



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FRANKY BRUNO WITZKE

RESISTÊNCIA AO DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO DE CONCRETOS
GEOPOLIMÉRICOS

CURITIBA

2022

FRANKY BRUNO WITZKE

RESISTÊNCIA AO DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO DE CONCRETOS
GEOPOLIMÉRICOS

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior.

Coorientadora: Profa. Dra. Caroline Angulski da Luz.

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Witzke, Franky Bruno.

Resistência ao desgaste superficial por abrasão de concretos
geopoliméricos. / Franky Bruno Witzke. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior.

Coorientadora: Profa. Dra. Caroline Angulski da Luz.

1. Concreto. 2. Durabilidade (Engenharia). 3. Estruturas de concreto.
4. Cinza de casca de arroz - Utilização. I. Medeiros Junior, Ronaldo Alves
de. II. Luz, Caroline Angulski da. III. Universidade Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Junior CRB-9/1797

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **FRANKY BRUNO WITZKE** intitulada: **Resistência ao desgaste superficial por abrasão de concretos geopoliméricos**, sob orientação do Prof. Dr. RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Novembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

23/11/2022 11:24:54.0

RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/11/2022 13:28:29.0

CRISTINA VITORINO DA SILVA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO
URUGUAI E DAS MISSÕES)

Assinatura Eletrônica

23/11/2022 09:58:09.0

JOSÉ ILO PEREIRA FILHO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

22/11/2022 16:46:19.0

SAMOEL SCHWAAB
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA
CATARINA)

A minha mãe, Dione Schattenberg,
pelo apoio durante toda a caminhada,
por não medir esforços para me ajudar
a alcançar todos os meus objetivos.

Minha eterna gratidão a você!

AGRADECIMENTOS

O doutorado foi uma fase marcante da minha vida, foi uma fase de muitas descobertas e de crescimento pessoal e profissional, no qual pude amadurecer.

Vários momentos marcaram a minha trajetória no doutorado, dentre eles, o dia em que recebi a notícia que eu fui aprovado. Depois disso, na primeira viagem (de muitas!) para Curitiba, onde um turbilhão de pensamentos, emoções e sentimentos passavam em minha cabeça em uma velocidade nunca antes presenciada por mim.

Nas aulas das disciplinas teóricas e também nas reuniões com meu orientador, onde escolhi os geopolímeros para estudar. Tema, este, que quase me fez desistir do mestrado, em 2016. Agora, em 2022, considero o tema superado, ufa!

Aí veio a pandemia, e tudo mudou. Equipei um laboratório na minha casa e foi lá que realizei grande parte dos ensaios do programa experimental.

As leituras se tornaram rotina durante esses anos, principalmente na fase da escrita da revisão bibliográfica. Mais tarde, em 2021, ocorreu a banca de qualificação onde pude parar para rever criticamente tudo o que estava sendo feito e melhorar os pontos fracos da minha pesquisa.

A parte experimental durou muitos meses, principalmente o ensaio de desgaste natural dos protótipos de concreto, no qual usei meu próprio carro para desgastar os materiais. Era um vai e vem em cima das placas de concreto até chegar em 10.000 ciclos de desgaste. Depois disso, montei o quebra-cabeça com os dados disponíveis e concluí a tese.

Algumas histórias são realmente incríveis, e fazer um doutorado com certeza é uma delas. Aproveito este espaço para deixar registrado todos os meus agradecimentos e carinho por pessoas que puderam me acompanhar e me ajudar ao longo da minha jornada acadêmica. E realmente me considero uma pessoa muito sortuda por ter o auxílio de pessoas tão especiais.

Em primeiro lugar eu gostaria de agradecer a Deus, por me oferecer, sempre, planos muito maiores do que os meus sonhos, e por me agraciar com tantas conquistas. Obrigado por me apontar o caminho certo todas as vezes que eu precisei de uma direção. Obrigado por tudo, Deus!

A minha mãe, que segurou resolveu todos os problemas enquanto eu estava ausente em decorrência do doutorado. Por sempre ter me apoiado em todas as

decisões que eu tomei na vida, por sempre estar ao meu lado. Você é a melhor mãe do mundo! Te amo infinitamente! Gratidão!

Ao meu pai, que certamente, do plano espiritual, está muito orgulhoso por esta conquista. Por ter me auxiliado e ter me dado subsídios e apoio incondicional sempre que estive ao meu lado. Obrigado por ser parte de tudo o que me tornei hoje.

As minhas avós, oma Tule e oma Lúcia, por todo amor e carinho compartilhados comigo durante todos esses anos. Meu sonho é ser para os meus netos tudo o que vocês são para mim. Duas joias que ganham mais brilho a cada dia que passa!

À Marcia Cristina Ferreira, por todo apoio que tem me dado durante todos esses anos. Pela amizade e parceria. Obrigado por tudo. Você é incrível!

A minha tia e madrinha, Márcia Rosane Witzke, por sempre se fazer presente e me apoiar. Muito obrigado!

Ao meu professor orientador, prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior, todo meu carinho e respeito por você. Você exerceu durante esses últimos anos, o seu papel de orientador, professor e amigo com uma serenidade e um profissionalismo digno de respeito. Um grande professor sempre deixa uma marca eterna na vida dos seus alunos. E, com certeza, toda vez que me enxergo como professor, vejo você como um exemplo a ser seguido. Obrigado por tudo!

À professora, Dra. Caroline Angulski da Luz, professora coorientadora deste trabalho, por todas as considerações e por todo o auxílio durante esses anos de doutorado. Ao professor Dr. José Ilo Pereira Filho, por ter buscado as cinzas de casca de arroz utilizadas nesta pesquisa.

Aos mestres, membros das bancas de qualificação e defesa final da minha pesquisa, Dr. Samoel Schwaab, Dra. Cristina Vitorino da Silva, Dr. José Ilo Pereira Filho e Dra. Mariana d'Orey Gaivão Portella Bragança, por terem aceitado o convite para participar das bancas de qualificação e defesa e por terem dado tantas contribuições importantes para esta tese.

A minha colega de doutorado, Dra. Neusa Aparecida Munhak Beltrame, com quem pude compartilhar todos os meus anseios e medos durante este processo de doutoramento. Por sempre ter me auxiliado em todos os trabalhos de disciplinas, pesquisas extras e na lida com os tão temidos geopolímeros. Obrigado!

A toda a equipe da TESTECON de Blumenau (SC), por intermédio do Sr. Nelson e do Eng. André, por terem realizado de forma gratuita os ensaios de resistência mecânica e abrasão Los Angeles dos corpos de prova e agregados da minha pesquisa.

À empresa Metacaulim do Brasil, por ter doado a amostra de metacaulim que foi utilizada na dosagem dos concretos geopoliméricos durante a pesquisa.

Ao SENAI (Criciúma), ao LACTEC, à Falcão Bauer, à Real 3D e ao IDT (UNESC), por terem realizado os ensaios de forma ética, íntegra e profissional.

Ao designer Me. André Alves, pela amizade, por ter me auxiliado na padronização gráfica da minha pesquisa e por ter feito e refeito tantos fluxogramas (foram muitos!). À Eng. Me. Natássia Cardoso Biléssimo pela amizade e por ter me auxiliado na análise estatística de dados. Ao Eng. Me. João Henrique Vicenzi Sandri, pela amizade e por ter me auxiliado no ensaio de dureza superficial. À Eng. Me. Eloise Leonora Gnoatto pela amizade e por ter me auxiliado com o transporte das cinzas de casca de arroz.

Ao Eng. Luiz Rossi Neto, por ter me auxiliado em muitos momentos durante esses anos de doutorado, por ter colocado a mão na massa na confecção dos concretos e por sempre estar presente quando precisei.

A minha grande e estimada amiga que a vida me deu, engenheira civil Dra. Talita Montagna, por toda a ajuda, no âmbito pessoal, profissional e acadêmico.

A minha grande e estimada amiga, Dra. Thais Schlichting, por todo o seu auxílio durante toda minha vida acadêmica e pela sua amizade que é muito importante para mim. Muito obrigado!

Aos meus amigos, Luiz Henrique, Tércia, Genilson, Juliana, Brunna e Eloise, por me acompanharem e me ajudarem sempre que precisei de ajuda. Por me proporcionarem bons momentos e por estarem sempre ao meu lado.

A todos os familiares, amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho. Muito obrigado!

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena
Acreditar no sonho que se tem
Ou que seus planos nunca vão dar certo
Ou que você nunca vai ser alguém
Tem gente que machuca os outros
Tem gente que não sabe amar
Mas eu sei que um dia a gente aprende
Se você quiser alguém em quem confiar
Confie em si mesmo.
Quem acredita sempre alcança”.

