

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANA CAROLINE KASZUBA

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO E DA AREIA NATURAL
PELA CINZA DE CASCA DE ARROZ EM ARGAMASSA AUTONIVELANTE**

PATO BRANCO

2023

ANA CAROLINE KASZUBA

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO E DA AREIA NATURAL
PELA CINZA DE CASCA DE ARROZ EM ARGAMASSA AUTONIVELANTE**

**Study of partial replacement of cement and natural sand by rice husk ash in
self-leveling mortar**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANA CAROLINE KASZUBA

**ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO E DA AREIA NATURAL
PELA CINZA DE CASCA DE ARROZ EM ARGAMASSA AUTONIVELANTE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. José Ilo Pereira Filho

Data de aprovação: 26 de junho de 2023

José Ilo Pereira Filho
Doutor em Engenharia de Produção (UFRGS)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco

Caroline Angulski da Luz
Doutora em Engenharia Civil (UFSC)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco

Paulo Cezar Vitorio Junior
Doutor em Engenharia Civil e Ambiental (UPF)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco

PATO BRANCO
2023

Dedico este trabalho a minha família, por todo o
suporte e resiliência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, minha mãe Marisa, meu pai Ederson e meu irmão João, por me apoiarem durante toda essa etapa, ao estarem do meu lado, me motivando e dando forças para poder concluir essa fase tão importante da minha vida. Às minhas avós que sempre me colocaram em suas orações, para me guiar nesse longo percurso da graduação. Dedico à minha família todas as minhas conquistas.

Também, aos meus amigos, Aline, Camila, Carolina e Mateus, por tornarem todo o processo da graduação mais leve e agradável, por estarem do meu lado em momentos tão difíceis e me motivarem a continuar e persistir.

Ao meu professor orientador, José Ilo Pereira Filho, que me incentivou a seguir o caminho da pesquisa científica. Muito obrigada por toda a orientação e colaboração para concretização desse trabalho e, ainda, por sempre compartilhar novos aprendizados.

À minha banca por todas as contribuições e orientações técnicas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do laboratório de materiais da UTFPR – Pato Branco, estagiários e alunos do mestrado, por todos os conhecimentos compartilhados e ajuda na execução de ensaios.

À Central de Análises – UTFPR Campus Pato Branco.

A todos que não mencionei, professores do Departamento de Construção Civil e colegas, que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conclusão desse projeto tão especial e da graduação.

“Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido.
Agora é hora de compreender mais para temer menos.”
Marrie Currie

RESUMO

Estudos com uso de materiais conhecidos como subprodutos industriais vêm sendo difundidos de forma expressiva, em vista de seu potencial de incorporação em argamassas e concretos. A cinza de casca de arroz (CCA) é um desses subprodutos, resultante da queima da casca de arroz (CA) no processo de secagem do grão de arroz. A calcinação da CA gera um resíduo de morfologia irregular, com distintas fases amorfas e cristalinas e com alto teor de sílica em sua composição, mas que não o classifica como sílica ativa. Muitas pesquisas indicam que a cinza, quando adequadamente tratada, pode ser utilizada como substituinte parcial do cimento ou como adição ao mesmo. No entanto, é válido avaliar se a incorporação da CCA residual em compósitos cimentícios, proporciona conservação das propriedades físicas e mecânicas. Já as argamassas autonivelantes são materiais caracterizados por sua elevada fluidez e que exigem alto controle técnico e consumo de cimento para sua produção, tornando o material pouco acessível. Sendo assim, o uso da CCA nessas argamassas pode trazer diversos ganhos produtivos a esse material. O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da substituição parcial da areia natural e do cimento pela cinza de casca de arroz em argamassas autonivelantes, quanto a porosidade e na aderência entre substrato e argamassa. Para isso, foram adaptados traços retirados da bibliografia estudada para serem produzidas duas argamassas, nas quais foi feita a substituição parcial de 15%, em massa, da areia por CCA e foi reduzida a quantidade de cimento em 10 e 20% de sua massa. Foram realizados ensaios no estado fresco e estado endurecido, nas idades de 28, 60 e 91 dias, para verificar se as argamassas produzidas estavam de acordo com os requisitos mínimos de desempenho físico e mecânico. Na sequência foram realizados ensaios de absorção e índice de vazios e estudo da microestrutura, para avaliar a porosidade e a resistência de aderências das argamassas autonivelantes. As dosagens com CCA e redução de cimento apresentaram resultados promissores no estado fresco e as resistências mecânicas também alcançaram valores superiores aos limites normativos utilizados. Para as análises de porosidade, da resistência de aderência e da microestrutura, observou-se maior influência do uso da CCA sobre os resultados obtidos. Ainda assim, foi atestada a viabilidade do uso da CCA em argamassas autonivelantes, mesmo com a redução no consumo de cimento.

Palavras-chave: argamassa autonivelante; cinza de casca de arroz; pozolana; efeito *filler*; consumo de cimento.

ABSTRACT

Studies that use materials known as industrial by-products have been expressively disseminated, bearing in mind their potential as incorporation in mortars and concrete. Rice husk ash (RHA) is one of these subproducts, resulting from the burning of rice husks (RH) in the rice grain drying process. RH calcination generates a residue of irregular morphology, with distinct amorphous and crystalline phases and with high silica content in its composition, but which does not classify it as silica fume. Many studies indicate that the rice husk ash, when properly treated, can be used as a partial replacement or an addition to the cement. However, it is worth evaluating whether the incorporation of residual RHA in cementitious composites provides a conservation of physical and mechanical properties. Whereas self-levelling mortars are materials characterized by their high fluidity and require high technical control and cement consumption for their production, making the material inaccessible. Therefore, using RHA in these mortars can bring several productive gains to this material. The present work aims to analyze the influence of partial replacement of natural sand and cement by rice husk ash in self-levelling mortars regarding porosity and adherence between substrate and mortar. For this purpose, the proportions of materials were adapted considering the bibliography studied to produce two mortars, in which was made a partial replacement of 15%, in mass, of the sand by RHA and the amount of cement was reduced by 10 and 20% of its mass. Tests were carried out in the fresh and hardened state at the ages 28, 60 and 91 days to verify whether the mortars produced acquired the minimum requirements from physical and mechanical performance. Afterwards, absorption and voids content tests were carried out, as well as a study of the microstructure, to evaluate the porosity and adhesion resistance of the self-levelling mortars. Dosages with RHA and cement reduction showed promising results in the fresh state. The mechanical strengths also reached values higher than the normative limits used. For porosity, adhesive strength and microstructure analyses, it was observed higher influence of using RHA on the results obtained. Even so, the viability of using RHA in self-levelling mortars was attested, even with the reduction in cement consumption.

Keywords: self-levelling mortars; rice husk ash; pozzolan; filler; cement consumption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Microtextura da pasta autonivelante.	20
Figura 2: Faixas granulométricas e composição do agregado miúdo	23
Figura 3: Mecanismo de ação de um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos	26
Figura 4: Curvas de tempo de escoamento das argamassas em função do teor de aditivo SP	33
Figura 5: Consistência das argamassas em função do teor de aditivo SP	34
Figura 6: Efeito da variação da relação água/cimento e SP na fluidez e no índice de segregação da argamassa	35
Figura 7: Análise visual da borda da pasta escoada. (a) Pasta com borda desuniforme, (b) Pasta com borda uniforme	37
Figura 8: Análise visual da segregação da pasta escoada. (a) Pasta sem tendência a segregação, (b) Pasta com tendência a segregação	37
Figura 9: Difratoograma de Raio-X da pasta de cimento controle e pasta de cimento com 10% de CCA (após 28 dias de cura)	46
Figura 10: Fluxograma da metodologia	53
Figura 11: Difratoograma de raios X da cinza da casca de arroz	56
Figura 12: Curva granulométrica do agregado miúdo	58
Figura 13: Procedimento de mistura para a pasta de cimento	65
Figura 14: Procedimento de mistura dos materiais da argamassa autonivelante	66
Figura 15: Prensa EMIC para ensaios mecânicos	71
Figura 16: Esquema para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração (cotas em centímetro)	72
Figura 17: Aparelho utilizado para o ensaio de resistência de aderência à tração	73
Figura 18: Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração	74
Figura 19: Recipiente utilizado para a realização do ensaio de absorção por capilaridade	75
Figura 20: Análise visual da argamassa de referência, A0	79
Figura 21: Aspecto visual da argamassa produzida com a quarta tentativa de dosagem	80

Figura 22: Propriedades das argamassas autonivelantes estudadas no estado fresco	85
Figura 23: Densidade de massas das argamassas A10 e A20 para as idades de 28, 60 e 91 dias	88
Figura 24: Evolução da resistência à compressão das argamassas autonivelantes	90
Figura 25: Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes	95
Figura 26: Placas de contrapiso da argamassa A10 no estado fresco (a) no estado endurecido (b) e com os cortes dos CP's feitos (c) e da argamassa A20 no estado fresco (d) no estado endurecido (e) e com os cortes dos CP's feitos (f).....	97
Figura 27: Absorção de água por capilaridade a 28 e 91 dias.....	102
Figura 28: Coeficiente de capilaridade a 28 e 91 dias	103
Figura 29: Absorção e índice de vazios das argamassas A10 (a) e A20 (b).....	105
Figura 30: Poros das argamassas confeccionadas (a) A10 a 28 dias, (b) A10 a 91 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 91 dias	106
Figura 31: MEV das argamassas (a) A10 a 28 dias, (b) A10 a 60 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 60 dias com aproximação de 500x	108
Figura 32: MEV das argamassas (a) A10 a 28 dias, (b) A10 a 60 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 60 dias com aproximação de 1000x	109
Figura 33: Dimensão dos poros observados nas amostras (a) A10 a 28 dias (b) A10 a 60 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 60 dias com aproximação de 500x	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Espalhamentos mínimos e máximos para argamassas autoadensáveis e autonivelantes	32
Tabela 2: Intervalos de espalhamento para argamassas autonivelantes	33
Tabela 3: Material do contrapiso e ensaios aplicáveis	39
Tabela 4: Requisitos de desempenho da EFNARC para pisos cimentícios autonivelantes	40
Tabela 5: Resistências mecânicas para argamassas autonivelantes	41
Tabela 6: Características químicas e físicas do cimento CP V – ARI	55
Tabela 7: Superfície específica da cinza de casca de arroz	56
Tabela 8: Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização dos materiais	60
Tabela 9: Quantidade de materiais para ensaio de resistência à compressão do cimento.....	62
Tabela 10: Dosagens de argamassa autonivelantes utilizada de referência para o estudo	63
Tabela 11: Resultados da argamassa de referência – A0	63
Tabela 12: Identificação das argamassas autonivelantes	64
Tabela 13: Resistência à compressão do cimento CP V – ARI aos 7 dias	78
Tabela 14: Dosagem da argamassa elaborada	80
Tabela 15: Traços adotados para as dosagens das argamassas	81
Tabela 16: Quantidade, em massa, de materiais utilizados para produção das argamassas teste	81
Tabela 17: Resultado dos ensaios no estado fresco	82
Tabela 18: Resultada das análises visuais das argamassas produzidas	83
Tabela 19: Densidade de massa das argamassas autonivelantes a 28 dias.....	87
Tabela 20: Resistência à compressão das argamassas autonivelantes a 28 dias	89
Tabela 21: Resistência à compressão das argamassas autonivelantes a 60 dias	89
Tabela 22: Resistência à compressão das argamassas autonivelantes a 91 dias	90

Tabela 23: Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes a 28 dias	94
Tabela 24: Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes a 60 dias	94
Tabela 25: Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes a 91 dias	94
Tabela 26: Resistência de aderência à tração das argamassas autonivelantes a 28 dias	97
Tabela 27: Resistência de aderência à tração das argamassas autonivelantes a 60 dias	98
Tabela 28: Forma e frequência de ruptura para a argamassa A10, em 28 e 60 dias	99
Tabela 29: Forma e frequência de ruptura para a argamassa A20, em 28 e 60 dias	100
Tabela 30: Resultados da caracterização das argamassas pelo ensaio de absorção de água.....	106
Tabela 31: Síntese dos resultados no estado fresco das argamassas A10 e A20	111
Tabela 32: Síntese dos resultados no estado endurecido para as argamassas A10 e A20	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA	Casca de arroz
CCA	Cinza de casca de arroz
CP	Cimento Portland
CP V – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CP's	Corpo de prova
IAP	Índice de atividade pozolânica
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma brasileira
RBMG	Resíduo de beneficiamento de mármore e granito
RCMG	Resíduo do corte de mármore e granitos
SP	Superplastificante
SRMs	Matérias-primas secundárias
VMA	Modificador de viscosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

$A = \text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
$C = \text{CaO}$	Óxido de cálcio
$\bar{C} = \text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$S = \text{SiO}_2$	Dióxido de silício
$\bar{S} = \text{SO}_3$	Trióxido de enxofre
$F = \text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido férrico
$M = \text{MgO}$	Óxido de magnésio
$H = \text{H}_2\text{O}$	Água
$O = \text{O}_2$	Oxigênio
$\text{Ca(OH)}_2 = \text{CH}$	Hidróxido de cálcio ou Portlandita
$\text{C-S-H} = (\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)_y(\text{H}_2\text{O})_z$	Silicato de cálcio hidratado
$\text{C}_6\bar{\text{A}}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32} = 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$	Etringita
$\text{C}_3\text{A} = 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Celita
Cl	Cloro
K_2O	Óxido de potássio
Na_2O	Óxido de sódio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	Justificativa.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Argamassa autonivelante	18
2.1.1	Definição	18
2.1.2	Materiais componentes da argamassa autonivelante.....	19
<u>2.1.2.1</u>	<u>Cimento</u>	<u>21</u>
<u>2.1.2.2</u>	<u>Agregado miúdo</u>	<u>22</u>
<u>2.1.2.3</u>	<u>Aditivos químicos.....</u>	<u>23</u>
<u>2.1.2.3.1</u>	<u>Aditivo superplastificante</u>	<u>25</u>
<u>2.1.2.3.2</u>	<u>Aditivo modificador de viscosidade.....</u>	<u>27</u>
<u>2.1.2.4</u>	<u>Adições minerais</u>	<u>28</u>
2.1.3	Propriedades das argamassas autonivelantes	30
<u>2.1.3.1</u>	<u>Reologia</u>	<u>30</u>
<u>2.1.3.2</u>	<u>Trabalhabilidade</u>	<u>31</u>
<u>2.1.3.3</u>	<u>Coesão</u>	<u>35</u>
<u>2.1.3.4</u>	<u>Resistências mecânicas</u>	<u>38</u>
2.2	Cinza de casca de arroz	41
2.2.1	Produção da cinza da casca do arroz	41
2.2.2	A adição da cinza da casca de arroz em dosagens de concretos e argamassas.....	42
2.2.3	Características e comportamento da CCA em matrizes de cimento Portland 44	
3	METODOLOGIA	51
3.1	Classificação da pesquisa.....	51
3.2	Delineamento da pesquisa	52
3.3	Materiais	54

3.3.1	Cimento	54
3.3.2	Cinza da casca de arroz	55
3.3.3	Agregado miúdo	57
3.3.4	Aditivo superplastificante	58
3.3.5	Aditivo modificador de viscosidade	59
3.3.6	Água	59
3.4	Métodos	59
3.4.1	Etapa 1: Caracterização do cimento	59
<u>3.4.1.1</u>	<u>Massa específica do cimento</u>	<u>60</u>
<u>3.4.1.2</u>	<u>Resistência à compressão do cimento</u>	<u>61</u>
3.4.2	Etapa 2: Estudo da argamassa	62
3.4.3	Etapa 3: Preparação da argamassa	64
<u>3.4.3.1</u>	<u>Confecção das argamassas</u>	<u>64</u>
<u>3.4.3.2</u>	<u>Moldagem dos corpos de prova</u>	<u>66</u>
3.4.4	Etapa 4: Ensaio no estado fresco	67
<u>3.4.4.1</u>	<u>Índice de consistência da argamassa e análise visual</u>	<u>67</u>
<u>3.4.4.2</u>	<u>Densidade de massa e Teor de Ar Incorporado</u>	<u>68</u>
3.4.5	Etapa 5: Ensaio no estado endurecido – Resistências mecânicas	69
<u>3.4.5.1</u>	<u>Densidade de massa aparente</u>	<u>69</u>
<u>3.4.5.2</u>	<u>Resistência à tração na flexão</u>	<u>70</u>
<u>3.4.5.3</u>	<u>Resistência à compressão</u>	<u>71</u>
<u>3.4.5.4</u>	<u>Resistência de aderência à tração</u>	<u>72</u>
3.4.6	Etapa 6: Ensaio no estado endurecido – Propriedades de durabilidade	74
<u>3.4.6.1</u>	<u>Absorção de água por capilaridade</u>	<u>74</u>
<u>3.4.6.2</u>	<u>Absorção de água por imersão</u>	<u>76</u>
<u>3.4.6.3</u>	<u>Análise microestrutural</u>	<u>77</u>
4	RESULTADOS	78
4.1	Caracterização do cimento	78
4.2	Estudo da argamassa	79
4.3	Propriedades no estado fresco	82
4.4	Propriedades no estado endurecido	86
4.4.1	Densidade de massa	86
4.4.2	Resistência à compressão	89

4.4.3	Resistência à tração na flexão.....	93
4.4.4	Resistência de aderência à tração	96
4.4.5	Absorção de água por capilaridade	102
4.4.6	Absorção de água por imersão	104
4.5	Análise microestrutural: microscopia eletrônica de varredura.....	107
4.6	Análise geral dos resultados.....	111
5	CONCLUSÃO	113
	REFERÊNCIAS.....	115

1 INTRODUÇÃO

As atuais mudanças na sociedade fazem com que sejam buscadas novas soluções e estas devem ser alinhadas ao surgimento de avanços tecnológicos e as novas expectativas dos consumidores, um material inovador e viável deve possibilitar agilidade dos processos construtivos e ainda ser sustentável.

Desde a idade antiga existem registros do uso de materiais que hoje classificam-se como cimento, a primeira formulação reconhecida do cimento Portland foi patenteada em 1824, mas somente em 1845, Isaac Johnson elaborou um modelo mais semelhante ao cimento Portland utilizado atualmente, com maiores propriedades cimentantes (NEVILLE, 2016). O crescimento da economia mundial impulsiona diretamente a ampliação da infraestrutura, gerando consequente necessidade de aumento na demanda de produtos como o cimento, isso posto, em 2017, a produção de cimento mundialmente alcançou a marca de 4.100 milhões de toneladas (BRASIL, 2018).

De acordo com dados do Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2022), no Brasil, foram produzidas 65,8 milhões de toneladas de cimento no ano de 2021. Além disso, em 2016 a indústria cimentícia foi responsável 24,9% das emissões de CO₂, relativa ao total de emissões geradas por processos industriais (BRASIL, 2019). Vale ainda ressaltar que no processo de produção de cimento, 63% das emissões de CO₂ são decorrentes do processo de conversão do calcário em óxido de cálcio (SNIC, 2019).

Estes dados trazem a importância de serem buscadas alternativas ecologicamente adequadas para a fabricação de cimento Portland e até mesmo para a produção de argamassas e concretos. O mercado atual exige que os materiais alcancem bom desempenho mecânico e funcional, mas também é necessário entender as interações deste com o meio ambiente, buscando uma solução que permita o mínimo de consumo energético e o menor impacto ambiental.

Assim sendo, uma matriz cimentícia que vem ganhando destaque no mercado atual da construção civil é a argamassa autonivelante, aplicada na construção de contrapisos, dada sua característica de agilizar o processo construtivo. Chaves (2019) indica que o principal objetivo no uso da argamassa autonivelante é

viabilizar a redução dos defeitos de modelagem devido às falhas de aplicação ou técnicas inadequadas.

Porém, ainda que apresente muitas vantagens com relação às técnicas usuais de execução de contrapiso, a produção de argamassas autonivelantes exige um alto controle das etapas, de maneira a garantir que sejam alcançadas as propriedades de fluidez, coesão e homogeneidade do material. Para Rizwan e Bier (2012), o uso de aditivos químicos e adições minerais são fundamentais para manter o equilíbrio entre resistência à segregação e fluidez em misturas auto adensáveis.

As argamassas autonivelantes são formuladas de maneira semelhante a argamassas convencionais, da massa total: de 25% a 45% corresponde a cimento Portland, de 40% a 60% corresponde a areia fina quartzosa, 10% a 15% são destinados a aditivos e adições minerais e de 20% a 30% corresponde a parte de água de amassamento (NAKAKURA, BURCHER, 1997).

As composições de misturas autonivelantes ainda apresentam elevado consumo de cimento, como uma solução para manter a coesão da pasta, no entanto, o uso em excesso de cimento pode trazer prejuízos à durabilidade do material e, ainda, gerar consequências graves ao ambiente, considerando o alto gasto energético para a sua produção (SANTOS, 1997).

À vista disso, surgem pesquisas que investigam possibilidades de reduzir a produção e o consumo de CP a partir de sua substituição parcial em materiais de base cimentícia, sendo a principal linha de estudo com adições de subprodutos agroindustriais que não possuem destinação adequada.

Um resíduo muito pesquisado que pode ser citado é a cinza de casca de arroz (CCA), subproduto da indústria de arroz, tendo em vista o seu potencial de participar das ações pozzolânicas em misturas cimentícias, decorrente do alto teor de sílica (SiO_2) do resíduo. No entanto, a maior parte da CCA é resultado da queima da casca de arroz (CA) sem controle de temperatura, fazendo que este material tenha maiores fases cristalinas, menor potencial pozzolânico e estrutura mais porosa, contribuindo para o descarte inadequado da CCA residual em ampla escala (ISAIA *et al.*, 2017a).

Por esse motivo, grande parte das contribuições acadêmicas que pesquisam a CCA, apontam a necessidade de controle de queima e prévia de moagem para aumentar a reatividade do resíduo, o que acarreta em maiores gastos energéticos. Por isso tem-se a importância de estudar a CCA residual, objetivando

verificar se o resíduo apresentará desempenho técnico, tal que promova a melhora na qualidade do material cimentício, sem a necessidade de tratamentos.

Nesse contexto, o presente trabalho tratará a respeito do comportamento da cinza de casca de arroz residual em argamassas autonivelantes, com relação a resistência mecânica e a trabalhabilidade. De forma a verificar se a CCA residual tem potencial para atuar como aglomerante e proporcionar melhora no desempenho do material.

Para buscar responder ao problema acima citado o trabalho será dividido em introdução, onde são apresentados conceitos iniciais a respeito do tema, os objetivos e a justificativa, para na sequência serem apresentados os materiais e métodos adotados, para por fim apresentar a discussão dos resultados e as conclusões.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a influência da substituição parcial do cimento e da areia natural pela cinza da casca de arroz em argamassas autonivelantes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Examinar a influência da utilização da cinza de casca de arroz nas resistências mecânicas de argamassas autonivelantes.
- Verificar a influência da utilização da cinza de casca de arroz na aderência de argamassas autonivelantes à substratos de concreto.
- Verificar a influência da utilização da cinza de casca de arroz no índice de vazios e na absorção da argamassa autonivelante.
- Investigar a influência da substituição parcial do cimento e da areia natural pela cinza da casca de arroz na microestrutura da argamassa autonivelante.

1.2 Justificativa

No Brasil são produzidos cerca de 11 milhões de toneladas de arroz e, aproximadamente, 70% da produção se concentra no Rio Grande do Sul (IBGE, 2021). A casca de arroz é um subproduto do beneficiamento do arroz amplamente empregada como fonte de energia em agroindústrias, o resíduo gerado desse processo é a cinza da casca de arroz. De acordo com Pouey (2006), aproximadamente 20% da massa da casca de arroz se converte em CCA e esse resíduo não possui local de destinação apropriado, sendo geralmente descartada em aterros. Isso mostra a necessidade de pesquisas que investigam formas de reinserir o resíduo gerado, na cadeia de produção industrial.

De acordo com Zaparte (2020), a CCA é composta por de 80 a 90% de sílica, quando tiver característica amorfa, terá efeito pozolânico e em contato com água e com óxido de cálcio se torna cimentícia passando a ter valor aglomerante, formando compostos cimentantes. Nisso tem-se a importância da incorporação da CCA em argamassas e concretos, o uso do resíduo possibilita a despoluição do meio ambiente, a partir do reaproveitamento de um material residual sem valor agregado e também permite a redução do consumo do cimento e, conseqüentemente, no custo de compósitos cimentícios.

Ao seu encontro, Menezes *et al.* (2009), ainda afirmam que adições pozolânicas podem substituir parte do cimento na mistura, levando a menor gasto energético, promovendo melhoria nas propriedades mecânicas e ainda ao fim de sua ação química, as adições também passam a atuar fisicamente (efeito *filler*) melhorando a trabalhabilidade da pasta.

A argamassa autonivelante é um material de base cimentícia com propriedades como elevada fluidez e potencial de se auto adensar, mantendo a coesão e homogeneidade, sendo estas características responsáveis por garantir uma rápida e fácil aplicação, proporcionando ao material grande relevância no setor da construção civil, dada sua característica de agilizar os processos construtivos.

De acordo com Nakakura e Burcher (1997), a argamassa autonivelante assegura que sejam evitados alguns defeitos que ocorrem em contrapisos usuais como: elevada espessura e peso próprio e o alto índice de patologias decorrentes de descolamentos, fissuração, ondulações e desníveis. Além disso, o autor, também

aponta que o sistema autonivelante tem algumas vantagens com relação ao método usual, como: maior produtividade, visto que a aplicação é rápida, tempo para execução reduzido e processo de cura mais rápido.

No entanto, Santos (1997) afirma que, novos materiais devem visar bom desempenho técnico e funcional, mas também ambiental, uma alternativa é o uso de resíduos agrícolas. O que corrobora este estudo, pois a argamassa autonivelante ainda que proporcione melhora física e produtiva ao processo construtivo, exige um elevado consumo de cimento. Logo, a adição da CCA busca a viabilidade da incorporação de resíduos agrícolas na produção de compósitos cimentícios.

Como muitas pesquisas trazem a análise das propriedades de argamassas e concretos com substituição parcial do cimento pela CCA com tratamento prévio de moagem e queima, esta pesquisa, objetiva originalmente, investigar a atuação da CCA originada de um processo de queima sem controle de temperatura e sem previa moagem, oferecendo uma solução de curto prazo à indústria geradora do resíduo.

Como na região de origem da cinza utilizada no trabalho, não há a disponibilidade de jazidas de areia natural e a empresa produz, aproximadamente, 20 toneladas diárias de CCA, optou-se por estudar a substituição parcial da areia por ser este um recurso finito e de menor disponibilidade.

Desta forma, o estudo foi realizado com argamassas autonivelantes que tiveram porcentagem de redução de cimento e de substituição parcial da areia natural, de tal maneira que ao final do mesmo, fosse possível verificar as contribuições do resíduo com relação a absorção, ao índice de vazios e à aderência da argamassa ao substrato de concreto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Argamassa autonivelante

2.1.1 Definição

De acordo com a norma C1708 – “Argamassas autonivelantes compostas de cimento hidráulico” (ASTM, 2016), argamassa autonivelante pode ser definida como argamassa contendo cimento hidráulico que, no estado fresco, apresenta fluidez suficiente para alcançar nivelamento a partir da força gravitacional.

A argamassa autonivelante é um material de base cimentícia com propriedades autoadensáveis como homogeneidade e fluidez, além de ser bombeável e fácil de aplicar, utilizada exclusivamente em superfícies horizontais (RUBIN, 2015).

Para Martins (2009), uma argamassa pode ser classificada como autonivelante, se o material tiver capacidade de preencher os vazios da pasta, de maneira a se adensar unicamente sob efeito da gravidade e sua própria capacidade de fluxo, sem apresentar indícios de separação da pasta. A autora ainda aponta que é essencial que as misturas autonivelantes apresentem “equilíbrio entre alta fluidez com grande mobilidade e moderada viscosidade e coesão entre as partículas que constituem a mistura” (MARTINS, 2009, p.33).

Em pesquisa a respeito de concretos autoadensáveis, Tutikian e Dal Molin (2008), afirmam que a única ferramenta utilizada para compactar e adensar uma mistura autoadensável deve ser seu próprio peso, ou seja, o adensamento deve ocorrer devido a ação da gravidade sobre a massa cimentícia.

Sendo assim, a argamassa autonivelante, do ponto de vista reológico, é uma mistura em que as partículas componentes se distribuem uniformemente no meio líquido, conferindo ao material propriedades de compósito sólido/líquido (MARTINS, 2009). De acordo com a EFNARC (2002), normativa europeia de concreto autoadensável, uma mistura só pode ser chamada de autoadensável se proporcionar simultaneamente capacidade de preenchimento ou fluidez, habilidade passante ou coesão – característica que garante que a mistura escoie sem perder suas propriedades – e resistência à segregação.

A argamassa autonivelante é um material que requer maior controle da composição, os materiais utilizados para a formulação devem possuir características e teores tais quais garantam que seja alcançada a fluidez intrínseca a pasta. Visto que, o principal objetivo da argamassa autonivelante é evitar que apareçam defeitos decorrentes de falhas de aplicação ou técnicas inadequadas de moldagem (CHAVES, 2019).

Mehdipour *et al.* (2013) relatam que pastas autonivelantes devem apresentar elevada estabilidade para serem homogêneas, de forma a proporcionar ao produto final bom desempenho estrutural, durabilidade e resistência. À vista disso, Carvalho (2015), afirma que as argamassas autonivelantes são classificadas como materiais de alto-desempenho, com rápido espalhamento e auto consolidação, sem indícios de segregação.

2.1.2 Materiais componentes da argamassa autonivelante

Argamassas autonivelantes podem ser dosadas de forma muito semelhante a concretos autoadensáveis, de acordo com Silva (2016), os dois materiais tem como preceito o adensamento exclusivo pela ação da gravidade, isso porque, nos dois compósitos é feito o uso de aditivos e adições minerais para modificar a estrutura cimentícia da pasta.

Ao dosar argamassas autonivelantes os principais fatores a serem observados são a proporção de água/materiais secos e os tipos de aditivos químicos utilizados, ambos devem ser escolhidos de forma a garantir que a argamassa em seu estado fresco seja compactada sem auxílio de aparelhos e sem que surjam indícios de segregação (FELEKOGLU *et al.*, 2006).

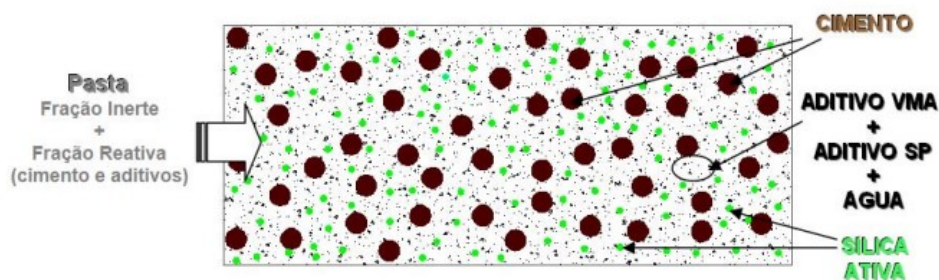
No Brasil, ainda não existe normativa que trate sobre argamassas autonivelantes, muitas pesquisas se desenvolvem a partir de adaptações de normas nacionais existentes ou internacionais. Quanto ao método de dosagem, o mesmo é observado, as bibliografias estudadas apontam para diversas formas de desenvolver uma formulação de argamassa autonivelante com bom desempenho. Pileggi (1996 apud MARTINS, 2009), apresentou algumas exigências, que devem ser levados em consideração, ao dosar argamassas autonivelantes.

