela dedicação, atenção e paciência em me acompanhar no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores Cleverson Fernando Garcia e Sidney Nicodemos da Silva, pelas importantes sugestões oferecidas na qualificação.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais, principalmente a Carol, por sempre ter me orientado com extrema boa vontade e paciência.

Às instituições de ensino CEFET/MG e IFMG – Campus Santa Luzia, as quais foram suportes de infraestrutura para viabilizar todo procedimento experimental. E aqui destaco o apoio de laboratórios por meio do professor Daniel, do Leandro e de toda equipe do setor de extensão do IFMG – Santa Luzia. Destaco também a colaboração do Raul e da equipe da Laborloc no empréstimo de alguns materiais e pelo compartilhamento de técnicas de ensaios. Muito obrigado também a CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Diariamente a construção civil produz um volume considerável de resíduos. A geração, o mal acondicionamento e a disposição final inadequada são processos que afetam a salubridade ambiental e econômica das cidades. O interesse em estudar novas formas sustentáveis de redução e tratamento dos resíduos urbanos gera amplas discussões a respeito de estratégias que auxiliem a cadeia produtiva da construção. Nesse sentido o presente trabalho analisou o resíduo cerâmico originado no processo de pós-queima das placas de porcelanato, chamado chamote. Foi estudada a viabilidade técnica em se utilizar esse material como substituto do agregado miúdo comercial na confecção de argamassas de assentamento. Para caracterizar física e mecanicamente o material proposto, foram realizados os seguintes ensaios: granulometria dos agregados selecionados, absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão para as idades de cura de 7, 14 e 28 dias. Na sequência os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). A granulometria comprovou que o resíduo de porcelanato possui teor de finos mais elevado que a areia. Os resultados apresentados para os ensaios referentes à absorção de água e índice de vazios mostraram que quanto maior o teor de substituição do agregado, menor é o teor de água absorvida. Quanto a massa específica, ficou verificada pouca alteração nessa propriedade até os 28 dias. Por fim, para os ensaios de compressão, o traço com substituição total da areia pelo resíduo mostrou um ganho de 30% nos valores de resistência à compressão em relação a argamassa de referência. Dessa forma, de acordo com as análises obtidas, verificou-se a possibilidade de substituição de toda a areia pelo chamote de porcelanato, apresentando inclusive ganhos nas propriedades mecânicas e físicas da argamassa no estado endurecido.

Palavras-chave: Argamassa, Chamote de porcelanato, Porcelanato, Reciclagem, Resíduo.

ABSTRACT

Every day the civil construction industry produces a considerable volume of waste. The generation, poor conditioning, and inadequate final disposal are processes that affect the environmental and economic health of cities. The interest in studying new sustainable ways of reducing and treating urban waste generates extensive discussions about strategies that help the construction production chain. In this sense the present work analyzed the ceramic residue originated in the post firing process of porcelain tiles, called grog. The technical feasibility of using this material as a substitute for the commercial fine aggregate in the production of mortars was studied. To physically and mechanically characterize the proposed material, the following tests were performed: granulometry of the selected aggregates, water absorption, void index, specific mass and compressive strength for curing ages of 7, 14 and 28 days. The results were then submitted to analysis of variance (ANOVA) and the Tukey test ($\alpha = 0,05$). The granulometry proved that the porcelain tile waste has a higher content of fines than sand. The results presented for the tests referring to water absorption and void index showed that the higher the content of aggregate substitution, the lower the content of water absorbed. As for the specific mass, there was little change in this property until the 28 days. Finally, for the compression tests, the mix with total substitution of sand by waste showed a 30% gain in compressive strength values compared to the reference mortar. Thus, according to the analyses obtained, the possibility of substituting all the sand for the porcelain tile chamotte was verified, presenting gains in the mechanical and physical properties of the mortar in the hardened state.

Keywords: Mortar, Grog, Porcelain tiles, Recycling, Residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação da resistência à flexão e absorção de água em função da temperatura de queima de massas para fabricação de porcelanato. 23
Figura 2: Produção de porcelanato no Brasil 25
Figura 3: Camadas do revestimento em argamassa 27
Figura 4: Classificação das areias 29
Figura 5: Moinho de Disco MD-200. 47
Figura 6: Amostra da areia de referência 48
Figura 7: Amostra do chamote. 48
Figura 8: Ensaio de Granulometria 49
Figura 9: Argamassa com 100% de resíduo de porcelanato na relação a/c: 0,48 ... 49
Figura 10: Argamassa com 100% de resíduo de porcelanato na relação a/c: 0,75 . 49
Figura 11: Moldagem dos corpos de prova 52
Figura 12: Desmoldagem dos corpos de prova 52
Figura 13: Ensaio de compressão 53
Figura 14: Pesagem Hidrostática dos Corpos de Prova 54
Figura 15: Curvas granulométricas dos agregados 59
Figura 16: Taxa de absorção das argamassas. 62
Figura 17: Índice de vazios das argamassas. 65
Figura 18: Massa específica das argamassas. 68
Figura 19: Resistência à compressão das argamassas. 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipologia de placas cerâmicas 16
Tabela 2: Grupos de absorção de água em função da fabricação 16
Tabela 3: Módulo de resistência à flexão e carga de ruptura de revestimentos prensados 17
Tabela 4: Aditivos utilizados em argamassas 29
Tabela 5: Resistências ao se substituir agregado natural por resíduos de porcelanatos 42
Tabela 6: Proporção de materiais utilizados 47
Tabela 7: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária 48
Tabela 8: Composições das argamassas 50
Tabela 9: Composição granulométrica do agregado miúdo de referência (areia) 58
Tabela 10: Composição granulométrica do composto areia/resíduo (50/50%) 58
Tabela 11. Composição granulométrica do resíduo de porcelanato 58
Tabela 12: Resultado da variação da taxa de absorção (%) nas argamassas, n=3 . 59
Tabela 13: Análise estatística - Absorção de água nas argamassas, n=3 63
Tabela 14: Resultado da variação do índice de vazios (%) nas argamassas, n=3 .. 64
Tabela 15: Análise estatística - Índice de vazios nas argamassas, n=3 66
Tabela 16: Resultado da variação da massa específica (g/cm3) nas argamassas, n=3 67
Tabela 17: Análise estatística – Massa específica nas argamassas, n=3 69
Tabela 18: Resultados da variação da resistência à compressão das argamassas, n=4 70
Tabela 19: Análise estatística - Resistência à compressão nas argamassas, n=4 ... 72

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1: Produção do porcelanato 17
Fluxograma 2: Metodologia da pesquisa 46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

2. OBJETIVOS 14

2.1. Objetivo geral 14

2.2. Objetivos específicos 14

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15

3.1. Materiais cerâmicos 15

3.2. Argamassas 27

3.3. Reutilização do chamote de porcelanato em argamassas. 38

4. MATERIAIS E MÉTODOS 45

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 57

5.1. Curvas granulométricas dos agregados 58

5.2. Desempenho físico 60

5.3. Desempenho mecânico 69

6. CONCLUSÕES 74

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 75

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção é um setor relevante para o Brasil. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) esse setor representou 9,7% do PIB nacional em 2021. Segundo Santo et al. (2014), a construção civil é um segmento em constante crescimento devido à demanda por implementação de residências, estradas, indústrias, etc. Estes dados mostram como o setor é essencial a geração de emprego, ao desenvolvimento das cidades e à economia do país.

Contudo uma quantidade cada vez maior de resíduos é gerada. Kabirifar et al. (2020) estimaram que a indústria da construção é responsável por 40% dos resíduos em aterros no Brasil. Chi et al. (2020) destacaram que o setor tem um impacto negativo no meio ambiente por meio do esgotamento e degradação do solo, geração de resíduos sólidos, emissões de poeira e gás e consumo de recursos naturais não renováveis.

No segmento cerâmico, um dos principais resíduos produzidos é o chamote. Esse resíduo é o produto acabado que apresentou falhas desqualificantes, como, por exemplo, trincas, fissuras, etc. O chamote é descartado uma vez que sua reinserção no processo inicial não é adequada, pois segundo Noni Júnior et al. (2010), o produto já passou pela etapa de queima ou sinterização.

No Brasil, a indústria de porcelanato é cada vez mais crescente. A grande aceitação do porcelanato pelo mercado consumidor se deve a certas propriedades, como baixa porosidade, alta resistência mecânica e ao ataque químico, facilidade de manutenção, além de ser um material de características moderna e versátil.

Nesse contexto o processo da produção de porcelanato, devido a seu volume, também contribui consideravelmente para a geração de resíduos que não são reaproveitados pela indústria. Dessa forma é necessário estudar métodos que minimizem e reduzam esse impacto. Uma das opções é a reutilização dos chamotes de porcelanato na própria construção civil.

Essa indústria necessita da exploração de agregados na natureza. Uma alternativa para solucionar os problemas de extração de areia e descarte do chamote

de porcelanato seria a incorporação deste material como agregados, por meio da substituição dos constituintes naturais nas argamassas. Nesse sentido algumas pesquisas são realizadas. Estudos dos componentes, propriedades e comportamento de argamassas produzidas com chamotes cerâmicos propiciaram o desenvolvimento de diferentes versões de argamassas (MATIELO, 2019).

A possibilidade de fabricar argamassas inserindo materiais que seriam descartados traz diversos benefícios. Pode-se citar a preservação de jazidas de areia, a diminuição da contaminação do solo e lençóis freáticos, a redução do consumo de energia para extração e beneficiamento dos agregados naturais e a diminuição de resíduos descartados em aterros sanitários. Quanto aos benefícios econômicos podemos citar a diminuição dos custos de transporte dos agregados naturais de locais mais distantes para os centros consumidores, a execução de obras a custos menores utilizando materiais reciclados e a possibilidade de se produzir argamassas de melhor comportamento mecânico (PAIXÃO, 2011).

Nesse sentido a presente pesquisa analisa a influência da substituição da areia por chamote de porcelanato, em diferentes proporcões, na confecção de argamassas de assentamento. Parâmetros físicos e mecânicos foram levantados para se estudar a viabilidade dessa substituição e a busca pelo teor de chamote mais viável. As argamassas propostas foram comparadas com uma de referência, sem resíduo em sua composição, e os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste Tukey com 95% de confiança para comparar os tratamentos entre si.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Substituir o agregado miúdo natural por resíduos de porcelanato na fabricação de argamassas para construção civil e analisar a influência dessa substituição por meio de ensaios de resistência mecânica e de propriedades físicas.

2.2. Objetivos específicos

- Classificar granulometricamente a areia de referência e o chamote resultante da fabricação de porcelanato, definindo suas curvas granulométricas.

- Propor diferentes formulações, com teores de 0%, 50% e 100% de substituição da areia pelo resíduo, mantendo fixa a quantidade de água.

- Analisar a absorção de água, a porosidade e a massa específica das argamassas obtidas para o tempo de cura de 7, 14 e 28 dias.

- Determinar as características mecânicas de resistência à compressão para o tempo de cura de 7, 14 e 28 dias.

- Avaliar, por métodos estatísticos, as propriedades ensaiadas para se obter a melhor formulação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Materiais cerâmicos

De acordo com Callister (2012), os materiais cerâmicos são compostos formados por elementos metálicos e não metálicos, para os quais as ligações interatômicas são totalmente, ou predominantemente, iônicas tendo, porém, alguma natureza covalente. Segundo o mesmo autor, o termo “cerâmica” vem da palavra Keramikos que significa “matéria queimada”, indicando que as propriedades desejáveis destes materiais são atingidas mediante um tratamento térmico a uma alta temperatura conhecido como cozimento.

O processamento dos materiais cerâmicos compreende uma série de etapas que podem ser definidas como: preparação das matérias-primas (cominuição e mistura), conformação (extrusão, prensagem e colagem), processamento térmico e acabamento (LUZ, 2008).

As matérias-primas utilizadas são classificadas como plásticas: argila, caulim e filito e não plásticas: quartzo, calcita, dolomita, talco e feldspato. De acordo com Luz (2008) as características mais comuns nos materiais cerâmicos são a dureza, a resistência à compressão e a flexão e o bom isolamento elétrico. O autor também destaca o fato desses materiais serem antialérgicos, de fácil limpeza, incombustíveis e antiderrapantes.

3.1.1. Revestimentos cerâmicos

A Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER) destaca que o Brasil é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a terceira posição em produção e a segunda em consumo. No ano de 2021, foram produzidos 1.048 milhões de metros quadrados, ficando o país atrás apenas da China e da Índia. Quanto ao mercado interno, as vendas totais em 2021 atingiram 901 milhões de metros quadrados.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define as placas cerâmicas segundo a NBR/ISO 13006 (ABNT, 2020) como uma mistura de um material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformadas por extrusão (representada pela letra A) ou por prensagem (representada pela letra B), podendo ainda ser conformadas por outros processos (representados pela letra C). As placas são secadas e queimadas à temperatura de sinterização e, de acordo com referida norma, podem ser esmaltadas (GL = glazed) ou não esmaltadas (UGL = unglazed).

A classificação dos revestimentos é feita de acordo com o teor de água absorvido. Essa característica é muito importante para a especificação de uma placa em função do seu local de uso, uma vez que a água absorvida afetará algumas de suas propriedades como: resistência à flexão, carga de ruptura, resistência ao desgaste e ao manchamento (CABRAL JUNIOR et al., 2019). Na Tabela 1 é apresentada a classificação dos revestimentos cerâmicos.

Tabela 1: Tipologia de placas cerâmicas

Grupo	Absorção de água (%)	Aplicações
BIa	0,0 – 0,5	Pisos, Paredes – Porcelanato
BIb	0,5 – 3,0	Pisos, Paredes – Grês
BIIa	3,0 – 6,0	Pisos, Paredes – Semigrês
BIIb	6,0 – 10	Pisos, Paredes – Semiporoso
BIII	> 10	Pisos, Paredes – Monoporosa/Azulejo

Fonte : CABRAL JUNIOR et al. (2019)

Por outro lado, a NBR/ISO 13006 (ABNT, 2020) classifica as placas cerâmicas de revestimento, em um dos seus critérios, quanto ao grupo de absorção de água em função do seu método de fabricação, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Grupos de absorção de água em função da fabricação

Absorção de água (%)	Métodos de fabricação		
	Extrudado (A)	Prensado (B)	Outros (C)
Abs ≤ 0,5	AI	BIa	CI
0,5 < Abs ≤ 3,0		BIb	
3,0 < Abs ≤ 6,0	AIIa	BIIa	CIIa
6,0 < Abs ≤ 10	AIIb	BIIb	CIIb
Abs > 10	AIII	BIII	CIII

Fonte: NBR/ISO 13006 (ABNT, 2020)

Silva (2012) apresentou as resistências mecânicas requeridas para os revestimentos prensados de acordo com a absorção de água. Esses valores estão ilustrados na Tabela 3.

Tabela 3: Módulo de resistência à flexão e carga de ruptura de revestimentos prensados

Grupo de absorção de água	Absorção de água (%)	Módulo de resistência à flexão (MPa)	Carga de ruptura (n) para espessura ≥ 7,5 mm	Carga de ruptura (n) para espessura ≤ 7,5 mm
BIa	0,0 – 0,5	≥ 35	≥ 1.300	≥ 700
BIb	0,5 – 3,0	≥ 30	≥ 1.100	≥ 700
BIIa	3,0 – 6,0	≥ 22	≥ 1.000	≥ 600
BIIb	6,0 – 10	≥ 18	≥ 800	≥ 500
BIII	> 10	≥ 15	≥ 600	≥ 200

Fonte: Silva (2012)

Assim para uma cerâmica ser considerada porcelanato ela deve satisfazer os dados apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3, ou seja: absorver no máximo 0,5% de água, ser conformada por prensagem e possuir módulo de resistência à flexão maior que 35MPa.