Renato Russo e Flávio Venturini

RESUMO

Ao longo do tempo, as estruturas de concreto convencional têm demandado custos consideráveis para o reparo e recuperação das suas áreas desgastadas por abrasão superficial. Além disso, esses materiais convencionais, muitas vezes, não conseguem atender às exigências de solicitação impostas pelo meio em que estão inseridos. Em contrapartida, nos últimos anos, o crescente número de pesquisas com geopolímeros mostra que este material tem apresentado durabilidade satisfatória, e por isso incentiva a exploração de seu uso em locais que sofrem desgaste superficial por abrasão. O objetivo geral deste trabalho é de investigar a resistência à abrasão superficial de concretos geopoliméricos. Para tanto, foram confeccionadas misturas de concreto convencional com cimento e geopoliméricas com metacaulim e cinza de casca de arroz. Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, de microestrutura, análise de custo, aplicabilidade e execução de três métodos acelerados de desgaste superficial por abrasão, além da criação de protótipos de concreto para comparação com o desgaste natural das peças de concreto. Os resultados mostraram, no estado fresco, maior densidade e maior consistência nas amostras geopoliméricas. No estado endurecido, apesar da mesma resistência mecânica, os concretos geopoliméricos apresentaram maior dureza superficial e menor absorção de água. Os ensaios acelerados mostraram que os concretos geopoliméricos apresentam, no geral, menor desgaste por abrasão que os concretos convencionais, apesar do seu custo de produção ser cerca de seis vezes superior.

Palavras-chave: Abrasão superficial. Concreto geopolimérico. Metacaulim. Cinza de casca de arroz. Durabilidade.

ABSTRACT

Conventional concrete structures have demanded considerable costs for the repair and recovery of their areas worn by surface abrasion. Furthermore, these conventional materials often couldn't meet the requirements imposed by the environment where they are inserted. On the other hand, in recent years, the growing number of research on geopolymers shows that this material has a satisfactory durability, encouraging the exploration of its use in places that suffer abrasive wear. The main goal of this paper is to investigate the surface abrasion resistance of geopolymer concrete. For this purpose, mixtures of conventional concrete with cement and geopolymer mixtures with metakaolin and rice husk ash were produced. Tests in the fresh and hardened state, microestructural analysis, cost, application and three accelerated methods of surface wear by abrasion were made and a concrete plate was created for investigate the abrasive worn in natural conditions. The results showed that, in the fresh state, geopolymers concretes had a higher density and consistency. Furthermore, despite geopolymer and conventional concrete having the same mechanical strength, the two geopolymers mixtures showed higher surface hardness and less water absorption. The accelerated abrasion tests showed that geopolymers concretes present, in general, less wear by abrasion than the conventional concrete, despite their production cost about 6x higher.

Keywords: Superficial abrasion. Geopolymer concrete. Metakaolin. Rice husk ash. Durability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EQUAÇÕES DAS REAÇÕES DE GEOPOLIMERIZAÇÃO DE CIMENTOS GEOPOLIMÉRICOS.....	25
FIGURA 2: FASES DO MECANISMO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO.....	26
FIGURA 3: MICROGRAFIA DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS.....	27
FIGURA 4: INTERFACE AÇO PASTA DE (a) CIMENTO PORTLAND; E (b) CIMENTO GEOPOLIMÉRICO.....	28
FIGURA 5: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS A BASE DE METACAULIM E ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	30
FIGURA 6: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS DE ACORDO COM O TIPO DE CURA.....	32
FIGURA 7: RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO, TEMPO DE CURA E RELAÇÃO SI/AL DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS.....	34
FIGURA 8: RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO E O TEMPO DE CURA DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS COM A CONCENTRAÇÃO MOLAR DOS ATIVADORES QUÍMICOS (HIDRÓXIDO DE SÓDIO E SILICATO DE SÓDIO).....	35
FIGURA 9: RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO DO METACAULIM E RESISTÊNCIA DO CONCRETO.....	41
FIGURA 10: MICROGRAFIA DE PARTÍCULA DE METACAULIM.....	42
FIGURA 11: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS EXPOSTAS A DIFERENTES CONDIÇÕES DE AGRESSIVIDADE.....	47
FIGURA 12: MICROGRAFIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	51
FIGURA 13: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS ATIVADOS ALKALINAMENTE.....	55
FIGURA 14: % DE PERDA DE MASSA E DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 25 (a) E 50 (b) CICLOS DE CONGELAMENTO.....	56
FIGURA 15: COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO METACAULIM (MK) E DA CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA).....	58
FIGURA 16: IMAGEM DE MEV DE MATRIZ GEOPOLIMÉRICA COM CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	58
FIGURA 17: MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO.....	59

FIGURA 18: PROCESSO DE DESGASTE ABRASIVO.....	62
FIGURA 19: DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO EM PISOS DE CONCRETO.....	63
FIGURA 20: DESGASTE ABRASIVO SUPERFICIAL DE CONCRETOS COM CINZA VOLANTE.....	68
FIGURA 21: RELAÇÃO ENTRE ENCRUSTAÇÃO DE SAL, RESISTÊNCIA MECÂNICA E ABRASÃO SUPERFICIAL.....	72
FIGURA 22: PERDA DE MASSA POR ABRASÃO SUPERFICIAL DE CONCRETOS CONTENDO 0, 50 E 100% DE ADIÇÃO DE ÓLEO DE PALMA EM CURA SUBMERSA OU EM AR.....	75
FIGURA 23: RESISTÊNCIA À ABRASÃO, POR IDADE, DE MATERIAIS DE REPARO GEOPOLIMÉRICOS E CONVENCIONAL.....	79
FIGURA 24: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA, CONCENTRAÇÃO MOLAR, ALCALINIDADE DA SOLUÇÃO E RELAÇÃO ENTRE ATIVADORES NA RESISTÊNCIA À ABRASÃO SUPERFICIAL.....	80
FIGURA 25: RESISTÊNCIA À ABRASÃO SUPERFICIAL DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BORRACHA.....	81
FIGURA 26: FLUXOGRAMA RESUMIDO DA PESQUISA.....	84
FIGURA 27: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO.....	85
FIGURA 28: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	86
FIGURA 29: AMOSTRA DE METACAU LIM.....	88
FIGURA 30: CURVA GRANULOMÉTRICA DO METACAU LIM.....	89
FIGURA 31: DIFRATOGRAMA DO METACAU LIM.....	90
FIGURA 32: CURVA GRANULOMÉTRICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	91
FIGURA 33: DIFRATOGRAMA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	91
FIGURA 34: AMOSTRA DE SILICATO DE SÓDIO ALCALINO.....	93
FIGURA 35: AMOSTRA DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO.....	94
FIGURA 36: CURA AMBIENTE DE CORPOS DE PROVA GEOPOLIMÉRICOS.....	98
FIGURA 37: ESQUEMA DE ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA.....	103
FIGURA 38: ESQUEMA DE ENSAIO DE ABRASÃO INORGÂNICA.....	104
FIGURA 39: ESQUEMA DE ENSAIO DE ABRASÃO PROFUNDA.....	105
FIGURA 40: APLICAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE FORMA LINEAR.....	107

FIGURA 41: EXEMPLO DE RELATÓRIO DE DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	108
FIGURA 42: SLUMP TEST DAS AMOSTRAS GM10C (A) E GM (B).....	112
FIGURA 43: INEXISTÊNCIA DE EXSUDAÇÃO DE CP (a), GM (b) e GM10C (c).....	114
FIGURA 44: ANÁLISE MACROESTRUTURAL DE CP (a), GM (b) e GM10C (c).....	114
FIGURA 45: EFLORESCÊNCIA NAS AMOSTRAS GM10C E GM.....	118
FIGURA 46: IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA E MICROSCOPIA OTICA DAS AMOSTRAS CP (A) E GM10C (B).....	121
FIGURA 47: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (28 DIAS).....	124
FIGURA 48: ANÁLISE DE RESÍDUOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (28 DIAS).....	125
FIGURA 49: BOXPLOT DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (28 DIAS).....	126
FIGURA 50: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (28 DIAS).....	128
FIGURA 51: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA E A ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	129
FIGURA 52: DIFRATOGRAMAS DAS PASTAS DAS TRÊS MISTURAS ESTUDADAS.....	130
FIGURA 53: ANTES E DEPOIS DOS CORPOS DE PROVA DE GM10C (A), GM (B) E CP (C) DESGASTADOS PELO MÉTODO DA ABRASÃO INORGÂNICA.....	132
FIGURA 54: DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS MISTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO INORGÂNICA AOS 28 DIAS DE IDADE.....	133
FIGURA 55: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (180 DIAS).....	135
FIGURA 56: ANÁLISE DE RESÍDUOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (180 DIAS).....	136
FIGURA 57: BOXPLOT DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (180 DIAS).....	137
FIGURA 58: DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO INORGÂNICA AOS 1000 M EM 28 E 180 DIAS DE IDADE.....	138