- Distribuição granulométrica: a quantidade e tamanho das partículas que compõem a mistura afetam diretamente a reologia das pastas de argamassas autonivelantes, visto que no estado fresco a argamassa se apresenta como uma suspensão reativa de partículas. Além disso, a parcela de finos (cimento e adições) e a fração graúda (agregados), são componentes que interagem diferentemente na argamassa.
- Utilização de agentes dispersantes: é necessário o uso de agentes dispersantes, visto que ambas as parcelas da mistura, fina e graúda, sofrem com forças de superfície e forças mássicas, respectivamente.
- Condições de mistura: a matriz de pasta autonivelante é formada pelos aglomerantes, adições minerais, água e aditivos, é necessário alto controle ao dosar tais componentes, visto que matriz em excesso aumenta a viscosidade da argamassa, impedindo o fluxo da mistura e matriz em quantidade menor aumenta a fluidez da argamassa e o choque entre agregados e, ainda, reduz a tensão do escoamento, comprometendo a aplicação do material.

Como já citado anteriormente, a formulação de argamassas autonivelantes é semelhante à de argamassas convencionais, a principal diferença se encontra na necessidade de uso de aditivos químicos e minerais (entre 10% a 15% da massa total) para que sejam melhoradas as características reológicas no estado fresco e as propriedades físico-mecânicas no estado endurecido.

De acordo com Martins (2009) a microestrutura da argamassa autonivelante é basicamente formada por agregados miúdos e pela pasta cimentícia, formando uma mistura sólida/líquida. A pasta cimentícia pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1: Microtextura da pasta autonivelante.



Fonte: Martins (2009)

Rubin (2015) ainda aponta que é necessário cuidado na escolha de materiais que irão compor a mistura autonivelante, tendo em vista a melhora do esqueleto granular e da composição, para isso devem ser analisadas tanto as propriedades físicas (forma, morfologia, índice de finura, entre outras características), quanto as propriedades físico-químicas (reações de hidratação e interações entre os materiais), dado que, essas afetam diretamente o desempenho do produto.

Em conformidade, Mendes, Effting e Schacow (2020), dosaram argamassas autonivelantes com excelente trabalhabilidade, com diâmetro de espalhamento superior a 125 mm (mini troncocônico), sem indícios de segregação, a partir da combinação entre agregado miúdo (areia), adições minerais (RCMG e fíler calcário) e aditivos químicos (superplastificante e modificador de viscosidade). Os autores afirmam que o uso de finos e aditivos químicos é essencial para a produção de argamassas autonivelantes que apresentem maior espalhamento, consequentemente melhor trabalhabilidade, mantendo a coesão, homogeneidade e suprimindo a segregação da pasta.

2.1.2.1 Cimento

Para a produção de argamassas autonivelantes não é necessário utilizar algum tipo específico de cimento, geralmente são empregues cimentos mais usualmente comercializados, no Brasil o cimento mais comumente aplicado é o cimento Portland.

Mehta e Monteiro (1994), definem CP como um material pulverulento e aglomerante hidráulico, composto por silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio que em contato com a água hidrata-se e depois de endurecido não se decompõe, nem com nova presença de água.

A EFNARC (2002) ainda destaca que todos os tipos de cimentos podem ser utilizados em pastas autonivelantes e que a escolha do material depende principalmente das características desejadas como resistência e durabilidade. A normativa, no entanto, informa que deve ser ter cuidado com o consumo de cimento, a faixa ideal está entre 350 e 450 kg/m³, mais de 500 kg/m³ de cimento pode favorecer o surgimento de fissuras, enquanto consumo menor que 350 kg/m³ de cimento reduz a quantidade de finos na mistura, sendo necessário adicionar outros finos.

O cimento utilizado em argamassas autonivelantes deve possuir elevada finura e ter boa capacidade de adsorver à aditivos químicos, como superplastificantes (MARTINS, 2009; CHAVES, 2019). No entanto, Silva (2016) ressalta que cimentos de alta finura aceleram o processo de hidratação da mistura, podendo acarretar em retração da pasta e consequente fissuração.

A argamassas autonivelantes demandam de maior quantidade de finos, com o objetivo de aumentar a coesão da mistura, visto que é reduzida a tensão de escoamento e aumentada a viscosidade da pasta, sendo assim, cimentos de maior superfície específica são mais recomendados, mesmo que seja necessário ter mais controle da liberação de calor de hidratação e da retração (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Tutukian e Dal Molin (2008), também ressaltam que para melhorar a reologia da pasta, com relação a fluidez e enrijecimento da mistura, é indicado utilizar cimentos com teor de C_3A até 10%, teores maiores resultam em perda de fluidez e rápido enrijecimento, dificultando a aplicação do material.

2.1.2.2 Agregado miúdo

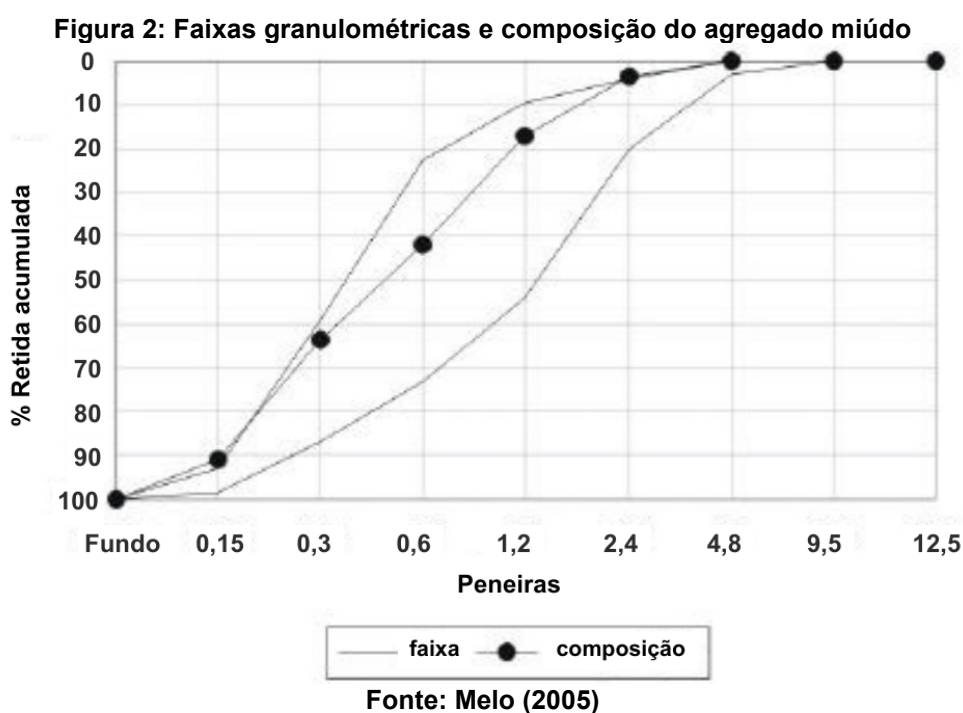
Para Chaves (2019), a escolha do agregado miúdo interfere diretamente na fluidez da argamassa, à vista disso, deve ser levado em consideração a distribuição granulométrica do agregado miúdo, o mais indicado é utilizar areias naturais de granulometria fina. Agregados de granulometria mais grossa, podem ser obstáculos à viscosidade da argamassa, já agregados de granulometria fina melhoram o fluxo da pasta, pois funcionam como lubrificantes (KATSIADRAMIS; SOTIROPOULOU; PANDERMARAKISA, 2010).

Além disso, para alcançar melhor fluidez é preferível que seja empregado em argamassas autonivelantes agregados miúdo retirados de fontes naturais, estes possuem formato arredondado e textura lisa (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Os autores também afirmam que quanto menor o módulo de finura do agregado miúdo melhor a coesão de misturas autonivelantes.

Assim como é indicado o uso de areias naturais, outra característica importante do agregado miúdo para argamassas autonivelantes é quanto a sua

dimensão. Muitas pesquisas adotam formulações cuja dimensão máxima do grão é de 2 mm (LIBRE; KHOSHNAZAR; SHEKARCHI, 2010; RIZWAN; BIER, 2012).

Melo (2005), ainda observou em sua pesquisa que a granulometria dos sólidos que compõe misturas autoadensáveis é importante para que sejam alcançadas as propriedades desejadas. O uso de faixas granulométricas adequadas pode melhorar o preenchimento de vazios, de forma que partículas menores preencham o espaço entre partículas maiores, sem prejudicar o espaçamento entre as mesmas (MELO, 2005). A Figura 2 mostra a faixa granulométrica ideal para os agregados miúdo (areia média e areia fina) e também a faixa granulométrica da composição de agregado miúdo (20% areia fina e 80% areia média).



2.1.2.3 Aditivos químicos

O uso de aditivos químicos na indústria da construção civil já se torna um item indispensável para a dosagem de argamassas e concretos. Os diversos critérios de desempenho exigidos atualmente fazem com que sejam buscadas soluções alternativas para alcançá-los.

Para o desenvolvimento de dosagens de pastas autonivelantes o uso de aditivos é imperativo para que se possa atender aos requisitos reológicos mínimos, os principais aditivos utilizados são o superplastificante e o modificador de viscosidade.

O objetivo do primeiro é promover melhor fluidez e reduzir a tensão de escoamento da pasta, já o segundo, tem como principal função melhorar a estabilidade da pasta (MARTINS, 2009).

Os aditivos superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, enquanto os aditivos modificadores de viscosidade oferecem um aumento da coesão, prevenindo a exsudação e segregação do concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008, p.35).

De acordo com Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010), a relação entre fluidez e estabilidade é inversamente proporcional, os autores apontam que conforme a fluidez aumenta, é verificada a perda de estabilidade da mistura, porém, as características autoadensáveis da pasta cimentícia dependem do bom desempenho, simultâneo, da fluidez e da estabilidade.

Não somente, os autores apontam que para evitar perda de estabilidade e desempenho mecânico, o mais aconselhável é o uso de maiores teores de superplastificante como uma forma melhorar a fluidez, outra solução é o uso de aditivos modificadores de viscosidade, estes, no entanto, reduzem a fluidez da amostra exponencialmente, mesmo quando aplicados a baixos teores. Com isso, os autores aconselham que em dosagens de concretos e argamassas seja preferível corrigir a fluidez e estabilidade por meio de diferentes relações a/c e teores de superplastificante.

Em conformidade ao citado, Silva (2016), verificou em sua pesquisa a sensibilidade de argamassas autonivelantes, mediante as alterações nas formulações de aditivos superplastificantes e modificador de viscosidade. A autora percebeu que mesmo leves aumentos nos teores de aditivos levavam a grandes prejuízos na coesão e estabilidade da pasta.

Martins (2009), apontou teores de aditivos que melhor alcançaram com o esperado, uma pasta fluida e sem segregação, para o VMA a autora identificou que pastas com o teor de 0,9% de VMA e 0,5% de SP apresentaram os resultados mais satisfatórios. Ainda assim, foi observado que a dosagem de VMA é mais sensível, pequenos aumentos podem resultar em elevada perda de fluidez, ao utilizar 1,1% de VMA a pasta perdeu suas características autonivelantes.

Mendes (2019), obteve pastas com melhor característica autonivelante ao utilizar 0,33% de SP e 0,67% de VMA. Silva (2016), avaliou formulações para argamassas autonivelantes, para a dosagem de aditivo superplastificante e

modificador de viscosidade verificou que a pasta de referência mais apropriada foi dosada com 0,4% e 0,75% de SP e VMA, respectivamente, já a pasta com substituição de 30%, em massa, de cimento pela cinza volante precisou de 0,6% de SP e 1,07% de VMA.

Oliveira (2019), analisou formulação de argamassa autonivelante com substituição parcial de agregado miúdo por agregado reciclado de concreto, para a argamassa de referência a dosagem mais eficaz possuía teor de 0,5% de SP e 0,77% de VMA e para as argamassas teste foi fixado o teor de VMA, porém foram reduzidos os teores de SP para 0,3%, 0,4% e 0,4% para as argamassas com substituição de 25%, 50% e 75% da areia, respectivamente.

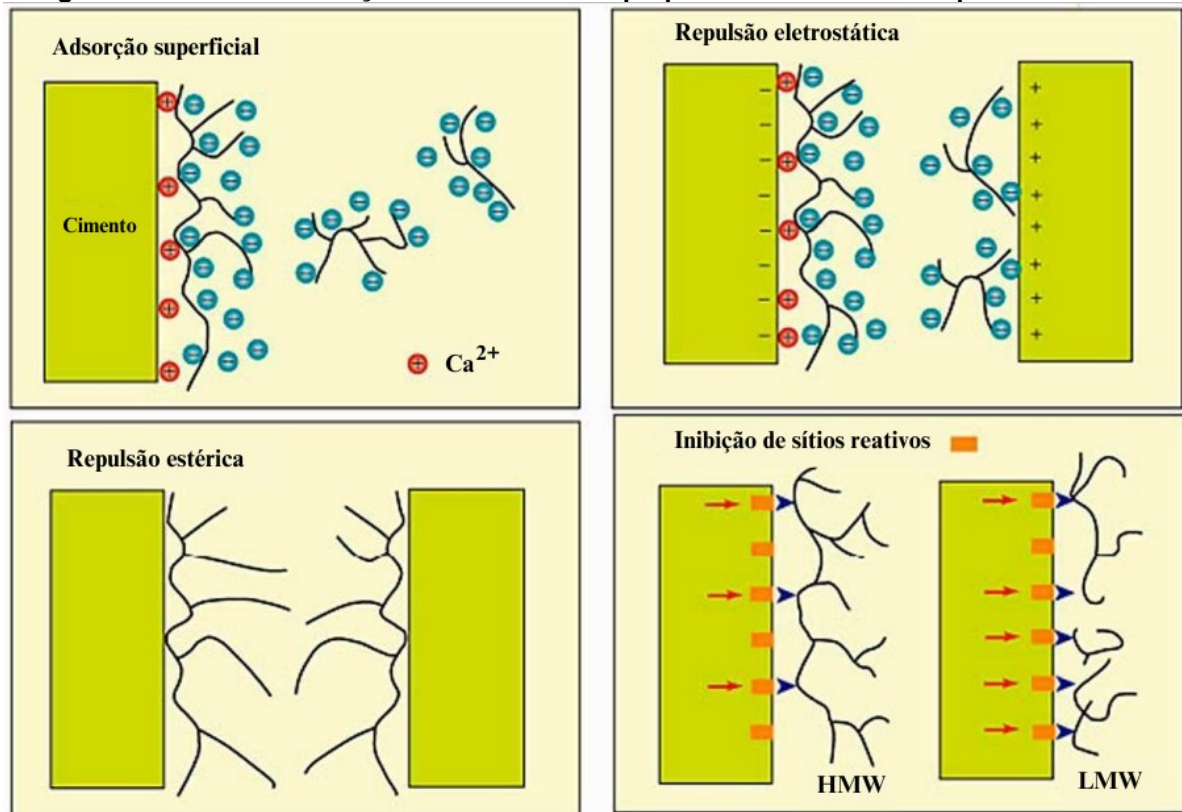
2.1.2.3.1 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante atua, sobretudo, na dispersão de grãos de cimento. Em decorrência do seu processo de fabricação os grãos de cimento são sujeitos à ação das forças de Van der Waals (forças eletroestáticas entre regiões de cargas opostas), o que gera a tendência dos grãos se aglomerarem, essa disposição acarreta na perda da fluidez e aumento da viscosidade da pasta, visto que a parte da água de amassamento adicionada à mistura fica aprisionada nos flocos de grãos de cimento aglomerado (MONTE, 2003 apud SILVA, 2016).

Os superplastificantes podem ser divididos em quatro categorias, são estas: “condensados sulfonados de melamina-formaldeído; condensados sulfonados de naftaleno-formaldeído; lignossulfonatos modificados; e outros, como ésteres de ácido sulfônico e ésteres de carboidratos” (NEVILLE, 2016, p.271).

Para pastas autonivelantes o mais indicado é o uso de superplastificantes de terceira geração, os policarboxilatos, esses são mais eficientes em compósitos cimentícios por acelerar o processo de dispersão e desfloculação das partículas de cimento (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). A Figura 3 apresenta a ação do superplastificante a base de policarboxilatos nas partículas de cimento.

Figura 3: Mecanismo de ação de um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos



Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008)

Martins (2009), explica que o superplastificante atua quimicamente, junto ao sistema de partículas de cimento, a partir da repulsão eletroestática, ou seja, o SP faz com as partículas de cimento se dispersem, facilitando que seja alcançada trabalhabilidade sem ser necessário adicionar mais água.

De forma resumida os principais efeitos dos superplastificantes, conforme Neville (2016), são:

- Aumento da trabalhabilidade para uma mesma relação água/cimento, sem perda de coesão;
- Aumento de resistência, devido a possibilidade de reduzir, significativamente, o consumo de água;

Ao avaliar a influência de aditivos químicos em argamassas auto consolidantes, Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010), verificaram que os resultados em pasta com 1% de aditivo superplastificante, eram equivalentes a um acréscimo de 17% na relação água/cimento. Já Carvalho, Cheriaf e Rocha (2018), atingiram argamassas autonivelantes com melhor desempenho para teores de SP até 0,40%, ao testarem teores de 0,45% e 0,50%, os autores perceberam que as argamassas passaram a apresentar indícios de segregação e exsudação.

2.1.2.3.2 Aditivo modificador de viscosidade

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2008, p. 39), os aditivos modificadores de viscosidade - *viscosity modify admixture* (VMA), “são produtos à base de polissacarídeos com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base inorgânica”.

O VMA é utilizado para garantir melhor viscosidade na mistura cimentícia, o aditivo age, formando uma rede que apreende a água, mantendo as partículas finas em suspensão. Tal ação promove melhora na coesão da pasta, evitando o surgimento de segregação e exsudação (MARTINS, 2009).

Além disso, o uso do VMA é uma solução para dosagens de argamassas e concretos com pouca uniformidade nas quantidades de agregados e relação água/cimento, ou seja, o aditivo funciona de maneira semelhante a adição de finos na mistura, por isso pode ser trabalhado em substituição a estes para melhorar a estabilidade da pasta (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Martins (2009, p. 43) ainda cita alguns dos principais efeitos do VMA, são eles:

- “Flexibilidade na escolha de materiais e procedimentos de lançamentos;
- Obtenção de níveis de fluidez que fazem com que o concreto seja capaz de vencer grandes distâncias horizontais;
- Melhoria da homogeneidade na mistura;
- Permanência da coesão durante queda livre”.

Em sua pesquisa, Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010), identificou que o aditivo VMA tem grande influência sobre a estabilidade de argamassas autonivelantes, prevenindo o surgimento de segregação, exsudação e o bloqueio de fluxo através de seções estreitas. No entanto, o autor também verificou que o uso de 1% de VMA pode acarretar em uma redução de 30% no espalhamento da mistura e que porcentagem de VMA acima de 1,5% não apresenta efeitos relevantes sobre a fluidez da pasta, enquanto maiores teores de VMA podem resultar em argamassas de péssima reologia (LIBRE; KHOSHNAZAR; SHEKARCHI, 2010; MARTINS, 2009).

O efeito do VMA na estabilidade de misturas cimentícias parece ser mais dominante em maiores relação água/cimento. Por exemplo, a adição de VMA em 1% da massa de cimento nas misturas com relação água/cimento de 0,55, levou a uma diminuição do índice de segregação de 159% para 83% (LIBRE; KHOSHNAZAR; SHEKARCHI, 2010, p.1265).

Sendo assim, aditivo VMA é utilizado para melhorar a homogeneidade, a estabilidade e a resistência a segregação da pasta, para isso o VMA atua de duas formas: adsorção na superfície das partículas finas ou dispersão em água, de forma a garantir viscosidade moderada da pasta. Ou seja, as ligações químicas do aditivo aprisionam a água e conservam as partículas finas suspensas, garantido a coesão da argamassa (MARTINS, 2009).

2.1.2.4 Adições minerais

As adições minerais, são materiais resultantes de um processo industrial ou de um material natural beneficiado, são finamente moídas ou finas de origem, devendo ser, também, insolúveis. As adições minerais são utilizadas em compósitos cimentícios com objetivo de melhorar as propriedades no estado fresco, como aumentar a coesão e também no estado endurecido, ampliando a resistência mecânica, química e a durabilidade. As características das adições e consequentemente sua eficácia dependem do processo de obtenção, da composição química, mineralogia, do grau de amorficidade, da granulometria, da quantidade utilizada e das condições de cura (BAUER, 2019).

Bauer (2019), também cita que as adições minerais podem ser classificadas com base na sua ação físico-química em três grupos: pozolânico, material cimentante e *filler*. Analogamente, Tutikian e Dal Molin (2008), apontam que as adições minerais podem atuar de duas formas:

- Efeito químico: garante as pastas melhor desempenho mecânico e durabilidade, pois as adições minerais podem reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), composto frágil e solúvel, formado pela hidratação do cimento. Da reação deriva o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), composto resistente, que pode ocupar os vazios da pasta.
- Efeito físico: fisicamente as cinzas podem atuar de três formas, (1) efeito *filler*, (2) refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação e (3) alteração da microestrutura da zona de transição. O primeiro promove o preenchimento dos vazios, levando a um aumento na densidade da pasta, o segundo promove um aumento nos pontos de nucleação e o terceiro promove a redução da água livre, retida pelos agregados.

A incorporação de adições minerais em argamassas ou outros materiais a base de cimento é fundamental para alcançar melhor e mais abrangente desempenho e ainda reduzir os custos do produto (WU *et al.*, 2021).

De acordo com Rizwan e Bier (2012), as adições minerais são conhecidas como matérias-primas secundárias ('secondary raw materials' – SRMs), estes materiais são parcelas importantes na composição de argamassas autonivelantes, em que é necessário serem alcançados altos índices de deformação e, ainda, elevada resistência a segregação.

Ao verificar a influência de adições minerais em argamassas autonivelantes, Rizwan e Bier (2012) perceberam que o uso de cinza volante nas argamassas permitiu redução no teor de superplastificante para uma mesma trabalhabilidade. Os autores atribuíram tal resultado às características do material, a cinza volante é um material com superfície interna esférica e oca e com morfologia de superfície vítrea, enquanto o fíler calcário, material cujas partículas são irregulares, ásperas e fragmentada, gerou maior atrito interno durante a mistura, requerendo maiores quantidade de SP para trabalhabilidade similar a anterior.

Ademais, as adições minerais, quando adequadamente dosadas em argamassas autonivelantes, otimizam a demanda de água do sistema, teor de cimento, retração, calor de hidratação, adensamento e a microestrutura, como resultado o sistema autonivelante apresenta melhor resistência e durabilidade (CHAVES, 2019).

Martins (2009), averiguou que o uso de sílica ativa em substituição ao cimento em argamassas autonivelantes, provocou redução do espalhamento da mistura, esse resultado está relacionado com a menor área específica da adição, logo melhor preenchimento dos vazios na mistura e os espaços entre agregados e o produto de hidratação. Esse efeito densifica a matriz da argamassa e gera aumento da viscosidade, além disso a redução dos vazios auxilia no processo de hidratação da adição com a água e a reação com os aditivos.

Carvalho, Cheriaf e Rocha (2018), constataram que a substituição de cimento por fíler calcário, cinza pesada e resíduo de construção em teores superiores a 20% não traz resultados satisfatórios, visto que as argamassas autonivelantes apresentaram maiores índices de segregação e menor taxa de espalhamento. Os autores, identificaram que mesmo para teores de 10% e 15% substituição de cimento, o uso de adições minerais reduziu o espalhamento, em função do aumento na

porcentagem de finos na mistura, componentes que possuem maior área superficial específica e requerem maior quantidade de água para molhar a superfície de suas partículas e manter a fluidez.

O uso de adições minerais tem relação direta com o aumento da viscosidade em argamassas autonivelantes, a taxa de aumento na viscosidade depende da porcentagem de substituição da adição mineral ou da mistura inerte. Além disso, a proporção de mudança na viscosidade também depende do formato da partícula, da textura da superfície e da distribuição granulométrica da adição utilizada (FELEKOGLU *et al.*, 2006).

Paralelamente, Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010) alcançaram em sua pesquisa que o uso de fíler calcário e cinza volante aumentaram a fluidez da argamassa autonivelantes. Para o fíler calcário o aumento da fluidez foi observado nas misturas com menor relação água/cimento. Para a cinza volante, o aumento de fluidez da argamassa pode ser atribuído ao formato da partícula, as cinzas volantes possuem partículas de formato esférico que reduzem a fricção na interface do agregado e da pasta. No entanto, a influência das adições minerais na fluidez de argamassas autonivelantes é inferior aos aditivos químicos.

2.1.3 Propriedades das argamassas autonivelantes

2.1.3.1 Reologia

Felekoglu (2006), observou que todas as pastas de argamassas de reparo autonivelante, apresentavam comportamento de pseudoplástico, visto que para baixas taxas de deformação a pasta apresentava maior viscosidade, enquanto o comportamento fluido era visto para as altas taxas de deformação.

Como citado previamente, Martins (2009) definiu argamassa autonivelante sob o ponto de vista reológico como uma suspensão de partículas. Sendo assim, no estado fresco a quantidade e o tamanho das partículas que compõem a mistura influenciam diretamente as propriedades reológicas da argamassa, isso porque, tanto a parcela de finos (cimento e adições minerais) quanto a fração graúda (agregado miúdo) que arranjam a formulação de pastas autonivelantes interagem de maneiras muito diferentes entre si e cada um desses comportamentos afetam as propriedades

da mistura no estado fresco, o que requer maior cuidado ao dosar formulações autonivelantes.

Em outras palavras, o estudo das características no estado fresco de argamassas autonivelantes depende do entendimento de como as propriedades reológicas afetam o comportamento da pasta de cimento (parcela líquida) com os agregados (parcela sólida), visto que o fluxo da argamassa autonivelante depende da aplicação de tensões cisalhantes. Como a argamassa é uma suspensão de partículas, a composição, a proporção adicionada, a forma e a granulometria dos agregados e adições minerais influenciam na viscosidade da pasta, pois o aumento na quantidade de materiais indica que os choques entre as partículas também aumentarão, levando a maior resistência ao escoamento (MELO, 2015).

Outrossim, a compreensão das características reológicas dos compósitos cimentícios, como argamassas e concretos, depende de duas propriedades reológicas principais: tensão de cisalhamento e viscosidade aparente. Os parâmetros reológicos também influenciam diretamente o desempenho dos materiais no estado endurecido, principalmente para argamassas autonivelantes, que se comporta como fluido no estado fresco, à vista disso, o bom desenvolvimento das etapas de produção e aplicação da argamassa autonivelante depende de quanto controle se teve sobre as propriedades reológicas da pasta (CHAVES, 2019). Martins (2009), ainda destaca alguns pontos de principais influência da reologia sobre argamassas autonivelantes:

(1) as características de aplicação da argamassa autonivelante, requerem uma determinada reologia da argamassa, já que ela será aplicada com certa velocidade e altura, que não devem de forma alguma influenciar na perda de qualquer das suas características, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. A separação dos grãos (exsudação) também é um fenômeno que não poderá acontecer na hora da aplicação dessa argamassa; (2) a argamassa autonivelante deve atingir uma determinada consistência no instante da sua aplicação, de modo que sua viscosidade permita uma deformação apropriada pela ação do seu peso próprio; (3) outro fator importante é o espalhamento da nata sobre o substrato e a lona plástica, que obrigatoriamente deverá formar uma superfície plana, para receber o acabamento (MARTINS, 2009, p.63).

2.1.3.2 Trabalhabilidade

Nakakura e Burcher, em 1997, foram os precursores das pesquisas com argamassas autonivelantes no Brasil, em seu trabalho, os autores avaliaram a trabalhabilidade das argamassas com base na avaliação da consistência das

mesmas. A consistência é uma característica importante, a aplicação da argamassa autonivelante depende diretamente dessa propriedade, além disso, a partir da consistência é possível identificar a viscosidade necessária para que a argamassa possa se deformar pela ação de seu próprio peso. Uma argamassa autonivelante com boa consistência garante que o material se espalhará sobre o substrato com a planeza necessária para exercer sua função de regularização ou acabamento (NAKAKURA; BURCHER, 1997; MARTINS, 2009).

De acordo com Neville (2014) a trabalhabilidade não pode ser definida apenas em função de facilidade de lançamento ou da resistência segregação, a trabalhabilidade é muitas vezes dependente do tipo de adensamento adotado e também está relacionada com a consistência do produto, no entanto mesmo com trabalhabilidades diferentes, dois produtos podem apresentar a mesma consistência. Por essa razão o autor define como trabalhabilidade “a quantidade de energia interna útil necessária para produzir o adensamento completo” (NEVILLE, 2014, p.194).

Muitas bibliografias estudadas utilizam ensaios de espalhamento para quantificarem a trabalhabilidade de misturas. Carvalho (2022), resumiu em seu trabalho algumas das principais pesquisas sobre argamassas autonivelantes que trazem os limites de espalhamento para obter uma boa trabalhabilidade, conforme apresentado na Tabela 1. Na Tabela 2 são apresentados índices de consistência de outras bibliografias utilizadas nessa pesquisa.

Tabela 1: Espalhamentos mínimos e máximos para argamassas autoadensáveis e autonivelantes

Aparato	Espalhamento (mm)	Fonte	Argamassa
Tronco de cone	240 a 260	EFNARC (2005)	Autoadensável
Tronco de cone	234 a 395	Emoto e Bier (2007)	Autonivelante
Tronco de cone	250 a 270	Georgin <i>et al.</i> (2008)	Autonivelante
Tronco de cone	250 a 300	Barluenga e Olivares (2010)	Autonivelante
Tronco de cone	240 a 260	Katsiadramis (2010)	Autonivelante
Tronco de cone	253 a 347	Onishi e Bier (2010)	Autonivelante
Mini cilindro	125 a 150	ASTM C1708 (2016)	Autonivelante
Mini cilindro	130 a 150	Yang <i>et al.</i> (2016)	Autonivelante
Tronco de cone	270 a 310	Schaefer <i>et al.</i> (2017)	Autonivelante
Mini cilindro	150 a 160	Zhang <i>et al.</i> (2018)	Autonivelante
Tronco de cone	252 a 339	Anjos <i>et al.</i> (2020)	Autonivelante

Fonte: Adaptado de Carvalho (2022)

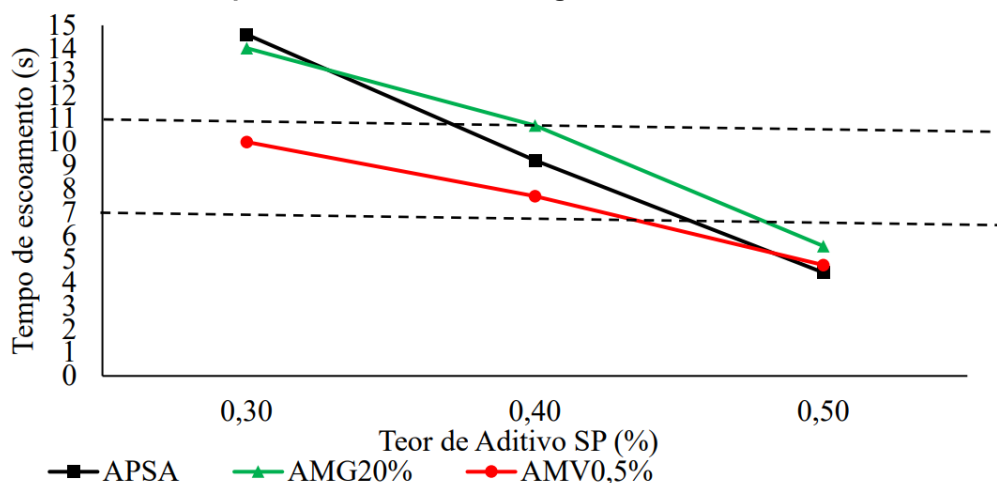
Tabela 2: Intervalos de espalhamento para argamassas autonivelantes

Aparato	Espalhamento (mm)	Fonte
Cilindro espanhol	250 a 350	Martins (2009)
Mini tronco de cone	240 a 270	Carvalho (2015)
Tronco de cone	Acima de 250	Tambara Júnior (2016)
Mini tronco de cone	240 a 260	Chaves (2019)

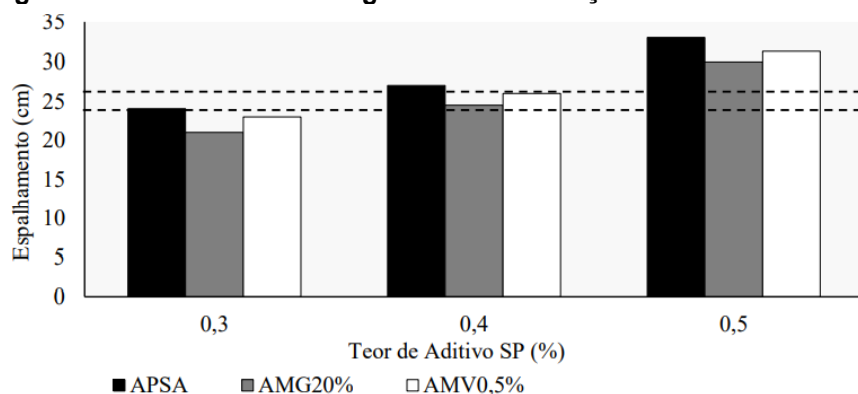
Fonte: a autora (2022)

A norma C1708 (ASTM, 2016) traz que o espalhamento é uma medida de capacidade de aplicação de argamassas autonivelantes, determinar uma faixa limite de espalhamento é imprescindível para utilizar estas argamassas, espalhamentos baixos não caracterizam uma argamassa autonivelantes, enquanto espalhamento altos causam perda das propriedades esperadas à argamassa. Estabelecer um espalhamento apropriado permite que sejam utilizadas quantidades de água adequada para avaliar as características físicas da argamassa.