3.1.2. Porcelanato

O termo porcelanato surgiu na Itália no final da década de 1970. Segundo Sánchez. et al (2010) o objetivo do termo foi designar um material de alto desempenho mecânico, apresentando uma aparência natural, assemelhando- se à rocha natural mais do que qualquer outro produto cerâmico.

O porcelanato é um produto vitrificado, compacto e com baixa porosidade. Tais características conferem ao material excelente resistência mecânica, resistência a substâncias químicas e à abrasão. Outras características técnicas são resistência ao desgaste, baixa absorção de água, dureza superficial, resistência à compressão, além de um ótimo grau de limpabilidade. O porcelanato pode ainda ser submetido a um processo de polimento superficial que realça seu aspecto estético, sem modificar consideravelmente suas características mecânicas (OLIVEIRA, 2015).

Uma massa de porcelanato é composta basicamente por uma mistura de argila ou caulim, quartzo e feldspato. A fração da argila fornece plasticidade e resistência mecânica durante o processamento. O quartzo, devido a seu alto ponto de fusão, promove estabilidade térmica e dimensional. Já o feldspato fornece propriedades fundentes à massa, confere estabilidade durante a sinterização e reduz a porosidade a um nível muito baixo, sendo o responsável inicial pelo processo de densificação (ROSSO et al., 2005).

Quanto ao caulim, ele é rico em alumina e durante a queima pode fazer parte da reação de vitrificação formando vidros silicoaluminosos, ou as agulhas de mulita ($3Al_2O_3$ - $2SiO_2$), as quais atuam como esqueleto do corpo contribuindo para o aumento da resistência mecânica. A escolha das matérias-primas objetiva dar cor branca ou clara à base dos produtos, além de boa sinterização nas condições de queima rápida (35 a 50 minutos) e de temperaturas em torno de 1.200ºC (CABRAL JUNIOR et al., 2019; ROSSO et al., 2005; SÁNCHEZ. et al., 2010).

Inicialmente, a expressão “grés porcelanato” derivou das seguintes terminologias: “grés”, que consiste em um material cerâmico com estrutura compacta, característica de uma fase cristalina imersa em uma fase vítrea e “porcelanato”, terminologia que se refere às características técnicas dos produtos, os quais se assemelham às porcelanas (MENEGAZZO, et al., 2000).

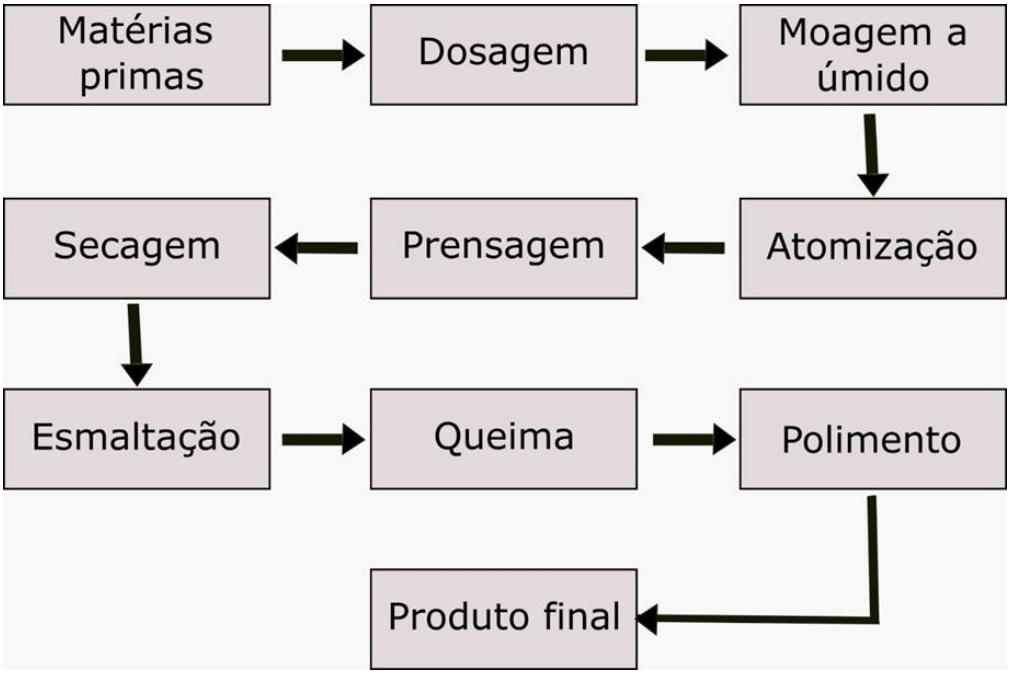
De acordo com Cabral Júnior et al. (2019), embora o setor de cerâmica branca seja denominado genericamente de porcelana e louça, a definição, quanto à natureza do corpo cerâmico, pode ser:

- Porcelana: quando a absorção de água do corpo cerâmico é zero (pode-se admitir até 0,5%);
- Grés: são designados os materiais com baixíssima absorção (geralmente entre 0,5% e 3%);
- Faiança (ou louça): refere-se aos corpos mais porosos (geralmente superior a 3%).

3.1.3. Processo de fabricação do porcelanato:

As etapas de produção do porcelanato são apresentadas no Fluxograma 1 a seguir, sendo o conteúdo correspondente apresentado na sequência.

Fluxograma 1: Produção do porcelanato



Fonte: OLIVEIRA e HOTZA (2015)

- **Dosagem**

Segundo Rosso et al. (2005), inicia-se a fabricação do porcelanato com a dosagem das matérias-primas, mediante uma formulação pré-determinada. É necessário um controle rigoroso na liberação dos materiais, sobretudo quanto ao teor de umidade, para que a formulação tenha peso real conforme a especificação. Após a pesagem das matérias-primas, essas são levadas para a moagem.

- **Moagem**

A moagem via úmida é realizada em moinhos de bolas, que consistem basicamente em um recipiente cilíndrico contendo em seu interior bolas de material resistente e de diâmetros variados, podendo ser um processo contínuo ou intermitente. O material a moer mistura-se com a água para facilitar a operação, sendo usados percentuais de água maiores que 20%. Durante a moagem, as partículas do

material são reduzidas, seus formatos são alterados e sua distribuição granulométrica é modificada. O composto resultante é chamado de barbotina (SILVA, 2012).

Para favorecer as reações de vitrificação e densificação durante a queima, as partículas presentes na barbotina, após a moagem, devem apresentar diâmetros médios entre 15 e 20 μm. Essa faixa granulométrica contribui para aumentar a superfície específica das partículas que compõem a massa cerâmica e, portanto, a reatividade durante a queima (OLIVEIRA e HOTZA, 2015).

A respeito da granulometria do produto pós-moagem, Rosso et al. (2005) esclarecem que uma moagem não eficiente poderá comprometer a reatividade da massa durante a queima, podendo ocasionar arrancamento de partículas durante a etapa de polimento. Além disso, a resistência mecânica após a queima está associada ao tamanho dos microporos gerados no interior da peça, que depende, entre outros fatores, da dimensão das partículas da massa. Do contrário, caso a moagem da barbotina seja excessiva, poderá haver o comprometimento da prensagem, resultando em peças com baixa densidade aparente e resistência mecânica a seco, além da excessiva retração linear das placas durante a queima.

É durante a moagem que é realizada a coloração da barbotina. Para isso é adicionado o corante e a solução permanece em agitação, por no mínimo 24 horas, para a homogeneização da cor.

- **Atomização**

A atomização consiste em desumidificar a barbotina obtida na etapa anterior. Aqui ocorre a secagem e a granulação da massa. O controle do teor de água é realizado pelo atomizador, também conhecido por “spray dryer”. O processo consiste na injeção da barbotina à alta pressão, onde entra em contato com o ar a uma temperatura que varia de 500 a 600°C (MORAES, 2007). A mudança brusca na temperatura evapora quase que instantaneamente a água. Com isso, ao final desse processo, é possível obter grãos com as características adequadas à prensagem.

Rosso et al. (2005) observam que o formato, a umidade e o tamanho dos grãos

obtidos após a atomização afetam o preenchimento do molde na prensa, que por sua vez pode alterar a resistência mecânica a verde das placas, gerar problemas dimensionais e trincas durante a queima.

- **Prensagem**

De acordo com Moraes (2007), na produção do porcelanato a conformação é a etapa responsável por deixar o corpo cerâmico com a máxima densidade a verde possível, porém, observando a necessidade da liberação dos gases que deve ocorrer na sinterização.

Os objetivos desta etapa são a conformação e a redução da porosidade interna da peça. A pressão de compactação varia de 400 kgf/cm^2 a 500 kgf/cm^2 e a densidade a verde varia de 1,95 a 2,00 g/cm^3 (OLIVEIRA e HOTZA, 2015; ROSSO et.al., 2005).

Além do controle da pressão de compactação, é muito importante que a alimentação dos pós atomizados para as cavidades da matriz ocorra de forma homogênea. A heterogeneidade de algumas misturas de pós atomizados pode dificultar o processo de prensagem (OLIVEIRA e HOTZA, 2015).

- **Secagem**

Segundo Silva (2012), na etapa de secagem ocorre a eliminação do líquido de processamento, que está no material prensado que acompanhou o grânulo atomizado. Nesta fase do processo o teor de umidade do material alcança valores inferiores a 1,0%. Os objetivos desta operação são: aumentar a resistência mecânica do produto, garantir a uniformidade de temperatura na superfície da peça e assegurar uma distribuição homogênea da umidade. Uma retração diferencial devido a uma taxa diferenciada de secagem sobre a superfície do produto pode produzir deformação. Além disso, o ideal é que as retrações terminem antes de finalizada a secagem.

- **Esmaltação**

A esmaltação é responsável pela decoração da superfície do porcelanato. Nessa fase é aplicada uma camada uniforme de esmalte. Esse material é uma espécie de vidro transparente, incolor e quase sempre brilhante que se funde no forno e se solidifica no resfriamento. Porém, se na base vítrea do esmalte existir substâncias opacificantes, o esmalte se tornará opaco (SILVA, 2012).

- **Queima**

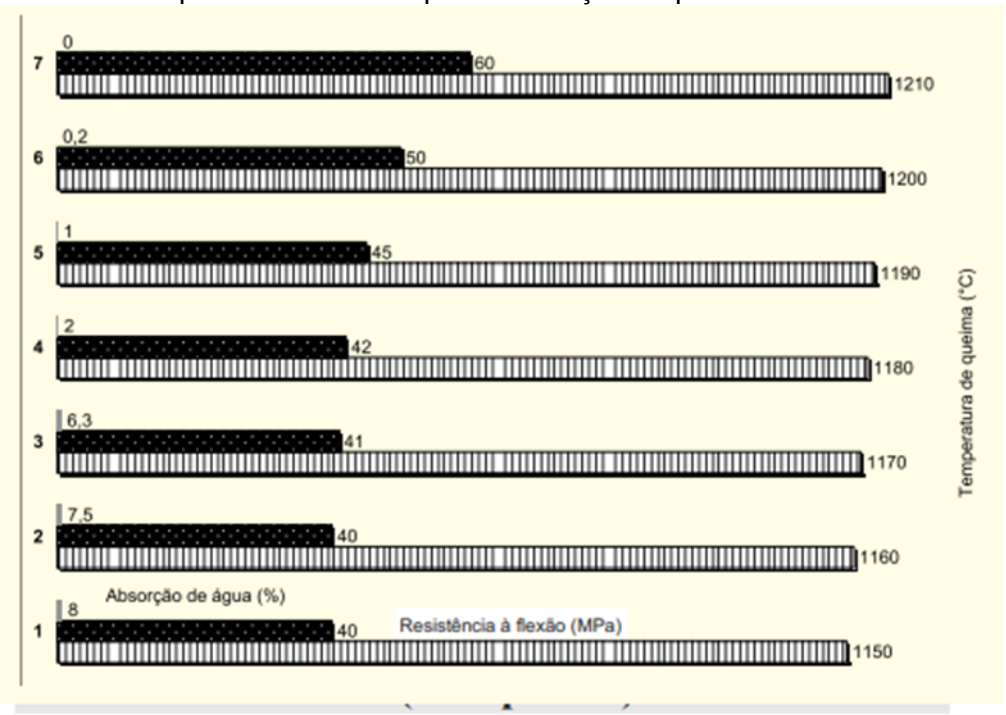
Devido à grande quantidade de fundentes presentes na composição de sua massa, o desenvolvimento da densificação do porcelanato ocorre por meio da sinterização via fase líquida. Esse tipo de sinterização envolve um sistema onde a fase sólida apresenta solubilidade limitada no líquido durante a queima. O processo resulta no aumento do tamanho do grão e na densificação do material (ROSSO et al., 2005).

De acordo com Silva (2012), a etapa de queima é a última fase da produção do porcelanato que influencia no seu desenvolvimento microestrutural. A temperatura ótima de queima para porcelanato normalmente situa-se entre 1.190 e 1.220°C e esta temperatura deve proporcionar a máxima densificação da massa cerâmica. A faixa de temperatura usada na sinterização determinará as propriedades técnicas do material.

Já OLIVEIRA e HOTZA (2015) observam que temperatura e tempo são parâmetros importantes e devem ser analisados atentamente para se obter um material vitrificado com baixa porosidade, por meio da utilização de um ciclo de queima rápida, usualmente de 50 a 70 min e com temperaturas na faixa de 1.200 a 1.230°C.

Na Figura 1 são apresentas as variações de resistência à flexão e de absorção de água em função da temperatura de sinterização. Os requisitos do produto após a etapa de queima são: absorção de água quase nula, valores elevados de resistência à flexão e à abrasão profunda e alta resistência a manchas (OLIVEIRA e HOTZA, 2015).

Figura 1: Variação da resistência à flexão e absorção de água em função da temperatura de queima de massas para fabricação de porcelanato.



Fonte: OLIVEIRA e HOTZA (2015)

Segundo Rosso et al. (2005), a resistência mecânica após a queima está associada ao tamanho dos microporos gerados no interior da peça. O aumento da temperatura até seu valor ótimo contribui para a modificação estrutural e a densificação do material. Como resultado dessa estrutura mais densa têm-se a redução da absorção de água e o aumento da resistência da placa de porcelanato (OLIVEIRA e HOTZA, 2015).

Sánchez et. al. (2010) observam que a temperaturas de 900 a 1000°C, uma importante quantidade de fase líquida começa a se formar, circundando as partículas e resultando na condução de pressão capilar. A capilaridade une as partículas, aumentando a retração linear e reduzindo a porosidade. Elevando a temperatura, aumenta-se a quantidade da fase líquida e reduz-se a porosidade. Em torno de 1180°C, os poros começam a se fechar e suas conexões são eliminadas. Os poros fechados possuem ar que pressionam as paredes, opondo-se a densificação. Acima de 1200°C, a pressão dos poros fechados é alta e neutraliza a pressão capilar, fazendo a expansão do produto. Temperaturas acima de 1210°C resultam no inchaço do material, reduzindo a resistência e outras propriedades mecânicas.

- **Polimento**

Uma das características que contribui muito para a alta demanda do porcelanato é o seu aspecto brilhante que é conseguido pela etapa de polimento. Além do efeito estético essa fase confere ao porcelanato a sua característica de limpabilidade. Durante o polimento são empregados abrasivos sucessivamente mais finos. O resultado final será de placas cerâmicas extremamente polidas em nível de espelho (MORAES, 2007).