FIGURA 59: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA.....	140
FIGURA 60: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (24H) E A DUREZA SUPERFICIAL.....	142
FIGURA 61: IMAGENS DE MEV DAS AMOSTRAS CP (A) E GM10C (B) APÓS ENSAIO DE ABRASÃO.....	145
FIGURA 62: DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO HIDRÁULICA DOS CORPOS DE PROVA ESTUDADOS.....	146
FIGURA 63: DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS MISTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA (72H).....	147
FIGURA 64: SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS GM (A) E GM10C (B) SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA.....	148
FIGURA 65: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA.....	149
FIGURA 66: INTERFACE PASTA/AGREGADO GRAÚDO DE GM10C (A) E GM (B).....	150
FIGURA 67: CORPO DE PROVA ABRASIONADO UTILIZADO NO ENSAIO DE ABRASÃO PROFUNDA.....	151
FIGURA 68: CORRELAÇÃO ENTRE A ABRASÃO PROFUNDA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (28 DIAS).....	152
FIGURA 69: DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS MISTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO PROFUNDA.....	154
FIGURA 70: PROTÓTIPOS ANTES DA EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE DESGASTE NATURAL.....	158
FIGURA 71: PROTÓTIPOS DEPOIS DA EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE DESGASTE NATURAL.....	158
FIGURA 72: DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DOS PROTÓTIPOS DE CONCRETO.....	159

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: RELAÇÃO DE ALGUMAS PESQUISAS COM TIPOS DE PRECURSORES E ATIVADORES ALCALINOS UTILIZADO.....	37
TABELA 2: REQUISITOS FÍSICOS PARA UTILIZAÇÃO DO METACULIM.....	43
TABELA 3: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DIFERENTES METACULINS.....	44
TABELA 4: EFEITO E CONDIÇÕES DE QUEIMA NAS PROPRIEDADES DA CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	49
TABELA 5: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DIFERENTES TIPOS DE CINZAS DE CASCA DE ARROZ.....	52
TABELA 6: MECANISMOS DE DESGASTE SUPERFICIAL.....	60
TABELA 7: FASES DO DESGASTE POR ABRASÃO.....	63
TABELA 8: CARACTERÍSTICAS DE AGREGADOS GRAÚDOS UTILIZADOS EM ALGUMAS PESQUISAS SOBRE ABRASÃO SUPERFICIAL.....	64
TABELA 9: TEORES DE CIMENTO RECOMENDADOS PARA PISOS.....	67
TABELA 10: CARACTERÍSTICAS DAS NORMAS QUE MENSURAM O DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO.....	78
TABELA 11: CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MECANICA DO CIMENTO CP II-F 40.....	87
TABELA 12: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METACULIM.....	88
TABELA 13: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO METACULIM.....	89
TABELA 14: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	91
TABELA 15: MISTURAS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	94
TABELA 16: QUANTIDADE DE MATERIAL NECESSARIA PARA PRODUÇÃO DE 1m ³ DAS MISTURAS DO ESTUDO.....	96
TABELA 17: RELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DA PESQUISA E OS CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS.....	100
TABELA 18: RESULTADOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	110
TABELA 19: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (RC28 E RC180).....	116
TABELA 20: RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	119
TABELA 21: RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL.....	122

TABELA 22: RELAÇÃO ENTRE DESGASTE ABRASIVO INORGANICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	139
TABELA 23: R ² DAS MISTURAS ESTUDADAS PARA O ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA.....	141
TABELA 24: RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO E RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA DO CONCRETO.....	142
TABELA 25: RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E A RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA DO CONCRETO.....	152
TABELA 26: RESUMO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA POR ABRASÃO SUPERFICIAL DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	155
TABELA 27: CUSTO PARA A PRODUÇÃO DAS MISTURAS DE CONCRETO.....	162
TABELA A1: LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS SOBRE GEOPOLÍMEROS.....	190
TABELA B1: LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS NACIONAIS SOBRE GEOPOLÍMEROS.....	192
TABELA C1: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 28 DIAS DE IDADE.....	193
TABELA C2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 28 DIAS DE IDADE.....	193
TABELA C3: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 180 DIAS DE IDADE.....	193
TABELA C4: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 180 DIAS DE IDADE.....	193
TABELA D1: RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	194
TABELA D2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	194
TABELA E1: RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	195
TABELA E2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE DUREZA SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	195
TABELA F1: RESULTADOS DE ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS ESTUDADAS (28 DIAS).....	196

TABELA F2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (500 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (28 DIAS).....	196
TABELA F3: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (1000 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (28 DIAS).....	196
TABELA F4: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGANICA (28 DIAS).....	196
TABELA F5: RESULTADOS DE ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS ESTUDADAS (180 DIAS).....	197
TABELA F6: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (500 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (180 DIAS).....	197
TABELA F7: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (1000 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (180 DIAS).....	197
TABELA F8: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGANICA (180 DIAS).....	197
TABELA G1: RESULTADOS DE ABRASÃO HIDRÁULICA DAS MISTURAS ESTUDADAS.....	198
TABELA G2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (24H) DAS AMOSTRAS.....	198
TABELA G3: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (48H) DAS AMOSTRAS.....	198
TABELA G4: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (72H) DAS AMOSTRAS.....	198
TABELA G5: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA.....	198
TABELA H1: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	199
TABELA H2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	199

TABELA H3: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA.....	199
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CO₂ – dióxido de carbono

UFPR – Universidade Federal do Paraná

CREA-PR – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná

IBRACON – Instituto brasileiro do concreto

SiO₂ - óxido de silício

Al₂O₃ – óxido de alumínio

Al - alumínio

Si - silício

pH – potencial hidrogeniônico de uma solução

ACV – Avaliação do ciclo de vida

CP – Cimento Portland

CO₂/m³ - Relação dióxido de carbono por metro cúbico

kg - quilo

NaOH – hidróxido de sódio

Na₂CO₃ – Carbonato de sódio

Na₂SO₄ – Sulfato de sódio

KOH – óxido de potássio

Mol/L – relação mols por litro

MPa - Megapascal

Na₂SiO₃/NaOH

Na₂SiO₃.nH₂O

Na/Al – relação sódio alumínio

GPa – gigapascal

RAS – Resistência à abrasão superficial

RAH – Resistência à abrasão hidráulica

A/C – relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

Fe₂O₃ – Trióxido de ferro

°C – graus celcius

µm - micrometro

SO₃ – trióxido de enxofre

TiO₂ – dióxido de titânio

CaO – óxido de cálcio

MgO – óxido de magnésio

K₂O – óxido de potássio

Na₂O – óxido de sódio

cm - centímetro

mm – milímetro

obs - observações

Ωm – Ohms por metro

PVA – Álcool polivinílico

P₂O₅ – pentóxido de fósforo

MnO – óxido de manganês

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura

M - Mols

ACI – American Concrete Institute

CIENTEC – Centro de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

CASAN – Companhia Catarinense de Água e Sanemaneto

NM – Norma Mercosul

MEV – Microscopia eletrônica de Varredura

EDS – Espectroscopia por energia dispersiva

DRX – Difração de raios X

UND - Unidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.2.1	Objetivo geral.....	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
1.3	INEDITISMO.....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2	MATERIAIS GEOPOLÍMÉRICOS.....	22
2.1	DEFINIÇÃO.....	22
2.2	EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	22
2.3	PROCESSO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO.....	24
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DE GEOPOLÍMEROS.....	29
2.5	MATÉRIAS-PRIMAS PARA CONFECÇÃO DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS.....	34
2.5.1	Ativadores alcalinos.....	35
2.5.2	Precursores.....	38
2.6	METACAULIM.....	39
2.6.1	Definição, obtenção e composição.....	40
2.6.2	Características mineralógicas.....	40
2.6.3	Características físicas.....	41
2.6.4	Características químicas.....	43
2.6.5	Influência do metacaulim em concretos.....	44
2.7	CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	48
2.7.1	Definição, obtenção e composição.....	49
2.7.2	Características mineralógicas.....	50
2.7.3	Características físicas.....	51
2.7.4	Características químicas.....	52
2.7.5	Influência da cinza de casca de arroz em concretos.....	53
2.8	MICROESTRUTURA DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS DE METACAULIM E CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	57
3	O FENÔMENO DO DESGASTE DE MATERIAIS.....	60