Chaves (2019), verificou que argamassas autonivelantes que apresentam menor tempo de fluxo alcançam maiores espalhamentos, como apresentado nas Figuras 4 e 5. A autora verificou que o teor de SP é o principal fator de influência ao tempo de escoamento da argamassa e consequentemente seu espalhamento, as argamassas autonivelantes apresentam elevada sensibilidade aos teores de SP utilizados, para 0,4% de SP, as argamassas AMG20% (argamassa produzida com 20% de RBMG) E AMV0,5% (argamassa produzida com 0,5% de VMA) alcançaram as propriedades estabelecidas, já a argamassa APSA (argamassa produzida sem adição) superou o limite máximo de espalhamento definido, mesmo apresentado tempo de fluxo dentro dos limites e, ainda, apresentou sinais de exsudação.

Figura 4: Curvas de tempo de escoamento das argamassas em função do teor de aditivo SP

Fonte: Chaves (2019)

Figura 5: Consistência das argamassas em função do teor de aditivo SP**Fonte: Chaves (2019)**

A capacidade de argamassas autonivelantes manterem a fluidez ao longo do tempo está relacionada com as reações de hidratação, o tempo de pega e a capacidade de retenção de água, tais características estão vinculadas com a composição e as prioridades dos materiais utilizados. O uso de RBMG contribuiu para a retenção do fluxo na mistura, visto que o maior número de finos na mistura retém mais água de amassamento. O uso de VMA também contribuiu para uma maior retenção de fluxo, em vista de sua composição polimérica (CHAVES, 2019).

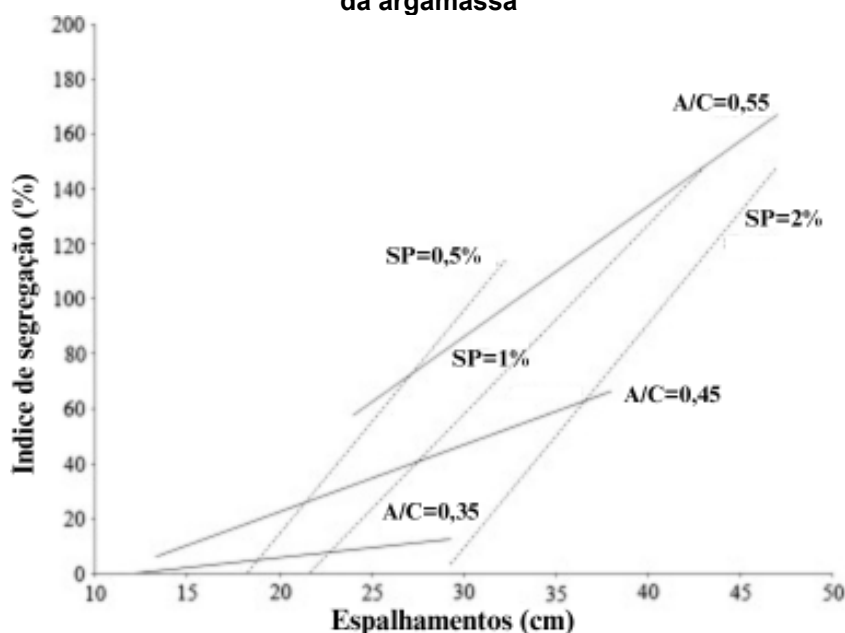
Salienta-se ainda que Mehdipour *et al.* (2016) ao avaliarem a estabilidade de concretos e argamassas autonivelantes, observaram que o metacaulim, a cinza volante e a relação água/cimento, em ordem de significância, foram os indicadores que mais alteraram o espalhamento da mistura. A cinza volante em substituição ao cimento aumentou a fluidez da mistura, suas partículas de formato esférico e superfície lisa reduzem o atrito interno na mistura. Enquanto o metacaulim em substituição ao cimento reduziu a fluidez da mistura, em decorrência de ter partículas três vezes menores que a cinza volante, ou seja, aumenta o teor de finos na mistura.

Do mesmo modo, Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010) notaram que o fator água/cimento e o teor de superplastificante têm grande influência sobre a fluidez de argamassas autonivelantes. Enquanto o aumento de 10% na relação água/cimento aumenta o espalhamento em 18%, a adição de 1% de SP, em relação a massa de cimento, acarreta em um aumento de até 30% na fluidez da mistura.

Todavia, os autores apontam que a fluidez de argamassas autonivelantes está ligada à estabilidade do material, melhor fluidez pode ser alcançada ao utilizar maiores relação água/cimento ou adicionando aditivo SP na mistura, porém o aumento na fluidez pode resultar em elevados índices de segregação. Observando a

Figura 6, a linha continua representa as amostras de argamassa em que foi variado o teor de aditivo SP para alterar a fluidez e a linha tracejada representa as amostras em que foi variada a relação água/cimento para modificar a fluidez. Por meio da inclinação das linhas, Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010), constataram que o aumento na relação água/cimento aumenta a fluidez ao mesmo tempo que reduz a estabilidade da mistura, visto que a inclinação das linhas tracejadas é maior.

Figura 6: Efeito da variação da relação água/cimento e SP na fluidez e no índice de segregação da argamassa



Fonte: Adaptado de Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010)

2.1.3.3 Coesão

As argamassas autonivelantes apresentam maior suscetibilidade ao surgimento de segregação e exsudação da pasta, tendo em vista a necessidade de ser um material de elevada fluidez. A coesão e a viscosidade são duas propriedades essenciais para argamassas autonivelantes não sofrerem perda de resistência mecânica em decorrência da segregação e da exsudação (MARTINS, 2009).

A estabilidade de argamassas autonivelantes é necessária para garantir a homogeneidade da mistura, de forma que não comprometa a aderência da argamassa ao substrato e também para assegurar bom desempenho de resistência mecânica e durabilidade (MEHDIPOUR *et al.*, 2013). Mehdipour *et al.* (2013), ainda definem estabilidade como a capacidade da argamassa autonivelante manter seus materiais

constituintes uniformemente distribuídos durante todos o processo de aplicação do material e após o termino da execução.

Deste modo, pode-se dizer que a estabilidade é a união de dois parâmetros a segregação estática e a segregação dinâmica, a primeira se refere a segregação dos agregados e da pasta quando a argamassa está em repouso, já a segunda ocorre quando a argamassa está sendo transportada ou lançada ao substrato. Diante disso, se encontra a importância do cuidado na escolha dos materiais e nas formulações para a composição de argamassas autonivelantes, para obter um material que atenda às especificações e ainda tenha estabilidade (MEHDIPOUR *et al.*, 2016).

Da mesma maneira, a normativa de concreto autoadensável, NBR 15823 – 1 – “Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco” (ABNT, 2017, p.3), define resistência a segregação como a “capacidade do concreto de permanecer com sua composição homogênea durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento”. A norma também define a segregação dinâmica como a segregação que ocorre com o lançamento do material, durante o fluxo e a segregação estática como o processo de sedimentação de agregados.

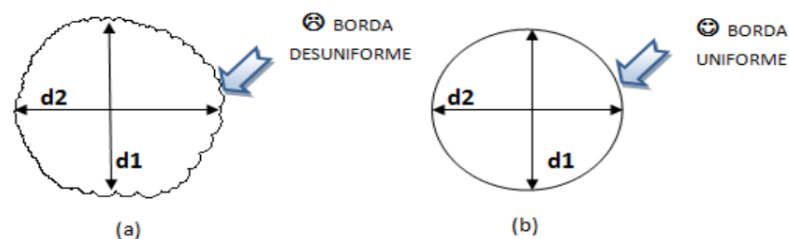
Por outro lado, a exsudação nas argamassas ocorre devido à separação da água da mistura, quando esta, se eleva à superfície do material, esse efeito pode comprometer o acabamento final da argamassa já executada e contribui para o surgimento de manifestações patológicas como manchas, redução de resistência mecânica superficial e perda de durabilidade (RUBIN, 2015).

Salienta-se então que a exsudação é um tipo de manifestação da segregação, decorrente da não fixação da água pelos componentes sólidos da mistura, levando a água a se elevar a superfície da argamassa, a exsudação depende, em grande parte, das propriedades do cimento (BAUER, 2019). Como falado, no processo de exsudação se forma uma película de água sobre a superfície do material, o que impede a evaporação de água da mistura, tendo como resultado uma camada porosa, fraca e de baixa durabilidade. Duas consequências indiretas da exsudação são a perda da aderência pasta-agregado e aumento da permeabilidade (BAUER, 2019).

Sendo assim, não existe uma maneira direta de avaliar a coesão de argamassas autonivelantes ou as consequências de uma argamassa com baixa coesão. Desse problema, Martins (2009) sugeriu uma forma de avaliar a coesão das

argamassas autonivelantes no estado fresco, a partir da avaliação visual da mistura após seu escoamento. A primeira maneira se refere a análise da borda, que pode ser dita como uniforme ou desuniforme, as bordas que se apresentam desuniformes tendem à segregação. A segunda maneira trata de uma análise visual quanto à segregação da pasta escoada, podendo ser com ou sem indícios de segregação de materiais secos e/ou água, chega-se à conclusão pela observação da espessura da pasta escoada, pastas de pequena espessura tendem à segregação e pastas com maior espessura indicam que a mistura tenha maior coesão e, portanto, menor tendência de segregar. As Figuras 7 e 8 exemplificam essas duas análises, respectivamente.

Figura 7: Análise visual da borda da pasta escoada. (a) Pasta com borda desuniforme, (b) Pasta com borda uniforme



Fonte: Martins (2009)

Figura 8: Análise visual da segregação da pasta escoada. (a) Pasta sem tendência a segregação, (b) Pasta com tendência a segregação



Fonte: Martins (2009)

A estabilidade e a trabalhabilidade são duas características que tem influência uma sobre a outra e precisam ser tratadas cuidadosamente. De acordo com Mehdipour *et al.* (2016), é necessário estabelecer um limite máximo de fluidez previamente a elaboração da argamassa autonivelante para assegurar boa estabilidade, caso a fluidez ultrapasse o limite, os riscos de instabilidade, como aparecimento de exsudação e segregação, aumentam. Já uma pasta muito viscosa

diminui a habilidade passante da argamassa, oferecendo maior resistência ao espalhamento da mistura (MARTINS, 2003).

[...] para uma relação água/cimento constante, aumentar o espalhamento (mini-slump) em um centímetro tende a aumentar o índice de segregação em uma média de 2,6%. Para um teor constante de superplastificante, usar maior relação água/cimento para aumentar espalhamento em um centímetro pode resultar em um aumento no índice de segregação em cerca de 7,5% (LIBRE; KHOSHNAZAR; SHEKARCHI, 2010, p.1270).

Ademais, Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010) avaliaram a estabilidade de argamassas autonivelantes a partir da determinação de índices de resistência a segregação e a exsudação e, também, correlacionaram a estabilidade com a dificuldade de passagem da argamassa sobre seções estreitas. Os autores perceberam que o uso de aditivo VMA foi a ferramenta mais eficiente para aumentar a resistência à segregação da argamassa autonivelante, o uso de finos pode aumentar levemente o risco de segregação e a relação água/cimento é o parâmetro que mais influencia na segregação dos agregados na mistura.

Do mesmo modo, os autores verificaram que o aumento na exsudação em pastas autonivelantes está relacionado com o aumento da relação água/cimento e do teor de SP, para maiores relação água/cimento, ao tentar melhorar a fluidez da pasta. Os autores citam que para misturas muito fluidas, a exsudação pode ser controlada utilizando aditivo VMA, ou adições minerais, como fíler calcário ou cinza volante (LIBRE; KHOSHNAZAR; SHEKARCHI, 2010).

2.1.3.4 Resistências mecânicas

No estado endurecido, as argamassas autonivelantes devem apresentar superfície pouco porosa, visto que o piso acabado pode ter contato direto com o meio externo, ficando exposta ao ataque de agentes agressivos, como intempéries ou produtos químicos. Além disso, as argamassas autonivelantes, quando utilizadas como material de acabamento final, sofrem com o desgaste por abrasão, resultante do tráfego de equipamentos, maquinários ou pessoas. A porosidade da argamassa autonivelante pode ser corrigida pelo refinamento dos poros, propriedade obtida por meio da adição de finos na composição da mistura (SILVA, 2016).

A norma Europeia de contrapisos, EN 13813 (UNE, 2002), estabeleceu algumas características e especificações, com base no tipo de aglomerante utilizado

na mistura, as quais os sistemas de contrapiso devem atender, a partir da identificação de quais ensaios físico-mecânicos são essenciais para o entendimento das propriedades no estado endurecido. A Tabela 3, traz as especificações para contrapisos de cimento.

Tabela 3: Material do contrapiso e ensaios aplicáveis

Material base do contrapiso	Resistência a compressão	Resistência à flexão	Resistência ao desgaste “ Bohme ”	Resistência ao desgaste “ BCA ”	Resistência ao desgaste por rodadura	Dureza superficial	Resistência a penetração	Resistência ao desgaste por rodadura em solo	Tempo de pega	Retração e inchamento	Consistência	Valor de pH	Módulo de elasticidade	Resistência ao impacto	Resistência à tração
Cimento	N	N	N ^a (um dos três)	O	-	O	O	O	O	O	O	O	O	O ^a	O

Legenda: (N) Normativa; (O) Opcional onde seja relevante; (-) Não relevante; (^a) Somente para pastas autonivelantes utilizadas em superfícies de desgaste.

Fonte: Adaptado de EN 13813 (UNE, 2002)

A norma de contrapisos não estabeleceu limites para resultados esperados e necessários a argamassas de contrapiso à base de cimento. Nakakura e Burcher (1997), propuseram em sua pesquisa alguns resultados limites para o desempenho mecânico de argamassas autonivelantes, tendo como base a norma brasileira de pisos.

- Resistência a compressão: 25 a 35 MPa;
- Resistência à tração na flexão: 8 a 11 MPa;
- Resistência ao arrancamento por tração (aos 28 dias de cura): para pisos residenciais deve ser de 1 MPa, para pisos de locais públicos e indústrias leves deve ser de 2,0 MPa e para pisos industriais submetidos à ação de rodas maciças de carregadeiras: > 3,0 MPa;
- Resistência à abrasão (pelo método de ensaio de abrasão na máquina de Böhme): 6,0 cm³/50 cm² ou 1,2 mm de espessura.

De acordo com Silva (2016), um dos principais problemas vistos em argamassas autonivelantes são o aparecimento de fissuras, decorrentes de variações dimensionais e volumétricas do material que provocam o fenômeno da retração. As

fissuras deixam a superfície da argamassa ainda mais exposta ao ataque de agentes agressivos. A autora aponta que uma solução para o controle da retração e da fissuração em argamassas autonivelantes é o uso de fibras poliméricas ou uso de aditivos químicos redutores de retração.

Em 2001, foi lançado pela Federação Europeia para Construções Específicas de Sistemas Químicos e de Concreto, um documento que unificou as especificações de qualidade e requisitos numéricos para pisos cimentícios autonivelantes modificado por polímeros (EFNARC, 2001). A Tabela 4 traz os requisitos da EFNARC (2001).

Tabela 4: Requisitos de desempenho da EFNARC para pisos cimentícios autonivelantes

Classificação conforme uso pretendido	Características de desempenho	Método de ensaio especificado	Requisitos
A	Resistência à compressão	EN 13892 - 2	≥ 20 MPa
A	Resistência a flexão	EN 13892 - 2	≥ 5 MPa
A	Resistência à abrasão	EN 13892 – 4 (BCA)	$\geq 0,2$ mm de desgaste por ano
A	Resistência de arrancamento ao substrato	EN 1542, usando como referência EN 1766 para substratos de concreto (relatar a área de ruptura)	$\geq 1,0$ MPa
A	Resistência ao impacto	ISO 6272 (quando ligado a uma superfície de concreto de acordo com a EN 13892-1)	≥ 4 Nm
B	Consistência (para misturas bombeadas)	EN 13454-2 ou EN 12706	≥ 220 mm ≥ 130 mm
B	Resistência ao escorregamento (molhado)	EN 13036-4 (Pêndulo de deslizamento)	≥ 40 , quando testado molhado
B	Permeabilidade ao vapor da água	EN 12086	≤ 4 g/(m ² .d)
Classificação para uso pretendido: A – Requisito obrigatório para todas utilizações previstas – métodos de testes padrão e limites de desempenho são especificados. B – Exigência especial para situações particulares – métodos de teste padrão é especificado e os limites de desempenho especificados ou o resultado declarado no pedido			

Fonte: Adaptado de EFNARC (2001)

Vale ressaltar que existe uma normativa americana para argamassas autonivelantes que estabelece alguns requisitos quanto as propriedades do material no estado fresco e no estado endurecido. A Tabela 5, apresenta os requisitos de resistência mecânica de acordo com a norma C1708 (ASTM, 2016).

Tabela 5: Resistências mecânicas para argamassas autonivelantes

Resistência	1 dia	S_d	7 dias	S_d	28 dias	S_d
À flexão (MPa)	4,51	1,19	7,45	2,43	-	-
À compressão (MPa)	21,76	7,30	32,01	7,04	39,15	9,36

Fonte: Adaptado de ASTM C1708 (2016)

Rizwan e Bier (2012), verificaram que as resistências à compressão e à flexão de argamassas autonivelantes com 20% de substituição, em massa, de cinza volante por SRMs (sílica ativa e CCA amorfa), melhorou com relação as misturas de referência com 100% de cinza volante, em relação a massa de cimento. Os autores observaram que o resultado de elevar as resistências mecânicas está relacionado com efeito de refinamento dos poros e, também, devido a pozolanicidade das matérias-primas secundárias empregues.

2.2 Cinza de casca de arroz

2.2.1 Produção da cinza da casca do arroz

Atualmente o arroz é um dos cereais mais consumidos no mundo, sendo que o Brasil se classifica na décima primeira posição no ranking mundial em produção de arroz (USDA, 2022). Conforme dados da *United States Department of Agriculture* a produção de arroz o Brasil atingiu 730 milhões de toneladas de arroz na safra de 2022/23 (USDA, 2022).

Olivo (2020) destaca que o beneficiamento do arroz resulta em três subprodutos: o farelo, os grãos fragmentados e a casca de arroz. A CA é um resíduo pouco nutritivo, caracterizada por possuir superfície irregular e abrasiva e por ser um material resistente a degradação natural, permanecendo inalterada por longos períodos, tornando-se um problema ao meio ambiente, em vista de elevado teor de carbono em sua composição (SILVA, 2020).

Sendo assim, a CA não possui valor comercial, visto que é um material de maior dureza, mais fibroso e abrasivo, no entanto, tem elevado poder calorífico, produzindo até 16720 kJ/kg, por isso boa parte do subproduto é empregue como fonte alternativa de calor para a secagem do cereal em usinas de beneficiamento do grão (DELLA; KUHN; HOTZA, 2005).

O processo de queima da CA gera um resíduo, a cinza da casca de arroz, material que apresenta em sua composição até 90%, em massa, de sílica amorfa se processo de queima da mesma for controlado, além de que quando moída a CCA pode ter efeito semelhante à de sílicas ativas (ISAIA *et al.*, 2017a).

Para Mehta e Monteiro (1994), a cinza gerada de queima não-controlada em fornos industriais ou de queima a céu-aberto, pode apresentar em sua composição minerais de sílica não reativa, como a tridimita e a cristobalita, esse material para ter potencial pozolânico precisa ser moído em partículas muito finas, outra forma de obter cinza reativa é a partir de um processo de combustão controlado, para manter o material em seu estado amorfo.

Dalla, Khun e Hotza (2005), ainda apontam que mesmo a CCA vinda direto de um processo de beneficiamento de arroz, pode ter grande potencial de ser uma sílica ativa, apenas sendo submetida a simples processos de queima e moagem do material. Os autores ainda citam que a produção de sílica a partir de um resíduo agroindustrial, soluciona o problema da poluição provocada pela deposição incorreta do resíduo no meio ambiente e também gera um novo material com alto valor agregado.

No mercado atual, a maior parte da cinza da casca de arroz produzida é resultado da queima da casca de arroz sem controle de temperatura, resultando em um material sem as características consideradas apropriadas para utilizar o material em composições cimentícias, contribuindo para o descarte do material (ISAIA *et al.*, 2017a).

Santos (1997) relatou que muitas pesquisas não apontam tratamentos ideais com a CCA para atingir melhores resultados, além de que, segundo o autor, não é possível afirmar que a CCA residual não apresente pozolanicidade, pois são muitos os fatores que influenciam na composição da cinza.

2.2.2 A adição da cinza da casca de arroz em dosagens de concretos e argamassas

Della, Khun e Hotza (2005), avaliaram a CCA como uma fonte alternativa de sílica, na pesquisa os autores observaram que a cinza pode resultar em sílica com 95% de pureza ao passar por um processo de queima a 700°C durante 6 horas e se for adotado um tratamento prévio de moagem a úmido a superfície específica da CCA

pode chegar a 81 m²/g. Os autores verificaram que o teor de sílica na CCA residual também é alto (72,10%), porém, em seu estado residual a cinza apresenta elevado percentual de perda ao fogo.

Da mesma forma, Cordeiro, Masuero e Dal Molin (2014), verificaram que para faixas de temperatura entre 500°C e 1100°C todas as CCA apresentaram teor de sílica superior a 80%. Ao analisar a caracterização mineralógica das cinzas, os autores perceberam que todas apresentavam materiais cristalinos, sendo que os picos ficavam mais visíveis para temperaturas de queima superiores a 800°C, consequentemente reduzindo o grau de amorficidade. Apesar disso, avaliando o índice de pozolanicidade em argamassa, constatou-se que mesmo a CCA resultante do processo de queima a 950°C apresentou 70% de material reativo em sua composição.

Bezerra *et al.* (2011), utilizaram em pesquisa a CCA originada de um processo de queima a céu aberto, em seu estado natural, com relação a granulometria da CCA, foi observada uma porcentagem de finos significativa no material, o que confere à mesma característica aglomerante. Além disso, os autores verificaram após análise química da CCA que está apresenta fases amorfas e teor de sílica superior a 80%, podendo conferir ao material características de pozolanas.

Resultado semelhante foi observado na pesquisa de Silva *et al.* (2020), os autores também observaram na CCA resultante de um processo de queima controlado a 600°C durante 4 horas, uma parcela de finos superior a 20%, indicando a característica aglomerante do resíduo.

Os resultados da CCA em argamassas são decorrentes, principalmente, das ações do efeito *filler* e das reações pozolânicas, de acordo com Jamil *et al.* (2016), as reações químicas com a CCA em argamassas são diminutas entre 7 e 14 dias de cura, após 90 dias de cura os resultados de resistência a compressão de argamassas pode dobrar em decorrência do efeito pozolânico da cinza.

Ao utilizar CCA residual em argamassas de assentamento, Bezerra *et al.* (2011), observaram que o teor ideal para a substituição de cimento por CCA é de 15% a 20%, visto que as argamassas ensaiadas com estes teores apresentaram elevado ganho de resistência e menores taxas de absorção de água.

Ferreira e Ribeiro (2018), avaliaram o desempenho de concretos autoadensáveis com adição de CCA residual, para os três teores estudados (5%, 10% e 20%), a resistência mecânica foi reduzida, no entanto, mantendo a faixa de relação

água/aglomerante entre 0,47 e 0,55, essa redução não foi tão expressiva, se comparado aos concretos de referência, assegurando a viabilidade técnica de aplicação desse resíduo.

Pouey (2006), em pesquisa realizada sobre a produção de cimentos pozolânicos, constatou que a CCA residual, mesmo com fases cristalinas, pode ser utilizadas juntamente com o cimento, porém, a autora aponta para a necessidade de serem adotados tratamentos físicos para a redução da granulometria da CCA, de forma a alcançar resultados mais satisfatórios.

Isaia *et al.* (2017b), compararam o desempenho de concretos estruturais com substituição de aglomerante por CCA moída em moinho de bolas por 1h e CCA natural, os melhores resultados foram observados nos concretos com teor de 15% de CCA moída. Ainda assim, mesmo com resultados inferiores, o uso da CCA natural é viável tecnicamente, os resultados, após 28 dias, se mostraram suficientes, se comparados aos de referência para concretos estruturais.

A finura da CCA é uma propriedade de grande influência nas propriedades mecânicas de argamassas. Zaparte (2020) alcançou promissores resultados mecânicos para argamassas de revestimento, a argamassa com CCA moída por 3h alcançou 35% a mais de resistência a compressão do que a CCA moída por 2h.

Olivo (2020), verificou a influência da temperatura de queima na CCA com base no desempenho de argamassas de revestimento, com os resultados percebe-se que a argamassa com CCA residual, com teor de substituição de 10% e 15%, apresentou desempenho semelhante as argamassas com CCA que passaram por processo de calcinação (queima controlada), para a idade de 91 dias.

2.2.3 Características e comportamento da CCA em matrizes de cimento Portland

Bauer (2019) traz a definição de material pozolânico como:

materiais inorgânicos silicosos ou silicaluminosos, tanto naturais ou artificiais, que possuem pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas quando finamente moídos e misturados com o hidróxido de cálcio ou materiais que podem liberar hidróxido de cálcio (clínquer de cimento Portland), endurecem na presença de água e temperatura ambiente (BAUER, 2019, p. 200).

Conforme Zaparte (2020), a composição das pozolanas é formada na sua maior parte por matérias cristalinos como quartzo e feldspato e por sílica e alumina, fração amorfa, altamente reativas com cimento.

Não existem classificações ou termos apropriados para se tratar de materiais pozolânicos, a NBR 12653 – “Materiais pozolânicos – Requisitos” (ABNT, 2015) apenas distinguem as pozolanas entre naturais e artificiais e traz três classes de pozolanas, sendo estas:

Classe N: Pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos desta Norma, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.

Classe C: Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas que obedece aos requisitos aplicáveis nesta Norma.

Classe E: Qualquer pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido nesta Norma (ABNT NBR 12653, 2015, p.3).

Para mais, Bauer (2019) aponta que uma adição mineral que se enquadra nas classificações da NBR 12653 (ABNT, 2015) é a cinza de casca de arroz. A CCA é classificada com uma pozolanas artificial, com grande potencial de ser aplicada em concretos e argamassas.

As propriedades químicas e físicas da CCA dependem de três principais fatores: tipo do arroz, processo de combustão e moagem a partir dos quais a cinza foi produzida. Um processo de combustão controlado resulta em uma cinza com elevado teor de sílica amorfa porosa e com alta área de superfície específica, já o processo de moagem proporciona a redução do tamanho das partículas e da estrutura de poros da CCA (MOSABERNAPH; UMAR, 2020).

Em pesquisa com CCA produzida sem controle de temperatura e com tempo de queima de 36 horas, Tashima *et al.* (2012), verificou que o teor de SiO₂ na CCA atingiu 83,53%, sendo que destes, 93,30% da sílica era amorfa (reativa). Sendo assim, o potencial da reação entre a CCA e o CP depende, principalmente, do grau de amorficidade presente na sílica, outros fatores que influenciam são a finura e a área superficial da CCA (ZAPARTE, 2020).

Ao encontro disso, Cordeiro, Toledo Filho e Fairbarn (2009), afirmam que a viabilidade de substituir parcialmente o cimento por pozolanas se deve a presença de

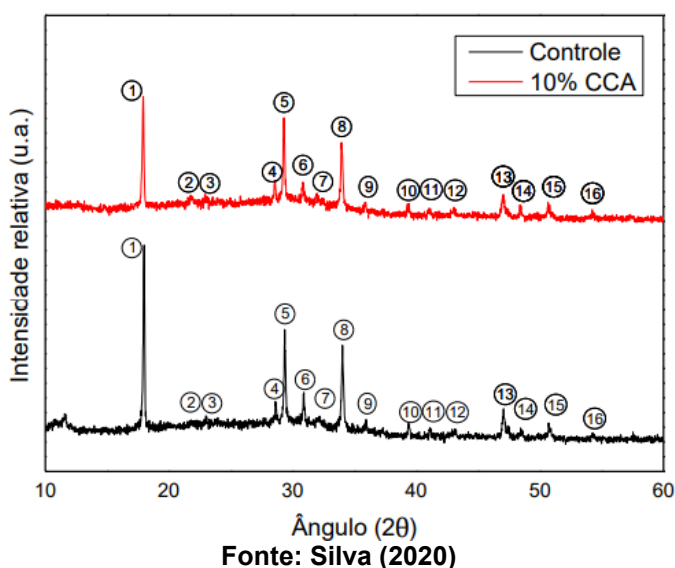
fases ativas na constituição química do material. A sílica ativa das pozolanas acabam reagindo com o hidróxido de cálcio gerado no processo de hidratação do cimento.

A sílica amorfa é a principal fase ativa das pozolanas e, em contato com água e à temperatura ambiente, solubiliza em meio alcalino e reage com íons Ca^{+2} para formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H, de acordo com notação utilizada na química do cimento = C-CaO; S-SiO₂; H-H₂O), conforme ilustra a Equação 1. (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBERN, 2009, p.1)



Silva (2020), observou em sua pesquisa, a partir do ensaio de difração de Raio-X, em amostras com 28 dias de cura, que os picos de hidróxido de cálcio (representados pelos pontos 1 e 8), reduziram na amostra com 10% de CCA, conforme mostrado na Figura 9, comprovando que parcela da fase ativa da cinza reagiu com o hidróxido de cálcio.

Figura 9: Difratoograma de Raio-X da pasta de cimento controle e pasta de cimento com 10% de CCA (após 28 dias de cura)



Ao analisar a influência da CCA em argamassas de assentamento, Bezerra *et al.* (2011) contataram que para todas as idades de cura, os corpos de prova (CP's) contendo a cinza apresentaram resistência a compressão superior à argamassa de referência. Os autores ainda expuseram que tal resultado é consequente da “reação da CCA com o hidróxido de cálcio formando o C-S-H, material resistente e estável, que favorece o aumento da resistência e diminuição da permeabilidade” (BEZERRA *et al.*, 2011, p.5).