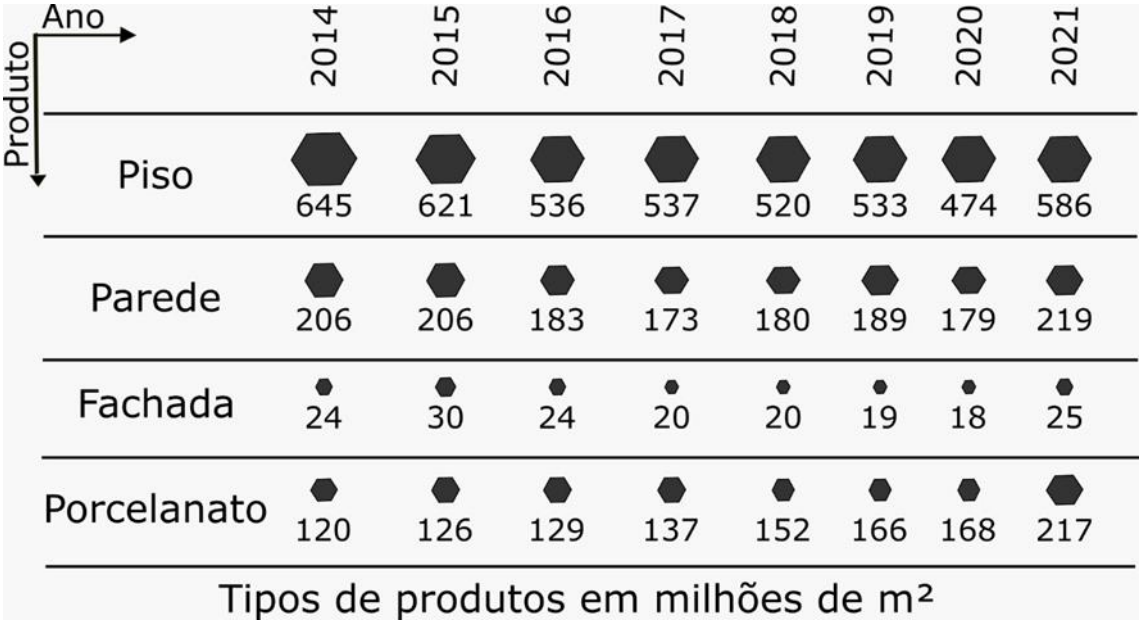
Segundo Rosso et al. (2005), o equipamento empregado no polimento das placas cerâmicas é dotado de várias cabeças polidoras formadas de materiais abrasivos, que em contato com as peças em alta rotação, velocidade controlada e em presença de água executam o polimento.

A primeira parte do equipamento é responsável pelo desgaste acentuado da peça, ou seja, pelo nivelamento de sua superfície. A segunda etapa realiza a preparação para o polimento. Por fim, a terceira etapa é o polimento propriamente dito. Um parâmetro importante para um bom polimento é a qualidade e quantidade de água utilizada. A função da água é diminuir o atrito entre os abrasivos e a peça, refrigerar o local e retirar os resíduos gerados que poderiam ficar sobre as peças, causando riscos e arranhões (ROSSO et al., 2005).

3.1.3.1. A indústria brasileira de porcelanato

O Brasil é um dos mais importantes mercados de porcelanato. Dados da ANFACER confirmam a expressividade e o constante crescimento desse setor. Na Figura 2 é ilustrado o aumento de sua produção ao longo dos anos.

Figura 2: Produção de porcelanato no Brasil



Fonte: ANFACER (2021)

De acordo com a ANFACER, em 2014 o Brasil produziu 120 milhões de metros quadrados de porcelanato. Já em 2021, essa produção foi de 217 milhões de metros quadrados, um aumento de quase 81%. O país ocupa a 3ª posição em produção e a 2ª posição em consumo no mundo, além de ser o 7º do ranking das exportações desse tipo de revestimento.

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM) o Brasil conta hoje com 20 empresas fabricantes de porcelanato. A maior parte se encontra nos estados de São Paulo e Santa Catarina.

3.1.3.2. Geração de resíduos na produção de porcelanato

Resíduo é todo material ao qual se pode agregar valor, gerando uma nova cadeia produtiva, ao contrário de lixo que é todo o resíduo que não possui valor agregado. As aplicações possíveis de um resíduo são aquelas que melhor aproveitam as características físico-químicas do material para gerar um novo produto de melhor desempenho e menor impacto ambiental, com condições de competir no mercado (PAIXÃO, 2011).

De acordo com MORAIS (2002), a reutilização dos resíduos apresentam vantagens de ordem econômica e comercial. De ordem econômica, devido ao melhor aproveitamento da matéria-prima, a redução ou a eliminação de pagamentos de multas ambientais, além do aumento do nível de controle do processo de produção. Já as vantagens comerciais seriam devido a melhora da imagem da empresa, a facilidade de certificação ambiental e de qualidade nos produtos e processos e o possível ganho de mercados consumidores nacionais e internacionais.

MELCHIADES et al. (2015) e CONTARTESI et al. (2019) destacaram alguns dos passivos ambientais oriundos das diversas etapas de fabricação do porcelanato, são eles:

- Mineração para extração de grande quantidade de materiais naturais: argila refratária, argila fundente, filito, caulim, feldspato e quartzo.
- Custo de transporte das matérias-primas das jazidas as fábricas.
- Alto consumo de água e de defloculantes.
- Grande gasto de energia elétrica.
- Elevado consumo de gás natural.
- Emissão de poeira, ruídos e vibrações.
- Geração de efluentes.
- Geração de resíduos perigosos na fabricação de esmaltes.
- Emissão de gases e material particulado na atmosfera.

Na produção nacional dos revestimentos cerâmicos, o volume descartado de resíduos representa em média 3,0% de toda sua produção. Considerando que esses materiais ocupam mais de 80 km² anualmente em aterros específicos, e sabendo que os constituintes solúveis do porcelanato são o chumbo, o cádmio e outros metais pesados, é notório o problema ambiental gerado por apenas descartar o material nos aterros sem oferecer nenhuma solução (MATOS, 2015).

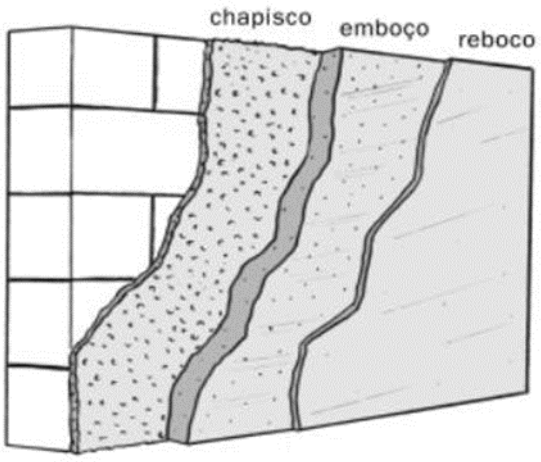
Dessa forma, diminuir, ao máximo, a quantidade de resíduo de porcelanato descartado e inutilizado no meio ambiente se faz necessário, sendo uma questão não somente ambiental, mas também econômica e social.

3.2. Argamassas

O sistema construtivo em alvenaria é o mais utilizado nas edificações brasileiras. Para revestir essas edificações são realizadas camadas de argamassas, sendo as mais comuns o chapisco e a camada única. As argamassas de revestimento conferem às construções conforto térmico e acústico, estanqueidade e durabilidade. Elas possuem diferentes composições, sendo que a argamassa de um chapisco convencional é composta por cimento, areia e água, já na camada única é empregado cimento, areia, água e cal hidratada (CALDAS e TOLEDO FILHO 2019).

Segundo Recena (2012) classicamente os revestimentos podem apresentar até três camadas, estas são ilustradas na Figura 3:

Figura 3: Camadas do revestimento em argamassa



Fonte: ABCP (2020).

As definições dos constituintes de um revestimento clássico argamassado são:

- Chapisco: camada em contato direto com a alvenaria. Sua função é melhorar a aderência do revestimento e uniformizar o substrato. Essa argamassa é constituída de cimento e areia média ou grossa.

- Emboço: camada intermediária, sua função principal é fazer o nivelamento do chapisco, deixando a superfície mais lisa para receber o reboco.

➢ Reboco: executada sobre o emboço tem a função de promover o acabamento do sistema através de uma textura mais lisa, executada com areia fina.

As argamassas também podem ser utilizadas para ligar elementos da construção. Essas são chamadas de argamassas de assentamento. Segundo Carasek (2010) e Recena (2012) suas funções são: distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos; vedar as juntas da alvenaria garantindo a estanqueidade da parede à penetração de água das chuvas, impermeabilizar as paredes e absorver as deformações naturais, como as de origem térmica e as de retração por secagem a que a alvenaria estiver sujeita.

3.2.1. Materiais constituintes nas argamassas

De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas são misturas homogêneas compostas por aglomerantes inorgânicos, agregados miúdos e água, podendo conter em sua composição aditivos com propriedades de aderência e endurecimento. De acordo com a referida norma, as argamassas podem ser dosadas na própria obra ou industrializadas.

3.2.1.1. Cimento

O cimento é um dos materiais mais importantes e utilizados na construção civil. Ele é considerado um aglomerante hidráulico, ou seja, que endurece na presença de água e, após o endurecimento, mesmo submetido à ação da água, permanece com suas características preservadas. Resultante de uma mistura homogênea de clínquer (produto originário da rocha calcária), gesso e adições de outras substâncias que modificam suas propriedades, o cimento, quando combinado a outros materiais forma pastas, argamassas e concretos (LOPES, 2017).

3.2.1.2. Cal

Segundo Lopes (2017), a cal é um produto resultante da calcinação de rochas calcárias e pode ser considerada um aglomerante aéreo, ou seja, que não resiste bem à umidade depois de endurecido. Por apresentar características de plasticidade e durabilidade, sua principal utilização é em argamassas e também em revestimentos

de muros e paredes. A cal confere às argamassas trabalhabilidade e capacidade de absorver deformações.

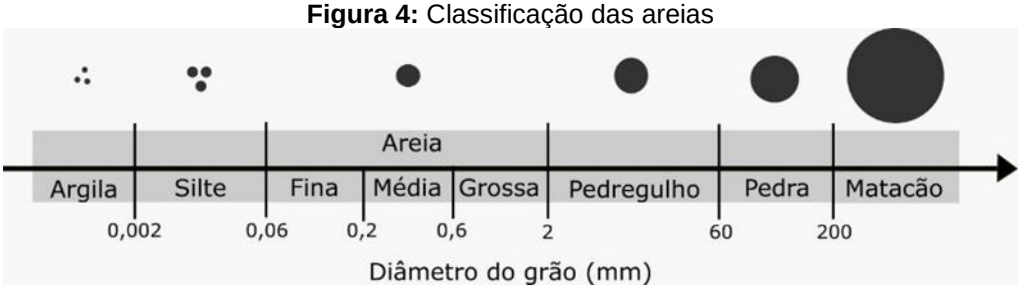
Existem dois tipos de cal, a virgem e a hidratada. A cal virgem é obtida pelo processo de decomposição térmica da rocha que é moída e aquecida até a queima (900°C), processo chamado de calcinação. Na produção da cal hidratada é acrescentada água a esse processo. Em obras, normalmente é utilizada a cal hidratada, pois a cal virgem necessita de adição de água para ser aplicada, o que diminui a agilidade e a segurança na produção (LOPES, 2017).

3.2.1.3. Areia

Os agregados são materiais inertes, sem forma e volume definidos, além disso, possuem dimensões e propriedades adequadas para diferentes usos em obras de engenharia. A maior parte dos agregados pode ser encontrada na natureza, como é o caso das areias, pedras britadas e dos seixos. No concreto e na argamassa os agregados possuem as funções de: minimizar a retração, diminuir o calor de hidratação e aumentar a resistência química e à abrasão (LOPES, 2017).

A areia é definida como agregado miúdo e pode ser obtida de forma natural ou artificial. A areia natural pode ser extraída de depósitos eólios, leitos de rios e cavas. A norma NBR 6502 (ABNT, 1995) classifica esse agregado pelo tamanho de seus grãos em areia fina, média e grossa, como apresentado na Figura 4. A granulometria do agregado tem influência nas proporções de aglomerantes e água da mistura.

Figura 4: Classificação das areias



Fonte: Modificado pelo autor.

Geralmente o agregado empregado em argamassas é a areia natural, constituída de quartzo. Alternativamente também são empregadas areias artificiais,

como as obtidas pela britagem de rochas, principalmente o calcário e o dolomito (CARASEK, 2010). Os agregados representam de 60% a 80% do consumo dos materiais da argamassa e também exercem grande influência em seu comportamento, tanto no estado fresco, quanto no desempenho final do revestimento.

Carasek et al. (2016) estudaram cinco areias, sendo uma areia natural e quatro de britagem oriundas de rochas de diferentes litologias (granito, dolomito, micaxisto e quartzito). As principais conclusões obtidas foram que a porosidade (vazios entre partículas e grãos de areia) e a massa unitária da areia são os parâmetros que melhor se correlacionam com a consistência e a densidade de massa das argamassas, o que é explicado pela alteração no volume das argamassas devido ao volume de vazios deixado pelos grãos das areias.

3.2.1.4. Água

A água tem como objetivo fornecer continuidade à mistura, permitindo a ocorrência das reações entre os diversos componentes da argamassa, sobretudo as do cimento. Embora ela seja o recurso diretamente utilizado para regular a consistência e a trabalhabilidade da argamassa, o teor de água adicionado deve ser pré-estabelecido (ABCP).

De acordo com Carasek (2010), á agua utilizada em argamassas não poderá conter sais solúveis nem matéria orgânica. Dessa forma deve-se empregar água potável da rede pública de abastecimento.

3.2.1.5. Aditivos

Diversos fatores influenciam o tempo de pega do cimento, entre eles a finura do cimento, o fator água/cimento da mistura e a granulometria dos agregados. Assim, podem ser utilizados vários tipos de aditivos que aceleram ou retardam o início da pega, sem que haja prejuízos para o material (LOPES, 2017).

Outras propriedades das argamassas também podem ser melhoradas, tanto no

estado fresco quanto no endurecido. Existem no mercado diversos tipos de aditivos. Esses, porém devem ser muito bem dosados e adicionados em pequenas quantidades. Alguns exemplos utilizados na construção são apresentados na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Aditivos utilizados em argamassas

Tipos de aditivos	
Redutores de água (plastificante)	São utilizados para melhorar a trabalhabilidade da argamassa sem alterar a quantidade de água.
Retentores de água	Reduzem a evaporação e a exsudação de água da argamassa fresca e conferem capacidade de retenção de água frente à sucção por bases absorventes.
Incorporadores de ar	Formam microbolhas de ar, estáveis, homogeneamente distribuídas na argamassa, aumentando a trabalhabilidade e atuando a favor da permeabilidade.
Retardadores de pega	Retardam a hidratação do cimento, proporcionando um tempo maior de utilização.
Aumentadores de aderência	Proporcionam a aderência química ao substrato.
Hidrofugantes	Reduzem a absorção de água da argamassa, mas não a tornam impermeável e permitem a passagem de vapor d'água.

Fonte: ABCP (2020).

3.2.2. Tipos de argamassas

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), as argamassas são definidas em diversos tipos, de acordo com seus usos e aplicações, a saber:

a) Argamassa para assentamento:

- Argamassa para assentamento em alvenaria de vedação: indicada para ligação de componentes de vedação no assentamento em alvenaria, com função de vedação.

- Argamassa para assentamento em alvenaria estrutural: indicada para a ligação de componentes de vedação no assentamento em alvenaria, com função estrutural.

- Argamassa para complementação da alvenaria (encunhamento): indicada para

fechamento de vedação, após a última fiada de componentes.

b) Argamassa para revestimento de paredes e tetos:

➢ Argamassa para revestimento interno: indicada para revestimento de ambientes internos da construção, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).