3.1	INTRODUÇÃO AO DESGASTE FÍSICO DE MATERIAIS.....	60
3.2	DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO.....	61
3.2.1	Fases do desgaste superficial por abrasão.....	62
3.2.2	Fatores internos que influenciam o desgaste por abrasão.....	64
3.2.3	Métodos para determinação do desgaste superficial por abrasão.....	76
3.2.4	Resistência à abrasão superficial de concretos geopoliméricos.....	79
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	83
4.1	MATERIAIS.....	85
4.1.1	Agregados.....	85
4.1.2	Cimento Portland.....	87
4.1.3	Metacaulim.....	88
4.1.4	Cinza de Casca de Arroz.....	91
4.1.5	Ativador alcalino: Silicato de sódio alcalino.....	93
4.1.6	Ativador alcalino: Hidróxido de sódio.....	93
4.1.7	Água.....	94
4.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	94
4.2.1	Estudo preliminar.....	94
4.2.2	Estudo principal.....	97
4.2.3	Caracterização das misturas.....	100
4.2.4	Análise estatística.....	105
4.2.5	Análise de custo.....	106
4.2.6	Criação de protótipos de concreto para validação em campo sob condição natural de exposição.....	106
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	110
5.1	ESTADO FRESCO.....	110
5.2	ESTADO ENDURECIDO.....	115
5.3	ENSAIOS ACELERADOS DE ABRASÃO SUPERFICIAL.....	123
5.4	DESGASTE SOB CONDIÇÕES NATURAIS DE EXPOSIÇÃO E COMPA- RAÇÃO COM OS RESULTADOS ACELERADOS.....	158
5.5	ANÁLISE DE CUSTO.....	162
6	CONCLUSÕES.....	164
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	165

REFERÊNCIAS.....	166
APÊNDICE A – LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS INTERNACIONAIS SOBRE GEOPOLÍMEROS.....	190
APÊNDICE B – LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS NACIONAIS SOBRE GEOPOLÍMEROS.....	192
APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (RC28 E RC 180).....	193
APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	194
APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DUREZA SUPERFICIAL.....	195
APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABRASÃO INORGÂNICA.....	196
APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABRASÃO HIDRÁULICA.....	198
APÊNDICE H – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABRASÃO PROFUNDA.....	199

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, em meio à preocupação em que o mundo vive com a preservação do meio ambiente, há uma busca incessante por parte da indústria e da ciência no desenvolvimento de tecnologias ecologicamente adequadas e na produção de materiais mais sustentáveis, bem como compostos que tenham suas características físicas, mecânicas e químicas melhoradas.

Dentro deste cenário, houve a criação de um material de alto desempenho, fabricado com materiais aluminossilicatos que foi chamado de geopolímero. Este material tem forte potencial ecológico pois pode utilizar, para sua fabricação, resíduos industriais, que tenham como base alumina e sílica (VALADARES, 2019). Além disso, utiliza outros materiais convencionais e difundidos pela indústria da construção, como agregados graúdos, agregados miúdos, água, além de ativadores químicos (SCHWAAB, 2019).

Por se tratar de um material de alto desempenho, algumas pesquisas apresentam maiores resistências mecânicas e maior durabilidade para o concreto geopolimérico em comparação com os concretos convencionais. Desempenhando, dessa forma, um papel vital em ambientes agressivos e, diminuindo, também, os custos com recuperações das estruturas de concreto ao longo da sua vida útil (MAURI *et al.*, 2009; NATH e SARKER, 2017; ZHU *et al.*, 2021).

Dentre todas as formas de manifestações patológicas recorrentes em estruturas de concreto, o desgaste superficial por abrasão é uma das mais frequentes. Ela é comum em ambientes com alto tráfego de pessoas, veículos e máquinas e demanda aportes financeiros para recuperação das estruturas em que é encontrada. A abrasão é afetada, também, por fatores internos como a dosagem do concreto e o processo de cura do material (SILVA, 2015).

Diante deste contexto, há expectativa na aplicação de concretos geopoliméricos em superfícies onde os esforços à abrasão são preponderantes, como forma a aumentar a resistência ao desgaste superficial e, ao mesmo tempo, produzir um concreto com melhor desempenho ambiental.

Os estudos com concretos geopoliméricos mostram maior eficácia no uso do metacaulim como principal precursor na sua fabricação. Porém, por se tratar de um material nobre, o metacaulim possui um custo similar ao cimento Portland e, por isso, pode ser substituído pela cinza de casca de arroz, resíduo da indústria de

cultivo do arroz, que possui menor impacto ambiental em sua produção, que contém, também, sílica e alumina em sua composição. (LIANG *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2021).

Dessa forma, o presente trabalho investigou a resistência à abrasão superficial, bem como suas características correlatas, de concreto convencional e de concreto geopolimérico de metacaulim, com características mecânicas similares, bem como uma amostra de concreto geopolimérico com substituição parcial de metacaulim por cinza de casca de arroz. A metodologia englobou ensaios acelerados de laboratório para mensurar a abrasão superficial, bem como a criação de placas de concreto para verificação do desgaste por abrasão real, ao longo do tempo.

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto é utilizado de forma ampla como material de construção na sociedade moderna. Com o crescimento das cidades, da industrialização e da modernização, a demanda por esse material cresce ano após ano. Dessa forma, matérias-primas são necessárias em quantidades suficientes no mundo todo para a fabricação de concretos. Por outro lado, uma quantidade considerável de resíduos industriais e agrícolas está sendo gerada e, muitas vezes, descartada irregularmente, criando problemas ambientais. Torna-se necessária, nesse sentido, uma evolução dos materiais cimentícios em direção à sustentabilidade ambiental, além da procura por outras fontes de matérias-primas mais sustentáveis para a produção de concretos, bem como a utilização e valorização de resíduos nesse processo (MEHTA e MONTEIRO; 2014; SCHWAAB, 2018, ZHU *et al.*, 2021).

A utilização do cimento Portland na composição do concreto convencional faz com que esse material seja responsável pela emissão de cerca de 271,9 kg de CO₂/m³ de concreto produzido. Além disso, o seu consumo energético utiliza cerca de 1794 MJ/m³ de clínquer (energia térmica) e entre 90 e 120 kWh/t de cimento produzido (energia elétrica) (BORGES *et al.*, 2014). Além disso, a interação do concreto com o meio ambiente contribui para problemas de durabilidade nas estruturas de concreto. Tais problemas desencadeiam custos na reparação do material. Em muitos locais, os aportes gastos com a recuperação da estrutura são maiores que aqueles com a construção de outra edificação (ALIABDO; ELMOATY e SALEM, 2016; CAMÕES, 2005; RAKHIMOVA e RAKHIMOV, 2019).

Por outro lado, os materiais geopoliméricos, de maneira geral, não utilizam cimento Portland em sua fabricação. Em substituição ao cimento, são inseridos materiais precursores aluminossilicatos, como o metacaulim (matéria-prima), escória de alto forno, cinza de casca de arroz, e cinza volante (resíduos industriais), e ativadores alcalinos, como silicatos de sódio e potássio, hidróxidos de sódio e potássio, entre outros. A utilização desses materiais e resíduos industriais envolvem cerca de 3,6 vezes menos geração de CO₂, além de apresentarem cerca de 45,8% menor consumo energético na produção dos geopolímeros (BORGES *et al.*, 2014). A durabilidade desses materiais também pode ser superior em comparação aos concretos convencionais, por apresentar uma microestrutura homogênea, similar às de rochas (AMRAN *et al.*, 2020; JINDAL, 2019).

O metacaulim vem sendo estudado por muitas pesquisas como matéria-prima para a produção de concretos geopoliméricos (ALBIDAH *et al.*, 2021; AMIN *et al.*, 2022; MOTA *et al.*, 2016; SCHWAAB, 2019). Para obtenção do material, todavia, é necessária a extração e a calcinação de argilominerais, o que acarreta em custos neste processo, tornando-o um material nobre. Dessa forma, há a possibilidade de substituí-lo pelo resíduo de cinza de casca de arroz, que por sua vez, é um material resultante de um processo agrícola e, por isso, não possui custo próprio de fabricação, exceto se ocorrer beneficiamento (moagem) (ASSI *et al.*, 2020; JAYA *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2018).

A abrasão superficial é frequentemente encontrada em pisos industriais, pavimentos, calçadas, passeios públicos e contrapisos. Sua ocorrência está ligada a fatores externos, como a ação de intempéries e utilização do local, bem como fatores internos, como a influência dos diversos componentes da massa, tipo e tempo de cura. Além disso, a abrasão superficial está relacionada com outras propriedades físicas (absorção de água e densidade), mecânicas (resistência à tração, compressão e flexão) e de durabilidade de concretos (ABITANTE, 2004; SILVA, 2015).