Tashima *et al.* (2012) obtiveram resultados semelhantes, os autores apontaram também para a proporcionalidade entre o aumento do teor da CCA com o ganho de resistência mecânica. Tal reação pode ser explicada não somente pelo efeito químico do material pozzolânico, mas também devido as pozzolanas contribuírem para o efeito *filler* na mistura, reduzindo a dimensão dos poros, favorecendo o ganho de resistência.

O maior ganho de resistência alcançado ao utilizar cinzas com tratamentos prévios de moagem, é justificado pela maior nucleação das partículas, aumentando os locais onde as reações químicas acontecem. Além disso, as partículas mais finas da CCA são mais eficazes no processo de obstrução de vazios da pasta cimentícia, de forma que esta, se torne mais compacta (ISAIA *et al.*, 2017a).

A nucleação, assim como o efeito *filler*, é um efeito físico proporcionado pelo uso de pozzolanas em argamassas e concretos, esse efeito é notório nas primeiras idades, quando a velocidade de hidratação do cimento é maior. Desta reação são geradas grandes quantidade de hidratos e conseqüentemente aumenta a concentração de portlandita na pasta, esse aumento na concentração de CH aumenta o avanço das reações pozzolânicas em idades posteriores (OLIVO, 2020).

Ademais, outro fator que interfere no potencial da ação química da CCA é o processo de queima pela qual a mesma é submetida. Righi, Nakanishi e Mohamad (2014), trouxeram em sua pesquisa a caracterização de cinzas de casca de arroz com e sem controle de queima, ambas as cinzas tinham teores de sílica semelhantes, porém, os autores perceberam que a CCA sem controle de queima apresentou porcentagem de perda ao fogo superior ao limites normatizados, indicando uma possível redução na porcentagem de sílica ativa na CCA e aumento nos teores de carbono em sua composição, tais indicadores, contribuem para a redução da atividade pozzolânica da cinza.

As CCA por sua natureza apresentam uma grande quantidade de sílica em sua estrutura. Observa-se que a quantidade de sílica reativa diminui à medida que se aumenta a temperatura de queima; mesmo assim, a CCA apresenta sílica amorfa remanescente, em altas temperaturas, suficiente para garantir a reação pozzolânica (CORDEIRO; MASUERO; DAL MOLIN, 2014, p7).

Como citado anteriormente a temperatura de queima da CCA é predominante na produção de cinzas com maior caráter amorfo, tal tratamento também tem influência sobre a análise da absorção de água do compósito cimentício.

De acordo com Della, Khun e Hotza (2005), a CCA apresenta coloração mais escura quando queimada a baixas temperaturas (inferiores a 400°C), indicando maior concentração de carbono, partículas finas que absorvem maior quantidade de água no processo de mistura.

Vale ressaltar que o efeito da CCA em compósitos cimentícios é mais tardio. Sendo assim, por ser um material pozolânico a CCA nas primeiras idades apresenta menor taxa de reação, essa reação aumenta exponencialmente e se torna fator dominante ao ganho de resistência mecânica após os 28 dias em cura (ISAIA *et al.*, 2017a; TASHIMA *et al.*, 2012, PEREIRA *et al.*, 2015; RIGHI; NAKANISHI; MOHAMED, 2014).

Isto posto, uma explicação para efeito da CCA mais tardio, é que as reações pozolânicas com a cinza se tornam significativas quando a concentração de Ca(OH)_2 na pasta for alta, ou seja, a atividade química da cinza depende dos produtos do processo de hidratação do cimento, visto que a CCA reage com este para produzir gel de C-S-H secundário (JAMIL *et al.*, 2016).

Diante disso, é possível notar que o efeito da CCA em argamssas e concretos é mais evidenciado nas propriedades mecânicas como resistência à tração e à compressão, ainda assim, tanto o efeito químico quanto o efeito físico da CCA, podem apresentar relevância sobre outras propriedades como: densidade de massa, teor de ar incorporado, durabilidade, entre outros.

De acordo com a literatura, a CCA promove a redução da densidade de massa da mistura no estado fresco, também chamada de massa específica da pasta cimentícia, em decorrência da massa específica da CCA ser menor que a do cimento e devido a ação física da CCA na pasta (FORTUNATO *et al.*, 2019; ZAPARTE, 2020).

O teor de ar incorporado é uma propriedade que tem influência sobre a reologia da pasta cimentícia e está diretamente interligado à densidade de massa da pasta, quanto maior a incorporação de ar na mistura maior será seu volume (ZAPARTE, 2020). Silva (2016) ainda explica, que o uso de adições minerais em compósitos cimentícios promove maior incorporação de ar, dado que a maior área de superfície específica desses materiais contribui para o aprisionamento de ar em torno das partículas.

De acordo com Tashima (2006), a CCA possuiu duas fases distintas, uma é representada pela face externa caracterizada por ser mais densa, outra é representada pela face interna, formada por uma estrutura porosa. Similarmente,

Vieira *et al.* (2020) observou em sua pesquisa que as partículas de CCA apresentam uma epiderme externa e outra interna, sendo a estrutura porosa localizada entre essas duas epidermes distintas.

A porosidade interna das partículas de CCA contribui para o aumento do teor de ar incorporado nas misturas (ZAPARTE, 2020). Além disso, as dimensões da estrutura porosa da CCA fazem com que no processo de mistura da pasta cimentícia seja consumido grande volume de água para preencher a superfície interna das partículas (TASHIMA, 2006; MOSABERPANAHI; UMAR, 2020).

Conforme Jamil *et al.* (2016), no estado endurecido a adição de CCA passa a apresentar novos resultados, um deles é a redução do número de poros permeáveis, aspecto diretamente ligado ao aumento do tempo de cura e à porcentagem de CCA presente, esse processo decorre da formação dos produtos do C-S-H secundário e do efeito *filler* (preenchimento).

Nesse sentido, a densidade de massa no estado endurecido tende a aumentar com aumento de teor de CCA na mistura. As adições minerais atuam nas argamassas e concretos, reduzindo a porosidade e tornando a matriz da pasta mais densa, consequentemente aumentando a densidade de massa, tal resultado pode prenciar o aumento da resistência mecânica, decorrente da redução no índice de vazios (BEZERRA *et al.*, 2011).

Isaia *et al.* (2017a), verificaram em sua pesquisa que um fator que contribui para a redução da permeabilidade e absorção de água em argamassas e concretos com CCA, são os vazios internos dos grãos da cinza residual, esses vazios funcionam como obstáculos para a interconexão dos poros, resultando na obstrução da passagem de agentes externos ao compósito cimentício.

De encontro a isso, Jamil *et al.* (2016) afirmam que o uso de CCA com tratamento prévio de moagem favorece a atenuação da taxa de absorção de água em argamassas de CP, no entanto, o mesmo não é verificado para CCA bruta. Os dois principais motivos para tal resposta são: (1) a cinza residual possuiu dimensões maiores e mais grosseiras, tornando a partícula mais higroscópica; (2) como as reações pozolânicas com a cinza bruta são reduzidas, a água absorvida, que seria utilizada no processo química, passa a ficar livre na estrutura da argamassa.

O efeito da CCA residual sobre a absorção de água é mais evidenciado à maiores idades (de 28 a 90 dias em cura), porque com maior tempo de cura, maior o

tempo para que o efeito de empacotamento das partículas possa ocorrer, ou seja, a acomodação das partículas da CCA ocorre em idades tardias (BEZERRA *et al.*, 2011).

No entanto, a porosidade é uma propriedade que pode favorecer o ganho de resistência à aderência ao substrato. Ao avaliarem os efeitos da CCA em argamassas de revestimento, Kieling *et al.* (2009), verificaram que quando utilizada em substituição de até 5% de CP, a CCA proporcionou a argamassa um ganho de 100% de resistência de aderência.

A partir da análise da microestrutura dos compósitos cimentício é possível identificar mais conclusivamente o impacto da CCA em compósitos cimentícios. Jamil *et al.* (2016), identificaram que a microestrutura de argamassas com partículas de CCA com maiores dimensões é caracterizada por uma estrutura mais porosa nas regiões de incorporação da CCA e pela presença de grão de cimento não hidratados ou apenas parcialmente hidratados. Tais sinais antecipam algumas respostas como menor densidade de massa da argamassa no estado endurecido, devido a redução da atividade pozolânicas observada.

Ao avaliar a microestrutura de argamassas, Tashima (2006), observou a sensibilidade das reações pozolânicas com a CCA com relação ao tempo de cura, para teores de 5%, 10% e 15% de substituição de CP por CCA, após 3 dias de cura todas as argamassas apresentaram grande quantidade de etringita em sua pasta, tal efeito se reverteu após 28 dias de cura, visto que a presença de cristais de C-S-H se tornou mais abundante.

Righi, Nakanishi e Mohamad (2014), ao analisarem a microestrutura de argamassas com adição de CCA em 10%, 15% e 20% aos 56 dias de cura, perceberam, a partir dos produtos de hidratação observados, que as reações pozolânicas estão ocorrendo em idades tardias e são mais lentas conforme é aumentado o teor de CCA nas pastas.

Sendo assim, pode-se dizer que os efeitos da CCA, químicos e físicos, influenciam as propriedades de argamassas e concretos no estado fresco e endurecido. Além disso, as reações químicas e físicas CCA em pastas cimentícias, ainda que sejam variáveis independentes entre si, quando em conjunto melhoram as propriedades mecânicas de materiais a base de CP.

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação da pesquisa

O estudo proposto para este trabalho foi desenvolvido com base na influência do uso de cinza de casca de arroz residual, empregue em substituição parcial à areia e com redução do teor de aglomerante, em argamassas autonivelantes, a partir da análise dos resultados do material quanto a resistência de aderência e a porosidade.

Sendo assim, com relação aos objetivos, a pesquisa foi classificada como explicativa. De acordo com Gil (2002), uma pesquisa explicativa se propõe a analisar os fatores que influenciam a ocorrência de determinado fenômeno, esta, no entanto, muitas vezes depende de levantamentos descritivos ou exploratórios para ser continuada. Este projeto propôs explicar o comportamento da cinza de casca de arroz em compósitos cimentícios, como a argamassa autonivelante, com relação as propriedades mecânicas do produto gerado, por isso para entender a relação entre as variáveis estudadas foi preciso, também, levantar hipóteses, o que conforme Menezes *et al.* (2019), é indicativo de uma pesquisa exploratória.

Ainda assim, o levantamento de dados da pesquisa foi feito com suporte de ensaios em laboratório, com os quais foram observadas e investigadas as relações entre as variáveis do estudo (MENEZES *et al.*, 2019), ou seja, os procedimentos técnicos adotados classificam a pesquisa como experimental. Para Gil (2002, p.47), “a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influencia-lo, definir as formas de controle e de observações dos efeitos que a variável produz no objeto”.

Cabe ainda classificar a pesquisa quanto a sua abordagem, isto posto, Menezes *et al.* (2019), aponta que quanto à natureza, uma pesquisa pode ser classificada como qualitativa ou quantitativa. O autor apresenta que a pesquisa qualitativa não toma o valor numérico como único aspecto a ser avaliado, as explicações do pesquisador são fundamentais para a análise de dados, a pesquisa qualitativa lida com fenômenos, enquanto a quantitativa lida com fatos que geralmente são avaliadas por critérios matemáticos. Com base no exposto, classifica-se a abordagem do presente estudo como quantitativa-qualitativa, visto que será

necessário quantificar resultados para avalia-los qualitativamente, ou seja, para a análise de resultados numéricos serão tomadas considerações qualitativas.

3.2 Delineamento da pesquisa

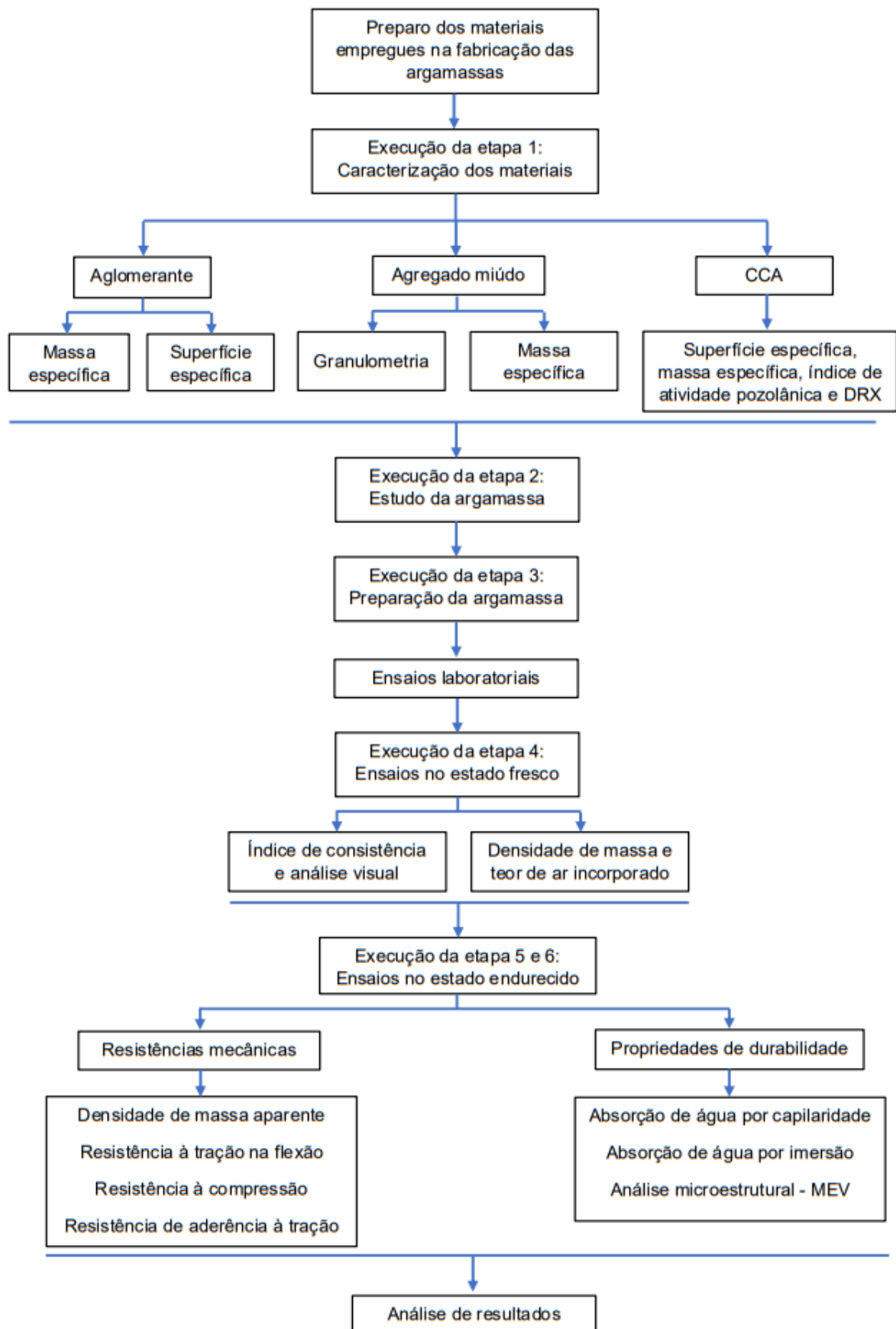
Este trabalho foi elaborado partindo da caracterização dos materiais necessários para confeccionar argamassas autonivelantes. Posteriormente, foi feita uma análise de bibliografias para buscar dosagens de argamassas autonivelantes, para então ser adaptado um traço que alcançassem os resultados esperados para o índice de consistência estipulado, tanto para a argamassa de referência quanto para a argamassa com substituição de 20%, em massa, de areia pela cinza de casca de arroz e redução de 10% e 20% de cimento.

Na sequência as argamassas foram confeccionadas, para serem ensaiadas no estado fresco, e finalmente, serem moldadas. No estado fresco, as argamassas autonivelantes foram ensaiadas com o objetivo de verificar o seu desempenho, visto que as propriedades no estado endurecido dependem dos bons resultados das pastas frescas.

As argamassas foram moldadas em fôrmas prismáticas com dimensões de 40 mm x 40 mm e 160 mm de comprimento e, sem desformar, permaneceram em cura, em câmara de controle de temperatura e umidade, por 72 horas. Decorrido o tempo, retiraram-se as argamassas dos moldes para completar o período de cura dos mesmos em ambiente de temperatura e umidade controlados, por 28, 60 e 91 dias.

Por fim os corpos de prova foram ensaiados no estado endurecido para verificar a influência da cinza de casca de arroz nas argamassas autonivelantes. A Figura 10 apresenta um fluxograma das atividades realizadas na metodologia.

Figura 10: Fluxograma da metodologia



Fonte: a autora (2022)

3.3 Materiais

3.3.1 Cimento

O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland CP V – ARI da marca Votoran Cimentos, pois, de acordo com a NBR 16697 – “Cimento Portland – Requisitos” (ABNT, 2018), é um cimento que apresenta grandes ganhos de resistência em idades iniciais, além de possuir elevada finura, característica que pode promover uma melhora na fluidez do compósito cimentício (SILVA, 2016).

Outro fator que colabora para escolha do CP V – ARI é que este cimento é o que possui menores quantidades de adições pozolânicas em sua mistura e maiores quantidades de clínquer e sulfatos de cálcio, portanto, ao fazer a substituição ou redução de parcela desse material em composições cimentícias, não acarretará em perdas expressivas de resistência.

A Tabela 6 apresenta algumas características do cimento conforme o apresentado na NBR 16697 (ABNT, 2018). Além disso, foram executados ensaios normatizados para determinar as características físicas e mecânicas do aglomerante.

Para a determinação da superfície específica o cimento foi utilizado o Método de Blaine seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 16372 – “Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)” (ABNT, 2015) e a massa específica do cimento foi obtida por meio dos procedimentos estabelecidos pela NBR 16605 – “Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica” (ABNT, 2017).

Como uma forma de verificar se o cimento apresentava resistência à compressão aos 7 dias limitada pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), também foi realizado o ensaio de compressão proposto pela NBR 7215 – “Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos” (ABNT, 2019).

Tabela 6: Características químicas e físicas do cimento CP V – ARI

Propriedade	Unidade	NBR 16697
SiO ₂	%	
Al ₂ O ₃	%	
Fe ₂ O ₃	%	
CaO	%	
MgO	%	≤ 6,5
SO ₃	%	≤ 4,5
K ₂ O	%	
Na ₂ O	%	
Cl	%	
CO ₂	%	≤ 5,5
Cal livre	%	
Perda ao fogo	%	≤ 6,5
Resíduo insolúvel	%	≤ 3,5
Tempo de pega – inicial	min	≥ 60,0
Tempo de pega – final	min	≥ 600,0
Massa específica	g/cm ³	3,03*
Resistência à compressão (1 dias)	MPa	≥ 14
Resistência à compressão (3 dias)	MPa	≥ 24
Resistência à compressão (7 dias)	MPa	≥ 34
Superfície específica	cm ² /g	4078**

* Médias de dois resultados consecutivos obtido pelo ensaio proposto pela NBR 16605 (ABNT, 2017).

** Valor obtido na pesquisa de Reis e Pereira Filho (2020).

Fonte: Adaptado da NBR 16697 (ABNT, 2018)

3.3.2 Cinza da casca de arroz

O material pozolânico utilizado como substituinte parcial da areia na mistura da argamassa autonivelante foi a cinza da casca de arroz proveniente da Cooperativa Agrícola Alegrete Ltda. (CAAL), localizada na cidade de Alegrete – RS.

Este material é resultante da queima da casca de arroz para a produção de energia elétrica. Conforme apresentado na literatura, as características físicas e químicas da CCA podem ser aprimoradas a partir de controle da temperatura de queima da casca do arroz ou de requeima da cinza, tais processos são geralmente feitos em laboratórios onde é controlada a temperatura máxima de queima para manter o caráter amorfo da sílica presente na composição da CCA. Outra solução empregue em CCA brutas é a moagem do material para aumentar seu potencial de reatividade.

A cinza da casca de arroz adotada nessa pesquisa originou-se de um processo de queima sem controle de temperatura e a mesma foi utilizada sem tratamento prévio de moagem, com o objetivo de reduzir o consumo energético para seu uso.

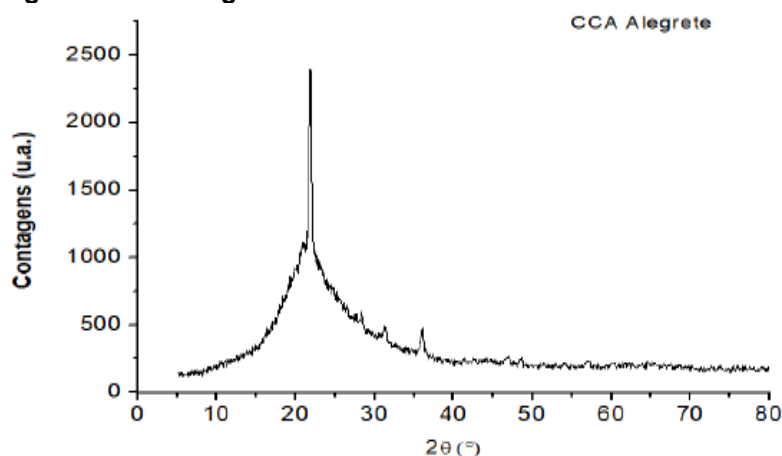
As características físicas e mineralógicas da cinza de casca de arroz, são apresentadas na Tabela 7 e na Figura 11, respectivamente. Os valores utilizados foram obtidos no trabalho de Nascimento (2023) e de Reis e Pereira Filho (2020), considerando que a cinza empregue para realizar este trabalho é derivada do mesmo lote, do qual a utilizada pela autora citada. Para a determinação da superfície específica Blaine da cinza de casca de arroz foram seguidos os procedimentos estabelecidos pela NBR 16372 (ABNT, 2015) e a massa específica da cinza de casca de arroz foi obtida por meio dos procedimentos estabelecidos pela NBR 16605 (ABNT, 2017).

Tabela 7: Superfície específica da cinza de casca de arroz

Superfície específica da CCA (cm²/g)	1740,19
Massa específica da CCA (g/cm³)	2,16

Fonte: Adaptado de Nascimento (2023)

Figura 11: Difratoograma de raios X da cinza da casca de arroz



Fonte: Reis e Pereira filho (2020)

Mediante aos resultados expostos acima, constatou-se que o valor da massa específica indica que a CCA é porosa e a sua superfície específica indica é um material fino. Analisando o difratograma verifica-se a existência de um halo de amorfismo. Ou seja, a cinza utilizada possui certo grau de amorficidade em suas partículas e, também, pode contribuir para o efeito *filler* (REIS; PEREIRA FILHO, 2020).

Com relação ao IAP da CCA residual, aos 28 dias a argamassa produzida com a cinza de casca de arroz não alcançou resultado de resistência com 90% ou mais da resistência da argamassa de referência, isto é, não pode ser considerada

como material pozolânico conforme o descrito na NBR 5752 – “Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias” (ABNT, 2014), a argamassa com CCA residual só passou a apresentar resultados satisfatórios de resistência à compressão após a idade de 91 dias, indicando potencial pozolânico mais tardio da CCA residual e que a mesma contribui para melhora na resistência mecânica por meio do efeito *filler* (Nascimento, 2023).

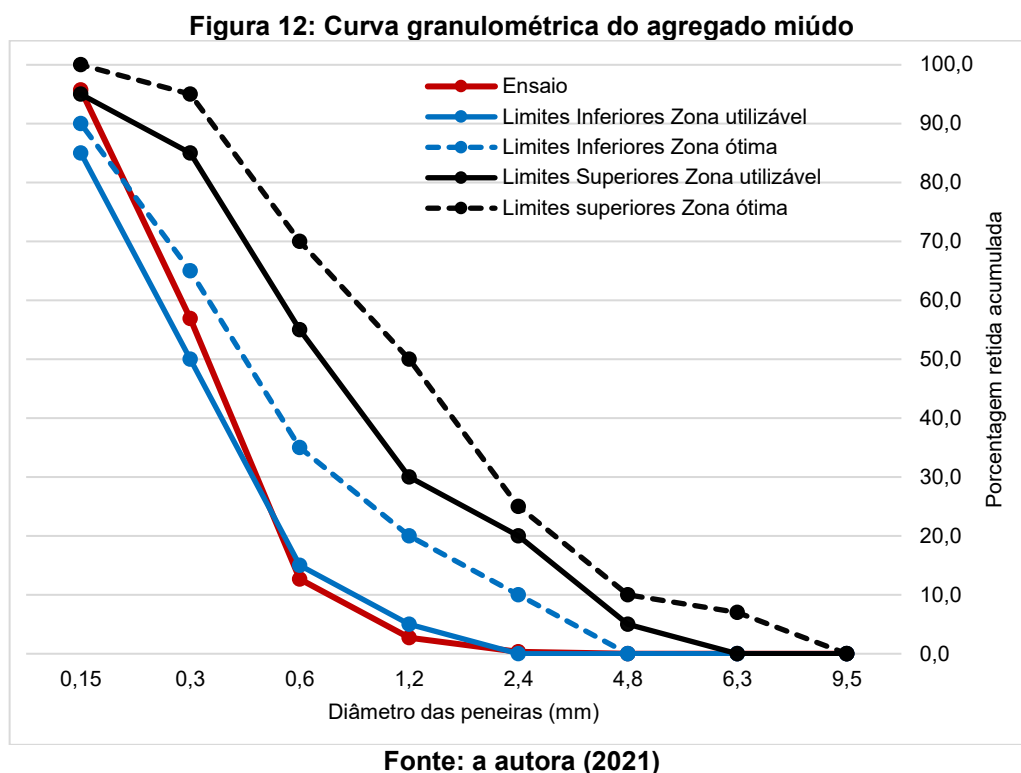
3.3.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural, proveniente de leitos de rios do estado do Paraná, do tipo fina, para evitar perda das características reológicas da pasta da argamassa autonivelante e no intuito de utilizar um material mais comumente empregado no setor da construção civil.

O material foi seco em estufa por um período de 48 horas em temperatura de 105°C e também foi passado na peneira, da série intermediária, de 6,3 mm, de modo a evitar que torrões ou grãos maiores de agregado fossem utilizados no processo de mistura.

A granulometria da areia, a dimensão máxima característica e o módulo de finura, foram obtidos seguindo os procedimentos da NBR NM 248 – “Agregados – Determinação da composição granulométrica” (ABNT, 2003) e para obter a massa específica da areia seguiu-se com o prescrito na NBR 9776 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman” (ABNT, 1987).

A Figura 12 apresenta a curva granulométrica da areia, com a qual se verificou que o agregado miúdo utilizado é classificado como areia fina, dado o módulo de finura obtido de 1,68 e o diâmetro máximo da areia de 1,2 mm. Além disso, a massa específica da areia utilizada apresentou um valor de 2,65 g/cm³.



De acordo com a NBR 7211 – “Agregados para concreto: Requisitos” (ABNT, 2022), a areia ensaiada atende ao limite da zona utilizável inferior, em que o módulo de finura varia de 1,55 a 2,20. Porém, conforme as faixas limite propostas por Melo (2005) para a distribuição granulometria do agregado miúdo, a areia utilizada na pesquisa possui maior proporção de areia fina, visto que a granulometria do agregado miúdo ensaiado não está entre as faixas granulométricas recomendadas, embora esteja próxima do limite inferior, e não corresponde a granulometria da composição de agregado miúdo (80% de areia média e 20% de areia fina) produzida pelo autor.

3.3.4 Aditivo superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante da empresa GCP Applied Technologies, TEC-FLOW 8000. De acordo com o fabricante esse aditivo é do tipo SP II / N/A/R e proporciona manutenção da trabalhabilidade por elevados períodos e obtenção de elevadas resistências iniciais e finais, a massa específica varia entre 1,080-1,120 g/cm³ e o limite de uso varia de 0,3 a 2% (GCP, 2019).

O superplastificante foi utilizado com o objetivo de promover melhor fluidez e possibilitar a redução da água da mistura. Visto que, superplastificantes colaboram

para a dispersão de grãos de cimento e ainda viabilizam a redução de até 40% da água na mistura sem perder a trabalhabilidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Ainda, conforme recomendações do fabricante, o aditivo SP da linha TEC-FLOW, não deve ser adicionado a misturas diretamente sobre os materiais secos.

3.3.5 Aditivo modificador de viscosidade

Foi utilizado o aditivo modificador de viscosidade da empresa Camargo Química, CQ ADMIX MV. De acordo com o fabricante a massa específica varia entre, 1,00-1,05 g/cm³ e o uso de aditivo proporciona melhora o desempenho de argamassas e concretos, visto que melhora as características de coesão e homogeneidade da massa, reduz a segregação e não interfere na trabalhabilidade (CQADMIX MV, 2019).

O modificador de viscosidade foi utilizado com o objetivo de amenizar a segregação e exsudação, devido a necessidade de maiores quantidades de água na mistura. O aditivo modificador de viscosidade melhora a coesão da mistura, reduzindo a segregação e a perda de água por exsudação, estabelecendo um equilíbrio com a falta de uniformidade na dosagem da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

3.3.6 Água

Utilizou-se água potável, proveniente da rede de abastecimento local, fornecida e tratada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

3.4 Métodos

3.4.1 Etapa 1: Caracterização do cimento

A caracterização dos materiais, foi realizada de acordo com as normas citadas na Tabela 8, realizaram-se todos os ensaios no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco. Em todos os

ensaios as condições do laboratório eram: temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e a umidade relativa do ar de $(60 \pm 5) \%$.

Tabela 8: Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização dos materiais

Ensaio	Norma ABNT
Massa específica (aglomerante)	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Resistência à compressão do cimento	NBR 7215 (ABNT, 2019)

Fonte: a autora (2022)

3.4.1.1 Massa específica do cimento

Para a determinação da massa específica do cimento, seguiu-se com os procedimentos estabelecidos pela NBR 16605 (ABNT, 2017), onde é usado o frasco volumétrico de Le Chatelier.

Para a realização deste procedimento foram utilizados dois frascos, estes devem ser enchidos com um líquido que não reaja quimicamente com os materiais que serão ensaiados, como a querosene.

Os frascos foram enchidos até o nível compreendido entre as marcas de 0 e 1 cm^3 e então secou-se a superfície interna dos frascos, acima do nível do líquido, para evitar a aderência dos materiais na superfície durante o despejamento. Na sequência, os frascos, foram colocados dentro de um recipiente com água em temperatura ambiente, para a realização de um banho termorregulador durante 30 minutos.

Após passado o tempo para regularização da temperatura, foi feita a primeira leitura do volume do líquido (V_1), nos frascos de Le Chatelier. Posteriormente, despejou-se, com auxílio de funil, quantidade suficiente de massa conhecida de cimento em um frasco, até que o líquido atingisse o nível entre 18 e 24 cm^3 .

Verificado que não tinham mais bolhas na mistura, o frasco foi devolvido ao recipiente com água para novamente passar por um banho termorregulador, durante 30 minutos. Decorrido o tempo, toma-se a segunda leitura do volume do recipiente (V_2), com aproximação de $0,1 \text{ cm}^3$. Por fim, calculou-se a massa específica do material, utilizando da Equação (1). O procedimento foi realizado duas vezes para evitar erros.

$$\rho = m/V \quad (1)$$

Onde:

- ρ = massa específica do material ensaiado, expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3);
- m = massa do material ensaiado, expressa em gramas (g);
- V = volume deslocado pela assa do material ensaiado ($V'_1 - V'_2$), expresso em centímetros cúbicos (cm^3);
- $V'_1 - V'_2$ = são os valores corrigidos de V_1 e V_2 , respectivamente a partir da calibração da escala do frasco volumétrico, em centímetros cúbicos (cm^3).

3.4.1.2 Resistência à compressão do cimento

Para a determinação da resistência do cimento, tomou-se como base os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2019), o método proposto pela norma utilizada de corpos cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para a determinação da resistência à compressão. Para o trabalho foram produzidos 6 corpos de prova, que foram ensaiados a 7 dias.