➢ Argamassa para revestimento externo: indicada para revestimento de fachadas, muros e outros elementos da construção em contato com o meio externo, caracterizando-se como camada de regularização (emboço ou camada única).

c) Argamassa de uso geral:

Indicada para assentamento de alvenaria sem função estrutural e também para revestimento de paredes e tetos internos e externos.

3.2.3. Classificação das argamassas

São encontrados na literatura diversos critérios de classificação das argamassas. Têm-se a classificação quanto à natureza do aglomerante, quanto à função no revestimento, quanto à forma de preparo, entre outros. Usualmente, na construção civil, as argamassas utilizadas são comumente compostas de areia natural lavada e os aglomerantes são em geral o cimento Portland e/ou a cal hidratada (FIORITO, 2010). Pode-se definir esse critério de classificação quanto ao tipo de aglomerante.

3.2.3.1. Argamassas à base de cal

Esse tipo de argamassa apresenta baixa resistência mecânica e endurecimento lento. Sendo a cal um aglomerante aéreo, ou seja, que não apresenta resistência à umidade em seu estado endurecido, essas argamassas devem ser limitadas a locais secos e bem arejados (RECENA, 2012).

Recena (2012) observa, porém, que essas argamassas possuem alta absorção de deformações, grande capacidade de retenção de água e baixa retração, o que ajuda a minimizar a ocorrência de fissuras, especialmente quando empregadas em revestimentos.

3.2.3.2. Argamassas de cimento e areia

Segundo Recena (2012), a depender da relação água/cimento, este tipo de argamassa pode apresentar elevada resistência à compressão e rigidez. O autor destaca que sendo o cimento um aglomerante hidráulico, essas argamassas resistem bem à umidade. Portanto são indicadas para fundações, revestimentos externos e construções em climas úmidos e chuvosos, além de edificações em contato direto e constante com a água.

3.2.3.3. Argamassas de cimento, cal e areia

O objetivo dessas argamassas, ditas mistas, é obter um material com características intermediárias as das argamassas de cimento e as de cal. O cimento é empregado com o intuito de aumentar a resistência à umidade e acelerar o tempo de pega da mistura, o que permite um acabamento das superfícies em um prazo menor (RECENA, 2012).

Segundo Fiorito (2010), as argamassas de cimento são mais resistentes, porém de mais difícil trabalhabilidade. Assim, adiciona-se cal para torná-las mais plásticas e facilitar o acabamento. Nas argamassas mistas, a cal, apesar de contribuir para a resistência mecânica, é empregada principalmente para conferir plasticidade e capacidade de retenção de água. Esse é o material mais utilizado no assentamento de elementos de alvenaria e em seu revestimento.

3.2.4. Propriedades requeridas das argamassas

Segundo Azevedo et al. (2018), existem diferentes propriedades que devem ser avaliadas quanto à eficiência e a qualidade da argamassa a ser utilizada. Esses estudos variam desde testes no estado fresco, como teor de ar incorporado e retenção

de água, a testes no estado endurecido, como resistência mecânica e absorção de água. De acordo com o referido autor a força de adesão da argamassa ao substrato é uma das mais importantes propriedades que devem ser analisadas, pois a interação da argamassa com o substrato garante a qualidade do revestimento final.

3.2.4.1. Propriedades requeridas no estado fresco

3.2.4.1.1. Aderência inicial

Recena (2012) confirma a importância dessa propriedade para as argamassas, seja na argamassa de assentamento com a finalidade de unir elementos em uma alvenaria, ou de revestimentos, diante de movimentações diferenciadas, choques térmicos, impactos e outras solicitações. A resistência de aderência inicial deve ser entendida como o resultado do comportamento de vários fatores, como: eficiência da aplicação, temperatura e velocidade do ar, umidade do ambiente, superfície do substrato, período de tempo após a aplicação, características dos materiais constituintes, entre outros.

Se uma argamassa apresentar-se muito seca, com baixa fluidez e com grande viscosidade, não haverá absorção de pasta, não ocorrendo aderência. Uma argamassa mal dosada, com excesso de água e ineficiente em aglomerante também não resultará em bons resultados, pois o substrato irá praticamente absorver somente a água (RECENA, 2012).

Baía e Sabattini (2000) definem a aderência inicial como a propriedade mecânica relacionada ao fenômeno que ocorre em superfícies porosas, pela entrada da argamassa nos poros, reentrâncias e saliências. Esse processo tem como resultado a ancoragem da argamassa na base, seguido do seu endurecimento progressivo. Esta propriedade está relacionada à aderência que a argamassa apresentará ao substrato quando endurecida. Os autores destacam a importância da superfície quanto à porosidade, a rugosidade e as condições de limpeza.

3.2.4.1.2. Trabalhabilidade

De acordo com Carasek (2010), esta propriedade determina a facilidade com que as argamassas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas e acabadas em uma condição homogênea. Uma argamassa é trabalhável quando permite ao aplicador executar bem o seu trabalho em termos de produtividade e custos.

Já Recena (2007) observa que a trabalhabilidade de uma argamassa deva estar diretamente ligada à tarefa a ser executada, ou seja, uma mesma argamassa ao ser utilizada em revestimento ou assentamento deverá apresentar trabalhabilidade diferente. Essa modificação da trabalhabilidade é alcançada pela variação da quantidade de água empregada na preparação da argamassa. Porém deve haver uma quantidade de aglomerante, suficiente para reter a água adicionada e assim garantir a estabilidade de volume e a coesão necessária para promover a aderência instantânea sem a ocorrência de segregação de seus constituintes.

O excesso de água em uma argamassa, se rompida à coesão, tornará a argamassa fluida, porém menos trabalhável, incapacitando-a para a função a que se destina. Do contrário, uma argamassa de grande coesão e, consequente, baixa fluidez, igualmente apresentará comprometimento em sua trabalhabilidade (RECENA, 2007).

3.2.4.1.3. Coesão

Essa propriedade está relacionada às forças de atração entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante. Dessa forma, a coesão é responsável por manter os constituintes da argamassa homogêneos sem haver segregação (CARASEK, 2010).

3.2.4.1.4. Plasticidade

Segundo Caresek (2010), a plasticidade é a característica da argamassa em conservar-se deformada depois de cessadas as tensões de deformação.

Uma plasticidade maior é obtida pelo aumento do volume da argamassa, ou seja, pelo aumento na quantidade de água empregada em sua produção até o limite de sua coesão. A maior plasticidade garante a aderência instantânea ao substrato, no momento da projeção da argamassa e permite um acabamento adequado aos revestimentos (RECENA, 2012).

Já no assentamento de elementos de alvenaria, a argamassa deverá apresentar uma plasticidade na qual seja possível a obtenção de uma junta de menor espessura, porém firme o suficiente para permitir a evolução da parede com velocidade e sem perda do prumo (RECENA, 2012).

3.2.4.1.5. Retração

Conforme Fiorito (2010) o endurecimento das argamassas é acompanhado por uma diminuição de volume, quer devido à evaporação da água, quer devido às reações de hidratação. Mesmo após a secagem notam-se variações dimensionais, esse fenômeno é chamado de retração.

Para as argamassas a retração deve ser observada cuidadosamente, buscando extrair do comportamento e evolução da mesma, em função da idade e condições ambientais, alguns procedimentos práticos aplicáveis em obras. É devido à retração, por exemplo, que se deve aguardar um tempo para a colocação de pisos sobre a argamassa do contrapiso ou que se deve aguardar para realizar o encunhamento das alvenarias de elevação (FIORITO, 2010).

3.2.4.1.6. Consistência

Consistência é a facilidade, ou não, da argamassa deformar-se sob a ação de cargas. Essa propriedade diz respeito à maior ou menor fluidez da argamassa e está associada à capacidade da mistura em resistir ao escoamento. Argamassas de consistência mais fluidas representam misturas com menores tensões de escoamento (CARESEK, 2010).

3.2.4.1.7. Retenção de água

Essa propriedade diz respeito à capacidade da mistura em reter a água contra a evaporação e contra a absorção de água da base. Assim essa propriedade é importante especialmente em substratos com alta sucção ou em condições climáticas desfavoráveis, como baixa umidade, ventos fortes e alta temperatura (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004; CARASEK, 2010).

Essa característica é importante, uma vez que possibilita a adequada hidratação do cimento e o endurecimento da argamassa de forma gradativa, garantindo assim ganho de resistência e o desempenho esperado no revestimento ou no assentamento (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004).

As autoras observam que o aumento da retenção de água na argamassa pode ser alcançado com o aumento da superfície específica dos constituintes, com adição de cal ou com aditivos que, por suas características, adsorvem a água ou impedem sua percolação através da massa sólida.

3.2.4.1.8. Massa específica e teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar retido na argamassa fresca e influencia diretamente na massa específica relativa, uma vez que essa considera os espaços vazios presentes no material. Durante a mistura, o ar incorporado atinge, no máximo, 3 a 4%, mas pode ser aumentado com o emprego de aditivos incorporadores de ar. A quantidade de ar incorporado altera diretamente outras propriedades da argamassa, como, por exemplo, a resistência à compressão e a trabalhabilidade.

3.2.4.1.9. Exsudação

Uma argamassa retém naturalmente a água usada no amassamento, molhando a superfície dos grãos de areia e do aglomerante, além de preencher os vazios. Porém, o excesso de água pode sair da mistura por exsudação (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004).

Essa propriedade diz respeito à tendência de separação da água da argamassa, de modo que a água suba e os agregados desçam devido à gravidade e mesmo sem nenhuma vibração ou choque. Argamassas de consistência fluida têm maior tendência à exsudação (CARSEK, 2010).

3.2.4.2. Propriedades requeridas no estado endurecido

3.2.4.2.1. Aderência

No estado endurecido, a aderência permite ao revestimento de argamassa absorver tensões normais ou tangenciais na superfície de interface com o substrato (CARASEK, 2010).

Para Carasek (2010), essa propriedade deriva da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa. Além disso, é observado que essa propriedade é influenciada pelas características dos materiais, do substrato (porosidade, absorção de água e rugosidade) e do preparo da argamassa.

3.2.4.2.2. Resistência mecânica

De acordo com Nakakura e Cincotto (2004) a resistência mecânica das argamassas está relacionada à sua capacidade de resistir aos esforços de tração, de compressão ou de cisalhamento. Sendo que a resistência à compressão é a propriedade mais comumente determinada, tanto para as argamassas de assentamento quanto para as argamassas de revestimento.

Porém, destacam as autoras que a resistência à compressão está mais associada à argamassa de assentamento pela forma como a qual será solicitada no sistema de vedação. Já para as argamassas de revestimento, a solicitação maior será de resistência à tração ou ao cisalhamento, pois a argamassa deverá suportar os esforços de tensão no sentido de evitar a fissuração do revestimento devido a movimentações do substrato e variações térmicas.

Baía e Sabbatini (2000) observam que a resistência mecânica varia com o consumo e a natureza dos agregados e aglomerantes utilizados, e também com a técnica de execução. Além disso, afirmam que quanto menor a relação água/cimento, maior a resistência.

3.2.4.2.3. Módulo de elasticidade

As argamassas são usadas para revestir ou unir elementos fabricados com materiais de diferentes naturezas, com variados coeficientes de dilatação e, consequentemente, com diferentes comportamentos em relação à absorção de água e à deformação causada pela ação térmica.

Dessa maneira, uma mesma argamassa poderá ser solicitada de forma diferenciada. No entanto ela deverá absorver com eficiência as deformações advindas da resposta dada pelos diferentes materiais às solicitações oriundas das constantes variações térmicas e/ou higrométricas (RECENA, 2012).

A capacidade de um material em absorver esforços por deformação está relacionada ao seu módulo de elasticidade. Sendo que o valor do módulo de elasticidade é obtido a partir da relação entre tensão e deformação caracteristica de um material. Quanto menor for o módulo de deformação, maior será a capacidade de absorver deformações.

3.2.4.2.4. Durabilidade

A durabilidade de uma argamassa corresponde à capacidade em manter sua estabilidade química e física ao longo do tempo em condições normais de exposição a um determinado ambiente, sem deixar de cumprir as funções para as quais foi projetada, desde que submetida aos esforços que foram considerados em seu projeto (RECENA, 2012).

O referido autor destaca que condições especiais de agressividade de um determinado meio exigirão o emprego de argamassas especiais. E em condições normais, não havendo exigências especiais de resistência química ou física, a durabilidade de uma argamassa de assentamento e principalmente de revestimento estará fortemente relacionada à presença de umidade e de sais solúveis passíveis de serem lixiviados. Sendo que quanto maior a presença de umidade, tanto maior deverá ser a participação de aglomerantes hidráulicos na formulação da argamassa.

3.2.4.2.5. Permeabilidade

Conforme Nakakura e Cincotto (2004), a permeabilidade é a propriedade relacionada à passagem da água, tanto no estado líquido como no estado de vapor, através da camada da argamassa endurecida. Ela é influenciada pelos poros capilares de dimensões maiores que 50 nm. As autoras afirmam que a permeabilidade depende da hidratação dos aglomerantes e do consequente preenchimento dos poros por eles ao longo do tempo. Assim, com o avanço da idade da argamassa, maior será o grau de endurecimento, e menor a sua permeabilidade.

Se a porosidade for elevada e os poros estiverem interligados, eles contribuirão de fato para o deslocamento de fluidos, de modo que a permeabilidade poderá ser alta. Porém, se os poros forem descontínuos a permeabilidade será baixa, mesmo com a porosidade alta. O ensaio de capilaridade relaciona-se à permeabilidade enquanto o ensaio de absorção de água está relacionado à porosidade, ou seja, ao volume de vazios (NAKAKURA e CINCOTTO, 2004).

3.3. Reutilização do chamote de porcelanato em argamassas

Segundo Lima et al. (2016), para estudar o desenvolvimento de tecnologias e processos que viabilizem a aplicação de um determinado resíduo, esse deve apresentar: grandes volumes gerados, baixo custo para aquisição, propriedades que comprovem o bom desempenho para a aplicação desejada e problemas ambientais quanto a sua disposição.

A produção de porcelanato gera diversos passivos ambientais em suas etapas de fabricação. Alguns autores analisaram a utilização de seu chamote como agregado graúdo em concreto e como elemento pozolânico. Destacam-se também os estudos do resíduo do polimento do porcelanato em argamassas e concretos como aditivo ou material cimentício complementar. Algumas pesquisas estudam a substituição da areia nas argamassas por uma composição de vários resíduos cerâmicos combinados, entre eles o do porcelanato. Também são encontrados alguns estudos sobre a utilização de chamotes de porcelanato para a confecção de pisos.

Especificamente com relação ao reaproveitamento do chamote como substitutos dos agregados miúdos em argamassas, alguns trabalhos demonstraram resultados significativos. Paixão (2011) verificou o comportamento das argamassas de assentamento e de revestimento com a substituição dos agregados miúdos por resíduos cerâmicos de porcelanatos e de azulejos. O autor substituiu 100% do agregado miúdo pelos resíduos num traço em massa de 1:3 (cimento e areia). Foi observado que as argamassas com os chamotes cerâmicos, tanto de porcelanato quanto de azulejo, necessitaram de uma maior quantidade de água para manter o índice de consistência, devido ao maior teor de finos nos resíduos. A argamassa confeccionada com 100% de resíduo de porcelanato, por exemplo, consumiu 25% a mais de água que a argamassa de referência. Porém, mesmo com o acréscimo da relação água/cimento, a argamassa com chamote de porcelanato apresentou um ganho de 51% na resistência à tração na flexão aos 63 dias e 42% na resistência à compressão no mesmo período.