Há uma lacuna para exploração de novos trabalhos que estudem o desgaste por abrasão superficial dentro desse universo de concretos convencionais e geopoliméricos, comparando-os. E, diferente dos trabalhos publicados que mostram somente um método acelerado para estudar a abrasão superficial, o presente estudo comparou três métodos acelerados de desgaste por abrasão superficial, além de comparar o desgaste por abrasão natural da peça de concreto.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa estão subdivididos em geral e específicos e estão apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi investigar o desgaste superficial por abrasão em concretos geopoliméricos com substituição parcial de metacaulim por cinza de casca de arroz.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- Avaliar a potencialidade do uso do metacaulim e da cinza de casca de arroz como precursores para fabricação de concretos geopoliméricos utilizados em aplicações submetidas ao desgaste por abrasão superficial;
- Comparar os resultados de desgaste por abrasão entre diferentes tipos de ensaios acelerados;
- Validar os resultados de ensaios acelerados de abrasão com a aplicação de placas expostas ao desgaste natural;
- Comparar os resultados de abrasão superficial de concretos geopoliméricos com o concreto convencional;

1.3 INEDITISMO

Este trabalho oferece contribuições originais para a área de materiais de construção civil e patologia das construções, dentre elas estão:

- Avaliação da substituição parcial do metacaulim pela cinza de casca de arroz na produção de concretos geopoliméricos para avaliação do desgaste por abrasão nas proporções estudadas;
- Comparação de três tipos de ensaios acelerados de desgaste por abrasão superficial (tendo em vista que os estudos encontrados na literatura estudam apenas um método acelerado por pesquisa), e a sua relação com as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade em concretos geopoliméricos e convencionais;
- Aplicação de protótipos de concreto para mensurar o desgaste superficial de abrasão real, natural e temporal dos concretos geopoliméricos e convencionais e a comparação dos resultados obtidos nesse procedimento com os encontrados nos ensaios de desgaste acelerados, para validação da pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em sete partes principais, detalhadas a seguir:

O primeiro capítulo é composto pela introdução do estudo, sua justificativa e ineditismo, além da exposição dos objetivos geral e específicos.

No segundo capítulo está exposta a revisão de literatura referente ao tema de concretos geopoliméricos, abordando o estado da arte, os materiais que são utilizados, por pesquisas, para a produção de concretos geopoliméricos, bem como as suas principais propriedades.

O terceiro capítulo compreende a revisão de literatura sobre abrasão superficial, abordando definições, relação com outros tipos de desgastes físicos e propriedades diversas, além da influência de fatores internos do concreto para a abrasão.

No quarto capítulo, encontra-se o programa experimental da pesquisa, assim como a descrição dos materiais utilizados durante o a realização do trabalho. São detalhados, também, os ensaios realizados.

O quinto capítulo apresenta os resultados e discussões obtidos na pesquisa até o momento.

O sexto capítulo contempla as conclusões finais da pesquisa, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS GEOPOLÍMÉRICOS

2.1 DEFINIÇÃO

O termo geopolímero foi utilizado pela primeira vez por Joseph Davidovits, que o definiu como um material sintético, com elevada durabilidade, estabilidade térmica e dureza, confeccionado por soluções alcalinas e pela ativação de partículas sólidas compostas de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) (DAVIDOVITS, 1994; SCHWAAB, 2019).

Esse termo resulta da junção do prefixo “geo”, que indica um material inorgânico, rígido e estável até a temperatura de 1250 °C, ao termo “polímero”, que endurece a baixas temperaturas, além de se transformar e policondensar. O geopolímero pode parecer, ainda, a um aglomerado de zeólitas com traços nanocristalinos, unidas entre si por uma fase de gel amorfa. (DAVIDOVITS, 2013; LIVI, 2013; SCHWAAB, 2019).

Embora os geopolímeros sejam considerados, atualmente, materiais inovadores, são baseados em um princípio antigo, provavelmente de materiais utilizados no Egito Antigo ou Coliseu (DAVIDOVITS, 1991). Pesquisas com foco nas propriedades de materiais geopoliméricos, porém, começaram a ser estudadas apenas a partir da década de 1960 (JINDAL, 2019; LIVI, 2013; MAZZA, 2010; SANTA, 2012).

2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A Tabela A1 apresentada no Apêndice A mostra um levantamento cronológico de algumas pesquisas relevantes internacionais que estudaram geopolímeros. Este levantamento foi elaborado por Livi (2013) e Schwaab (2019) e adaptado para a presente pesquisa, com artigos atuais da base de dados do Science Direct. Além disso, foram realizados diversos estudos nacionais acerca do tema, incluindo teses e dissertações. Esses estudos são apresentados na Tabela B1, que está contemplada no Apêndice B.

Conforme as Tabelas A1 e B1 apresentadas nos Apêndices A e B, as primeiras pesquisas da área remontam às décadas de 1950 e 1960 em estudos que utilizaram escórias álcali-ativadas com silicato de sódio. Davidovits, em 1978,

patenteou diversos estudos sobre a utilização e a ativação alcalina de caulim e metacaulim. A partir da década de 1990 as pesquisas sobre o tema se difundiram pelo mundo e passaram a estudar a influência de diferentes fontes de aluminossilicatos e ativadores alcalinos, bem como o comportamento no estado fresco, endurecido e durabilidade desses materiais.

No universo do cimento Portland, existem diversas pesquisas relacionadas a pastas, argamassas e concretos. No cenário com geopolímeros, porém, a maior parte das pesquisas estuda o cimento em si, com seus materiais precursores, bem como pastas e argamassas. Há, então, na literatura nacional e internacional, menor quantidade de pesquisas que estudam as propriedades de concretos geopoliméricos, foco do presente trabalho (CESARI, 2015; LIVI, 2013; MAZZA, 2010; MING *et al.*, 2016; SCHWAAB, 2019).

Os trabalhos internacionais dos últimos cinco anos se concentraram em estudar o efeito, a variação e a dosagem dos ativadores alcalinos (JINDAL, 2019; KAMSEU *et al.*, 2017; LUHAR *et al.*, 2019), bem como a testagem de diferentes tipos de materiais precursores (CAI *et al.*, 2020a; JINDAL, 2019; KAMSEU *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2018; NUAKLONG *et al.*, 2018a), tendo a maior parte das pesquisas utilizado o metacaulim (ASSI *et al.*, 2020; JAYA *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2018; QIN *et al.*, 2020). Há, também, estudos que visam a confecção de geopolímeros com maior resistência mecânica (CAI *et al.*, 2020b; JAYA *et al.*, 2020; LUHAR *et al.*, 2019; SALONI *et al.*, 2020a; XIE *et al.*, 2019; YAN *et al.*, 2017), ou comparação entre os tipos de cura (AMINI *et al.*, 2019).

Embora as propriedades sejam exaustivamente exploradas por trabalhos de todo o mundo (AMRAN *et al.*, 2020; BILLONG *et al.*, 2018), é nítido a maior presença de artigos que exploram a durabilidade dos geopolímeros (CAI *et al.*, 2020b; KUMAR *et al.*, 2018; LUHAR *et al.*, 2019; WONGSA *et al.*, 2016), sendo que as principais características de durabilidade estudadas englobam o ataque químico por ácidos, sulfatos e cloretos (AYGÖRMEZ *et al.*, 2020). Por outro lado, poucos trabalhos se concentraram no estudo de desgastes físicos, como a abrasão (LUHAR *et al.*, 2019; YAN *et al.*, 2017), de maneira que o tema ainda não foi explorado de forma completa e profunda. Há lacunas que precisam de investigação, tais como a comparação entre distintos métodos de avaliação de abrasão superficial, bem como o estudo da correlação entre as propriedades mecânicas e físicas com a abrasão. Há, também, espaço para pesquisas que visam a substituição do metacaulim por

precursores alternativos, como resíduos industriais, que não tem valor comercial ou carga ambiental. Esses assuntos são abordados pela presente tese.

2.3 PROCESSO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO

Os materiais geopoliméricos são sintetizados por meio de uma reação de geopolimerização. Durante esse processo, os cátions dos metais alcalinos (ativadores) ordenam as moléculas de água e, posteriormente, solubilizam os materiais (precursores) para início da atividade de nucleação, que formará a estrutura geopolimérica (BARROSO, 2009; SCHWAAB, 2019; SILVA, 2011a).

A reação de geopolimerização, também chamada de geossíntese, é uma reação exotérmica baseada pela indução do alumínio nas alterações químicas e cristalográficas de uma matriz silicosa, em um curto período de tempo, usando um componente alcalino (ativador). O mecanismo de reação de dissolução e formação do gel é semelhante a zeólitas e contém algumas etapas, listadas a seguir (MA *et al.*, 2018; MELO, 2011; SCHWAAB, 2019; SOUSA, 2011; XU, 2003).