Primeiramente, foram separados os materiais. A areia normal utilizada deve atender a NBR 7214 – “Areia normal para ensaio de cimento – Especificação” (ABNT, 2015) e sua distribuição granulométrica deve apresentar quatro frações, grossa, média grossa, média fina e fina, de igual massa, misturadas homogeneamente. A água utilizada foi previamente destilada e deve estar à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Por fim, o cimento foi coletado e armazenado em recipiente vedado para evitar prévias reações com o material.

A norma padroniza que o traço das argamassas produzidas seja de uma parte de cimento para três partes de areia e com relação água/cimento de 0,48. A Tabela 9 apresenta a quantidade em massa desses materiais, indicado pela norma, para serem produzidos 6 corpos de prova.

Tabela 9: Quantidade de materiais para ensaio de resistência à compressão do cimento

Material	Massa para a mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	
- Fração grossa	468 ± 0,3
- Fração média grossa	468 ± 0,3
- Fração média fina	468 ± 0,3
- Fração fina	468 ± 0,3

Fonte: adaptado da NBR 7215 (ABNT, 2019)

Após a separação dos materiais, foram preparados os moldes cilíndricos, estes foram limpos, para então ser passada uma fina camada de desmoldante no interior dos mesmos. Na sequência, foi feita a mistura dos materiais separados com um misturador mecânico.

Imediatamente, após o fim do processo de mistura foi feita a moldagem dos corpos de prova, tomando cuidado para que a argamassa fosse bem adensada. Os corpos de prova, ainda nos moldes, foram deixados por um período de 24 horas em câmara úmida. Decorrido o tempo de cura inicial, os corpos de prova foram retirados dos moldes e então colocados em tanque de cura com água saturada de cal até o a data de ruptura.

Antes de serem submetidos ao ensaio de compressão, a superfície dos corpos de prova foi retificada, tomando cuidado para não haver muita variação de tamanho entre cada um dos mesmos. Para finalizar, os corpos de prova foram rompidos na prensa EMIC DL-3000.

3.4.2 Etapa 2: Estudo da argamassa

Para a dosagem da argamassa autonivelante, não existe no meio técnico nacional um método difundido e normatizado. À vista disso, o objetivo de realizar o estudo da argamassa foi adaptar o traço da argamassa autonivelante e definir os melhores teores de aditivo superplastificante e modificador de viscosidade, para que as argamassas testes com CCA alcançassem o índice de consistência adequado.

A dosagem utilizada para realizar os estudos com a argamassa autonivelante nesta pesquisa, teve como base o traço de Kaszuba e Pereira Filho (2022), estudado em pesquisa científica com a argamassa autonivelante com substituição parcial da areia por cinza de casca de arroz e redução de cimento. A partir

de pesquisa bibliográfica, também foram encontrados outros traços semelhantes, em massa, para contribuir nas adaptações da dosagem, todos os traços estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Dosagens de argamassa autonivelantes utilizada de referência para o estudo

Autor	Silva (2016)	Mendes (2019)	Reis e Pereira Filho (2020)	Kaszuba e Pereira Filho (2022)
Traço Referência C:A	1:1,25	1:1	1:1,25	1:1,25
Porcentagens de adição	5% de Cinza volante	40% e 50% de RCMG	37,75% de CCA	20% de CCA
Proporção utilizada	Massa	Massa	Volume	Massa
Relação a/C	0,51	0,33	0,40	0,40 a 0,44
SP	0,40%	0,33%	0,48%	0,48% a 0,76%
VMA	0,75%	0,67%	1,43%	1,43% a 1,80%

C – Cimento; A – Areia; a – Água; SP – Superplastificante; VMA – Aditivo Modificador de Viscosidade; RCMG – Resíduo de Cortes de Mármore e Graníticos; CCA – Cinza de Casca de Arroz.

Fonte: a autora (2022)

Em pesquisa científica foi produzida argamassa autonivelante com 10% de redução de aglomerante que resultaram em resistências mecânicas iguais às argamassas autonivelantes sem CCA e sem redução de cimento aos 28 dias (KASZUBA.; PEREIRA FILHO, 2022). Sendo assim, para este trabalho foram adotadas duas porcentagens de redução de cimento de 10% e 20%, com o objetivo de verificar o limite de redução de aglomerante para alcançar resistências mecânicas que correspondessem aos limites normatizados pela EFNARC (2001).

Na pesquisa de Kaszuba e Pereira Filho (2022), a argamassa autonivelante de referência foi composta de cimento, areia, aditivos químicos e água, os resultados no estado fresco e endurecido desta são apresentados na Tabela 11. As misturas estudadas neste trabalho foram feitas com os mesmos materiais, diferindo pela substituição parcial da areia pela CCA e pela redução de quantidade em massa de cimento nas porcentagens de 10% e 20%.

Tabela 11: Resultados da argamassa de referência – A0

Resultados no estado fresco		
Índice de consistência (mm)	Densidade de massa (g/cm³)	Teor de ar incorporado (%)
320	2,03	8,57
Resultados no estado endurecido aos 28 dias		
Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	
8,37	38,41	
Resultados no estado endurecido aos 60 dias		
Resistência à tração (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	
8,60	41,50	

Fonte: Kaszuba e Pereira Filho (2022)

Sendo assim, foi utilizado o resultado da argamassa de referência A0, produzida por Kaszuba e Pereira Filho (2022), aos 28 dias como valor de referência para as demais argamassas produzidas neste trabalho. A Tabela 12 mostra a nomenclatura das argamassas autonivelantes produzidas neste trabalho, de acordo com o teor de redução de cimento.

Tabela 12: Identificação das argamassas autonivelantes

A0	Sem redução.
A10	10% de redução de cimento.
A20	20% de redução de cimento.

Fonte: a autora (2022)

Para fazer as adaptações necessárias no traço, tomou-se como base o ensaio de índice de consistência proposto no Anexo A da NBR 7215 (ABNT, 2019). Partiu-se do traço 1:1,25:0,0048:0,0143:0,4 (cimento: agregado miúdo: superplastificante: aditivo modificador de viscosidade: água), com o qual foi produzida a argamassa A0 na iniciação científica, citada anteriormente (KASZUBA.; PEREIRA FILHO, 2022).

Separaram-se as quantidades de material necessárias, para na sequência misturar os componentes conforme indicado na norma. As argamassas A10 e A20, já preparadas, foram então colocadas no molde troncocônico, até completo enchimento, por fim o molde foi retirado para a mistura se espalhar. Com a argamassa espalhada, tomaram-se duas medidas ortogonais do diâmetro, a média das medidas representa o índice de consistência.

O procedimento foi refeito até que se alcançasse com as argamassas testes, índice de consistência superior a 240 mm.

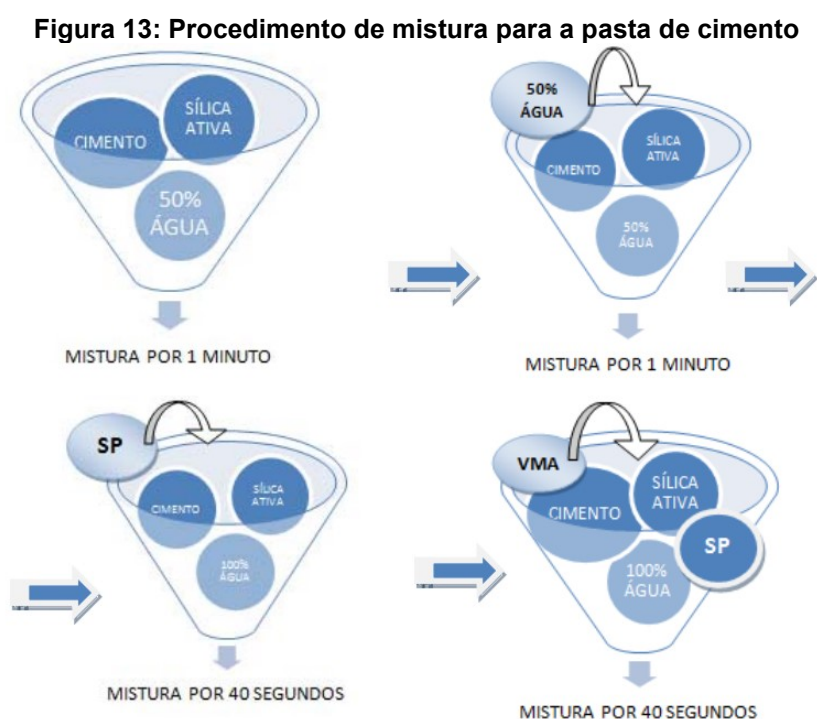
3.4.3 Etapa 3: Preparação da argamassa

3.4.3.1 Confecção das argamassas

O procedimento de mistura ocorreu de acordo com o prescrito pela NBR 16541 – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da mistura para a realização de ensaios” (ABNT, 2016), utilizando um misturador mecânico, seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019). No entanto, para

a realização deste procedimento foram feitas algumas alterações considerando que a pesquisa foi feita estudando argamassas autonivelante com adição de cinza da casca do arroz.

Conforme Martins (2009), o procedimento de mistura, desde a energia empregue à mistura, a dosagem de água utilizada até o tempo de preparo, tem direta relação com as propriedades da argamassa, no estado fresco e endurecido. O procedimento de mistura adotado pela autora é apresentado na Figura 13, o mesmo foi executado em velocidade lenta.



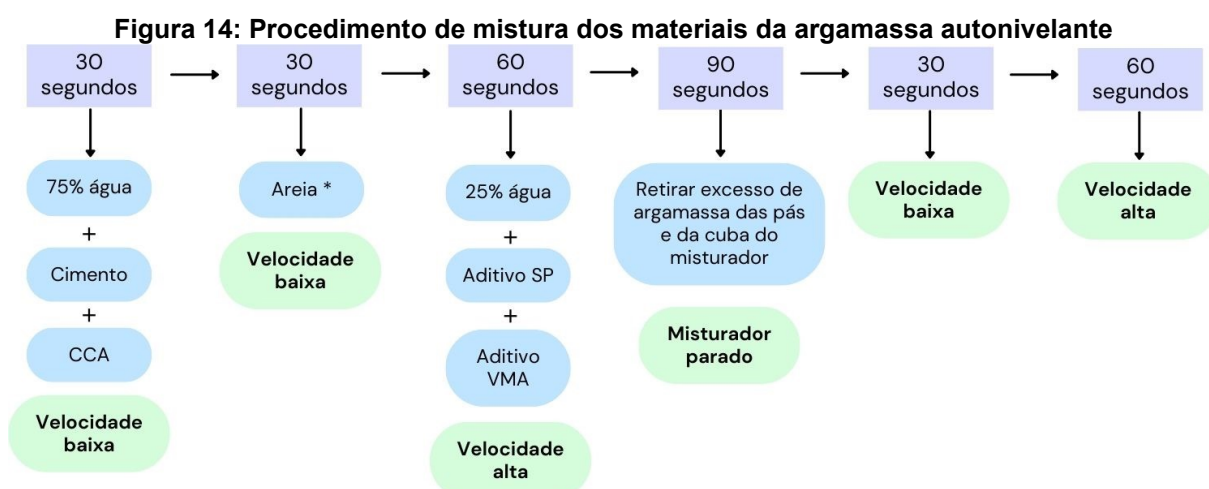
Fonte: Martins (2009)

De acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), para executar a mistura mecânica, primeiramente, deve ser colocado na cuba a quantidade total de água e cimento, para então acionar o misturador mecânico em velocidade baixa por 30 segundos. Sem paralisar o misturador, deve ser adicionada a massa de areia gradualmente durante 30 segundos, ainda em velocidade baixa. Após o término da colocação da areia acionar o misturador em velocidade alta por 30 segundos. Terminada essa etapa, o misturador deve ser desligado por 90 segundos, para retirar o material que ficou aderido às paredes da cuba e à pá. Decorrido o tempo, o misturador mecânico deve ser acionado em velocidade alta por 60 segundos.

No entanto, o procedimento de mistura da norma não leva em consideração o uso de adições minerais e aditivos químicos. De acordo com Mendes (2019), parte da água de amassamento deve ser separada para ser adicionada ao final da mistura juntamente com os aditivos químicos. Além disso, os fabricantes do aditivo superplastificante e modificador de viscosidade recomendam que os aditivos não sejam adicionados à mistura diretamente sobre os materiais secos.

Mendes (2019), adaptou o procedimento de mistura da norma. Inicialmente, foram colocados no misturador mecânico todo o material seco e 75% da água por 20 segundos em velocidade baixa, posteriormente, com os 25% restantes da água foram adicionados à mistura os aditivos, por 10 segundo em velocidade baixa. Na sequência o misturador foi acionado em velocidade alta por 60 segundos, para então ser desligado durante 90 segundos. Por fim o misturado foi acionado novamente em velocidade baixa por 60 segundos.

Com base no citado acima, para este trabalho foi adaptado o procedimento de mistura, conforme mostrado na Figura 14.



Nota: a areia deve ser adicionada em quatro partes de mesma massa, gradualmente.

Fonte: a autora (2022)

3.4.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova seguiu-se com as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2019). No entanto a norma foi ajustada, visto que não foi necessário incluir a etapa de adensamento, visto que as argamassas autonivelantes possuem característica auto adensável.

A primeira etapa do procedimento foi limpar os moldes para, na sequência, aplicar uma fina camada de desmoldante nas faces internas dos mesmos. Posteriormente, os moldes foram preenchidos, com auxílio de uma pá e com cuidado. Após os moldes serem completamente cheios o topo dos moldes foram rasados, utilizando de uma régua.

Os corpos de prova (CPs) moldados foram colocados em câmara de controle de temperatura e umidade por um período de 72 horas, em ambiente com temperatura do ar de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar não deve ser inferior a 95%, conforme o proposto na NBR 9479 – “Argamassa e concreto: câmeras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova” (ABNT, 2006). Passado o período inicial de cura os CPs foram retirados das fôrmas e permaneceram em câmara úmida, sob mesmas condições, até alcançarem as idades de 28, 60 e 91 dias, conforme o ensaio.

3.4.4 Etapa 4: Ensaios no estado fresco

3.4.4.1 Índice de consistência da argamassa e análise visual

Para o traço que obteve melhores resultados na etapa 2, foi feito o ensaio proposto pela NBR 13276 – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência” (ABNT, 2016), para avaliar o índice de consistência e verificar se a argamassa autonivelante apresenta trabalhabilidade adequada.

Além disso, esse experimento foi realizado para fazer uma análise visual da mistura, como objetivo de verificar possíveis ocorrências de perda de homogeneidade, devido a segregações e a uniformidade da borda, conforme citado no referencial bibliográfico.

O ensaio consistiu em preencher o molde troncocônico com a argamassa produzida. Após o molde ser enchido por completo, ele foi retirado verticalmente e foram registrados três diâmetros do espalhamento.

Durante esse procedimento não foi necessário fazer o adensamento das camadas de argamassa e realizar a etapa de golpes da mesa, visto que a argamassa autonivelante possui característica auto adensável e também deve ser capaz de se espalhar apenas por meio de seu peso próprio.

3.4.4.2 Densidade de massa e Teor de Ar Incorporado

Para a determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado na argamassa autonivelante foi utilizado uma adaptação do procedimento estabelecido pela NBR 13278 – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado” (ABNT, 2005), cujos procedimentos são utilizados para verificar a densidade de massa e o teor de ar incorporado de argamassas de assentamento e revestimento.

O molde deve ser preenchido de argamassa, com auxílio de uma pá. A argamassa deve ser introduzida no molde até o enchimento completo do mesmo. Por fim, foi verificado a massa do conjunto molde-argamassa e registrado o valor (M_C), esse valor foi utilizado para a realização dos cálculos, por meio das Equações (2) e (3), que determinam, respectivamente, a densidade de massa e o teor de ar incorporado.

$$d = \frac{M_C - M_V}{V_r} \cdot 1000 \quad (2)$$

Onde:

- d = densidade de massa da argamassa, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);
- M_C = massa do recipiente cilíndrico, contendo a argamassa, expresso em gramas (g);
- M_V = massa do recipiente cilíndrico vazio, expresso em gramas (g);
- V_r = volume do recipiente cilíndrico de PVC, expresso em centímetros cúbicos (cm^3).

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (3)$$

Onde:

- A = teor de ar incorporado na argamassa, expresso em porcentagem (%);
- d = densidade de massa, obtida por meio da equação (6);

- d_t = densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios, obtida por meio da equação (4), expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3).

$$d_t = \frac{\sum M_i}{\sum \frac{M_i}{\gamma_i}} \quad (4)$$

Onde:

- M_i = massa seca de cada componente da argamassa, incluindo a massa da água, expressa em gramas;
- γ_i = massa específica de cada componente da argamassa, expressa em g/cm^3 .

3.4.5 Etapa 5: Ensaios no estado endurecido – Resistências mecânicas

3.4.5.1 Densidade de massa aparente

Para a determinação da densidade de massa no estado endurecido, foi seguido os procedimentos descritos pela NBR 13280 – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido” (ABNT, 2005), e para a realização deste, foram moldados três corpos de prova prismáticos, com dimensões de 40 mm x 40 mm e 160 mm de comprimento, para cada tipo de argamassa autonivelante produzida. Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias.

Para obter a densidade de massa aparente, foi determinado, com o uso de um paquímetro, a altura, a largura e o comprimento de cada corpo de prova, as medidas foram tiradas de duas posições diferentes. Por fim, foi registrada a massa de cada um dos corpos de prova.

Para se obter a densidade de massa, primeiro determinou-se o volume de cada um dos corpos de prova, por meio da Equação (5) e posteriormente foi calculado a densidade de massa através da Equação (6).

$$v = l \cdot h \cdot c \quad (5)$$

Onde:

- v = volume do corpo de prova, expresso em centímetros cúbicos (cm^3);
- l = largura do corpo de prova, expresso em centímetros (cm);
- h = altura do corpo de prova, expresso em centímetros (cm);
- c = comprimento do corpo de prova, expresso em centímetros (cm).

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{m}{v} 1000 \quad (6)$$

Onde:

- ρ = densidade de massa, expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3);
- m = massa do corpo de prova, expressa em gramas (cm);
- v = volume do corpo de prova, expresso em centímetros cúbicos (cm^3).

3.4.5.2 Resistência à tração na flexão

Para determinar a resistência a tração na flexão das argamassas autonivelantes, foram seguidas as orientações indicadas na NBR 13279 – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão” (ABNT, 2005) adaptada aos tipos argamassas que foram estudadas. O ensaio foi realizado para as idades de 28, 60 e 91 dias, em corpos de prova com dimensões de 40 mm x 40 mm e 160 mm de comprimento e foram utilizados três corpos de prova pra cada argamassa moldada.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão foram moldados 9 CPs, 3 amostras para cada idade. Posteriormente, para cada idade prevista de ruptura, os corpos de prova foram colocados na prensa com aplicação de carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura. A prensa utilizada foi a EMIC DL-3000, mostrada na Figura 15.

Figura 15: Prensa EMIC para ensaios mecânicos



Fonte: a autora (2022)

A resistência à tração na flexão é obtida pela média das resistências individuais de cada corpo de prova calculada. De acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), se o desvio absoluto máximo for superior a 0,3 MPa é preciso ser calculada uma nova média que desconsidere o resultado mais discrepante. O ensaio é válido quando a resistência é obtida pela média de no mínimo 2 CPs, caso contrário é recomendável refazer o ensaio.

3.4.5.3 Resistência à compressão

Para determinar a resistência à compressão das argamassas autonivelantes, também seguiu-se as orientações indicadas pela NBR 13279 (ABNT, 2005) adaptada aos tipos argamassas que foram estudadas, visto que não é preciso realizar o adensamento. O ensaio foi realizado para as idades de 28, 60 e 91 dias, com a metade dos 3 CPs ensaiados à tração na flexão.

Para o ensaio de resistência à compressão são utilizadas 18 amostras da argamassa, 6 para cada idade. Posteriormente, para cada idade prevista de ruptura, os corpos de prova foram colocados na prensa com aplicação de carga de (500 ± 10) N/s até a ruptura. A prensa utilizada foi a EMIC DL-3000, mostrada na Figura 15.

A resistência à compressão é obtida pela média das resistências individuais de cada corpo de prova calculada. De acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), se o desvio absoluto máximo for superior a 0,5 MPa é preciso ser calculada uma nova

média que desconsidere o resultado mais discrepante. O ensaio é válido quando a resistência é obtida pela média de no mínimo 4 CPs, caso contrário é recomendável refazer o ensaio.

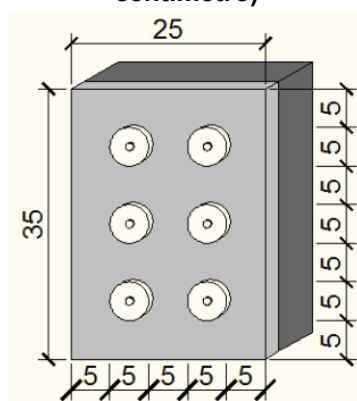
3.4.5.4 Resistência de aderência à tração

Para avaliar a aderência das argamassas autonivelantes elaboradas sobre substratos de concreto, executou-se o ensaio de resistência de aderência à tração conforme os requisitos da NBR 13528 - 2 – “Revestimento de paredes de argamassa inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 2: Aderência ao substrato” (ABNT, 2019). Neste ensaio é aplicado um esforço normal de tração por um equipamento de tração, chamado de dinamômetro, dessa forma, é verificada a tensão máxima suportada pela argamassa e sua aderência ao substrato.

A norma recomenda que para argamassas de cimento e areia o ensaio seja realizado aos 28 dias, contados a partir da aplicação da argamassa sobre o substrato de concreto. Para a realização do ensaio primeiramente foi feita a limpeza da superfície que receberá a argamassa, para evitar fatores que possam prejudicar a aderência. Também é indicado pela norma que o ensaio seja composto de 12 corpos de prova.

Para a confecção dos corpos de prova, foi adotada a metodologia proposta por Stolz (2011), em que para cada placa de argamassa foram perfurados, com uma serra copo, 6 CPs de seção circular espaçados entre si em 5 cm e aprofundados no substrato em 5 mm, conforme o esquema apresentado na Figura 16.

Figura 16: Esquema para a realização do ensaio de resistência de aderência à tração (cotas em centímetro)



Fonte: Stolz (2011)

Para esta pesquisa, adotou-se o mesmo método de arrancamento proposto por Stolz (2011), no entanto como serão ensaiados 2 tipos argamassas autonivelantes, optou-se por aplicar o revestimento de argamassa autonivelante sobre a mesma superfície de concreto polido com dimensões de 50 x 50 cm, separada em duas parcelas, por fôrmas de madeira. Após 28 dias da moldagem sobre substrato de concreto, foram feitos os cortes no revestimento, estendidos em 5 mm dentro do substrato, para na sequência serem coladas em cada placa as pastilhas, para realizar o ensaio.

O ensaio foi realizado com aparelho para teste de resistência à aderência de argamassas da marca Contenco, apresentado na Figura 17, acoplado à pastilha, na qual foi aplicada um esforço de tração perpendicular, até a ruptura.

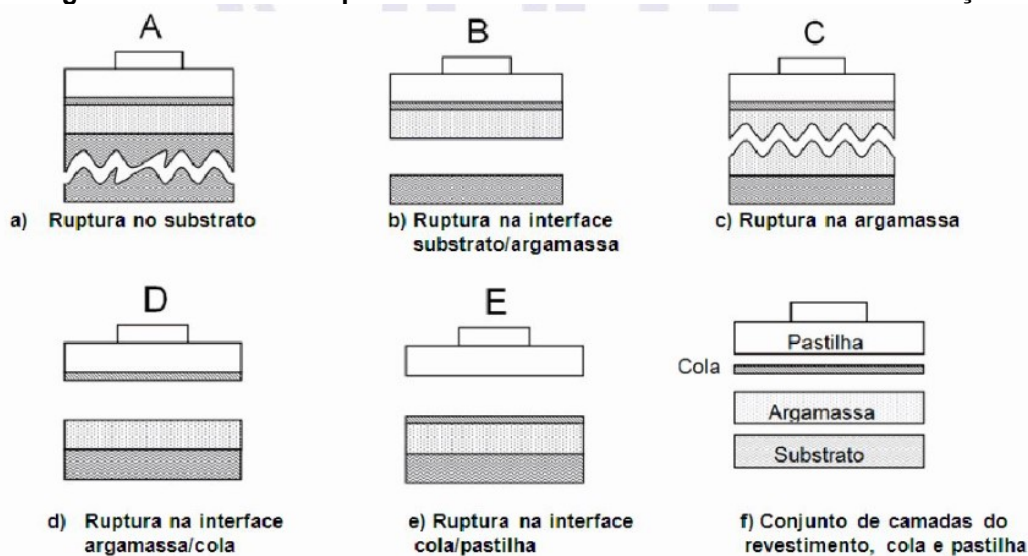
Figura 17: Aparelho utilizado para o ensaio de resistência de aderência à tração



Fonte: a autora (2022)

De acordo com a NBR 13528 – 2 (ABNT, 2019), a resistência de aderência a tração, expressa em megapascals (MPa), corresponde a razão entre a força de ruptura, expressa em Newtons (N) e a área da seção do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm). A norma ainda aponta que a forma de ruptura dos CPs deve ser expressa em porcentagem de ocorrência. Algumas possíveis formas de ruptura são apresentadas na Figura 18.

Figura 18: Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração.



Fonte: NBR 13528 - 2 (ABNT, 2019)

Nesta pesquisa a porcentagem de ocorrência de cada forma de ruptura foi feita com base na análise visual dos corpos de prova após o rompimento, sendo apenas um valor aproximado.

3.4.6 Etapa 6: Ensaios no estado endurecido – Propriedades de durabilidade

3.4.6.1 Absorção de água por capilaridade

O teor de absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade foram determinados utilizando três corpos de prova, prismáticos, moldados conforme as indicações da NBR 13279 (ABNT, 2005), para as idades de 28 e 91 dias. Para a realização do ensaio seguiu-se com as prescrições das NBR 15259 – “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade” (ABNT, 2005).

Primeiramente, os CPs foram preparados, por meio do lixamento de sua superfície, após terem sido limpos, foi tomada a massa inicial da amostra (m_0). Na sequência, os CPs foram colocados com a face quadrada sobre os suportes no recipiente de ensaio, como apresentado na Figura 19. Determinou-se a massa saturada dos CPs aos 10 minutos (m_{10}) e aos 90 minutos (m_{90}), antes da pesagem os corpos de prova foram secos com pano úmido para retirar o excesso de água da amostra e

imediatamente após o término da pesagem, os CPs devem ser devolvidos ao recipiente de ensaio.

Figura 19: Recipiente utilizado para a realização do ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: a autora (2023)

A absorção de água por capilaridade foi calculada para cada tempo, por meio da Equação (7) e o coeficiente de capilaridade foi obtido pela diferença de massa aos 10 minutos e aos 90 minutos, conforme a Equação (8).

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (7)$$

Onde:

- A_t = absorção de água por capilaridade, expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm²);
- m_t = massa do corpo de prova em cada tempo, expresso em gramas (g);
- m_0 = massa inicial do corpo de prova, expresso em gramas (g);
- t = corresponde aos tempos de 10 minutos e 90 minutos, expresso em segundo (s).

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (8)$$

Onde:

- C = coeficiente de capilaridade, expresso em gramas por decímetro quadrado pela raiz quadrada de minuto ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$);

3.4.6.2 Absorção de água por imersão

O teor de absorção e o índice de vazios foram determinados utilizando dois corpos de prova de cada uma das argamassas, para as idades de 28 e 91 dias, de acordo com as prescrições da NBR 9778 – “Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica” (ABNT, 2005).

Primeiramente, as amostras foram colocadas na estufa, mantidas à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por aproximadamente 72 horas, após a retirada das amostras, todas foram pesadas e registraram-se suas massas (m_s). Posteriormente, as amostras foram imergidas em água a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ por um período de 72 horas.

De acordo com a normativa, após serem retiradas da imersão as amostras deveriam ser submetidas a um processo de ebulição por 5 horas, para então, após a água esfriar naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, serem tomadas as massas das amostras com auxílio de uma balança hidrostática (m_i). Porém, pela falta de equipamentos laboratoriais para realizar essa etapa de maneira segura, tal procedimento não foi feito e foram tomadas as massas hidrostáticas das amostras após o período de 72 h em imersão em água.

Por fim, as amostras foram secas e foi registrado sua massa (m_{sat}). O teor de absorção e o índice de vazios são obtidos a partir das equações (9) e (10), respectivamente.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (9)$$

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

- A = absorção, expressa em porcentagem (%);

- I_v = índice de vazios, expresso em porcentagem (%);
- m_{sat} = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;
- m_s = massa da amostra seca em estufa;
- m_l = massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

3.4.6.3 Análise microestrutural

Para realizar uma análise qualitativa das argamassas ensaiadas foi feita a avaliação microestrutural das amostras. Sendo assim, a microestrutura e a análise elementar das argamassas produzidas foram verificadas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O uso do MEV, permite que sejam obtidas informações sobre a morfologia e a identificação de elementos químicos das argamassas ensaiadas, ou seja, é possível identificar os produtos da hidratação do cimento e das reações com a CCA. No entanto, neste trabalho o MEV foi utilizado com objetivo de ser realizada uma análise microestrutural que possibilitasse a avaliação da porosidade das argamassas, que previamente foram quantificadas e avaliadas.

Para a realização do ensaio pelo MEV, foram separados fragmentos de corpos de prova ensaiados à compressão, de todas as idades. Previamente a análise microestrutural, as amostras de argamassa foram mantidas em solução de álcool isopropílico por (24 ± 2) h e posteriormente foram mantidas por 48 h em estufa a 40 °C, processo de interrupção da hidratação e secagem conforme proposto por Silva (2001). Para a realização da análise microestrutural foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo TM3000, Hitachi, nas aproximações de 100x, 500x e 1000x.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do cimento

Para avaliar o cimento CP V – ARI utilizado, foi feito o ensaio de resistência à compressão do mesmo para a idade de 7 dias com quatro corpos de prova, conforme o estabelecido na NBR 7215 (ABNT, 2019). Este ensaio foi executado para verificar se a resistência do cimento utilizado atingia o limite estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018) de 34 MPa aos 7 dias.

Na Tabela 13 são apresentadas as resistências individuais de cada CP, assim como a resistência à compressão média, o resultado do CP 4 foi excluído do cálculo da resistência à compressão, visto que era o que mais se afastava da média.

Tabela 13: Resistência à compressão do cimento CP V – ARI aos 7 dias

CP's	CP V – ARI (MPa)	NBR 16697 (ABNT, 2018)
1	24,32	34 MPa
2	24,37	
3	22,11	
4	19,56*	
Média (MPa)	23,60	
Desvio máximo (MPa)	1,29	
Coef. Variação (%)	5%	

Nota: * Valor excluído do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

Analisando os resultados percebeu-se que o valor de resistência à compressão obtido foi inferior ao limite estabelecido pela normativa aos 7 dias de idade. A resistência à compressão estabelecida pela NBR 16697 (ABNT, 2018) é 44% superior à resistência média obtida pelo ensaio.

Dessa forma, o resultado de resistência à compressão do cimento CP V – ARI obtido indica que o material não está alcançando sua resistência nas idades iniciais. Ainda assim, como há maior probabilidade que resistência à compressão do CP V – ARI seja alcançada aos 28 dias, os resultados de resistência do cimento irão

interferir no desempenho das argamassas, considerando que estas serão ensaiadas apenas para idades a partir de 28 dias.