No estudo desenvolvido por Lima et al. (2016) foi avaliada a substituição de parte do agregado miúdo natural por resíduos de vidro e chamote de porcelanato nas proporções de 25% e 50% em massa da areia. Os autores utilizaram os traços de 1:2:6 e de 1:2:9 (cimento, cal e areia) em volume e mantiveram fixa a relação água/cimento. Foi concluído que as argamassas com a incorporação dos resíduos apresentaram maior fluidez e trabalhabilidade, além de maior resistência mecânica. Quanto às argamassas, com substituição por chamote de porcelanato, a Tabela 5 mostra as resistências aos 28 dias alcançadas:

Tabela 5: Resistências ao se substituir agregado natural por resíduos de porcelanatos

Traço	Tração na flexão (Mpa)	Compressão axial (Mpa)
Referência 1:2:6	6.80	4,20
25% de substituição	11,95	4,80
50% de substituição	9,38	8,60
Referência 1:2:9	6,09	3,70
25% de substituição	13,36	6,50
50% de substituição	19,22	8,70

Fonte: Lima et al. (2016)

Observa-se, pela tabela acima, que o maior aumento de resistência à tração na flexão e também de resistência à compressão ocorreu para a argamassa de traço 1:2:9 quando foi substituído 50% da massa da areia por chamote de porcelanato.

Matielo (2019) avaliou o desempenho de argamassas de revestimento confeccionadas com a inserção de resíduos de porcelanatos em substituição ao agregado miúdo. Para isso o autor utilizou como referência um traço em volume de 1:1:6 (cimento, cal e areia) e adotou novos traços substituindo a areia por resíduo de porcelanato nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%.

Após os ensaios concluiu-se que com a substituição da areia, foi necessário o acréscimo da quantidade de água para manter o índice de consistência fixo. A substituição gradativa da areia pelo resíduo proporcionou às argamassas uma maior retenção de água, melhorando o processo de cura e, consequentemente, resultando em uma menor fissuração.

Já nos ensaios no estado endurecido o autor concluiu que houve ascensão no desempenho físico e mecânico. Para a resistência à tração o traço com utilização de 25% de agregado reciclado foi o que obteve maior resistência aos 28 dias de cura, aumentando 40% em relação ao traço de referência. No ensaio de resistência à compressão os traços com 25% e 100% de substituição aumentaram a resistência em 30% no mesmo período. Por fim o autor observou também um aumento na resistência de aderência à tração em 92% para a argamassa com 100% de resíduo.

Paixão et al. (2011) analisaram a viabilidade de utilização de chamotes cerâmicos (piso, porcelanato e azulejo) para confecção de argamassas cimentícias. Os três chamotes investigados substituíram em 100% a areia de rio, sendo utilizado o mesmo traço, em massa, na proporção de 1:3 (cimento e areia). Nesse estudo foi adicionado um superplastificante a fim de garantir que o espalhamento fosse mantido, uma vez que os resíduos apresentaram maior módulo de finura e maior taxa de absorção que a areia. Os resultados indicaram que aos 63 dias o maior ganho de resistência à tração foi para a argamassa produzida com chamote de porcelanato, essa teve um ganho de 57%. Quanto à resistência à compressão, as argamassas com utilização de resíduos de porcelanato tiveram um aumento de quase 80% em seus resultados. Por fim os autores observaram uma redução de 50,6% na taxa de absorção de água e de 7,9% na massa específica real nas argamassas com chamote de porcelanato.

Sartor et al. (2021) verificaram as influências da substituição parcial da areia por resíduo de retífica cerâmica (RRC) de monoporosa e de porcelanato, separadamente, na confecção de argamassa colante. Foram estudados sete formulações de traço, sendo um padrão e três de diferentes composições em percentuais de substituição de 10, 15 e 20% para cada tipo de resíduo, RM – Resíduo Monoporosa e RP – Resíduo Porcelanto.

Os autores observaram que com o aumento do percentual de substituição do agregado, menos fluída a argamassa se torna. Por ter uma fração de finos maior, a área superficial do sistema com RRC aumenta, e assim exige uma maior quantidade de água para a argamassa. Observou-se, também, o aumento na absorção por capilaridade para as argamassas com 15% de RM e RP, indicando o aumento na porosidade da argamassa com a adição de finos. No entanto, com os percentuais de 20% observou-se a redução da permeabilidade, podendo estar associado a poros isolados na argamassa. Quanto a resistência de aderência à tração, foi observado que com maior quantidade de resíduo incluso, menor foi a capacidade de aderência da argamassa, tanto para RM quanto para RP. No entanto, os autores adotaram uma linha de tendência polinomial e estimaram um percentual de 6% de resíduo a ser substituído na argamassa, para que a mesma atendesse aos quesitos normativos de aderência.

Percebe-se que a substituição das areias por resíduos de materiais cerâmicos tem resultados satisfatórios na produção de argamassas. Dessa maneira, este trabalho pretende contribuir com soluções que permitam a diminuição dos impactos ambientais gerados pelos resíduos e pela extração de materiais naturais cada vez mais escassos. Além de expor resultados importantes derivados das incorporações do chamote de porcelanato em argamassas utilizadas na construção civil.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Etapas do desenvolvimento do trabalho

Os experimentos iniciaram pela caracterização da matéria-prima, sendo que a primeira etapa constou da preparação desses materiais. Para isso, as placas de porcelanato foram britadas e, em seguida, moídas empregando um moinho de disco. Já a areia adquirida foi secada em estufa a 100ºC. O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a NBR-17054 (ABNT, 2022) em todos os agregados para que se conhecesse à distribuição dos tamanhos de seus grãos.

Posteriormente foram propostas três formulações com diferentes teores de resíduo de porcelanato: agregado miúdo de referência (com 0% de substituição), composto 50/50 (com 50% de substituição) e resíduo de porcelanato (com 100% de substituição). Na sequência foram confeccionados corpos de prova para a realização dos ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão nas respectivas idades de cura: 7, 14 e 28 dias. Foram moldados 7 corpos de prova, para cada formulação proposta, em cada idade de cura, totalizando em 63 amostras.

Por fim, foi realizada uma comparação estatítisca entre os resultados obtidos, para se verificar a existência de diferenças significativas nas propriedades das argamassas ao se substituir a areia por resíduos de porcelanato.

O Fluxograma 2 apresenta as etapas de trabalho utilizadas na metodologia experimental visando uma melhor explicação dos procedimentos realizados.

Fluxograma 2: Metodologia da pesquisa



Fonte: Próprio autor

4.2. Materiais utilizados

Os materiais empregados neste trabalho foram: chamote de porcelanato Portobello, areia natural (agregado de referência) e cimento Portland de alta resistência inicial CP-V (fabricante Campeão Nacional).

Nesta pesquisa foi utilizado Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V), dado que este material não possui adições significativas. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) este cimento possui em sua constituição teores entre 90 e 100% de clínquer e sulfato de cálcio, com a adição de até 10% de material carbonático na produção do aglomerante. O cimento utilizado foi o Cimento Campeão, alta perfomance.

As composições foram preparadas com a mistura de água, cimento e agregado, no traço 1:3 em massa, sendo a relação de água/cimento igual a 0,75. O agregado miúdo utilizado como referência foi a areia média natural quartzosa, adquirida em depósito de materiais de construção. Em substituição à areia, foi investigado o uso do chamote, preparado em laboratório, como agregado miúdo na confecção de argamassas de assentamento. A Tabela 6 mostra a proporção dos materiais

utilizados, para cada grupo de corpos de prova.

Tabela 6: Proporção de materiais utilizados

Materiais	Descrição	Quantidade (g)
Aglomerante	Cimento Portland de alta resistência inicial -CPV	812
Agregado	Chamote de porcelanato	2436
Água	Água da concessionária	609

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Tabela 6 (p.46) o aglomerante corresponde a 21% da composição do traço, o agregado a 63% e a água a 16%.

4.3. Métodos

4.3.1. Preparação das matérias-primas

As peças de porcelanato foram previamente marteladas e em seguida foram beneficiadas em um moinho de disco modelo MD-200, como mostrado na Figura 5. A etapa de moagem foi realizada no Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa, localizado no Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Figura 5: Moinho de Disco MD-200.



Fonte: Próprio Autor

Após a moagem, os grãos do chamote de porcelanato e da areia de referência foram secos em estufa a 100ºC, durante 24h. Estes materiais estão representados nas Figuras 6 e 7. Na sequência, três amostras de 500g foram separadas, sendo a primeira delas constituída somente de chamote, a segunda somente de areia e a terceira de chamote e areia na mesma proporção. Estas amostras foram retiradas de

um montante de 2kg, tendo sido previamente homogeneizadas e quarteadas.

Figura 6: Amostra da areia de referência



Fonte: Próprio Autor

Figura 7: Amostra do chamote.



Fonte: Próprio Autor

As amostras foram então ensaiadas granulometricamente de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022). O ensaio foi realizado duas vezes, como prevê a norma. As peneiras selecionadas fizeram parte da série normal, estabelecidas na Tabela 7.

Tabela 7: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária

Série Normal	Série Intermediária
4,75mm	-
2,36mm	-
1,18mm	-
600µm	-
300µm	-
150µm	-

Fonte: NBR 17054 (ABNT, 2022).

Os equipamentos necessários para a realização do ensaio são: balança (com

resolução de 0,1% da massa da amostra do ensaio); estufa (capaz de manter a temperatura no intervalo de 100 ± 5ºC); peneiras; agitador mecânico de peneiras; bandejas; escova ou pincel e fundo avulso da peneira. O ensaio foi realizado no Laboratório de Solos do Insituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus Santa Luzia.

Para a realização do ensaio, em primeiro lugar, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 100ºC, após esfriar em temperatura ambiente foram determinadas as suas massas (m_1 e m_2). Após, as peneiras foram empilhadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo e com o fundo de peneiras para o conjunto.

Os cálculos necessários para a conclusão do ensaio são as porcentagens médias, retida e acumulada, em cada peneira, com aproximação de 1% e o módulo de finura, com aproximação de 0,01.

O ensaio de granulometria, Figura 8, foi importante para caracterizar e limitar o tamanho máximo de grão, para ambos os agregados.

Figura 8: Ensaio de Granulometria



Fonte: Próprio Autor

No presente trabalho, optou-se por utilizar todo o resíduo proveniente da moagem do

chamote de porcelanato, em lugar de selecionar o tamanho de grão similar ao da areia de referênca. Dessa maneira cumpre-se o objetivo do reúso completo do material que seria descartado na natureza.

4.3.2. Preparo das argamassas

As argamassas analisadas nesse trabalho foram preparadas no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção do IFMG – Campus Santa Luzia. Essas argamassas foram formuladas a partir da substituição do agregado natural miúdo (areia) por chamote de porcelanato nas proporções demonstradas na Tabela 8. A relação água/cimento adotada foi de 0,75. Nesta relação todas as argamassas ficaram coesas.

Tabela 8: Composições das argamassas

	Areia	**Chamote de Porcelanato**
Argamassa de Referência (REF 0%)	100%	0%
Argamassa 1 (ARPOR 50%)	50%	50%
Argamassa 2 (POR 100%)	0%	100%
Relação Água/Cimento: 0,75		

Fonte: Próprio Autor

As argamassas foram preparadas manualmente, de maneira a possibilitar a produção de todos os corpos de prova, para uma mesma idade de cura, de cada formulação, em uma única etapa.

Para a elaboração das argamassas, foi fixado o traço de 1:3 em massa (cimento:agregado miúdo). Inicialmente foi adotada a relação a/c de 0,48, porém observou-se que, nessa relação, as argamassas com adição de chamote não alcançavam uma trabalhabilidade aceitável, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9: Argamassa com 100% de resíduo de porcelanato na relação a/c: 0,48



Fonte: Próprio Autor

Dessa forma foi-se adicionando, gradualmente, água a composição da argamassa até se atingir uma trabalhabilidade conveniente. Isso foi possibilitado ao se alcançar uma relação a/c de 0,75, como mostrado na Figura 10. A necessidade de maior quantidade de água deve-se ao elevado teor de finos presentes no chamote de porcelanato em comparação a areia natural.

Figura 10: Argamassa com 100% de resíduo de porcelanato na relação a/c: 0,75



Fonte: Próprio Autor

4.3.3. Moldagem e cura dos corpos de prova

A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos de prova cilíndricos, de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, foi conduzida de acordo com a NBR 7215 (ABNT,1996). A moldagem foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção do IFMG – Campus Santa Luzia, conforme as recomendações da norma.

A introdução das argamassas nas formas foi realizada com o auxílio de espátula, em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, sendo homogeneamente distribuídos. Após a compactação, os corpos de prova foram rasados e depositados no laboratório para aguardar a desforma. Esse procedimento é ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Próprio Autor

Nas primeiras 24 horas de cura, os corpos de prova foram mantidos nas formas, tendo sido desmoldados após este período. Após o desmolde, ilustrado na Figura 12, essas amostras foram identificadas e imersas, separadas entre si, em um tanque de água (não corrente) saturada de cal, permanecendo nessas condições até o momento do ensaio.

Figura 12: Desmoldagem dos corpos de prova



Fonte: Próprio Autor

Foram confeccionados 63 corpos de prova, em lotes de 7 amostras, sendo 4 para os ensaios de compressão e 3 para os de caracterização física das argamassas.

4.3.4. Ensaios de Caracterização das Argamassas

No presente estudo foram determinadas como variáveis de análises a resistência à compressão, a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica. A resistência à compressão foi selecionada por ser um parâmetro adequado para se avaliar a qualidade das argamassas de assentamento. Os ensaios foram realizados aos 7, 14 e 28 dias de cura, com o objetivo de se verificar a evolução da resistência entre as argamassas confeccionadas.

Quanto aos demais parâmetros, esses foram definidos com o objetivo de auxiliar na avaliação das composições produzidas, uma vez que servem como indicativos da durabilidade das argamassas.

4.3.4.1. Resistência à Compressão

Foram confeccionados 36 corpos de prova cilíndricos, sendo 12 para a argamassa de referência (REF 0%), 12 para a argamassa 1 (ARPOR 50%) e 12 para a argamassa 2 (POR 100%). Foram rompidos 4 corpos de prova, de cada composição, para cada idade de cura. As amostras foram curadas e testadas de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT,1996) como mostra a Figura 13.

Figura 13: Ensaio de compressão



Fonte: Próprio Autor

A máquina utilizada para o ensaio foi o equipamento universal de ensaios Contenco I-3058 com taxa de carregamento de 4,9 MPa/s. Esses procedimentos foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção do IFMG – Campus Santa Luzia.

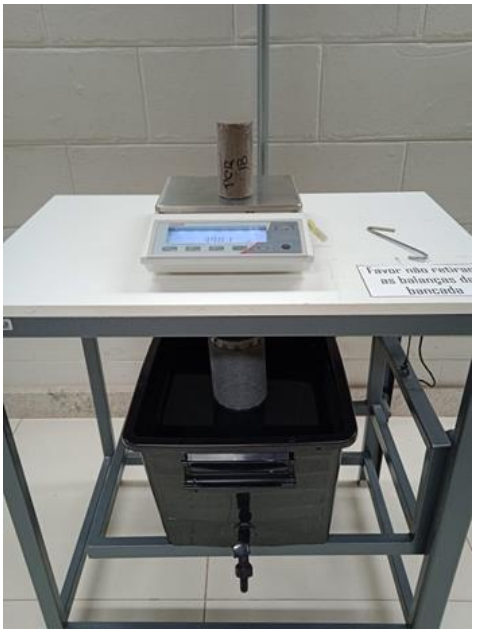
4.3.4.2. Absorção de água, índice de vazios e massa específica

De acordo com a NBR-9778, a absorção de água por imersão é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Já o índice de vazios corresponde à relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Por fim, a massa específica da amostra é a relação entre a massa seca do material e o volume total, incluindo todos os poros permeáveis e impermeáveis.