A primeira etapa é composta pela dissolução dos sólidos. Ela acontece de forma ágil em um ambiente com alto pH, iniciando o processo de rearranjo das ligações e a formação de uma cadeia. Os precursores têm seus aluminossilicatos lixiviados na superfície e são difundidos na solução pelos hidróxidos dos ativadores. Essa dissolução se inicia pela ruptura das ligações Al-O e, depois, de forma mais lenta, ocorre a ruptura das ligações Si-O. A dissolução desses componentes contribui para o aumento da formação de produtos com maior resistência mecânica. Como resultado desta primeira etapa, há a formação de silanol (-Si-OH) e siliato (-Si-O-) (DUXSON *et al.*, 2007; KORF, 2019; LONGHI, 2015, VALADARES, 2019). Por meio da síntese dos geopolímeros, se obtém, também, três monômeros: poli-sialato (Si-O-Al-O), poli-sialato-siloxo (Si-O-Al-O-Si-O) e poli-sialato-disiloxo (Si-O-Al-O-Si-O-Si), que consistem em tetraedros SiO₄ e AlO₄, ligados pelo compartilhamento de oxigênio (VALADARES, 2019).

Após, a parte dissolvida da mistura reage com os íons dos silicatos, formando um gel. Essa situação ocorre pelo mecanismo de polimerização por condensação entre as unidades monoméricas isoladas. Os monômeros de sílica reagem entre si e formam dímeros, que reagem com monômeros e formam polímeros. Os aluminatos

participam da polimerização, como substitutos dos tetraedros de silício (DUXSON *et al.*, 2007; KORF, 2019; LONGHI, 2015).

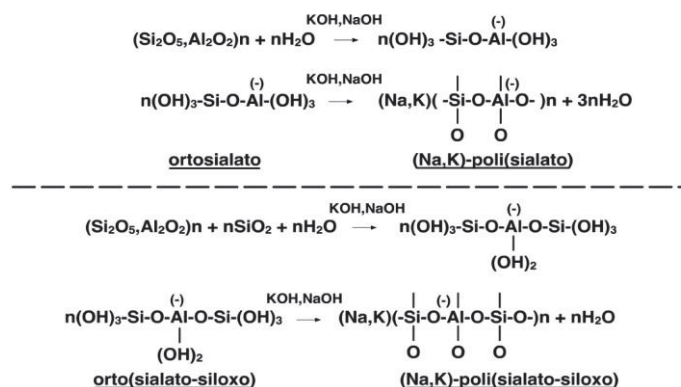
Depois de ter o sistema gelificado, há uma reorganização da massa e, conseqüentemente, maior conectividade entre as ligações, formando uma rede tridimensional com ligações Al-O-Si, que é responsável por liberar a água consumida na etapa antecessora, e que fica disponível nos poros do gel. Quanto maior o teor de sílica, melhor será a distribuição da água nos poros e melhor serão as propriedades mecânicas (DUXSON *et al.*, 2007; KORF, 2019; LONGHI, 2015).

No final, diferentemente do cimento Portland, não há formação de gel de silicatos hidratados (CSH) para o endurecimento da pasta. Utiliza-se, nesse caso, a policondensação da sílica e da alumina para se obter resistência mecânica. O principal produto final da reação é um gel aluminossilicato amorfo (N-A-S-H), que varia sua composição dependendo dos tipos de matérias-primas utilizadas (OLAWALE, 2013; VALADARES, 2019).

A água que está presente nos poros vai evaporar e dar início à formação de produtos como zeólitas, marcando a etapa de endurecimento. O gel formado precisa estar em pequena quantidade e condensado completamente, para que a porosidade se apresente de forma distribuída e uniforme. Além disso, pequenas variações nas quantidades de Si ou Al poderão influenciar as propriedades físicas e químicas da matriz geopolimérica (DUXSON *et al.*, 2007; KORF, 2019; LONGHI, 2015).

A formação do material geopolimérico foi trazida por Davidovits (1991) e é representado pelas equações trazidas na Figura 1.

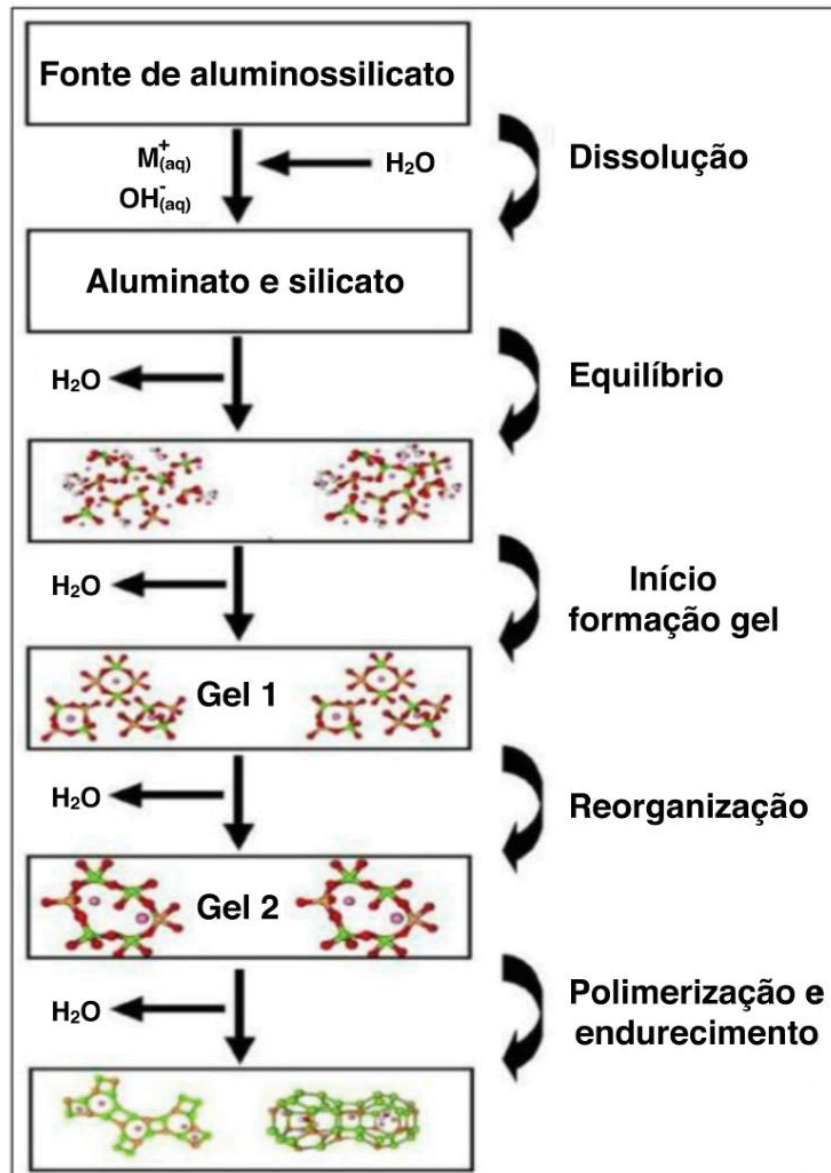
FIGURA 1: EQUAÇÕES DAS REAÇÕES DE GEOPOLIMERIZAÇÃO DE CIMENTOS GEOPOLIMÉRICOS



FONTE: Davidovits (1991).

A Figura 2 ilustra o mecanismo teórico para a geopolimerização, conforme etapas discutidas.

FIGURA 2: FASES DO MECANISMO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO



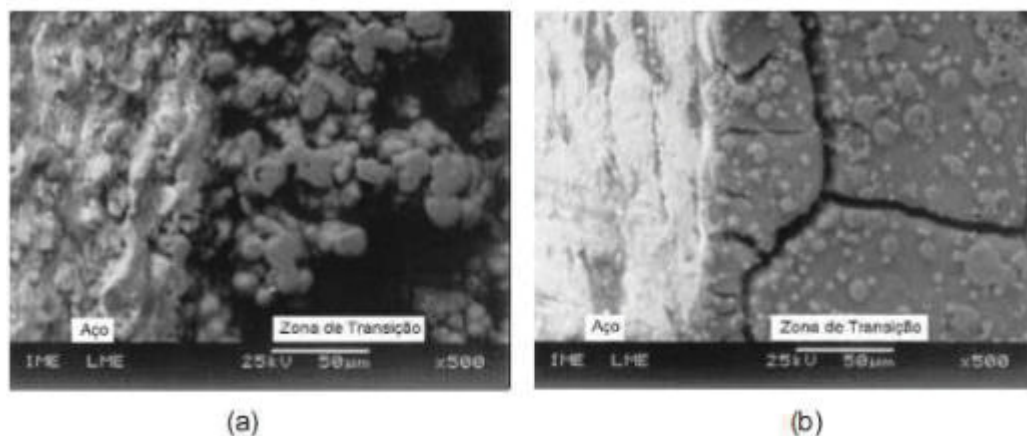
FONTE: Santos (1989).