4.2 Estudo da argamassa

A dosagem da argamassa com uso de CCA em substituição à areia foi feita partindo da proporção de materiais, obtida na pesquisa de Kaszuba e Pereira Filho (2022), de 1:1,25:0,0048:0,0143:0,4 (cimento: agregado miúdo: superplastificante: aditivo modificador de viscosidade: água), com o qual se obtiveram bom resultados para a argamassa de referência, sem uso da cinza, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20: Análise visual da argamassa de referência, A0



Fonte: a autora (2022)

Para validar as argamassas testes, foram avaliados os parâmetros de resistência à segregação e diâmetro mínimo de espalhamento de 240 mm. Na Tabela 14 são apresentadas as tentativas feitas para a adaptação da proporção de materiais, com a argamassa A10, partindo do traço de 1:1,39:0,0066:0,017:0,47, no qual aumentou-se proporção de areia na dosagem para reduzir o consumo de cimento.

Tabela 14: Dosagens de adaptação ao traço com redução de consumo de cimento

Dosagem		Proporção dos Materiais						Presença de segregação	Espalhamento
Tentativas	c	CCA	A	Agregado Total	a/c	SP	AMV		
T1	1	0,28	1,11	1,38	0,47	0,66%	1,66%	Sim	< 240 mm
T2	1	0,28	1,11	1,38	0,50	0,73%	1,73%	Sim	< 240 mm
T3	1	0,28	1,11	1,38	0,50	0,84%	2,00%	Sim	240 mm
T4	1	0,28	1,11	1,38	0,50	0,88%	2,00%	Sim	240 mm
T5	1	0,19	1,09	1,28	0,49	0,84%	2,00%	Não	> 240 mm

Legenda: c – cimento; A – areia; CCA – cinza de casca de arroz; a – água; SP – superplastificante; AMV – modificador de viscosidade

Fonte: a autora (2023)

Com as duas primeiras dosagens não se obtiveram bons resultados, visto ambas argamassas não atingiram o espalhamento mínimo necessário para serem consideradas autonivelantes e, ainda, apresentaram sinais de segregação do resíduo adicionado, mesmo após a correção na quantidade de aditivos químicos e da relação água/cimento na segunda tentativa. A relação água/cimento das dosagens foi alterada, pois os teores de aditivos já estavam se aproximando dos limites de utilização propostos pelos fabricantes.

Para a terceira e quarta dosagem foram feitas novas correções do aditivo superplastificante, mantendo a proporção da relação água/cimento e do modificador de viscosidade, no entanto, as pastas ainda apresentaram sinais de segregação do resíduo, como observado na Figura 21.

Figura 21: Aspecto visual da argamassa produzida com a quarta tentativa de dosagem

Fonte: a autora (2023)

De acordo com Mendes (2019), a falta de finos em misturas autonivelantes pode ser um fator relevante para o travamento do espalhamento da pasta por ação da gravidade e para o aumento da tendência a segregação. A solução adotada pela autora foi o aumento do consumo de cimento na dosagem, de forma acrescer a proporção de material fino na dosagem. Mendes (2019), também fez uso do RCMG, material de granulometria fina que promove absorção da água em excesso na mistura, sem prejudicar o espalhamento.

Sendo assim, para a quinta dosagem optou-se por reduzir a proporção de agregado miúdo e a porcentagem de cinza de casca de arroz adicionada, consequentemente aumentando o teor de finos de aglomerante, resultando em traço semelhante à argamassa de referência A0, com 1:1,28 (cimento: agregado total) e com 15%, em massa, de teor substituição do agregado miúdo pela CCA.

A dosagem T5 de materiais resultou em uma argamassa sem indícios de segregação e que obteve espalhamento superior ao mínimo indicado, sendo, portanto, utilizada para serem produzidas as duas argamassas teste A10 e A20. Na Tabela 15 são mostrados os traços resultantes das três argamassas produzidas e na Tabela 16 são mostradas as quantidades, em massa, dos materiais utilizados para a moldagem de 6 corpos de prova prismáticos.

Tabela 15: Traços adotados para as dosagens das argamassas

Mistura	c	CCA	A	Agregado Total	a/c	SP	AMV	Teor de substituição
A0	1	0	1,25	1,25	0,40	0,0048	0,0143	0
A10	1	0,19	1,0,9	1,28	0,49	0,0084	0,0200	15%
A20	1	0,22	1,22	1,44	0,55	0,0095	0,0250	15%

Legenda: c – cimento; A – areia; CCA – cinza de casca de arroz; a – água; SP – Superplastificante; AMV – modificador de viscosidade

Fonte: a autora (2023)

Tabela 16: Quantidade, em massa, de materiais utilizados para produção das argamassas teste

Mistura	Cimento (g)	CCA (g)	Areia (g)	SP (g)	AMV (g)	Água (g)	Agregado total (g)	C (kg/m³)
A0	1190	0	1487,5	5,7	17,0	476	1487,5	787,55
A10	1190	227,8	1292,3	10,0	23,8	581,8	1520,1	632,40
A20	1190	256,4	1454,0	11,3	29,8	654,5	1710,4	578,26

Legenda: C – consumo de cimento

Fonte: a autora (2023)

A EFNARC (2001), como citado no referencial bibliográfico, estabelece que, para misturas de argamassa autonivelantes, o consumo de cimento deva ser entre 350 e 450 kg/m³, se maior que 500 kg/m³ de cimento a mistura tende a apresentar maior retração e se o consumo de cimento for menor que 350 kg/m³ é importante que sejam incluídos na mistura materiais fíler.

Ainda assim, Mendes (2019) produziu em suas pesquisas argamassas autonivelantes com consumo de cimento de 608,77 kg/cm³ e relação água/ cimento de 0,55 para uma dosagem com proporção de cimento: areia de 1:1,5, com adição de RCMG. Segundo a autora, alto consumo de cimento em argamassas autonivelantes permite maior controle da exsudação da pasta, garantido bom desempenho mecânico, à vista disso, a dosagem estudada obteve resistência à compressão de 12,24 MPa em 24 horas e 36,34 MPa em 28 dias.

4.3 Propriedades no estado fresco

Os ensaios no estado fresco tiveram como principal objetivo caracterizar as argamassas para assegurar que a proporção de materiais adotada confere à pasta propriedades suficientes para que as mesmas apresentem bom desempenho mecânico.

Sendo assim, os resultados referentes aos ensaios realizados no estado fresco estão apresentados na Tabela 17 e 18 e correspondem ao espalhamento de cada mistura, a massa específica, o teor de ar incorporado e análise visual.

Tabela 17: Resultados dos ensaios no estado fresco			
Propriedade	A0	A10	A20
Espalhamento (mm)	320	305	235
Densidade de massa (g/cm³)	2,09	1,82	1,73
Teor de ar incorporado (%)	5,09	11,66	14,75

Fonte: a autora (2023)

Tabela 18: Resultados das análises visuais das argamassas produzidas

Mistura	Imagens do ensaio de espalhamento
A0 c:A:SP:AMV:a/c 1:1,25: 0,48%:1,43%:0,40 A argamassa apresentou pouca desuniformidade de borda, visto que as três medidas de diâmetro aferidas ficaram próximas. E as bordas da argamassa são altas e com forma lisa, o que indica boa coesão e menor tendência a segregação e exsudação.	
A10 c:CCA: A:SP:AMV:a/c 1:0,19:1,09:0,84%:2,00%:0,49 A argamassa apresentou bordas uniformes, visto que as três medidas de diâmetro aferidas ficaram próximas. E as bordas da argamassa são altas e com forma lisa, indicativo de boa coesão e baixa tendência a segregação e exsudação.	
A20 c:CCA:A:SP:AMV:a 1:0,22:1,22:0,95%:2,25%:0,55 A argamassa apresentou bordas uniformes, visto que as três medidas de diâmetro aferidas ficaram próximas. As bordas da argamassa apresentaram forma lisa, mas se mostraram mais baixas e líquidas, podendo indicar segregação de materiais.	

Fonte: a autora (2023)

Os espalhamentos das argamassas produzidas apresentaram grande variação com relação a argamassa de referência, para a argamassa A10 houve uma redução de 15% do espalhamento e para a argamassa A20 a redução foi de 27%. De acordo com Libre, Khoshnazar e Shekarchi (2010), quanto maior a finura e a área específica dos finos adicionados em misturas autonivelantes o espalhamento da pasta tende a reduzir, visto que para manter a mesma fluidez é necessário maior quantidade para molhar a superfícies das partículas adicionadas.

Carvalho (2015) em sua pesquisa observou a mesma tendência, com o aumento da porcentagem de finos na mistura o espalhamento reduz. O autor constatou que ao produzir misturas binárias e ternárias com resíduo de construção e demolição (RCD) a fluidez das argamassas reduzia, provavelmente devido a elevada área específica dos grãos do resíduo.

Analogamente, Perin e Zapelini (2021) observou em sua pesquisa redução de até 2,2% no espalhamento de argamassas autonivelantes com 16% de substituição de areia por fíler calcário. Conforme o autor, quanto maior a quantidade de fíler calcário na composição das argamassas menor o espalhamento das mesmas, além de aumentar o tempo de escoamento da pasta, ou seja, o fíler calcário promoveu maior viscosidade as argamassas.

A argamassa A20, assim como já citado, apresentou espalhamento inferior as demais argamassas produzidas e, também, exibiu uma maior concentração de materiais no centro, fato esse pode ser resultado da menor quantidade de partículas finas de cimento em sua composição. O mesmo foi observado por Carvalho (2015), em sua pesquisa pastas com 20% de substituição de cimento apresentavam sinais mais proeminentes de segregação dos resíduos.

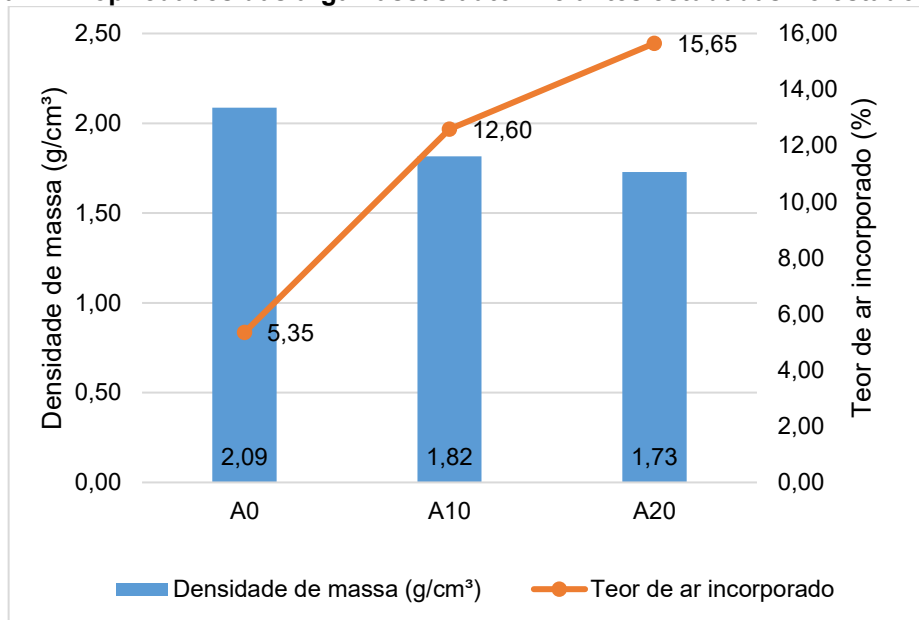
Resíduos, como a cinza pesada, possuem em seu interior maior volume de vazios, promovendo maior absorção de parte da água de amassamento da mistura, tal característica permite um maior controle da exsudação da mistura, mas torna necessário uso de maiores dosagens de aditivos químicos, diminuindo a estabilidade da pasta frente a segregação (CARVALHO, 2015).

Outro fator que pode interferir no espalhamento da argamassa é a textura das partículas dos resíduos utilizados, quanto mais rugosa, irregular e desigual a textura das partículas menor será a fluidez da pasta, devido ao aumento da fricção interna entre as partículas e da resistência interna ao espalhamento, consequentemente, aumentando a demanda por aditivos químicos para alcançar o espalhamento necessário (RIZWAN; BIER, 2011; SCOLARO, 2020).

Na Figura 22 é apresentada a relação que se destaca entre a densidade de massa das argamassas no estado fresco e o teor de ar incorporado nas mesmas, quanto maior a incorporação de ar nas pastas menor é a sua densidade de massa, consoante com o apresentado na bibliografia (TAMBARA JÚNIOR, 2016; SILVA, 2016; ALVES, 2020). Conforme Zaparte (2020), o teor de ar incorporado e a

densidade de massa são duas propriedades relacionadas, visto que, quanto maior a porção de ar na argamassa, maior será seu volume.

Figura 22: Propriedades das argamassas autonivelantes estudadas no estado fresco



Fonte: a autora (2023)

Tambara Júnior (2016), produziu argamassas autonivelantes com teor de ar incorporado variando de 8,6% a 16,4% e densidade de massa variando de 1,80 g/cm³ a 1,92 g/cm³. Silva (2016), obteve argamassas com teor de ar incorporado variando de 12,0% a 16,0% e densidade de massa variando de 2,00 g/cm³ a 2,1 g/cm³. Alves (2020), ao avaliar argamassas autonivelantes com cimento Portland CPV-ARI obteve resultados de teor de ar incorporado de 17,0% e densidade de massa de 1,80 g/cm³ ao utilizar sílica ativa em substituição ao cimento e teor de ar incorporado de 16,5% e densidade de massa de 1,80 g/cm³ ao utilizar metacaulim em substituição ao cimento.

De acordo com Silva (2016), o uso de resíduos de alta área específica contribui para o aprisionamento de bolhas de ar às argamassas autonivelantes durante o processo de mistura. Outro fator apresentado pela autora para o aumento do teor de ar incorporado e, conseqüente, redução da densidade de massa, é a redução do consumo de cimento, visto que a menor disponibilidade de grãos de cimento dificulta o preenchimento dos vazios entre as partículas de resíduos.

Chaves (2019) avaliou dois tipos de argamassas autonivelantes, uma com adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) e outra com

aditivo modificador de viscosidade, para estas a densidade de massa foi de 2,14 g/cm³ e 2,17 g/cm³, respectivamente, tendo a argamassa autonivelante de referência densidade de massa igual a 2,24 g/cm³. A autora afirmou que o uso de VMA reduz a tensão superficial da água na mistura e por consequência aumenta a tendência de incorporação de ar na mistura.

O uso de resíduos que possuem distribuição granulométrica desigual e partículas de formato angular, como o RBMG, tende a amenizar o efeito *filler* e consequentemente aumentar a incorporação de ar na mistura (CHAVES, 2019). Zaparte (2020), observou o mesmo efeito em argamassas de assentamento com adição de CCA, a autora explica que a porosidade interna das partículas da cinza de casca de arroz tem influência direta com o aumento do teor de ar incorporado na argamassa.

Bezerra (2010), produziu argamassas de assentamento com CCA, todas as argamassas produzidas com a cinza apresentaram valores de teores de ar incorporado maiores que a argamassa de referência, para o traço com 30% de CCA em substituição ao cimento, o teor de ar incorporado resultou em 48,96% e a densidade de massa em 1,92 g/cm³. Resultado esse, segundo a autora, tem como principais motivadores a estrutura porosa da CCA residual e a quantidade de água utilizada para a confecção das argamassas.

4.4 Propriedades no estado endurecido

As argamassas autonivelantes foram caracterizadas quanto sua densidade de massa e seu desempenho mecânico, estudado ao longo do tempo, foi avaliado em termos de resistência à compressão, à tração na flexão e de aderência à tração. Ainda, foi feita uma avaliação da durabilidade das argamassas com relação aos parâmetros de absorção por capilaridade e índice de vazios.

4.4.1 Densidade de massa

Os resultados das densidades de massa médias dos 3 CP's ensaiados para cada argamassa aos 28 dias, o desvio padrão e o coeficiente de variação são

apresentados na Tabela 19. Na Figura 23 é mostrada a evolução da densidade de massa e do volume das argamassas ao longo das idades de ruptura 28, 60 e 91 dias.

Tabela 19: Densidade de massa das argamassas autonivelantes a 28 dias

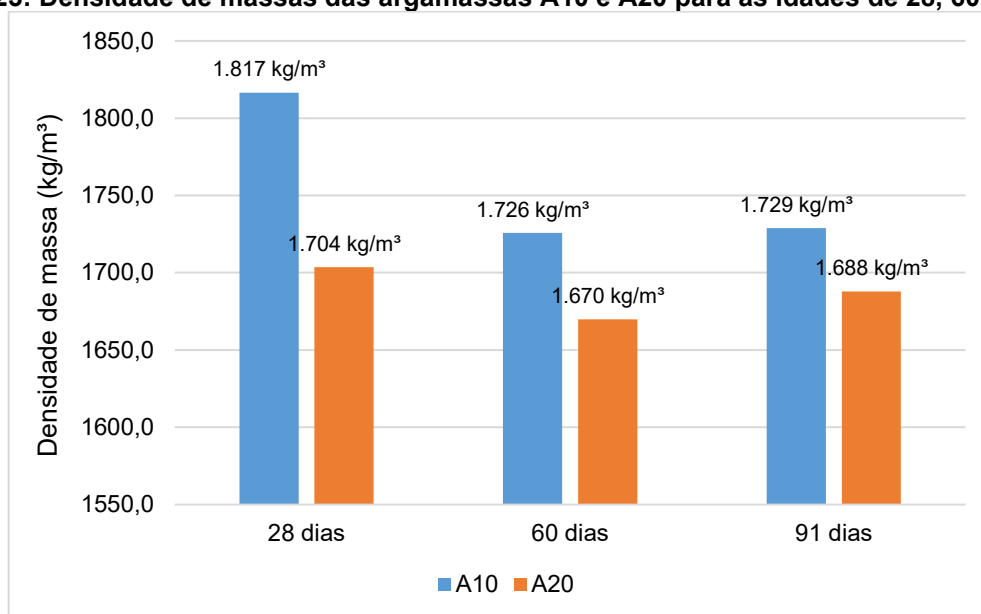
CP's	A10		A20	
	Volume (cm ³)	Densidade (kg/m ³)	Volume (cm ³)	Densidade (kg/cm ³)
1	249,9	1.803	258,9	1.664
2	251,4	1.847	253,7	1.719
3	258,9	1.799	251,8	1.728
Média	253,4 cm ³	1.817 kg/m ³	254,8 cm ³	1.704 kg/m ³
Desvio máximo	4,8 cm ³	26 kg/m ³	3,7 cm ³	35 kg/m ³
Coef. Variação	2%	1%	1%	2%

Fonte: a autora (2023)

Observando os resultados, percebeu-se que as densidades de massa das argamassas autonivelantes avaliadas foram menores que os valores encontrados na bibliografia estudada. Chaves (2019) obteve em sua pesquisa densidades de massa de 2023 kg/m³, 2088 kg/m³ e 2042 kg/m³, para argamassa sem adição, com adição de 20% de resíduo de corte de mármore e granito e com adição de 0,5% de aditivo modificador de viscosidade, respectivamente. Similarmente, Scolaro (2020) produziu nove dosagens de argamassas autonivelantes com adição de filer calcário, filer quartzoso e fino de britagem basáltico em teores de 5, 10 e 20% e para todas a densidade de massa foi superior a 2000 kg/m³.

De acordo com Chaves (2019), maiores densidades de massa visualizadas em dosagens com adição de finos, são indicativas da ocorrência do efeito *filler* como contribuinte para o processo de produtos de hidratação entre 7 e 28 dias, visto que esse processo gera o preenchimento dos vazios na estrutura da argamassa. Comparando ambas as argamassas produzidas nota-se que a argamassa A10 apresenta maior densidade de massa que a argamassa A20, podendo ser um indicativo de que o efeito *filler* é mais eficaz para a argamassa com 10% de redução do cimento.

Ademais, a diferença de densidade observada entre as argamassas, também é resultado da redução do consumo de cimento, visto que, é substituído um material de maior massa específica, pela CCA que tem menor massa específica.

Figura 23: Densidade de massas das argamassas A10 e A20 para as idades de 28, 60 e 91 dias

Fonte: a autora (2023)

As baixas densidades de massa no estado endurecido estão de acordo com o esperado e com o avaliado na pesquisa bibliográfica, visto que no estado fresco ambas as argamassas autonivelantes ensaiadas apresentaram teor de ar incorporado elevados. Os teores de aditivo modificador de viscosidade utilizados nas dosagens podem justificar os resultados encontrados, visto que a forma com que o aditivo promove viscosidade na mistura tende a formar redes de suspensão das partículas finas que resulta na formação de vazios (CHAVES, 2019).

A partir da Figura 23, verificou-se que no decorrer do tempo as densidades das argamassas A10 e A20 apresentaram uma redução 5% e 2% respectivamente, entre as idades de 28 e 60 dias e então se estabilizaram até os 91 dias. Tem-se que até os 28 dias parte da água, utilizada no processo de mistura da argamassa, ficou retida nas partículas de CCA, visto que a cinza é um resíduo de elevada porosidade, após essa idade a água passou a ser liberada, como a CCA tem baixo potencial pozolânico e a argamassa tem consumo de cimento reduzido, a água não foi consumida e os vazios da argamassa não foram preenchidos por compostos hidratados deixando os vazios na estrutura interna da argamassa.

Conforme Bezerra *et al.* (2011), a densidade de massa é uma característica inversamente proporcional à porosidade, portanto quanto menos densa a argamassa maior a porosidade de mesma, podendo interferir no desempenho da resistência mecânica do material.

4.4.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência a compressão foi realizado nas argamassas autonivelantes para as idades de 28, 60 e 91 dias, para verificar se ocorre a potencialização do efeito da cinza em idades para idades tardias, conforme apresentado nas Tabelas 20 a 22. Os resultados foram analisados e excluíram-se aqueles que se afastavam da média em mais do que 1,5 MPa.

Tabela 20: Resistência à compressão das argamassas autonivelantes a 28 dias

CP's	A0 (MPa)	A10 (MPa)	A20 (MPa)
1	39,06	32,66	27,06*
2	38,12	32,31	27,24
3	37,17	34,74	28,79
4	36,24	37,30*	28,27
5	46,10*	36,91*	28,91
6	33,74*	34,67	29,02
Média (MPa)	37,65	33,60	28,45
Desvio máximo (MPa)	1,215	1,290	0,733
Coef. Variação (%)	3%	4%	3%

Nota: * Valores excluídos do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

Tabela 21: Resistência à compressão das argamassas autonivelantes a 60 dias

CP's	A10 (MPa)	A20 (MPa)
1	33,92	28,66
2	34,53	30,40
3	38,89*	29,47
4	41,00*	28,56
5	34,12	26,00*
6	32,66	27,41
Média (MPa)	33,81	28,90
Desvio máximo (MPa)	0,806	1,114
Coef. Variação (%)	2%	4%

Nota: * Valores excluídos do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

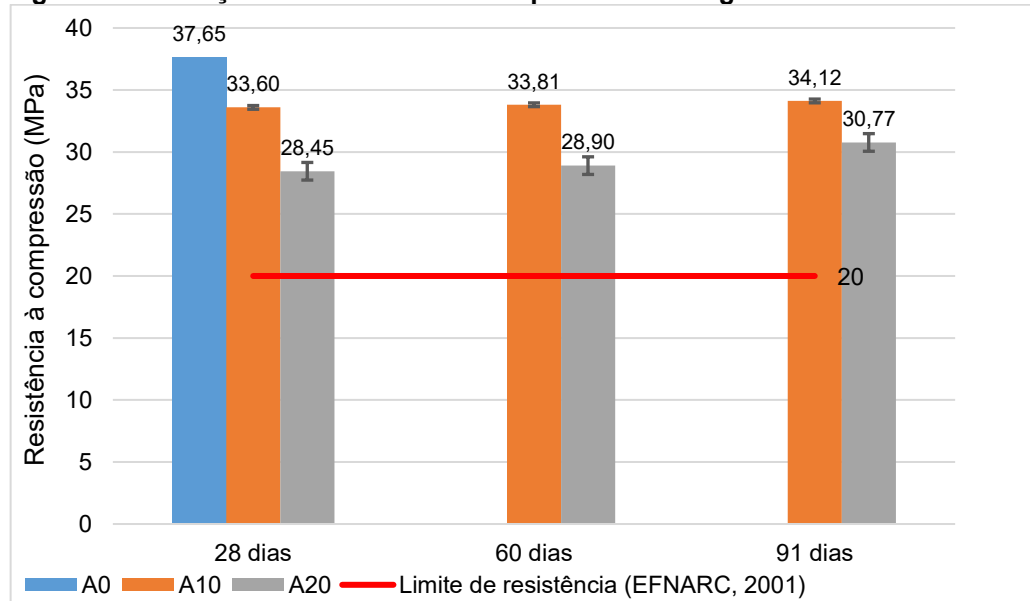
Tabela 22: Resistência à compressão das argamassas autonivelantes a 91 dias

CP's	A10 (MPa)	A20 (MPa)
1	34,67	30,48
2	32,74	26,74*
3	37,23*	32,14
4	35,17	30,86
5	39,10*	27,14*
6	33,88	29,60
Média (MPa)	34,12	30,77
Desvio máximo (MPa)	1,06	1,05
Coef. Variação (%)	3%	3%

Nota: * Valores excluídos do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

Na Figura 24 é apresentada a distribuição das resistências médias de acordo com porcentagem de redução de cimento ao longo das idades avaliadas. Os mesmos podem ser comparados por meio das Tabela 20 a 22. Na Figura 24 também é evidenciado o limite de resistência a compressão simples para pisos autonivelantes, proposto pela normativa EFNARC (2001). Analisando os resultados obtidos nessa pesquisa, observou-se que todos estão dentro do limite estabelecido pela referida norma.

Figura 24: Evolução da resistência à compressão das argamassas autonivelantes

Fonte: a autora (2023)

A partir da análise da Figura 24, observou-se que para todas as idades de ensaio as resistências médias foram inferiores a resistência a compressão da argamassa de referência aos 28 dias, sendo esta diferença menos expressiva para a argamassa A10. Ao comparar as argamassas A10 e A20, percebeu-se que para ambas a resistência à compressão sofre pouca variação e a diferença entre as argamassas teste diminuem ao longo do tempo.

A norma C1708 (ASTM, 2016), apresenta o estudo interlaboratorial, “ILS Nº. 349”, com resultados de ensaios realizados com 7 dosagens de argamassas comerciais autonivelantes, neste, a resistência à compressão média obtida em 28 dias foi de $39,15 \pm 0,86$ MPa, 4,0% superior a argamassa de referência produzida, 16,5% superior a argamassa teste A10 e 37,6% superior a argamassa teste A20. Tais reduções da resistência à compressão podem indicar que o efeito pozolânico da CCA residual não é suficiente para suprir a demanda da redução de cimento nas argamassas teste.

Mendes (2020), avaliou argamassas autonivelantes com traço semelhante ao desta pesquisa e obteve resistência à compressão média de 36,34 MPa, utilizando 40% de RCMG em substituição ao cimento, resultado este superior a resistência à compressão ao utilizar de 50% de fíler calcário em substituição ao cimento. No entanto, a autora percebeu que o RCMG é uma adição inerte visto que valores de resistência se reduziram expressivamente ao utilizar o resíduo em 50% de substituição ao cimento. Ou seja, o uso de até 40% de RCMG inerte promove bom desempenho mecânico devido ao efeito fíler do resíduo.

Ao encontro disso, tem-se que quanto maior o consumo de CCA bruta em dosagens, menores são as resistências à compressão das argamassas, visto que partículas maiores da cinza resultam em materiais de superfície mais porosa e com mais vazios internos (JAMIL, *et al.* 2016).

A variação nos valores de resistência à compressão para ambas as argamassas testes, A10 e A20, no decorrer das idades de ensaio foi baixa, tal resultado pode ser explicado pela redução do efeito *filler* da CCA em idades avançadas e reação pozolânica insuficiente para manter o desenvolvimento da resistência à compressão, mediante a redução do cimento.

Dessa forma, o maior ganho de resistência à compressão até a idade de 28 dias pode ser explicado pelo efeito *filler*, visto que resíduos que não detêm

características pozolânicas, apresentam maiores ganhos de resistência entre as idades de 7 e 28 dias em decorrência desse efeito (CHAVES, 2019).

Carvalho (2015) ainda explica que o uso de resíduos, que possuem elevada área específica, massa específica e porosidade, em argamassas autonivelantes aumentam a demanda de água no momento de mistura, reduzindo a disponibilidade de água para as reações de hidratação do cimento, fazendo com que a resistência até 7 dias seja baixa. Porém, a quantidade de água absorvida pelos resíduos inicialmente é liberada na argamassa o que dá continuidade ao processo de hidratação de partículas de cimento que não foram hidratadas completamente, gerando um salto de resistência até a idade de 28 dias.

Silva (2016), verificou ao produzir argamassas autonivelantes em que o consumo de cimento foi substituído por cinza volante, que a resistência à compressão a 28 dias foi menor que as resistências das argamassas de referência. A autora explicou que esse resultado pode ser decorrente da redução de consumo nas argamassas, como também pode ter influência das reações com a cinza volante ainda não terem ocorrido e, ainda, pode ser devido ao aumento de relação água/ cimento. Quanto maior a dosagem de água na mistura maior o volume de vazios na argamassa endurecida após o consumo da água nas reações de hidratação, tais pontos vazios resultam em regiões de acúmulo de tensões o que ocasiona perda de resistência mecânica (SILVA, 2016).

Os resultados das resistências mecânicas também podem ter sofrido influência do teor de ar incorporado na mistura, percebeu-se que a argamassa A20, a qual apresentou maior teor de ar incorporado, teve a maior perda de resistência à compressão. Fortunato *et al.* (2019), percebeu a mesma relação ao produzir argamassas autonivelantes com substituição de cimento pelo fino de britagem, os autores obtiveram resistência de 42 MPa para a argamassa com 20%, em volume, de substituição de cimento por fino de britagem, valor 17,6% menor que a argamassa de referência.

Ainda assim, os resultados obtidos nessa pesquisa se assemelham aos resultados de Carvalho (2015), que utilizou traço 1:2 (cimento: areia) para produzir argamassas autonivelantes com 15% de substituição do cimento por misturas binárias e ternárias de fíler calcário, cinza volante e resíduo de demolição de construção, alcançando resistências entre 25 e 30 MPa.

Ademais, Silva (2016), em sua pesquisa, elaborou dosagens de argamassas autonivelantes com traço de 1:1,25 (cimento: areia) e para reduzir o consumo de cimento fez a substituição de 30% e 50% do aglomerante por cinza volante, para estas a resistência à compressão aos 28 dias reduziu 4% e 56% com relação a argamassa de referência, resultado esperado decorrente da redução de cimento que variou de 746,7 kg/m³ a 346,06 kg/m³, para a argamassa de referência e a argamassa com 50% de substituição, respectivamente.

O efeito esperado pelo uso de finos em argamassas autonivelantes é o aumento de resistência mecânica, devido ao refinamento de poros que garante um melhor adensamento da mistura e em razão do efeito químicos, visto que a sílica das pozolanas tem potencial para reagir com hidróxido de cálcio do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (ALVES, 2020). Em sua pesquisa Alves (2020) produziu duas dosagens de argamassas autonivelantes com cimento CPV -ARI com adição de 10% de sílica ativa e metacaulim com resistência à compressão aos 28 dias de 49,37 MPa e 47,76 MPa, respectivamente.

De acordo com Chaves (2019) e Carvalho (2015), existe uma tendência de argamassas de alta resistência mecânica apresentarem estrutura interna menos porosa, característica que garante uma maior resistência ao ataque de agentes agressivos que podem degradar o material no decorrer do tempo. Conforme a NBR 11801 – “Argamassa de alta resistência mecânica para pisos – Requisitos” (ABNT, 2012), para uma argamassa de piso ser considerada de alta resistência mecânica precisa atingir resistência a compressão maior que 40 MPa.