Para os ensaios de caracterização física, foram confeccionados 27 corpos de prova cilíndricos, sendo 9 para a argamassa de referência (REF 0%), 9 para a argamassa 1 (ARPOR 50%) e 9 para a argamassa 2 (POR 100%). Foram ensaiados 3 corpos de prova, de cada composição, para cada idade de cura. As amostras foram analisadas de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2009).

Para a realização das análises, foram necessários os seguintes equipamentos: balança hidrostática; estufa capaz de manter a temperatura entre 95 a 105ºC; recipientes adequados para imersão dos corpos de prova e tanque de água. Nos ensaios realizados não foi utilizado o aquecimento da água, sendo todas as medidas conduzidas com a água a temperatura ambiente. Os procedimentos, representados na Figura 14, foram realizados no Laboratório de Solos do IFMG – Campus Santa Luzia.

Figura 14: Pesagem Hidrostática dos Corpos de Prova



Fonte: Próprio Autor

O ensaio de massa específica inicia-se com a pesagem da amostra e submersão na água à temperatura ambiente por um período de (24±4) h. Após, retira-se a amostra da água e envolve-a em pano absorvente até que toda a água visível seja eliminada, ainda que a superfície da mesma se apresente úmida. Imediatamente após ser enxugada, pesa-se a amostra com precisão de 1g (m_i, massa na amostra saturada).

Logo após, coloca-se a amostra no recipiente, para pesá-la submersa em água mantida a (23±2) ºC com precisão de 1g (m_i, massa da amostra saturada e imersa em água).

Para o cálculo da massa da amostra seca é necessário secar a amostra a 100ºC até a massa ficar constante, deixar esfriar até a temperatura ambiente durante 1h a 3h ou até que a amostra esteja a uma temperatura que permita a sua manipulação (aproximadamente 50ºC) e pesar com precisão de 1g (m_s, massa da amostra seca em estufa).

Os cálculos utilizados para a elaboração da tabela de resultados, retirados da NBR 9778 (ABNT, 2009) foram os referentes à massa específica, absorção de água e índice de vazios.

Para o cálculo da massa específica da amostra seca utiliza-se a expressão:

$$\rho_s = \frac{m}{m_{sat} - m_i}$$

Onde:

ρ_s é a massa específica da amostra seca, em g/cm³;
m_s é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;
m_{sat} é a massa da amostra em água após imersão, em gramas;
m_i é a massa da amostra saturada e imersa em água, em gramas.

A equação para o cálculo de absorção de água é feita a partir da fórmula seguinte:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} X\ 100$$

Onde:

A é a absorção de água, em porcentagem;
m_{sat} é a massa da amostra em água após imersão, em gramas;
m_s é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

E, por fim, a equação para o cálculo de índice de vazios é a seguinte:

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} X\ 100$$

Onde:

Iv é o índice de vazio;
m_{sat} é a massa da amostra em água após imersão, em gramas;
m_s é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;
m_i é a massa da amostra saturada e imersa em água.

4.3.5. Análise Estatística

Para avaliar os dados obtidos pelo programa experimental, empregou-se a análise de variância (ANOVA), por meio do aplicativo computacional InfoStat, a fim de verificar se existe diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Em seguida foi realizado o teste de Tukey para comparação das médias, servindo de complementação da ANOVA.

Segundo Devore (2006), a análise da variância ou ANOVA é utilizada para aceitar ou rejeitar as hipóteses analisadas em um experimento, cujo objetivo é verificar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que realmente produzem efeitos significativos nas respostas do experimento.

De acordo com o autor, o efeito de um determinado fator, ou da interação entre os fatores, sobre a variável analisada é estabelecido pela comparação entre os valores calculados experimentalmente e os tabelados de uma função de distribuição de probabilidade. Os valores tabelados são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados pode ser analisada através do p-valor, conhecida como probabilidade de significância. Ao se adotar um nível de significância nas análises de 5%, 10% ou 20%, fica estabelecido que, se o p-valor experimental for menor que o adotado, o determinado fator ou a interação dos fatores exerce influência significativa sobre a variável resposta analisada.

Apesar da ANOVA indicar a existência de uma diferença significativa entre os grupos analisados, o método não especifica entre quais grupos ocorre essa diferença. Devido a este fato, se fez necessário a comparação das médias por meio do teste de Tukey, com um nível de confiabilidade de 95% (PCZIECZEK, 2017).

O teste de Tukey é um teste de comparação múltipla, entre todos os pares, que deve ser realizado quando existe diferença significativa entre as médias dos resultados. Pelas comparações do teste de Tukey, os valores que não compartilham a mesma letra no agrupamento são significativamente diferentes entre si.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão explicitados em três seções. Na primeira serão apresentados os dados de caracterização dos agregados, na segunda, a caracterização física das argamassas formuladas e na terceira, seus comportamentos mecânicos.

5.1. Curvas granulométricas dos agregados

Os agregados apresentaram composições granulométricas conforme exibidas nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 9: Composição granulométrica do agregado miúdo de referência (areia)

Abertura da Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Material Passante (%)
6,3	0	0	100,00
4,75	0,10	0,10	99,90
2,36	1,44	1,54	98,46
1,18	21,47	23,01	76,99
0,6	40,42	63,43	36,57
0,3	20,81	84,23	15,77
0,15	8,06	92,30	7,70
Fundo	7,70	100,00	0,00
Dimensão Máxima (mm): 2,36			
Módulo de Finura: 2,67			

Fonte: Próprio autor

Tabela 10: Composição granulométrica do composto areia/resíduo (50/50%)

Abertura da Peneira (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Material Passante (%)
6,3	0,00	0,00	100,00
4,75	0,00	0,00	100,00
2,36	1,02	1,02	98,98
1,18	25,37	26,39	73,61
0,6	27,18	53,57	46,43
0,3	20,28	73,85	26,15
0,15	13,38	87,24	12,76
Fundo	12,76	100,00	0,00
Dimensão Máxima (mm): 2,36			
Módulo de Finura: 2,42			

Fonte: Próprio autor

Tabela 11. Composição granulométrica do resíduo de porcelanato

Abertura da	Média Retida	Média Retida	Material Passante

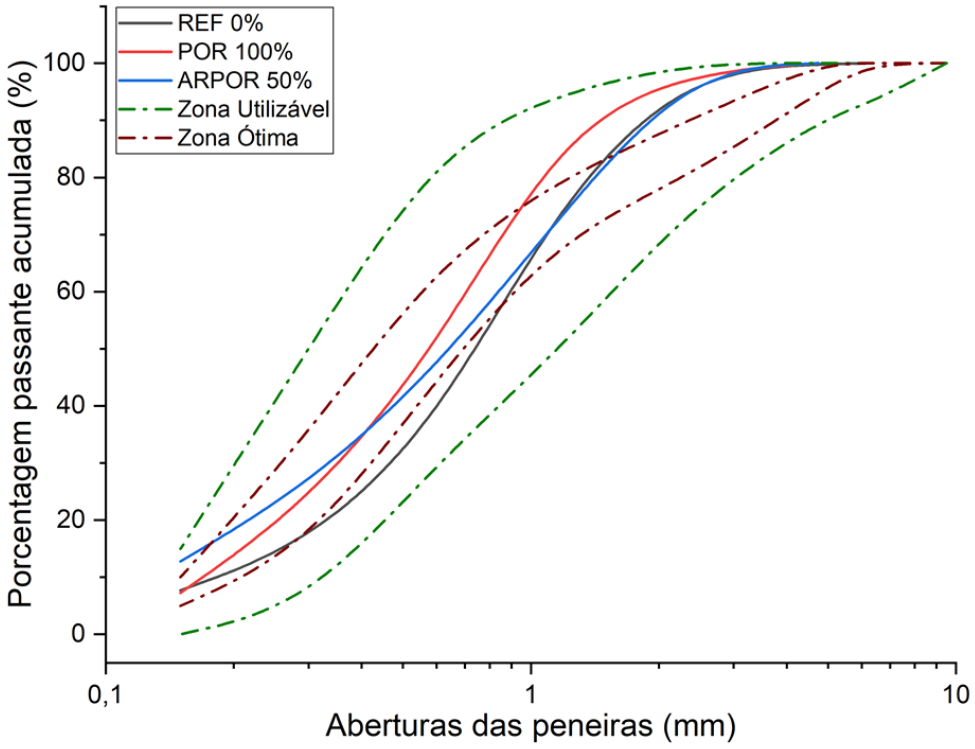
Peneira (mm)	(%)	Acumulada (%)	(%)
6,3	0,00	0,00	100,00
4,75	0,00	0,00	100,00
2,36	1,57	1,57	98,43
1,18	9,70	11,27	88,73
0,6	38,87	50,14	49,86
0,3	26,86	77,00	23,00
0,15	15,74	92,74	7,26
Fundo	7,26	100,00	0,00
Dimensão Máxima (mm): 2,36			
Módulo de Finura: 2,33			

Fonte: Próprio autor

O diâmetro máximo corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Seu valor é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado. Já o módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Quanto menor o módulo de finura, mais fino é o agregado. Observa-se portanto que o resíduo de porcelanato apresentou uma granulometria menor que a dos demais materiais. Dessa forma espera-se uma quantidade maior de água para hidratar esse agregado, devido a sua maior superfície de contato, e assim atender a trabalhabilidade da argamassa correspondente.

A Figura 15 apresenta as curvas granulométricas dos agregados analisados, bem como os limites das zonas ótima e utilizável propostos pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

Figura 15: Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Próprio Autor

De acordo com os dados de caracterização dos agregados, percebe-se que as três composições encontram-se dentro da zona utilizável (módulo de finura variando de 1,55 a 3,5), com considerável porcentagem dentro da zona ótima (módulo de finura variando de 2,2 a 2,9). Dessa forma esses materiais atendem a norma referenciada, podendo ser utilizados como agregados miúdos na construção civil.

5.2. Desempenho físico

5.2.1. Absorção de água, índice de vazios e massa específica

De forma a verificar se a substituição da areia natural por chamote de porcelanato provocaria alteração na taxa de absorção de água nas argamassas, corpos de prova foram ensaiados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009). A Tabela 12 apresenta os resultados de médias, desvio padrão e coeficiente de variação das argamassas estudadas.

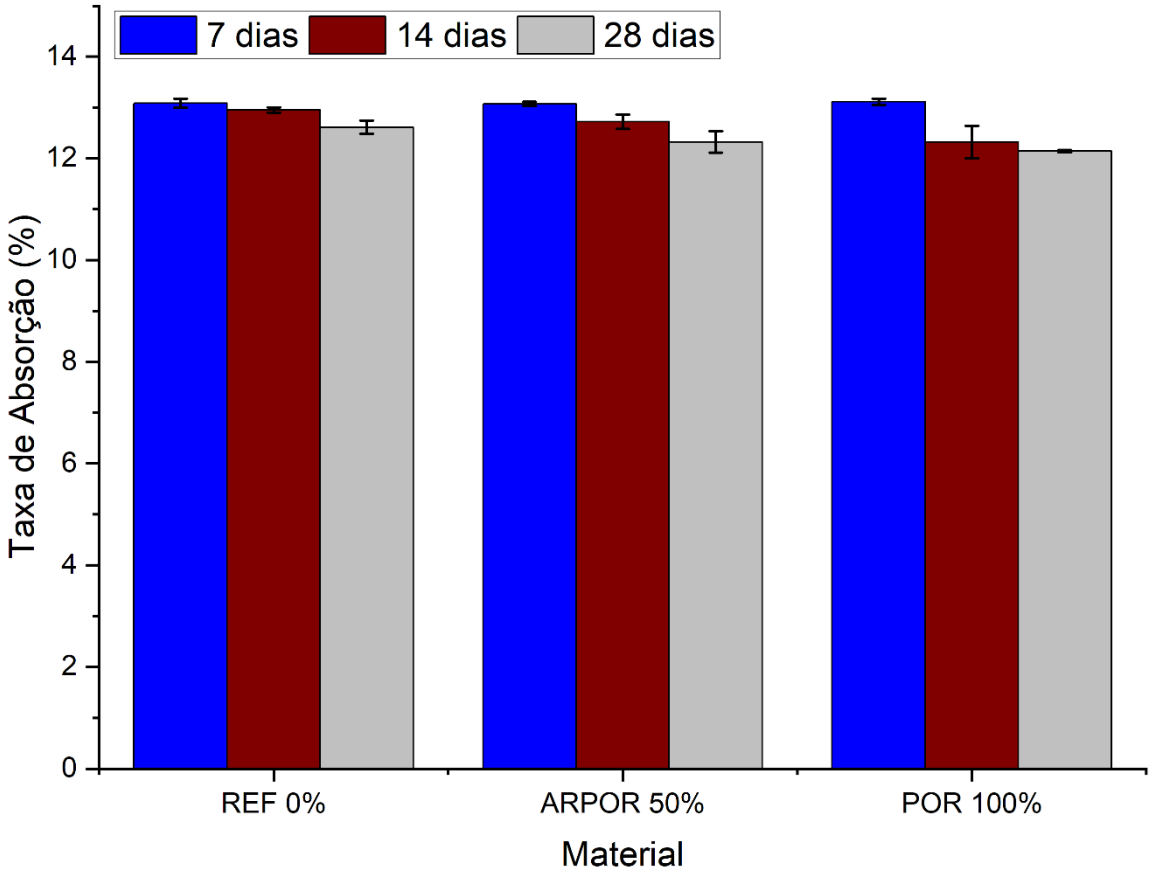
Tabela 12: Resultado da variação da taxa de absorção (%) nas argamassas, n=3

Traço	7 dias			14 dias			28 dias		
	Média (%)	*Desvio Padrão (%)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (%)*	*Desvio Padrão (%)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (%)*	*Desvio Padrão (%)*	*Coef. Variação (%)*
REF 0%	13,08	0,09	0,71	12,95	0,05	0,39	12,61	0,13	1,00
ARPOR 50%	13,07	0,04	0,29	12,72	0,14	1,08	12,32	0,21	1,69
POR 100%	13,11	0,06	0,46	12,32	0,32	2,57	12,14	0,02	0,14

Fonte: Próprio autor

A Figura 16 traz a comparação entre os dados de absorção de cada traço, em cada uma das idades.

Figura 16: Taxa de absorção das argamassas.



Fonte: Próprio Autor

Pelos resultados apresentados, pode-se dizer que de maneira geral, quanto maior for a idade da argamassa, menor é o teor de água absorvido. Podemos perceber também que, aos 28 dias, o traço com menor absorção de água foi aquele em que ocorreu a substituição de todo o agregado miúdo natural pelo chamote.

A Tabela 13 apresenta os resultados das análises estatísticas, para a absorção de água, nas respectivas idades de cura. Essa análise foi necessária para se verificar se os valores obtidos são de fato provenientes dos tratamentos realizados na variável de interesse ou devido a fatores externos que não se tinha controle durante a realização dos ensaios.