Assim como ilustrado pela Figura 2, a dissolução dos materiais depende do grau de saturação da fase líquida, das características dos sólidos, da taxa e tempo de mistura, além dos cátions do metal alcalino na solução. Ademais, o processo em aluminossilicatos ocorre de forma rápida caso o pH do meio for elevado, criando uma solução supersaturada. Muitas vezes, a dissolução completa de materiais só ocorre quando a estrutura endurecida é criada. Além disso, algumas porções de

Por meio da Figura 3 é possível observar a presença de uma fase única e não distinta, uma espécie de microestrutura massiva. Além disso, a figura evidencia um material sem morfologia definida, com composição semelhante a de rochas, uma vez que é formado por materiais aluminossilicatos. Tal motivo leva a cientistas estabelecerem uma comparação do material com a dos minerais formadores de rochas, enfatizando sua potencial durabilidade. Além disso, a matriz geopolimérica apresentou fissuração, provavelmente proveniente de pressões da cristalização de produtos formados no seu interior (MAURI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2002).

A Figura 4 mostra a interface aço-matriz de uma pasta com cimento Portland e uma com cimento geopolimérico.

FIGURA 4: INTERFACE AÇO PASTA DE: (a) CIMENTO PORTLAND; E (b) CIMENTO GEOPOLIMÉRICO



Obs.: Magnitude: 500x. FONTE: Dias (2001).

Por meio da Figura 4 é possível concluir que a zona de transição aço-matriz de pastas de cimento Portland são mais porosas que a interface de pastas de cimento geopolimérico. Além disso, foi revelado que a interface aço-pasta da pasta geopolimérica tem a mesma porosidade do restante do material, diferente da pasta de cimento Portland. Desta forma, a matriz geopolimérica desenvolveu maior adesão ao aço em decorrência da sua maior área de contato.

É inevitável comparar a micrografia da pasta geopolimérica com uma micrografia de pasta com cimento Portland. A primeira, utiliza materiais precursores (metacaulim, cinza volante, escória de alto forno, etc.) e forma uma matriz sólida por polimerização, composta de um gel aluminossilicato amorfo (N–A–S–H). Além disso, dependendo do tipo de precursor utilizado e da quantidade de cálcio disponível na

mistura, pode haver uma pequena produção de produtos hidratados. Já a segunda, composta pela pasta convencional de cimento Portland, independente da adição mineral, que é muitas vezes a mesma utilizada pela pasta geopolimérica, forma produtos por hidratação, como o gel C-S-H, etringita e a portlandita (MAURI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2002).

Há, também, uma diferença na definição e composição de materiais geopoliméricos e materiais álcali-ativados. Os materiais álcali-ativados são geralmente caracterizados por uma composição menor de sílica e maior teor de cálcio, além de serem confeccionados, muitas vezes, com um ativador sólido, água e uma fonte de aluminossilicato, com ou sem calcinação. Os materiais geopoliméricos geralmente se apresentam com baixo teor de cálcio, estrutura química tridimensional e são, muitas vezes, confeccionados com a combinação de dois ativadores alcalinos (destes, pelo menos um na fase líquida), água e uma fonte de aluminossilicato, com calcinação (LUUKKONEN *et al.*, 2018).

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM AS PROPRIEDADES DE GEOPOLÍMEROS

Várias relações entre compostos químicos dos materiais geopoliméricos exercem influência nas propriedades finais desses materiais: a relação sílica/sódio ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$), relação sílica/alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), assim como a temperatura são responsáveis pelo grau de geopolimerização do material por meio de um processo de dissolução. Se houver um aumento na quantidade de Al_2O_3 , a relação citada é reduzida e os produtos resultantes adquirem menor resistência mecânica. Conseqüentemente, as relações $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ e $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ estão diretamente ligadas com a resistência à compressão do concreto geopolimérico (APOLONIO, 2017; SCHWAAB, 2019; ZHANG *et al.*, 2013).

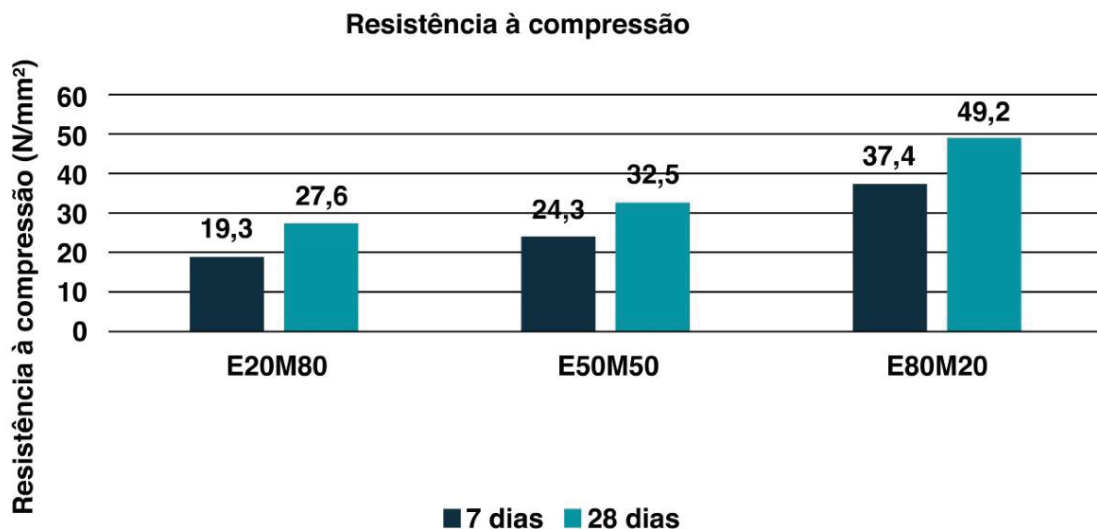
Ainda para incremento da resistência à compressão, vários autores utilizaram adição ou substituição, em peso do aglomerante geopolimérico, por cimento Portland. O aglomerante libera calor quando misturado à água e acelera ainda mais a reação de polimerização. Teores de adição de cimento Portland em concretos geopoliméricos acima de 20% tendem a reduzir a resistência mecânica, pois diminuem proporcionalmente as quantidades de sílica e alumina disponíveis e, conseqüentemente, diminuem a formação de produtos geopoliméricos (mais

ligações Ca-O do que Al-O e Si-O) (ADAM, 2009; JINDAL, 2019; MEHTA e SIDDIQUE, 2017; NATH, SARKER, 2015; SILVERSTRIM *et al.*, 1997).

Mehta e Siddique (2017) substituíram parcialmente a cinza volante, utilizada como precursora do concreto geopolimérico por cimento Portland nas quantidades de 10, 20 e 30%, mantendo constante os outros componentes da mistura. Houve incremento na resistência à compressão, em todas as idades de cura, até a quantidade de 20%. Houve redução de cerca de 5% na resistência mecânica ao substituir 30% de cinza volante por cimento Portland.

Kumar *et al.* (2018) pesquisaram as propriedades mecânicas de concretos geopoliméricos à base de metacaulim e escória de alto forno, em proporções 20/80, 50/50 e 80/20, respectivamente. A Figura 5 mostra os resultados da pesquisa.

FIGURA 5: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS À BASE DE METACALIM E ESCÓRIA DE ALTO FORNO



FONTE: Kumar *et al.* (2018) – adaptado.

A Figura 5 apresenta que as misturas com 50 e 80% de escória de alto forno tiveram maiores resistências à compressão, em 7 e 28 dias de idade. Tal fato decorre da presença de mais oferta de óxido de cálcio, maior ganho de resistência precoce e formação de produtos de reação mais resistentes, ambos fornecidos pela escória de alto forno.

Nath e Sarker (2017) estudaram o módulo de elasticidade de concretos geopoliméricos de cinza volante com hidróxido de sódio e silicato de sódio alcalino e concluíram que enquanto os concretos convencionais de 40 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura apresentaram módulo de elasticidade de 30,6 GPa, os concretos geopoliméricos de mesma resistência à compressão atingiram valores entre 21 a 23 GPa de módulo de elasticidade, ou seja, em torno de 25 a 30% menor.