Sendo assim, mesmo que as argamassas produzidas não tenham atingido alta resistência mecânica, seus resultados se apresentaram semelhantes aos da bibliográfica estudada, mostrando que mesmo com elevada redução no consumo de cimento e uso de CCA em seu estado residual as argamassas alcançaram bom desempenho mecânico quanto a sua resistência à compressão.

4.4.3 Resistência à tração na flexão

Da mesma forma que o ensaio apresentando anteriormente, o ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado nas argamassas autonivelantes para as idades de 28, 60 e 91 dias, conforme apresentado nas Tabelas 23 a 25. Os resultados

foram analisados e excluíram-se aqueles que se afastavam da média em mais do que 0,5 MPa.

Tabela 23: Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes a 28 dias

CP's	A0 (MPa)	A10 (MPa)	A20 (MPa)
1	8,08	4,47*	5,48
2	9,60*	5,10	4,85
3	7,42	5,45	4,99
Média (MPa)	7,75	5,28	5,11
Desvio máximo (MPa)	0,47	0,247	0,331
Coef. Variação (%)	6%	5%	6%

Nota: * Valores excluídos do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

Tabela 24: Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes a 60 dias

CP's	A10 (MPa)	A20 (MPa)
1	6,06	5,15*
2	6,50	5,85
3	6,74	5,85
Média (MPa)	6,43	5,85
Desvio máximo (MPa)	0,345	0,000
Coef. Variação (%)	5%	0%

Nota: * Valor excluído do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

Tabela 25: Resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes a 91 dias

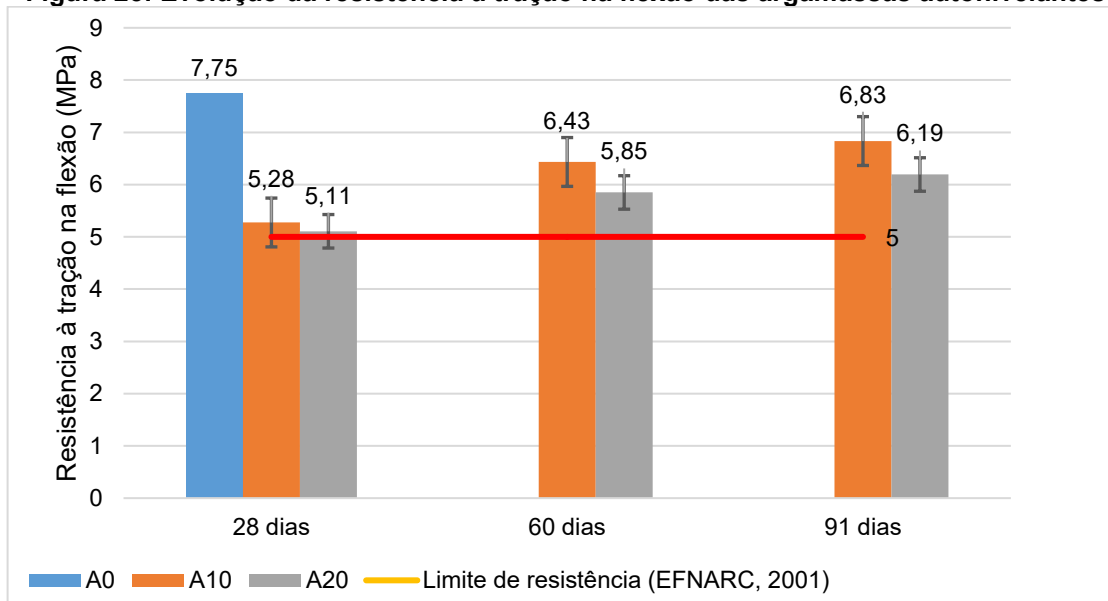
CP's	A10 (MPa)	A20 (MPa)
1	6,74	6,20
2	6,67	6,41
3	7,09	5,97
Média (MPa)	6,83	6,19
Desvio máximo (MPa)	0,23	0,22
Coef. Variação (%)	3%	4%

Fonte: a autora (2023)

Na Figura 25 é apresentada a distribuição das resistências médias de acordo com porcentagem de redução de cimento ao longo das idades avaliadas. Os mesmos podem ser comparados por meio das Tabela 23 a 25. Na Figura 25, também

é evidenciado o limite de resistência à tração na flexão para pisos autonivelantes, proposto pela normativa EFNARC (2001). Analisando os resultados obtidos nessa pesquisa, observou-se que todos estão dentro do limite estabelecido pela referida norma.

Figura 25: Evolução da resistência à tração na flexão das argamassas autonivelantes



Fonte: a autora (2023)

Ao analisar a Figura 25, verificou-se que para todas as idades de ensaio as resistências médias foram inferiores a resistência à tração na flexão da argamassa de referência aos 28 dias. A partir da comparação entre as argamassas A10 e A20, percebeu-se que para ambas a resistência à tração na flexão tem maior crescimento entre as idades de 28 e 60 dias e apresentou uma estabilização de 60 para 90 dias. Além disso, cabe ressaltar que a diferença entre as argamassas teste aumentou ao longo do tempo, ou seja, o ganho de resistência à tração foi maior para a argamassa teste A10.

O estudo interlaboratorial “ILS N°. 349” da norma C1708 (ASTM, 2016), a partir de resultados de ensaios realizados com 7 dosagens de argamassas comerciais autonivelantes, aponta uma resistência à flexão média em 28 dias de $10,75 \pm 0,57$ MPa. Tal resultado é 36,4% superior a argamassa de referência produzida e duas vezes maior que as resistências das argamassas teste A10 e A20.

Da mesma forma que para a resistência a compressão, os resultados da resistência à tração para idades mais tardias podem indicar que o efeito pozolânico da CCA residual não compensou a redução de cimento nas argamassas teste. Alto

teor de pozolanas em composições cimentícias reduz o calor de hidratação e, consequentemente, interfere na velocidade de reação da pozolana com o hidróxido de cálcio, fazendo com que o ganho final de resistência não seja alcançado (ALVES, 2020).

De acordo com Jamil *et al.* (2016), o efeito pozolânico e *filler* de cinzas de casca de arroz com maior dimensão de partículas é pouco significativo, até mesmo a idades mais tardias, se comparado com o processo de hidratação de argamassas formuladas apenas com cimento.

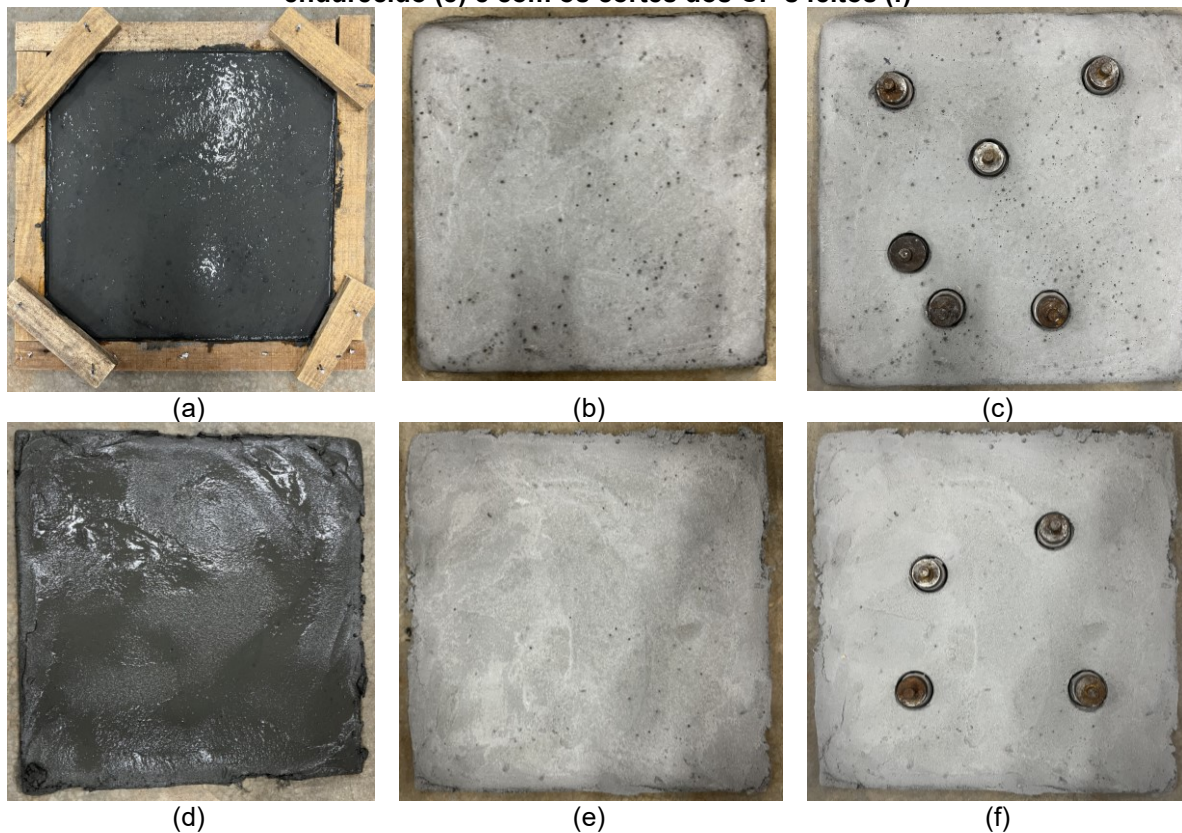
Ao analisar os resultados de resistência à tração obtidos nessa pesquisa percebeu-se que estes são inferiores a resultados obtidos pela bibliografia estudada. Alves (2019), obteve valores de resistência de 10,71 MPa e 10,63 MPa aos 28 dias em argamassas autonivelantes de com cimento CPV – ARI e 10% de adição mineral. Resultado semelhante foi observado na pesquisa de Mendes (2019), que obteve valores de 10,50 MPa para argamassas com 40% de substituição de cimento por RCMG e 10,75 MPa para argamassas com substituição de 50% do cimento por filer calcário.

Ademais, ao utilizar formulações com 30% e 50% de substituição do cimento por cinza volante, Silva (2016), obteve valores de resistência à tração de 7 MPa, valores superiores aos encontrados nessa pesquisa para consumos de cimento semelhantes. Ainda assim, a NBR 11801 (ABNT, 2012) classifica argamassas com mais de 4 MPa de resistência à tração na flexão como argamassas de alta resistência mecânica para pisos e todas as argamassas produzidas nessa pesquisa ultrapassaram 4 MPa.

4.4.4 Resistência de aderência à tração

A resistência de aderência a tração das argamassas teste foram determinadas para duas idades, 28 e 60 dias após a aplicação da argamassa no substrato. Na Figura 26 são mostradas as placas de contrapiso recém fabricadas e as mesmas após o período de cura com os CP's preparados.

Figura 26: Placas de contrapiso da argamassa A10 no estado fresco (a) no estado endurecido (b) e com os cortes dos CP's feitos (c) e da argamassa A20 no estado fresco (d) no estado endurecido (e) e com os cortes dos CP's feitos (f)



Fonte: a autora (2023)

Os resultados de resistência de aderência à tração, a forma e a frequência de ruptura dos CP's das argamassas autonivelantes estão apresentadas na Tabelas 26 e 27. Foram excluídos do cálculo da análise os valores que se afastavam em mais de 0,5 MPa do valor da média.

Tabela 26: Resistência de aderência à tração das argamassas autonivelantes a 28 dias

Amostra	A10		A20	
	Tensão (MPa)	Ruptura	Tensão (MPa)	Ruptura
1	1,29	A	0,34*	S/A
2	1,27	A	0,46	S/A
3	0,80*	A	0,52	S/A
4	0,41*	S/A	0,27*	S/A
5	1,5	A	-	-
Média (MPa)	1,35		0,49	
Desvio máximo (MPa)	0,13		0,04	
Coef. Variação (%)	9%		9%	

Legenda: A – Ruptura na argamassa; S – Ruptura no substrato; S/A – Ruptura na interface substrato argamassa.

Nota: * Valores excluídos do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

Tabela 27: Resistência de aderência à tração das argamassas autonivelantes a 60 dias

Amostra	A10	A20
	Tensão (MPa) Ruptura	Tensão (MPa) Ruptura
1	0,54 S/A	0,55 S/A
2	0,58 S/A	0,54 S/A
3	0,37* S/A	0,55 S/A
Média (MPa)	0,56	0,55
Desvio máximo (MPa)	0,03	0,01
Coef. Variação (%)	5%	9%

Legenda: A – Ruptura na argamassa; S – Ruptura no substrato; S/A – Ruptura na interface substrato argamassa
 Nota: * Valor excluído do cálculo da média.

Fonte: a autora (2023)

Durante o ensaio na primeira idade de 28 dias percebeu-se que os resultados estavam sofrendo maior variação, conforme mostrado na Tabela 26, em decorrência dos cortes feitos nas placas das argamassas teste. À vista disso, como alguns cortes feitos se aproximavam mais do substrato e outros atingiam apenas a espessura da placa moldada, em alguns resultados observou-se a interferência maior da resistência da argamassa ao arrancamento, do que a própria resistência entre a ligação argamassa/ substrato.

Sendo assim, optou-se por ser refeito o ensaio a idade de 60 dias tomando um maior cuidado para que os cortes feitos nas placas das argamassas ficassem mais próximos do substrato e assim pudesse ser avaliada com maior precisão a resistência à aderência entre substrato e argamassa e a comparação entre os dois tipos de argamassas autonivelantes avaliadas. Para esta idade de ruptura os resultados se mostraram mais precisos, dada a proximidade dos valores obtidos, conforme apresentado na Tabela 27.

É válido ressaltar que para a nova idade de rompimento foi tomado cuidado para que fosse seguido com o proposto pela NBR 13528 – 2 (ABNT, 2010), de forma que os pontos de arrancamento ficassem espaçados entre si em no mínimo 50 mm.

Analisando os resultados para a idade de 60 dias, destacou-se que ambas as argamassas apresentaram mesmo valor de resistência de aderência à tração média e a mesma forma de ruptura, majoritariamente na interface substrato/ argamassa. Semelhantemente, Chaves (2019) obteve para duas de suas dosagens testadas a maioria das rupturas acontecendo entre a interface substrato/ argamassa ou na argamassa, com resistências médias variando de 1,65 MPa a 2,07 MPa.

Na Tabela 28 e 29 são apresentadas as análises feitas da forma e da frequência de ruptura para todos os CP's ensaiados.

Tabela 28: Forma e frequência de ruptura para a argamassa A10, em 28 e 60 dias
(continua)

Identificação	Relatório fotográfico	Tensão (MPa)	Forma de ruptura
CP1 - A10 28 dias		1,29	95% A e 5% S/A
CP2 – A10 28 dias		1,27	100% A
CP3 – A10 28 dias		0,80	100% A
CP4 – A10 28 dias		0,41	80% S/A e 20% A
CP5 – A10 28 dias		1,50	100% A
CP1 – A10 60 dias		0,54	95% S/A e 5% A
CP2 – A10 60 dias		0,58	95% S/A e 5% A

Tabela 28: Forma e frequência de ruptura para a argamassa A10, em 28 e 60 dias (conclusão)

Identificação	Relatório fotográfico	Tensão (MPa)	Forma de ruptura
CP3 – A10 60 dias		0,37	95% S/A e 5% A

Fonte: a autora (2023)

Tabela 29: Forma e frequência de ruptura para a argamassa A20, em 28 e 60 dias (continua)

Identificação	Relatório fotográfico	Tensão (MPa)	Forma de ruptura
CP1 – A20 28 dias		0,34	90% S/A e 10% A
CP2 – A20 28 dias		0,46	95% S/A e 5% A
CP3 – A20 28 dias		0,52	80% S/A e 20% A
CP4 – A20 28 dias		0,27	55% S/A, 40% S e 5% A

Tabela 29: Forma e frequência de ruptura para a argamassa A20, em 28 e 60 dias (conclusão)

Identificação	Relatório fotográfico	Tensão (MPa)	Forma de ruptura
CP1 – A20 60 dias		0,55	90% S/A e 10% A
CP2 – A20 60 dias		0,54	80% S/A e 20% A
CP3 – A20 60 dias		0,55	80% S/A e 20% A

Fonte: a autora (2023)

Rubin (2015), ao avaliar o desempenho de argamassas autonivelantes industrializadas frente a argamassas convencionais do tipo “farofa”, obteve resistência médias entre 1,34 MPa a 2,81 MPa. Já Mendes (2019), alcançou resistência média de aderência à tração de 0,51 MPa, aos 30 dias, com coeficiente de variação de 49,02%, para argamassa autonivelante com 50% de substituição de cimento por fino de RCMG, sendo a forma de ruptura de maior frequência ocorrida na argamassa.

Da mesma forma, Carvalho (2015) obteve valores de resistência à aderência entre 0,75 MPa e 0,86 MPa, para substituição em 15% do cimento por misturas binárias e ternárias de fíler calcário, cinza pesada e resíduo de construção e demolição, com a maior ocorrência de ruptura na interface argamassa/ substrato. Conforme a autora, esses resultados já indicam que a argamassa apresenta elevada resistência à tração e boa aderência ao substrato, indicativo de melhora na vida útil do material, visto que argamassas de baixa resistência à aderência estão mais sujeitas ao desprendimento do substrato.

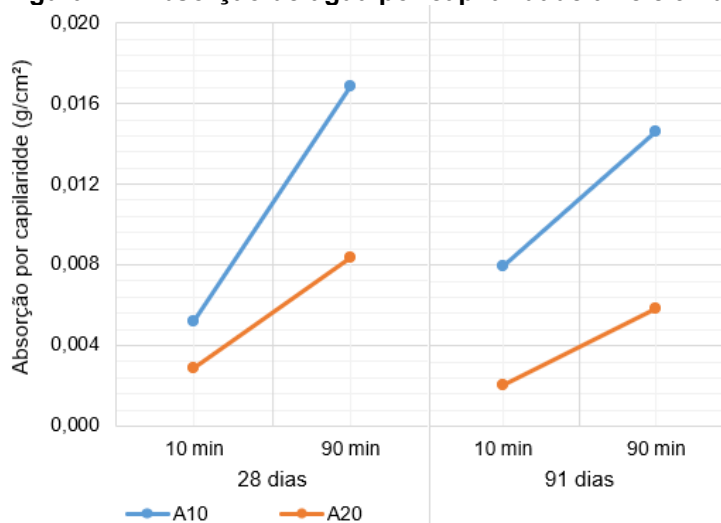
Dessa forma, percebeu-se que como o avaliado por Mendes (2019) e Carvalho (2015), a resistência de aderência à tração das argamassas autonivelantes sofre maior impacto pelo uso da CCA se comparado as demais resistências mecânicas avaliadas. Esse resultado pode ser decorrente do efeito químico da CCA ocorrer em idades mais tardias e o efeito *filler* da cinza não ser suficiente para garantir ganho de resistência mecânica, dada a redução no consumo de cimento, e, também, pode ter sofrido influência do alto teor de ar incorporado das misturas, que aumentam o volume de vazios na estrutura da argamassa endurecida, locais onde se acumulam tensões, prejudicando a resistência mecânica da mesma.

4.4.5 Absorção de água por capilaridade

Os resultados individuais de absorção de água por capilaridade em 10 e 90 minutos e de capilaridade, para as idades de 28 e 91 dias são apresentados nas Figuras 27 e 28, nas quais também são demonstradas as comparações entre cada um dos parâmetros para cada idade de ensaio.

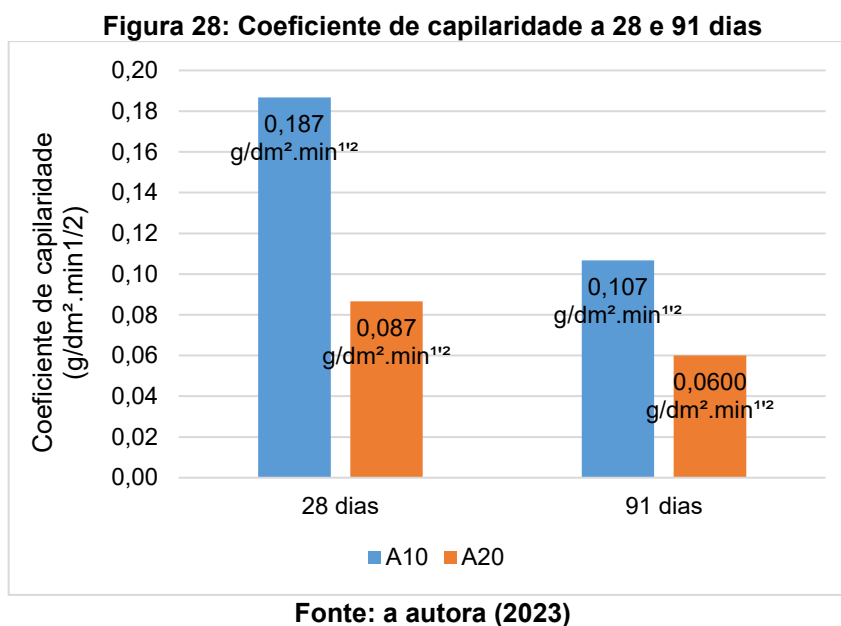
A absorção capilar é uma das formas pela qual ocorre o fenômeno de transporte de agentes agressivos em materiais como argamassas e concretos, por isso funciona como um bom parâmetro para avaliar a durabilidade desses materiais (SCOLARO, 2020).

Figura 27: Absorção de água por capilaridade a 28 e 91 dias



Fonte: a autora (2023)

Ao analisar a Figura 27, visualizou-se menores valores de absorção por capilaridade para a argamassa A20, isso pode ser explicado pelo fato de que nessa argamassa há uma maior quantidade da CCA em relação a massa de cimento, e como a CCA pode ser classificada como um fino, ela melhora a distribuição dos poros internos a estrutura da argamassa, consequentemente, reduzindo o coeficiente de capilaridade.



A partir da Figura 28, notou-se que o coeficiente de capilaridade reduz entre as idades de 28 e 91 dias, indicando que com o decorrer do tempo uma parcela dos poros existentes na estrutura interna da argamassa foram sendo preenchidos reduzindo a conectividade entre eles. Chaves (2019), observou em argamassas autonivelantes com uso de RBMG, um melhor empacotamento de grãos decorrente das interações entre finos, de forma a reduzir a conectividade entre os poros e na porosidade aberta da argamassa.

Ao utilizar uma cinza de carga de arroz bruta ocorre uma redução dos efeitos pozolânicos e *filler* do fino em argamassas autonivelantes, ainda assim, foi perceptível que mesmo uma pequena parcela de ocorrência desses efeitos, contribuíram para a melhora da estrutura interna da argamassa (JAMIL, *et al.* 2016).

Conforme Rizwan e Bier (2012), a absorção de água não depende somente da dimensão máxima dos poros, mas também da porosidade e da conexão entre os poros na estrutura interna da argamassa. Sendo assim, mesmo que a porosidade das

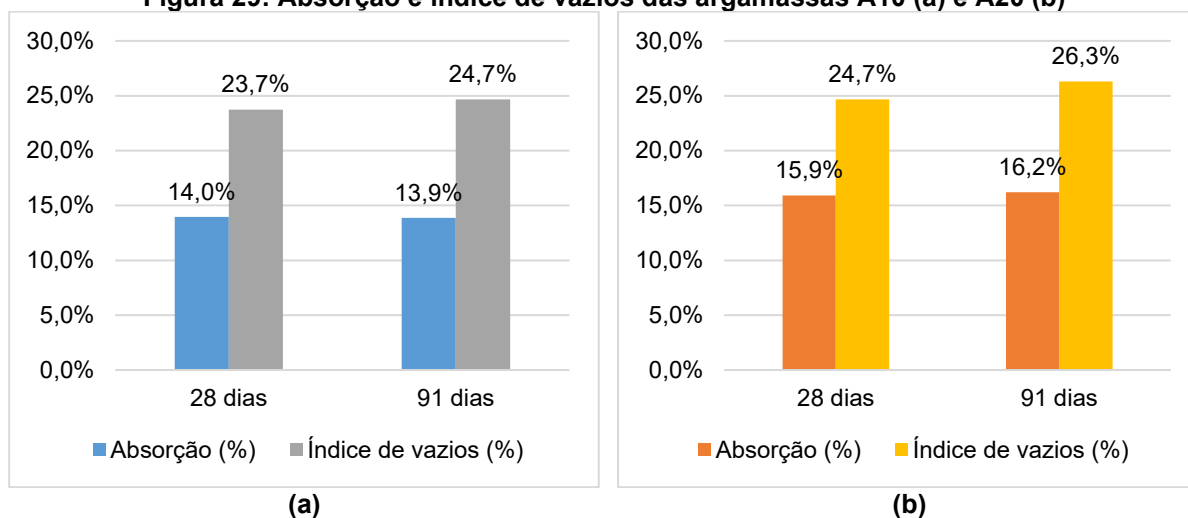
argamassas seja semelhante, a argamassa A20 apresentou menor conexão entre os poros da estrutura interna. Segundo Carvalho (2015), argamassas com maior teor de finos resultam em uma microestrutura com menor porosidade aberta e maior tortuosidade, tornando o caminho a ser percorrido pela água mais difícil.

Com base na bibliografia estudada, entendeu-se que o aumento de teor de finos em misturas autonivelantes acarreta no preenchimento de vazios, reduzindo a conexão entre os poros da estrutura interna da argamassa (Scolaro, 2020; PERIN; ZAPELINI, 2021). Perin e Zapelini (2021), obtiveram coeficientes de capilaridade variando de 0,327 g/cm² a 0,053 g/cm², para argamassas sem nenhuma adição e argamassas com 24% de adição de fíler calcário, respectivamente.

4.4.6 Absorção de água por imersão

Os resultados obtidos pelo ensaio de absorção por imersão são mostrados na Figura 29 e na Tabela 30. A partir dos dados observados, foi possível constatar que entre as duas idades ensaiadas houve pouca variação nos resultados para ambas as argamassas ensaiadas, indo em contrapartida aos resultados obtidos pelos coeficientes de capilaridades, que mostraram uma redução na conexão entre os vazios das amostras, isto é, era esperado que houvesse, mesmo que pequena, redução no índice de vazios das argamassas após 28 dias.

No entanto, os valores alcançados para índice de vazios das argamassas em 28 e 91 dias justificam os resultados de densidade de massa no estado endurecido e as resistências mecânicas analisados previamente neste capítulo.

Figura 29: Absorção e índice de vazios das argamassas A10 (a) e A20 (b)

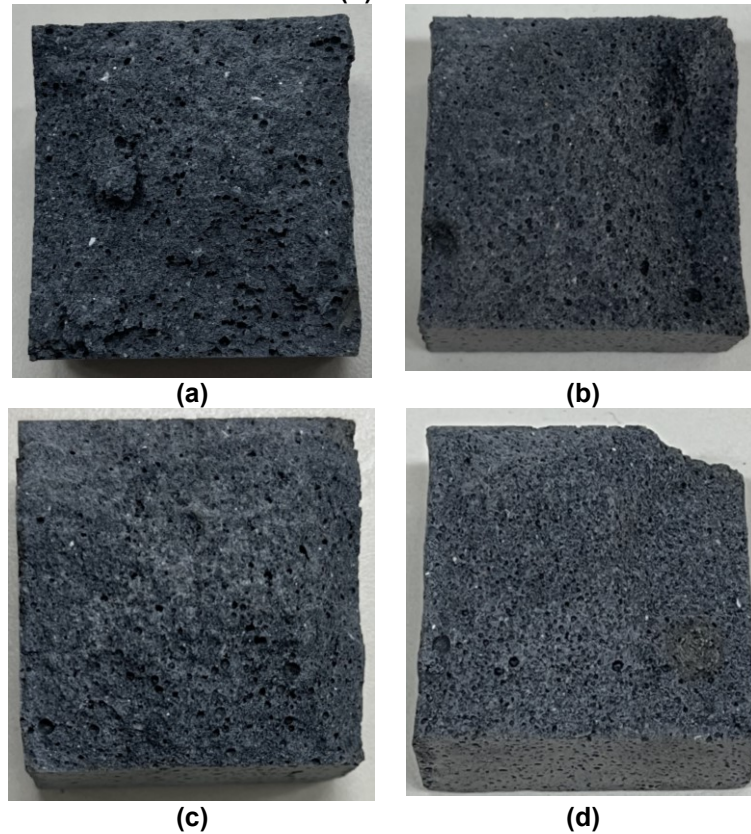
Fonte: a autora (2023)

De acordo com Carvalho (2015), os resultados de absorção e índice de vazios podem ser relacionados com o desempenho da resistência mecânica e são indicativos de maior durabilidade das argamassas. Sendo assim, quanto menos vazios na argamassa, menos porosa a microestrutura do material e, conseqüentemente, melhores serão os resultados do material com relação a sua resistência mecânica e sua resistência ao ataque de agentes agressivos (CHAVES, 2019).

Os valores observados para absorção e índice de vazios, conforme a Figura 29, são superiores aos resultados verificados em outras pesquisas. Perin e Zapelini (2021), alcançaram valores entre 7,4% e 8,3% para absorção e 15,5% e 17,0% para índice de vazios, em argamassas sem adição e com 24% de adição de fíler calcário. Mendes (2019), produziu argamassas com 50% de adição de fíler e com 40% e 50% de adição de RCMG, obtendo valores de absorção de 9,99%, 9,70% e 9,87% e índice de vazios de 22,2%, 21,65% e 22,05%, respectivamente.

Os resultados numéricos de índice de vazios podem ser mais facilmente visualizados na Figura 30, visto que é possível identificar elevado volume de vazios, mesmo a olho nu.

Figura 30: Poros das argamassas confeccionadas (a) A10 a 28 dias, (b) A10 a 91 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 91 dias



Fonte: a autora (2023)

Com relação as massas específicas, ambas as argamassas produzidas apresentaram valores próximos, sem variação expressiva, e em conformidade com os resultados dos demais ensaios. Percebeu-se que as massas específicas estão de acordo com os resultados de índice de vazios, visto que apresentaram valores menores do que os observados na bibliografia.

Tabela 30: Resultados da caracterização das argamassas pelo ensaio de absorção de água

Parâmetros	A10		A20	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
ρ_s (g/cm ³)	1,70	1,78	1,55	1,62
ρ_{sat} (g/cm ³)	1,94	2,03	1,80	1,89
ρ_p (g/cm ³)	2,23	2,36	2,06	2,20

Legenda: ρ_s – massa específica seca; ρ_{sat} - massa específica saturada; ρ_p – massa específica real

Fonte: a autora (2023)

De acordo com Zaparte (2020), os resultados de absorção são de extrema importância para análise do desempenho das argamassas, pois, quanto menor a absorção, menor será a quantidade de transporte de massa no interior do material,

assim evitando a degradação do material quando em contato com meio úmido ou agentes agressivos.