Tabela 13: ANOVA/Tukey (distribuição normal) - Absorção de água nas argamassas, n=3

Traço	7 dias		14 dias		28 dias	
	Valor-p = 0,7071		Valor-p = 0,0226		Valor-p = 0,0184	
	A (%)	Grupo	A (%)	Grupo	A (%)	Grupo
REF 0%	13,08	A	12,95	B	12,61	B
ARPOR 50%	13,07	A	12,72	A/B	12,32	A/B
POR 100%	13,11	A	12,32	A	12,14	A

Valor-p: probabilidade de significância, se menor que 0,05 existe diferença significativa entre os traços. Agrupamento: Traços que não compartilham a mesma letra são diferentes entre si.
Fonte: Próprio Autor

Pode-se observar que aos 14 dias a análise de variância (ANOVA) indicou a existência de pelo menos uma diferença significativa entre os traços, uma vez que o Valor-p experimental (0,0226) foi menor que o Valor-p teórico de 5% (0,05). O teste de Tukey indicou que os traços de referência (REF 0%) e o traço no qual houve a substituição total da areia pelo chamote (POR 100%) foram os que diferiram entre si, já que essas amostras pertencem a agrupamentos diferentes. Essa discordância ficou mais acentuada aos 28 dias, pois o Valor-p foi reduzido para 0,0184. Essa análise comprova que a utilização do chamote de porcelanato contribui para a redução da absorção de água pela argamassa, no estado endurecido.

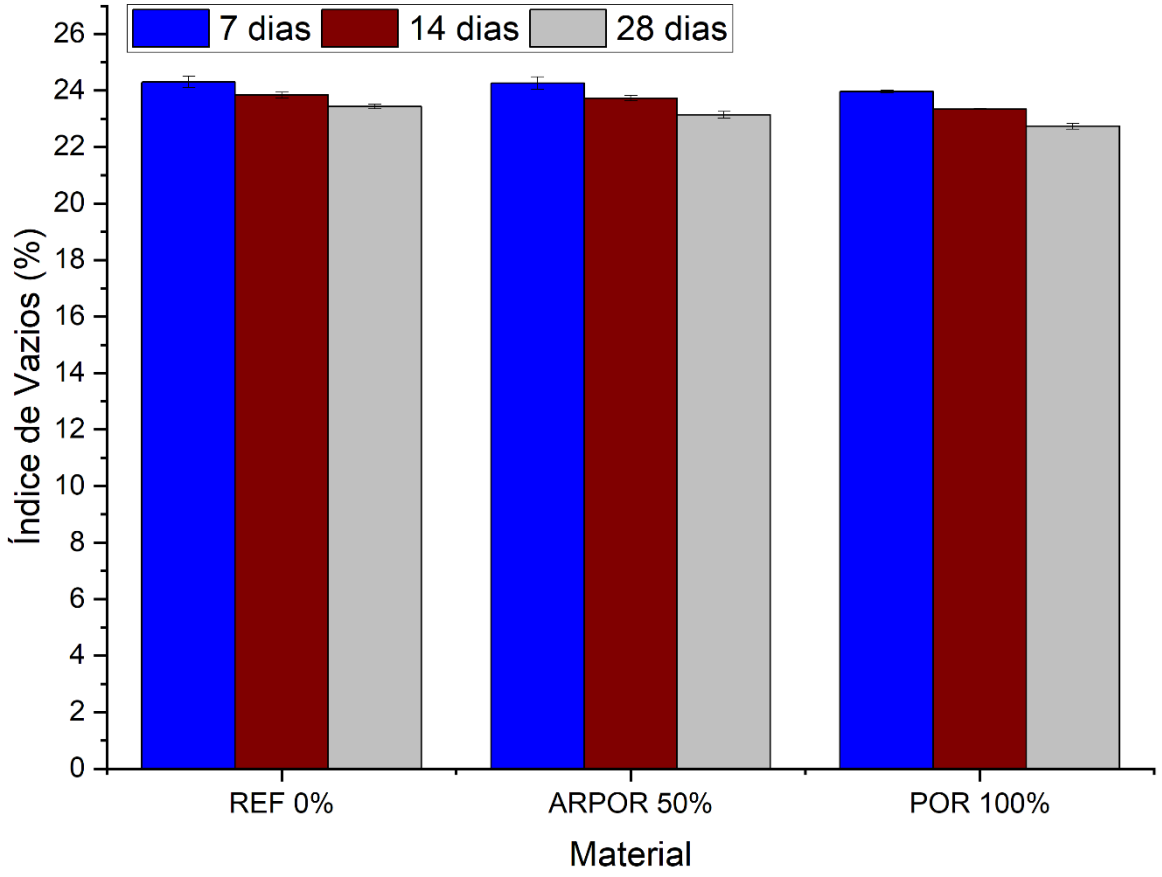
O mesmo comportamento foi obtido para o índice de vazios, conforme pode ser observado na Tabela 14 e na Figura 17. Esse fato pode ser explicado pelo maior empacotamento entre as partículas proporcionado pelo aumento no teor de finos presentes no chamote. Com o passar do tempo, também ocorre a densificação das amostras, o que resulta na diminuição do índice de vazios e na correspondente redução na taxa de absorção de água.

Tabela 14: Resultado da variação do índice de vazios (%) nas argamassas, n=3

Traço	7 dias			14 dias			28 dias		
	Média (%)	*Desvio Padrão (%)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (%)*	*Desvio Padrão (%)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (%)*	*Desvio Padrão (%)*	*Coef. Variação (%)*
REF 0%	24,30	0,20	0,82	23,84	0,10	0,41	23,43	0,08	0,36
ARPOR 50%	24,26	0,22	0,91	23,72	0,09	0,36	23,14	0,12	0,53
POR 100%	23,96	0,04	0,17	23,34	0,02	0,07	22,73	0,10	0,45

Fonte: Próprio Autor

Figura 17: Índice de vazios das argamassas.



Fonte: Próprio Autor

Podemos perceber que, aos 28 dias, o traço com menor índice de vazios foi aquele em que ocorreu a substituição de todo o agregado miúdo natural pelo chamote. Esse resultado era de se esperar, tendo em vista que esse traço também apresentou menor absorção de água no mesmo intervalo de cura.

A Tabela 15 apresenta os resultados da ANOVA e do Teste de Tukey para o índice de vazios.

Tabela 15: ANOVA/Tukey (distribuição normal) - Índice de vazios nas argamassas, n=3

Traço	7 dias		14 dias		28 dias	
	Valor-p = 0,1017		Valor-p = 0,0005		Valor-p = 0,0005	
	I.V.(%)	Grupo	I.V.(%)	Grupo	I.V.(%)	Grupo
REF 0%	24,30	A	23,84	B	23,43	C
ARPOR 50%	24,26	A	23,72	B	23,14	B
POR 100%	23,96	A	23,34	A	22,73	A

Valor-p: probabilidade de significância, se menor que 0,05 existe diferença significativa entre os traços. Agrupamento: Traços que não compartilham a mesma letra são diferentes entre si.
Fonte: Próprio Autor

De acordo com a análise estatística, somente a amostra constituída por chamote (POR 100%) diferenciou-se significativamente das demais, aos 14 dias. Porém, após 28 dias de cura, os três traços apresentam comportamentos diferentes em relação ao índice de vazios.

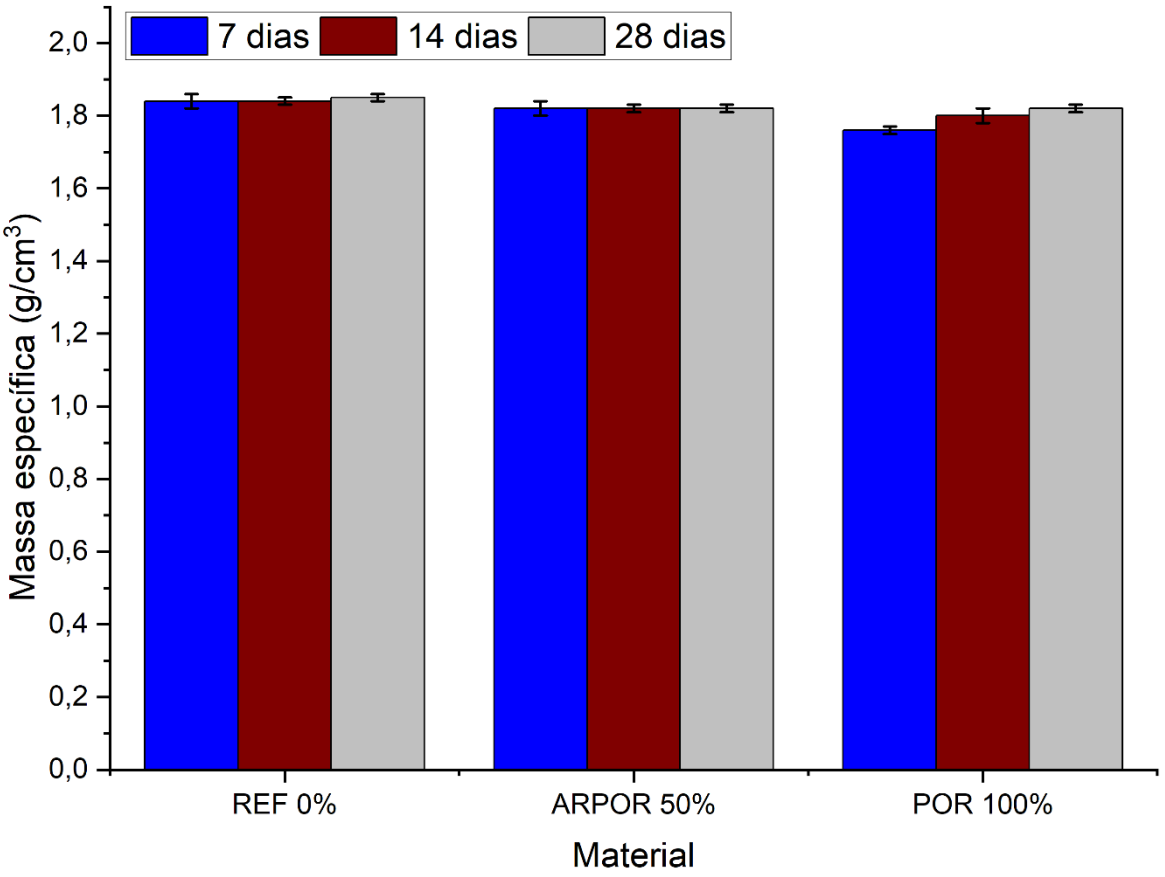
Por fim, a Tabela 16 e a Figura 18 mostram a variação da massa específica de cada traço, em cada uma das idades.

Tabela 16: Resultado da variação da massa específica (g/cm³) nas argamassas, n=3

Traço	7 dias			14 dias			28 dias		
	Média (g/cm³)	*Desvio Padrão (g/cm³)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (g/cm³)*	*Desvio Padrão (g/cm³)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (g/cm³)*	*Desvio Padrão (g/cm³)*	*Coef. Variação (%)*
REF 0%	1,84	0,02	1,13	1,84	0,01	0,63	1,85	0,01	0,62
ARPOR 50%	1,82	0,02	0,84	1,82	0,01	0,32	1,82	0,01	0,32
POR 100%	1,76	0,01	0,65	1,80	0,02	0,85	1,82	0,01	0,32

Fonte: Próprio Autor

Figura 18: Massa específica das argamassas.



Fonte: Próprio Autor

Observa-se que, de maneira geral, quanto maior for a idade da argamassa, maior será sua massa específica, devido ao empacotamento das partículas. Podemos perceber também que para todas as idades de cura, a argamassa constituída somente por areia apresenta maior massa específica.

Apesar da argamassa de referência, REF 0%, possuir maior porosidade no estado endurecido, esse comportamento pode ser justificado pela propriedade do agregado em si, indicando que a areia utilizada possui maior massa específica que o chamote de porcelanato aplicado nos demais traços. Essa observação fica mais evidente ao se analisar o traço POR 100%.

A Tabela 17 apresenta os resultados da ANOVA e do Teste de Tukey para esta propriedade.

Tabela 17: ANOVA/Tukey (distribuição normal) – Massa específica nas argamassas, n=3

Traço	7 dias		14 dias		28 dias	
	Valor-p = 0,0033		Valor-p = 0,0156		Valor-p = 0,0033	
	ρ_s (g/cm^3)	Grupo	ρ_s (g/cm^3)	Grupo	ρ_s (g/cm^3)	Grupo
REF 0%	1,84	B	1,84	B	1,85	B
ARPOR 50%	1,82	B	1,82	A/B	1,82	A
POR 100%	1,76	A	1,80	A	1,82	A

Valor-p: probabilidade de significância, se menor que 0,05 existe diferença significativa entre os traços. Agrupamento. Traços que não compartilham a mesma letra são diferentes entre si.
Fonte: Próprio Autor

De acordo com a análise estatística, somente a amostra constituída por areia (REF 0%) diferenciou-se significativamente das demais, aos 28 dias de cura.

Os resultados dos ensaios de desempenho físico das argamassas confirmam os dados levantados na literatura. De acordo com Torres e Matias (2016), a medida em que se substitui o agregado miúdo natural pelo resíduo de porcelanato ocorre a diminuição da porosidade e da absorção de água da argamassa no estado endurecido.

Comportamento semelhante foi observado por Matos et al. (2016). Os autores observaram que com o aumento da idade de cura e com o acréscimo do chamote de porcelanato, em substituição ao material natural, a argamassa obteve um aumento em sua massa específica e uma redução na sua porosidade e em seu índice de vazios.

5.3. Desempenho mecânico

5.3.1. Resistência à compressão

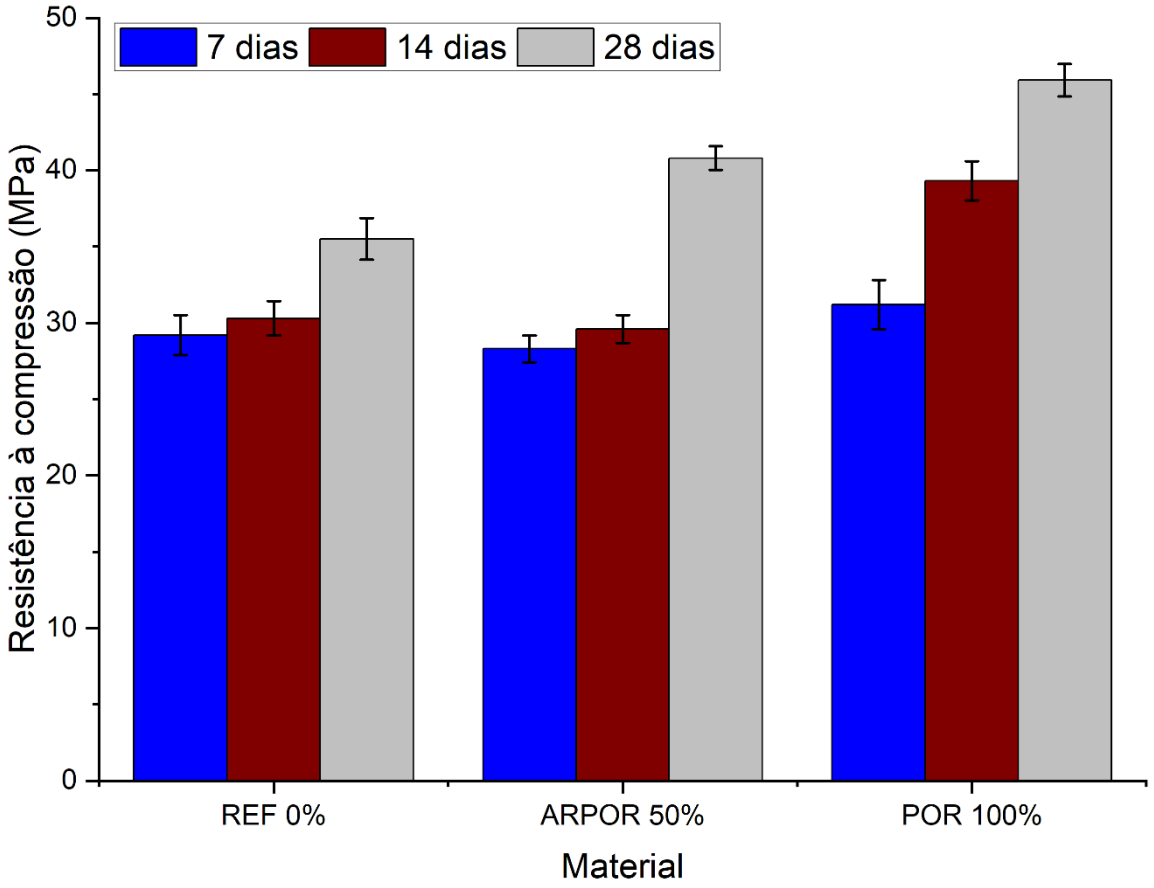
Os resultados referentes à resistência à compressão das argamassas estão apresentados na Tabela 18 e na Figura 19.