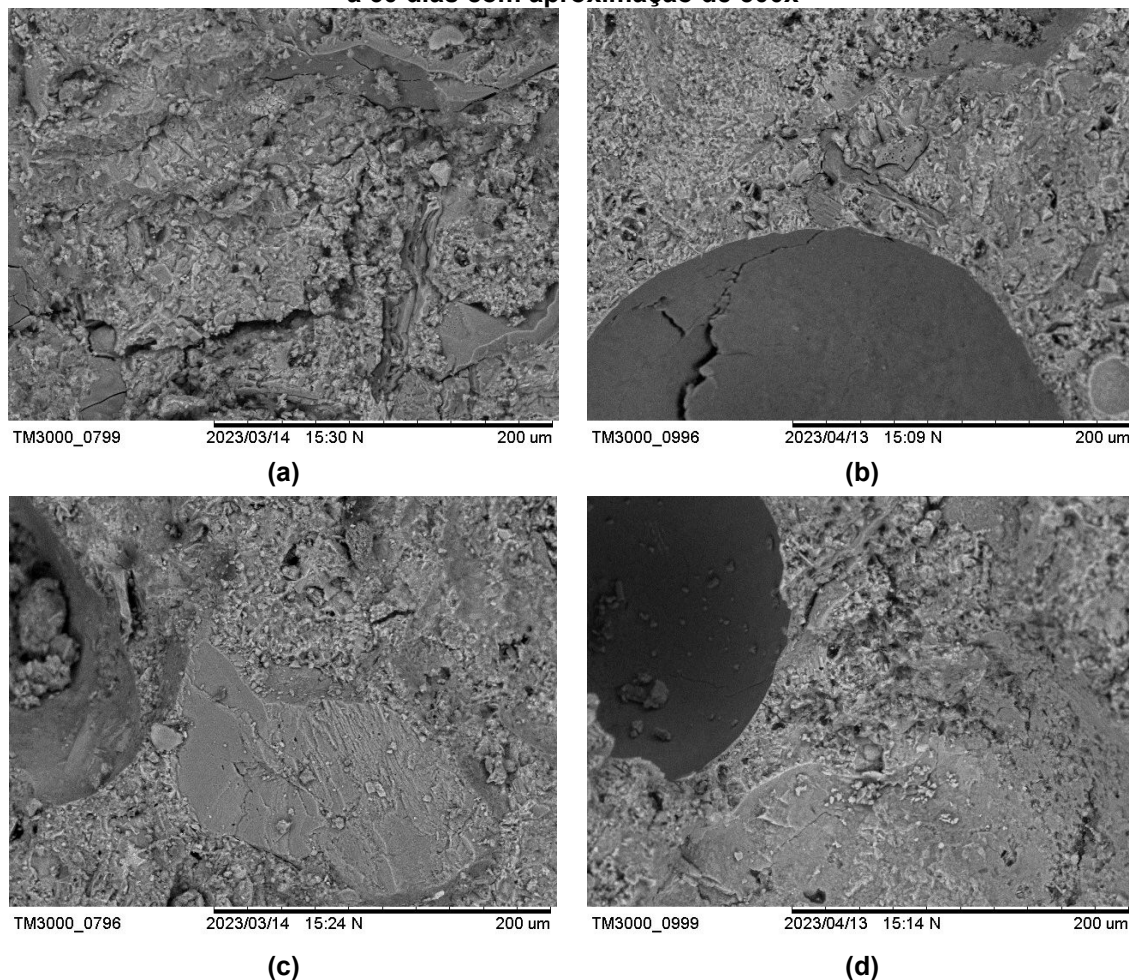
4.5 Análise microestrutural: microscopia eletrônica de varredura

Para todas as idades de ensaio foram retirados fragmentos das argamassas autonivelantes fraturadas para ser feita a análise da microestrutura do material por meio do MEV. Nas Figuras 31 e 32 são mostradas as imagens feitas nas ampliações de 500x e 1000x, respectivamente.

A partir da Figura 31 foi possível observar a microestrutura das amostras, aos 60 dias ambas as argamassas A10 e A20 apresentaram melhor compacidade, visto que há uma redução no número de vazios presentes na estrutura da argamassa. É evidenciado nas imagens que a argamassa A20 aos 60 dias (Figura 31-d) se mostrou mais compacta que as demais. Zaparte (2020) observou em imagens de MEV das argamassas com uso de CCA, em diferentes tempos de moagem, que a argamassa com a cinza em seu estado residual apresentou estrutura mais porosa, com maior número de vazios, estrutura esta que justifica o menor desempenho mecânico da argamassa com CCA residual se comparado com as argamassas de cinza moída.

Sendo assim, verificou-se que a estrutura das argamassas, observadas pela microscopia eletrônica de varredura, vai de encontro aos resultados obtidos nos ensaios anteriores. Em ambas as idades identificou-se elevado volume de vazios na estrutura das argamassas A10 e A20, como observado pelo índice de vazios, o que explica a perda de resistência mecânica.

Figura 31: MEV das argamassas (a) A10 a 28 dias, (b) A10 a 60 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 60 dias com aproximação de 500x

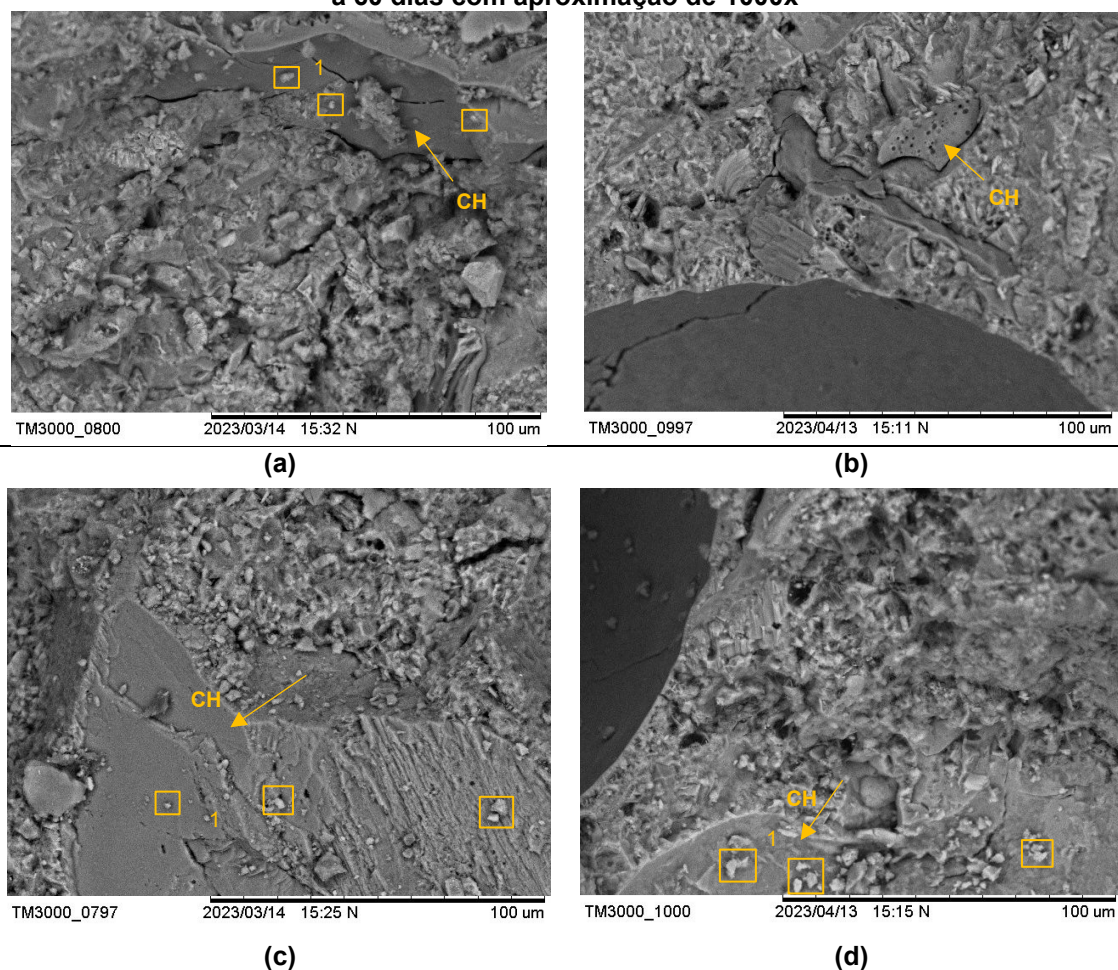


Fonte: a autora (2023)

Na Figura 31 (c) e 31 (d) foi possível identificar nos poros a presença de material precipitado de carbonato de cálcio. Olivo (2020), observou a partir da microscopia que nas amostras de argamassa com CCA residual há presença de portlandita e de C-S-H para as substituições de 5 e 10%, já para amostra com substituição de 15% há maiores indícios de etringita na estrutura da argamassa.

No entanto, o resultado das imagens de microscopia feitas não apresentou com clareza a formação de compostos hidratados. Apesar disso, em nenhuma das imagens foi possível identificar partículas de cinza de casca de arroz na estrutura da argamassa, isto é, a CCA pode ter sido consumida durante o processo de hidratação da argamassa.

Figura 32: MEV das argamassas (a) A10 a 28 dias, (b) A10 a 60 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 60 dias com aproximação de 1000x



Fonte: a autora (2023)

Na Figura 32 foi possível identificar que para ambas as argamassas existem regiões mais densas e homogêneas que indicam a presença de pequenas porções portlandita, em torno dessa fase, também aparecem partículas de carbonato de cálcio, como indicado em 1 nas imagens. A estrutura da portlandita (CH) visualizada na Figura 32 (b) se assemelha ao visualizado por Silva (2001), uma pequena concentração de hidróxido de cálcio com estrutura interna porosa.

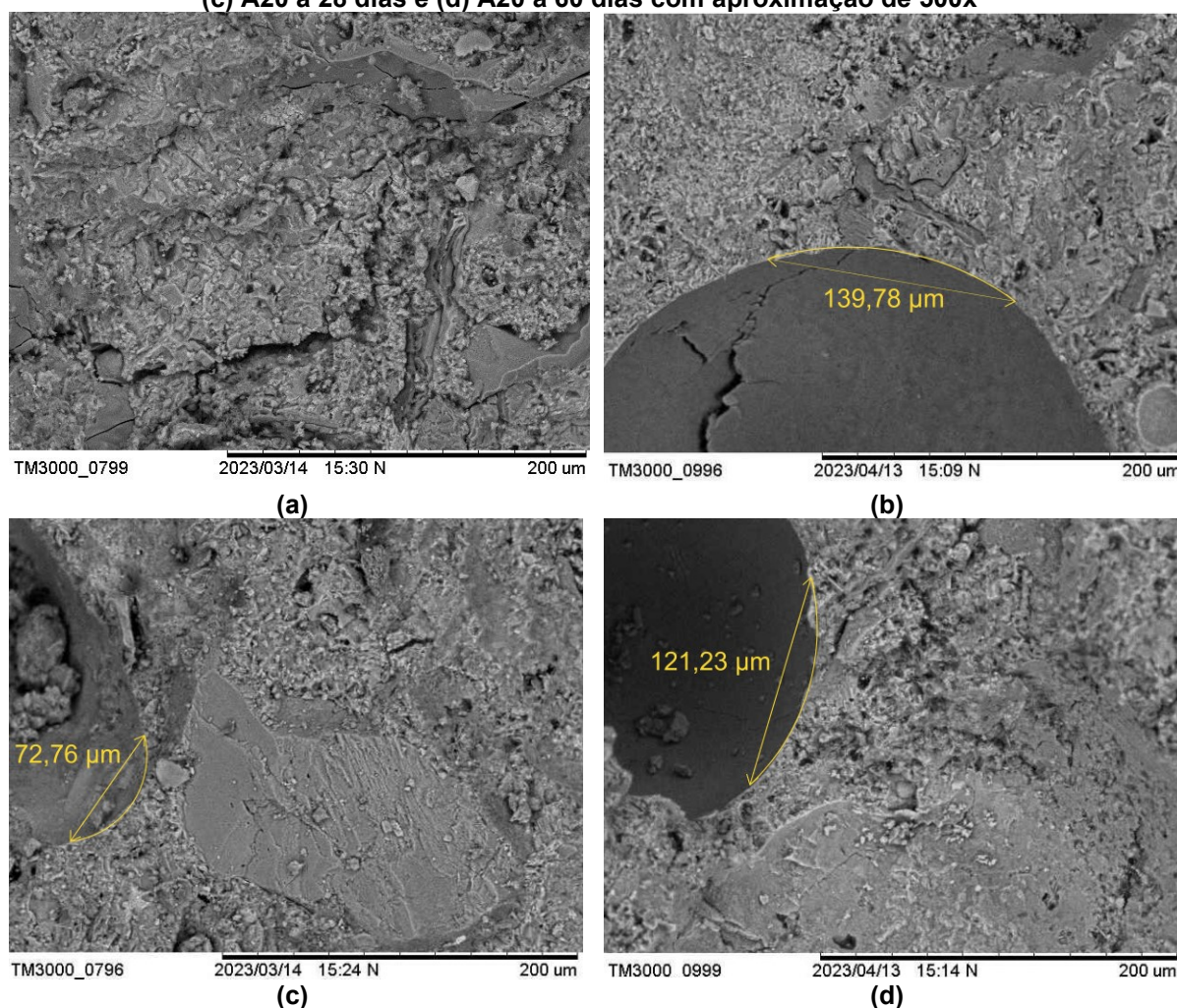
Nas imagens obtidas foi perceptível a presença de poros arredondados de maior dimensão se comparados aos vazios na microestrutura, destacados anteriormente, como mostra a Figura 33. Para fazer uma análise comparativa das dimensões dos poros foi feita uma medida linear de uma reta tangente, distante em 16 µm, da borda do poro.

Sendo assim, para a amostra da argamassa A10 aos 28 dias (Figura 33-a) não foram obtidas imagens que possibilitassem a visualização desses poros arredondados. A argamassa A10 aos 60 dias (Figura 33-b), apresentou poro de

dimensão maior que os destacados na argamassa A20 aos 28 e 60 dias. Poros de maior dimensão podem corroborar o encontrado no ensaio de absorção por capilaridade, em que a argamassa A10 apresentou maiores coeficientes de capilaridade, ou seja, a argamassa A10 pode apresentar poros de maior dimensão que sejam mais interconectados se comparados aos poros da argamassa A20.

O menor poro arredondado foi notado na amostra da argamassa A20 aos 28 dias (Figura 33-c), no entanto este poro possui formato diferente do observado nas demais amostras, nas quais os poros apresentam formato mais próximo a uma circunferência, tal fator pode ter interferência na medida obtida.

Figura 33: Dimensão dos poros observados nas amostras (a) A10 a 28 dias (b) A10 a 60 dias, (c) A20 a 28 dias e (d) A20 a 60 dias com aproximação de 500x



Fonte: a autora (2023)

Sendo assim, os resultados da microscopia apontam para a semelhança entre a microestrutura das argamassas ensaiadas, ambas as argamassas

apresentaram grande número de vazios, evidenciando os resultados obtidos nos ensaios de absorção e índice de vazios.

4.6 Análise geral dos resultados

Nas Tabelas 31 e 32 é apresentada um resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados no estado fresco e no estado endurecido aos 28 dias, respectivamente.

Tabela 31: Síntese dos resultados no estado fresco das argamassas A10 e A20

Ensaio	Estado fresco			
	Espalhamento	Densidade de massa	Teor de ar incorporado	Análise visual
A0	320 mm	2,09 g/cm ³	5,09%	Sem segregação Sem exsudação
A10	305 mm	1,82 g/cm ³	11,66%	Sem segregação Sem exsudação
A20	235 mm*	1,73 g/cm ³	14,75%	Sem segregação Sem exsudação
Requisitos	≥ 240 mm	-	≤ 16%	

Observação: Requisitos conforme a EFNARC (2001)
Nota: * Valor inferior ao requisito mínimo.

Fonte: a autora (2023)

Tabela 32: Síntese dos resultados no estado endurecido para as argamassas A10 e A20

Ensaio	Estado endurecido (28 dias)						
	Densidade de massa	Resist. à compressão	Resist. à tração	Resist. de aderência	Coef. de capilaridade	Absorção (imersão)	Índice de vazios
A0	-	37,65 MPa	7,75 MPa	-	-	-	-
A10	1817 kg/m ³	33,60 MPa	5,28 MPa	0,56 MPa*	0,187**	14,0%	23,7%
A20	1704 kg/m ³	28,45 MPa	5,11 MPa	0,55 MPa*	0,087**	15,9%	24,7%
Requisitos	-	≥ 20 MPa	≥ 5 MPa	≥ 1 MPa	-	-	-

Observação: Requisitos conforme a EFNARC (2001); Resultados de resistência de aderência à tração aos 60 dias.

Nota: * Valores inferiores ao requisito mínimo; ** Unidade em g/dm².min^{1/2}.

Fonte: a autora (2023)

Percebeu-se que ambas as argamassas produzidas apresentaram bom desempenho no estado fresco e endurecido e não exibiram muita diferença entre si, ao ser comparado seu desempenho mecânico aos 28 dias. Ainda, percebeu-se que a redução de cimento e o uso da CCA teve maior efeito sobre o espalhamento da argamassa A20, a qual apresentou valor inferior ao requisito mínimo, necessitando um ajuste nos aditivos.

Da mesma forma, verificou-se que a resistência de aderência de ambas as argamassas não alcançou o requisito mínimo, no entanto, o resultado obtido não é depreciativo das argamassas, visto que pode estar relacionado com o processo de execução, assim como, com o próprio desempenho do substrato, sobre o qual os contrapisos foram executados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo estudar a influência da substituição parcial da areia natural pela cinza da casca de arroz e a redução de cimento em argamassas autonivelantes quanto aos parâmetros de índice de vazios, absorção e aderência aos substratos de concreto. Para tanto, foram realizados ensaios de comportamento físico e mecânico e análise microestrutural nas argamassas autonivelantes para verificar o seu desempenho.

A respeito disso, concluiu-se que a cinza de casca de arroz tem efeito direto sobre o desenvolvimento de resistência mecânica das argamassas. As características da CCA resultaram em perda de resistência à compressão e à tração, tais resultados também foram visualizados na resistência de aderência à tração.

Mesmo atingindo bons resultados no estado fresco, as características físicas e morfológicas da CCA residual e a redução do cimento tiveram interferência significativa no estado endurecido das argamassas autonivelantes. A resistência à compressão e à tração atingiram o requisito mínimo proposto pela EFNARC (2001), no entanto, a resistência de aderência à tração foi menor que o resultado mínimo estipulado pela mesma norma. Os resultados da resistência à aderência podem estar relacionados ao fato desse ensaio ser mais sensível a variações do processo executivo e pela aderência, entre substrato e argamassa, ser influenciada pela porosidade resultante na argamassa ao utilizar a cinza.

Da mesma forma, ao comparar as argamassas autonivelantes deste trabalho com o mesmo material das diversas pesquisas avaliadas, constatou-se que o uso da CCA residual nas argamassas teve efeito expressivo no índice de vazios do material. Cabe ressaltar, que o uso da CCA promoveu maior incorporação de ar na argamassa em seu estado fresco, visto que, a estrutura irregular e a porosidade interna da CCA resultaram no aumento do teor de ar incorporado no material.

Por consequência, no estado endurecido observou-se que o volume de vazios nas argamassas se manteve, verificou-se que o índice de vazios presente na estrutura das argamassas e a absorção do material foi maior do que o visto na literatura. Logo, os resultados alcançados nos ensaios de absorção indicam que a argamassa com uso de CCA residual, dependendo do local de aplicação, pode ter sua durabilidade e vida útil prejudicadas em decorrência de sua estrutura mais porosa,

dado que os poros da estrutura e microestrutura das argamassas são o principal meio para a ocorrência de ataque por agentes agressivos.

Com relação a análise microestrutural das argamassas, o principal parâmetro observado foi a compacidade das amostras, a partir do qual percebeu-se que ambas as argamassas possuem microestrutura com elevado número de vazios, corroborando com os resultados analisados de índice de vazios e absorção da argamassa. No entanto, não foi observado pelo MEV pontos na microestrutura que possam indicar a maior fragilidade da argamassa quanto sua aderência ao substrato.

Além disso, ao comparar ambas as argamassas produzidas, concluiu-se que estas apresentam resultados semelhantes. A redução no consumo de cimento e o uso da cinza da casca de arroz tem maior influência sobre as resistências à tração e à compressão, conforme o esperado, visto que há uma redução no hidróxido de cálcio disponível na mistura e, ainda, porque a CCA não possui expressivo efeito pozolânico e efeito *filler*. Na resistência de aderência à tração e na porosidade, observou-se que os resultados obtidos são decorrentes do uso da CCA e, devido a isso, não há muita diferença de valores entre as argamassas.

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja investigado de maneira quantitativa a correlação entre o teor de ar incorporado e a coesão das argamassas autonivelantes com uso da CCA. Também, é importante ser dada sequência no estudo da durabilidade da argamassa autonivelantes frente ao ataque de agentes agressivos.

Por fim, tem-se que o uso da CCA em argamassas autonivelantes é viável, visto que não trouxe prejuízos significativos ao material de estudo. Comprovando que existe a possibilidade da reinserção do material no processo industrial, de maneira a promover redução nos impactos ambientais, decorrente de seu descarte inadequado.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1708/C1708M – 16**: Self-leveling Mortars Containing Hydraulic Cements. USA 2016, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11801**: Argamassa de alta resistência mecânica para pisos - Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 2 p.

_____. **NBR 13528 - 2**: Revestimento de paredes de argamassa inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 2: Aderência ao substrato. 1 ed. Rio de Janeiro, 2019. 10 p.

_____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. 1 ed. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

_____. **NBR 15823 - 1**: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. 2 ed. Rio de Janeiro, 2017. 14 p.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). 1 ed. Rio de Janeiro, 2015. 11 p.

_____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. 1 ed. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. 3 ed. Rio de Janeiro: [S.N.], 2014. 4 p.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Requisitos. 4 ed. Rio de Janeiro, 2022. 10 p.

_____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. 3 ed. Rio de Janeiro: [S.N.], 2015. 4 p.

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

_____. **NBR 9479:** Argamassa e concreto - Câmeras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006. 2 p.

_____. **NBR 9776:** Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ALVES, Brenda Maiara Oliveira. **Argamassa autonivelantes para contrapiso: efeito do tipo de cimento no comportamento físico-mecânico.** 2020. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

BAUER, L. A F. **Materiais de Construção - Vol. 1.** Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788521636632. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636632/>. Acesso em: 02 nov. 2022.

BEZERRA, Izabelle M. T. *et al.* Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 639-645, mar. 2011.

BEZERRA, Izabelle Marie Trindade. **Cinza de casca de arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento.** 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BRASIL. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.** Coordenação-Geral do Clima. 5. ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019. 71 p.

BRASIL. **Sumário Mineral Brasileiro 2018:** cimento. Agência Nacional de Mineração. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018. 3 p. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e->

[economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018](#). Acesso em: 10 set. 2022.

CARVALHO, H. D. S.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. Argamassas autonivelantes para pisos: contribuição dos finos residuais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

CARVALHO, Henrique Duarte Sales. **Análise da retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando adições minerais como substitutos parciais do Cimento Portland**. 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CARVALHO, Henrique Duarte Sales. **Contribuição ao estudo de argamassas autonivelantes produzidas com diferentes composições de aglomerantes e adição de cinza pesada e lama vermelha**. 2022. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

CHAVES, Patrícia da Silva. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito**. 2019. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, [S. L.], v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro; MASUERO, Ângela Borges; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Análise do potencial pozolânico da cinza de casca de arroz (CCA) através da técnica de Refinamento de Rietveld. **Revista Matéria**, [S. L.], v. 19, n. 2, p. 150-158, jun. 2014.

CQADMIX MV. 2019. Camargo Química. Disponível em: <https://camargoquimica.com.br/modificador-de-viscosidade/>. Acesso em: 19 nov. 2022.

DELLA, Viviana Possamai; KUHN, Ingeborg; HOTZA, Dachamir. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, [S. L.], v. 2, n. 10, p. 22-25, mar. 2005.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **EFENARC 2002**: Specification & Guidelines for Self-Compacting Concrete. United Kingdom: [s.n.], 2002. 32 p.

_____. **EFENARC 2001**: Specification & Guidelines for polymer-modified cementitious flooring as wearing surfaces for industrial and commercial use. United Kingdom, 2001. 23 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 13813**: Screed material and floor screeds - Screed material - Properties and requirements. 1 ed. United Kingdom: [S.N.], 2002. 38 p.

FELEKOGLU, Burak *et al.* The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 36, n. 9, p. 1719-1726, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>.

FERREIRA, Ludimilla; RIBEIRO, Fábio. Estudo Comparativo do Concreto Auto Adensável com Cinza da Casca de Arroz sem Controle de Queima e Sílica Ativa. **Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, [S.L.], v. 20, p. 1-12, 30 jul. 2018. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo - Univ. de Brasília. <http://dx.doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n20.2018.03>.

FORTUNATO, Morgana *et al.* Estudo da substituição de cimento Portland pelo fino de britagem em argamassa autoadensável. **Revista Técnico-Científica**: do CREA-PR, [S. L.], p. 1-10, fev. 2019.

GCP. **TEC-FLOW**: aditivo superplastificante para concreto. Aditivo superplastificante para concreto. 2021. GCP Applied Technologies. Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/tec-flow>. Acesso em: 19 nov. 2022.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 170 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Agricultura, pecuária e outros: Produção agrícola municipal (PAM)**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 05 set. 2022.

ISAIA, Geraldo Cechella *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **AMBIENTE CONSTRUÍDO**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 233-252, jun. 2017a.

ISAIA, Geraldo Cechella *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 121-137, jan./ mar. 2010.

JAMIL, M.; KHAN, M.N.N.; KARIM, M.R.; KAISH, A.B.M.A.; ZAIN, M.F.M.. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 128, p. 185-198, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>.

KASZUBA, Ana Caroline; PEREIRA FILHO, José Ilo. Análise do desempenho de argamassa autonivelante com redução de cimento e substituição parcial da areia por cinza de casca de arroz. In: Seminário de Extensão e Inovação, 12.; Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 27., 2022, Santa Helena. **Anais eletrônicos** [...] Santa Helena: Even3. 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/545940-analise-do-desempenho-de-argamassa-autonivelante-com-reducao-de-cimento-e-substituicao-parcial-da-areia-por-cinza/>. Acesso em: 27 jan. 2023.

KATSIADRAMIS, N.J.; SOTIROPOULOU, A.B.; PANDERMARAKIS, Z.G.. Rheological and Mechanical Response Modifications for a Self-Leveling Mortar. **Epj**

Web Of Conferences, [S.L.], v. 6, p. 23002(p.2)-23002(p.7), 2010. EDP Sciences.
<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20100623002>.

KIELING, Amanda *et al.* Influência da adição de cinza de casca de arroz na aderência de argamassas de revestimento. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 157-170, 16 set. 2009. UNISINOS - Universidade do Vale do Rio Dos Sinos. <http://dx.doi.org/10.4013/ete.2009.52.04>.

LIBRE, Nicolas Ali; KHOSHNAZAR, Rahil; SHEKARCHI, Mohammad. Relationship between fluidity and stability of self-consolidating mortar incorporating chemical and mineral admixtures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 24, n. 7, p. 1262-1271, jul. 2010. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.009>.

MARTINS, Eliziane Jubanski. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante**. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MEHDIPOUR, Iman *et al.* Effect of mineral admixtures on fluidity and stability of self-consolidating mortar subjected to prolonged mixing time. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 40, p. 1029-1037, mar. 2013. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.108>.

MEHDIPOUR, Iman *et al.* Linking stability characteristics to material performance of self-consolidating concrete-equivalent-mortar incorporating fly ash and metakaolin. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 105, p. 206-217, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.090>.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MELO, Karoline Alves de. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário**. 2005. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MELO, Luan Luiz Félix de. **Dosagem de argamassa autonivelante para contrapiso**. 2015. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MENDES, Gabriela Azambuja. **Dosagem de argamassa autonivelante com adição de resíduos do corte de mármore e graníticos (RCGM): análise das propriedades físicas e mecânicas**. 2019. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

MENDES, Gabriela Azambuja; EFFTING, Carmeane; SCHACKOW, Adilson. Argamassa autonivelante com adição de resíduos de mármore e granitos: propriedades físicas e mecânicas. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 403-418, jul. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000300436>.

MENEZES, Afonso Henrique Novaes *et al.* **Metodologia Científica**: teoria e aplicação na educação a distância. Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina: Livro Digital, 2019. 83 p.

MENEZES, Romualdo R. *et al.* Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 795-801, dez. 2009.

MONTE, R. **Avaliação de metodologia de ensaios destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

MOSABERPANAH, M.A.; UMAR, S.A.. Utilizing Rice Husk Ash as Supplement to Cementitious Materials on Performance of Ultra High Performance Concrete: a review. **Materials Today Sustainability**, [S.L.], v. 7, n. 8, p. 1-12, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100030>.

NAKAKURA, Elza Hissae; BUCHER, Hans Roman Edmundo. Pisos autonivelantes: propriedades e instalação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador. **Anais ...** Salvador: [s. n.], 1997. p. 305-316.

NASCIMENTO, Aline Cristiane Kumpfer. **Avaliação do uso da cinza de casca de arroz residual no tratamento do agregado reciclado de concreto**. 2023. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Pato Branco, Pato Branco, 2023.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016. E-book. ISBN 9788582603666. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788582603666/>. Acesso em: 19 set. 2022.

OLIVEIRA, Thais Valadares. **Formulações de argamassas autonivelantes para contrapiso com incorporação parcial de agregado reciclado de concreto**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

OLIVO, Paola. **Estudo da Influência da Temperatura de Queima da Casca de Arroz no Desempenho da Argamassa de Revestimento**. 2020. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.

PEREIRA, Adriana Maria *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 227-238, mar. 2015.

PERIN, Laisy Meurer; ZAPELINI, Pedro Antônio Pimentel. **Investigação do potencial do fíler calcário como promotor de viscosidade para argamassas autonivelantes**. 2021. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2021.

PILEGGI, Rafael Giuliano. **Efeito da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de concretos refratários**. São Carlos, 1996. 210p. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

REIS, Waleska Moraes; PEREIRA FILHO, José Ilo. Uso da cinza de casca de arroz na substituição da areia em argamassa autonivelante. In: Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, 25., 2020, Toledo. **ANAIS...** Toledo: UTFPR, 2020.

RIGHI, Débora P.; NAKANISHI, Elizabete Y. B.; MOHAMAD, Gihad. Caracterização de Cinza de Casca de Arroz Com e Sem Queima Controlada Utilizadas em Argamassas. **Conference Paper**, [S. L.], p. 1-12, ago. 2014. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.2698.9445>.

RIZWAN, Syed Ali; BIER, Thomas A.. Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 398-403, fev. 2012. Elsevier BV.

RUBIN, Ariane Prevedello. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra**. 2015. 1 v. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANTOS, Sílvia. **ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ RESIDUAL EM ARGAMASSAS E CONCRETOS**. 1997. 129 f. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SCOLARO, Taylana Piccinini. **Influência de diferentes fileres nas propriedades mecânicas e na retração de argamassas autonivelantes**. 2020. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SILVA, Denise Antunes. **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland**. 2001. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SILVA, Josimara Aparecida da. **Reologia de pastas cimentícias com cinza de casca de arroz**. 2020. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Materiais Para Engenharia, Universidade Federal de Itajaúba, Itajaúba, 2020.

SILVA, Juliana Oliveira da *et al.* Caracterização da cinza de casca de arroz visando aplicação na confecção de materiais alternativos para a construção civil. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 14, n. 1, p. 17-23, 2020.

SILVA, Sarah Honorato Lopes da. **Desenvolvimento de formulação de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação de retração por secagem**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Números: números da indústria**. São Paulo, 2022. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 10 set. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **ROADMAP tecnológico do cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 64 p.

STOLZ, Carina Mariane. **Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento**. 2011. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TAMBARA JÚNIOR, Luís Urbano Durló. **Desenvolvimento de argamassas autonivelantes com ativação alcalina de precursores residuais**. 2016. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

TASHIMA, Mauro Mitssuchi *et al.* Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 151-163, abr./ jun. 2012.

TASHIMA, Mauro Mitsuuchi. **Cinza de casca de arroz altamente reativa**: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento portland. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Área de Conhecimento: Estruturas, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2006.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2008.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Graphical Query: stats by country**. Elaborado por: Foreign Agricultural Service – FAS. [S.L.], 2022. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home/statsByCountry>. Acesso em: 05 nov. 2022.

VIEIRA, Amanda Pereira et al. Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 236, n. 1, p. 117553, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117553>.

WU, Miaomiao *et al.* Mix design of self-levelling mortar prepared by crushed sand with high flowability and early strengthening. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 283, p. 122679, maio 2021. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122679>.

ZAPARTE, Taiara Aparecida. **Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento Portland nas propriedades da argamassa de revestimento**. 2020. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.