Tabela 18: Resultados da variação da resistência à compressão das argamassas, n=4

Traço	7 dias			14 dias			28 dias		
	Média (MPa)	*Desvio Padrão (MPa)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (MPa)*	*Desvio Padrão (MPa)*	*Coef. Variação (%)*	*Média (MPa)*	*Desvio Padrão (MPa)*	*Coef. Variação (%)*
REF 0%	29,23	1,30	4,44	30,3	1,13	3,74	35,5	1,36	3,83
ARPOR 50%	28,3	0,88	3,12	29,6	0,92	3,12	40,8	0,77	1,88
POR 100%	31,2	1,60	5,13	39,9	1,28	3,22	45,9	1,07	2,33

Fonte: Próprio Autor

Figura 19: Resistência à compressão das argamassas.



Fonte: Próprio Autor

A argamassa preparada somente com o chamote de porcelanato (POR 100%), obteve uma resistência quase 30% maior que a argamassa confeccionada somente com a areia natural (REF 0%), aos 28 dias. Quando se substitui metade da areia pelo resíduo, observa-se um ganho de aproximadamente 15% na resistência, no mesmo tempo de cura.

De acordo com Medeiros (2019), o resíduo de porcelanato possui atividade pozolânica, devido a presença de minerais de quartzo na sua composição, portanto isto pode justificar o aumento da resistência para a argamassa POR 100%. Outra hipótese levantada é devido a formação de mulita. Segundo Casagrande (2015), o porcelanato possui em sua constituição grande quantidade de óxido de alumínio e caulinita, que em sua constituição predominante pós queima, forma a mulita. Esta, devido a sua estrutura acicular, atua como esqueleto do corpo contribuindo para o aumento da resistência mecânica do material.

Quanto a argamassa constituída por areia, esta por apresentar maior porosidade, era de se esperar que também apresentasse menor resistência à compressão, como evidenciado pelos ensaios. De acordo com Quarcioni et al. (2009) a formação de poros na pasta de cimento geralmente está associada à hidratação do cimento e à evaporação da água livre. Uma vez que a relação água/cimento de todos os traços foi mantida a mesma, a quantidade de água livre na argamassa de referência foi maior, devido a seu baixo teor de finos. A água que não reagiu possivelmente gerou poros na microestrutura, após sua evaporação, justificando a menor resistência mecânica da argamassa com 100% de areia.

A Tabela 19 apresenta os resultados das análises estatísticas da resistência à compressão.

Tabela 19: Análise estatística - Resistência à compressão nas argamassas, n=4

Traço	**7 dias**		**14 dias**		**28 dias**	
	Valor-p = 0,0310		Valor-p < 0,0001		Valor-p < 0,0001	
	σ_c (MPa)	Grupo	σ_c (MPa)	Grupo	σ_c (MPa)	Grupo
REF 0%	29,23	A/B	30,30	A	35,50	A
ARPOR 50%	28,30	A	29,60	A	40,83	B
POR 100%	31,32	B	39,90	B	45,85	C

Valor-p: probabilidade de significância, se menor que 0,05 existe diferença significativa entre os traços. Agrupamento: Traços que não compartilham a mesma letra são diferentes entre si.
Fonte: Próprio Autor

Percebe-se que existe diferença significativa para a resistência à compressão desde os 7 dias, sendo que essa diferença se acentua com o passar do tempo, envidenciado pela redução do Valor-p. Pode-se observar também que até os 14 dias as argamassas constituídas somente por areia (REF 0%) e as com areia e resíduo (ARPOR 50%) não se diferem significamente entre si. Porém aos 28 dias todos os traços apresentam comportamentos diversos uns com os outros.

Os resultados dos ensaios à compressão confirmam alguns dados levantados na literatura. De acordo com Lima et al. (2016), o aumento das proporções de resíduo, em substituição ao agregado miúdo, eleva o desempenho mecânico da argamassa.

Já Torres e Matias (2016), observaram que as argamassas que continham maiores quantidades de resíduos obtiveram resistências à compressão superiores as argamassas com areia natural. De acordo com estes autores, isso pode estar relacionado à ocorrência de reações pozolânicas no material fino do chamote de porcelanato.

6. CONCLUSÕES

Após a apresentação dos resultados e das discussões do capítulo anterior, chega-se às seguintes conclusões:

Durante a fase experimental, a utilização do chamote de porcelanato na produção de argamassas, diminuiu a consistência do material, sendo necessário aumentar a relação água/cimento.

As curvas granulométricas dos agregados propostos, e seus respectivos módulos de finura, revelaram que o chamote de porcelanato apresentava-se com menor granulometria. Além disso, em todas as composições propostas, os agregados encontravam-se dentro da faixa de utilização em argamassas.

Para os ensaios referentes à absorção de água, índice de vazios e massa específica, os resultados mostraram que, de maneira geral, quanto maior for a idade do corpo de prova menor será o índice de vazios e o teor de água absorvida. Além disso, a medida em que se substitui a areia pelo chamote de porcelanato, essas propriedades ficam ainda menores, o que representa uma vantagem em relação a durabilidade das argamassas. Para a massa específica observa-se um pequeno aumento dos valores com o aumento dos dias de cura, sugerindo que mudanças expressivas nessa propriedade, provavelmente, acontecem após os 28 dias de cura.

Em relação as propriedades mecânicas, apesar do acréscimo da quantidade de água no traço, constatou-se um ganho de resistência ao se substituir a areia pelo resíduo de porcelanato. A argamassa confeccionada totalmente por chamote apresentou uma aumento de 30% na resistência à compressão aos 28 dias. Dessa forma, infere-se que o pó proveniente da moagem do porcelanato, além de contribuir como agregado miúdo, tenha agido diretamente na argamassa como material pozolânico.

Por fim, a aplicação de conceitos estatísticos foi importante para validar as conclusões tomadas a partir das médias dos ensaios. Pode-se concluir que os valores atingidos são confiáveis, com um índice de confiança de 95%. A análise estatística empregada foi importante para identificar se os resultados obtidos pelos ensaios,

indicados através dos cálculos das médias eram de fato significativos e quais tratamentos realmente afetaram o desempenho dos corpos de prova.

Esta pesquisa comprovou a viabilidade da substituição de todo o agregado miúdo comercial por chamote de porcelanato em argamassas de assentamento. Isto porque, para além dos ensaios realizados, foi possível a reutilização de 100% desse resíduo, dispensando a necessidade de se selecionar faixas granulométricas específicas. Transformando assim, o resíduo em um produto com grande valor ecônomico e social agregado, reduzindo a degradação ambiental oriunda da extração de areias e da deposição desse resíduo na natureza.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a microestrutura das argamassas propostas com os chamotes de porcelanato, a fim de verificar a evolução das reações do resíduo com a matriz cimentícia;

- Ampliar o estudo para um número maior de porcentagens de substituição, sobretudo entre 50% e 100% de substituição;

- Avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de chamotes em argamassas, comparando todo o cilco de obtenção, beneficiamento e aplicação desses resíduos em relação o uso de areia natural.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. **Manual de Revestimentos de Argamassa.** Disponível em: < https://abcp.org.br/> Acesso em: 01 mai. 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 17054** – Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211** – Agregados para concreto - Especificação.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778** – Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13281** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – requisitos.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13817** – Placas cerâmicas para revestimento - Classificação. Rio de Janeiro, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13818** – Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15463** - Placas cerâmicas para revestimento — Porcelanato. Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13816** – Placas cerâmicas para revestimento -Terminologia. Rio de Janeiro, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502** – Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

Associação nacional dos fabricantes de cerâmica para revestimentos, louças sanitárias e congêneres – ANFACER: Principais produtores mundiais em milhoes de m^2 (2019). Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setorceramico/numeros-do-setor>. Acesso: junho de 2022.

AZEVEDO, A. R. G.; FRANÇA, B. R.; ALEXANDRE, J.; MARVILA, M. T.; ZANELATO, E. B.; XAVIER, G. C. Influence of sintering temperature of aceramic substrate in mortar adhesion for civil construction. **Journal of Building Engineering**. v. 19, p. 342-348, 2018.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** Coleção primeiros passos na qualidade no canteiro de obras. 2. ed. São Paulo: O nome da Rosa, 2000.

Bin Chi, Weisheng Lu, Meng Ye, Zhikang Bao, Xiaoling Zhang. Construction waste minimization in green building: A comparative analysis of LEED-NC 2009 certified projects in the US and China. **Journal of Cleaner Production**. Hong Kong, 2020.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de re- síduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**. São Paulo: v. 61, n. 358, p. 178-189, 2015.

CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M.; CUCHIERATO, G.; MOTTA, J. F. M. Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: Parte II – Indústria de Revestimentos. **Cerâmica Industrial**. São Paulo: v. 24, n. 2, p. 13-21, 2019.

CALDAS L. R.; TOLEDO FILHO R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para argamassas, graute e bloco de concreto. **Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**. Brasília: v. 2, n. 2, p. 34-61, 2018.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

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.** Rio de Janeiro: v. 21, n. 3, p. 714-732, 2016.

CARASEK, H. Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON**. Materiais de Construção Civil: Argamassas.** Universidade Federal de Goiás, 2007. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/> Acesso em: 30 abr. 2020.

CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. IBRACON, v. 1, p. 893-943, 2010.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002) . **Resolução nº 307**, de 5 de julho de 2002. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.downloa&id=305> Acesso em: 30 jan. 2022.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2012) . **Resolução nº 448**, de 19 de janeiro de 2012. Disponível em: < http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=652> Acesso em: 25 jan. 2022.

CONTARTESI F.; MELCHIADES F. G.; BOSCHI A. O.; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): Uma ferramenta para a redução do impacto ambiental dos revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**. São Paulo: v. 24, n. 2, p. 30-44, 2019.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

FIORITO, A. J. S.I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2010.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica.** São Paulo, v. 61, n. 358, p. 251-258, 2015.

KABIRIFAR K.; MOJTAHEDI M.; WANG C.; TAM V.W.Y. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective wast management: A review. **Journal of Cleaner Production.** Sydney: v. 263, 2020.

LIMA, W.E.F.; ROCHA, D.M.A.; Almeida, A.O; MONTE JUNIOR, I. **Avaliação de argamassas com substituição do agregado miúdo natural por resíduos cerâmicos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS – CBECIMAT, 22., Natal, 2016. Anais..., 2016. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/22cbecimat/> Acesso em: 17 abr. 2020.

LOPES, L. F. **Materiais de construção civil I**. Londrina: Educacional S. A., 2017.

LUZ. J. C. **Desenvolvimento de formulações para produção de grês porcelanato a partir de matérias-primas da região da bacia do Parnaíba.** Dissertação (Mestrado)**.** 87f – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

MATIELO A. L. **Estudo do desempenho físico e mecânico da argamassa de revestimento com a substituição do agregado miúdo por resíduos de porcelanato.** Trabalho de conclusão - 95f. Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari Univates, Lajeado, 2019.

MATOS, D. C. **Reaproveitamento do chamote de porcelanato para o desenvolvimento de novos compósitos cimentícios.** Dissertação (Mestrado). - 91f. Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MATOS, D. C.; SILVA, I. P. P.; CALADO, C. R.; BEZERRA, A. C. **Cementitious composite from porcelain tile grog: analysis of their properties anda application for sustainability.** In: 41st. IAHS WORLD CONGRESS: Sustainability and Innovation for the Future. Algarve, Portugal, 2016.

MENEGAZZO, A.P.M.; LEMOS F. L. N.; PASCOAL J. O. A.; GOUVÊA D.; CARVALHO J. C.; NÓBREGA R. S. N. Grés Porcelanato. Parte I: Uma Abordagem Mercadológica. **Cerâmica Industrial**. São Paulo, v. 5, n. 5, p. 7-10, 2000.

MORAES, M. L. V. N. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico**. Tese (Doutorado). 153f. – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

MORAIS, M. R. **Reciclagem de resíduos de indústria de placas cerâmicas: um estudo de caso.** Dissertação (Mestrado). - 148f. Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MOTTA J. F. M.; ZANARDO A.; CABRAL JUNIOR M. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. **Cerâmica Industrial**. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A.; **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2004.

NONI JUNIOR, A.; HOTZA, D.; SOLER, V.C.; VILCHES, E.S. Influence of composition on mechanical behavior of porcelain tile. Part I: Microestrutural characterization and developed phases after firing**. Materials Science & Engineering.** Espanha, v. 527, p. 1730 – 1735, 2010.

OLIVEIRA, A. P. N. de; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2015.

OLIVEIRA, A. P. N. de. Grés porcelanato: aspectos mercadológicos e tecnológicos. **Cerâmica Industrial**. São Paulo, v. 3, n. 3, p. 34-41, 1998.

PAIXÃO, C. A. B. **Utilização de refugos de revestimentos cerâmicos (porcelanato e azulejo) em substituição à areia em argamassas cimentícias.** Dissertação (Mestrado). - 72f. Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PAIXÃO C. A.; CAETADO, L. F.; COLIANTE, J. G. R.; FILHO, L. C. P. S.; BERGMANN, C. P. Estudo da viabilidade de utilização de resíduos cerâmicos para confecção de argamassas. **Cerâmica Industrial**. São Paulo, v. 16, n. 4, p. 33-38, 2011.

PCZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** Dissertação (Mestrado). - 141f. Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Florianopólis, 2017.

PESQUISA ANUAL DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL (PAIC) – 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2017_v27_informativo.pdf> Acesso em: 10 abr. 2020

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ÂNGULO, S. C.; GUILGE, M. S.; CAVANI, G. R.; CASTRO, A. L.; CINCOTTO, M. A. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído.** Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 175-187, 2009.

RECENA, F. A. P. Conhecendo a argamassa. 2. ed. Porto Alegre: PUCRS, 2012.
ROSSO, J.; CUNHA, E. S.; ROJAS-RAMÍREZ, R. A. Características técnicas e polimento de porcelanatos. **Cerâmica Industrial**. São Paulo, v. 10, n. 4, p. 11-14, 2005.

SÁNCHEZ, E.; GARCÍA, T.; SANZ, V.; MORENO, A. Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics International**. Espanha: v. 36, p. 831-845, 2010.

SARTOR, R. P.; SPECK, J. A.; SAVI, A. E.; PIVA, J. H.; ANTUNES, E. G. P. Estudo da influência da aplicação de pó residual do processo de retífica à seco de placas cerâmicas em argamassas colantes industrializadas. **MIX Sustentável.** Florianopólis, v. 7, n. 3, p.29-40, 2021.

SILVA, A. L. de. **Conformação de porcelanatos de baixa espessura por prensagem e tape casting.** Dissertação (Mestrado). 104f - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina.Florianópolis 2012.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato.**Dissertação (Mestrado). 107f - Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído** - ENTAC, XI. Florianópolis, 2006. Disponível em: < utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/ENTAC2006_Finos.pdf> Acesso em: 02 mai. 2020.

TORRES, I.; MATIAS, G. Sustainable mortars for rehabilitation of old plasters. **Engineering Structures.** Portugal: v. 129, p. 11-17, 2016.