É improvável que o processo de policondensação de aluminossilicatos ocorra totalmente. Porém, durante a geopolimerização, caso a razão entre óxidos dos precursores (Na_2O , K_2O) / Al_2O_3 seja menor que 0,8 e a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ seja inferior a 3,5, há a tendência da taxa de policondensação diminuir ainda mais. Nesse caso, haverá, pelo excesso de aluminossilicatos, a formação de uma espécie de pó branco não endurecido, resultado da parte que não sofreu reação (LIVI, 2013).

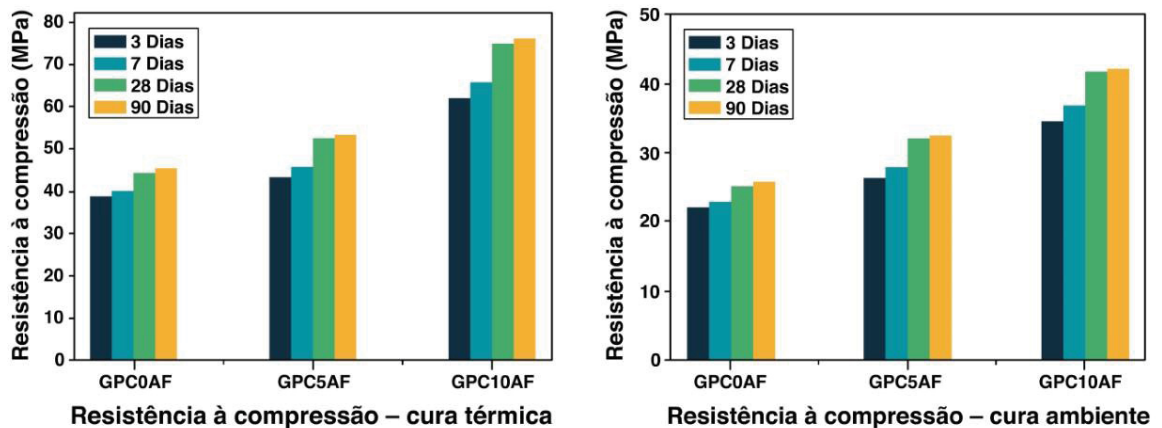
Outro fator preponderante que potencializa a geopolimerização é o tamanho das partículas dos materiais sólidos utilizados. Quanto menor a granulometria, maior a área de contato e mais rápida ocorre a reação. Em contrapartida, com a utilização de materiais com granulometria mais elevada, ocorre o aprisionamento e consequente não-hidratação ou não-reação das partículas, comprometendo assim o desempenho do material final, como por exemplo, menor resistência mecânica (BRITO, 2018).

A cura e a temperatura de cura exercem grande importância no desenvolvimento do produto geopolimérico. Enquanto no concreto convencional a cura frequentemente adotada em pesquisas é submersa ou em câmara úmida, para o concreto geopolimérico a cura utilizada nas pesquisas é ambiente ou térmica. A temperatura acelera a velocidade de reação e acarreta maior resistência final ao material (AMRAN *et al.*, 2020). A pesquisa de Granizo *et al.* (2014) avaliou a cura de geopolímeros com metacaulim em temperaturas de 25 a 85 °C e observaram maior grau de reação nos primeiros dias de cura com o incremento de temperatura. Além disso, esses autores evidenciaram a maior quantidade de silício no sistema, indicando maior quantidade de ligações Si-O.

Outros trabalhos também apresentaram melhores resultados mecânicos ao adotar cura térmica ou ambiente. Além disso, a cura submersa não é utilizada para os geopolímeros, pois há a lixiviação de íons alcalinos da pasta. Além disso, há a movimentação de álcalis na superfície do concreto, que está em processo de cura, e por isso pode conferir ao material uma tendência à eflorescência (HARDJITO e

RANGAN, 2005; JINDAL, 2017; JINDAL *et al.*, 2019; LIVI, 2013; SALONI *et al.*, 2020a; ZHANG, 2020). A Figura 6 mostra a resistência mecânica de concretos geopoliméricos com dois tipos de cura distintos.

FIGURA 6: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS DE ACORDO COM O TIPO DE CURA



FONTE: Saloni *et al.* (2020a) – adaptado.

A Figura 6 mostra que a cura térmica eleva a resistência à compressão do concreto geopolimérico de cinza volante aos 3, 7, 28 e 90 dias de idade se comparada à cura ambiente. Uma mesma amostra de concreto curada em temperatura ambiente e em cura térmica a 90 °C, por 28 dias, apresentou cerca de 42 e 75 MPa de resistência à compressão, respectivamente.

A quantidade de água desempenha papel importante na dissolução, hidrólise e nas reações de policondensação. A alta proporção de água/materiais secos favorece a fase de dissolução e a hidrólise, contudo, pode atrapalhar a policondensação. Esse comportamento é similar ao que ocorre para um concreto de cimento Portland, onde o aumento de água na relação água/cimento (A/C) pode melhorar as propriedades de trabalhabilidade do concreto fresco e, ao mesmo tempo, diminuir a resistência mecânica do concreto endurecido (CAI, 2020b; CESARI, 2015; LIVI, 2013; ZHIHUA *et al.*, 2013).

A utilização de aglomerantes geopoliméricos tem características distintas se comparadas ao cimento Portland, oferecendo vantagens e desvantagens na sua utilização. Essas diferentes características são apresentadas por algumas pesquisas

(AMRAN *et al.*, 2020; FREITAS, 2008; GRANJA, 2014; LIVI, 2013; SCHWAAB, 2019; ZHANG *et al.*, 2020).

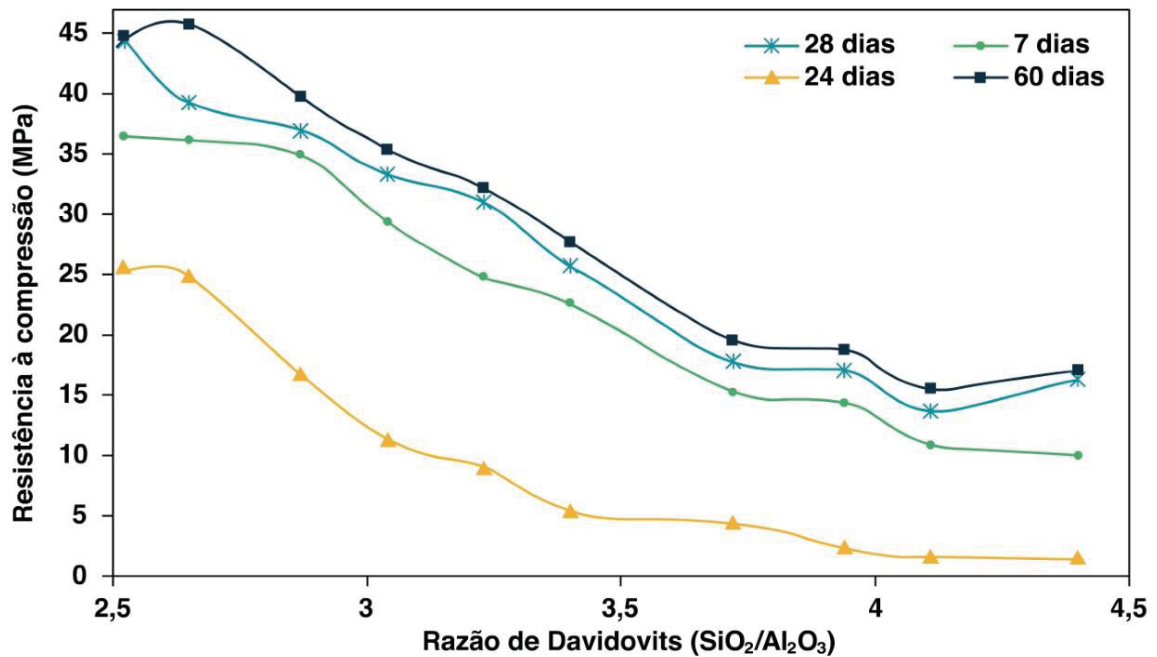
Concretos geopoliméricos utilizam fontes de matérias-primas abundantes em diferentes lugares. Além disso, são utilizadas adições minerais, pozolanas naturais ou resíduos industriais para a fabricação do material.

O ganho de resistência de materiais geopoliméricos, em decorrência da aceleração das reações de geopolimerização promovida pelo tipo de cura adotada proporciona ao produto final maior resistência inicial, se comparado à concretos convencionais com cimento Portland, como apresentado na pesquisa de Saloni *et al.* (2020a), a partir da Figura 6.

As desvantagens da utilização de materiais geopoliméricos estão ligadas à dosagem do material, que é diferente do convencional, ao preparo da solução ativadora e mistura dos componentes na betoneira, bem como a adoção de método de cura correto. Algumas pesquisas relatam a formação de eflorescência como desvantagem dos geopolímeros (LONGHI, 2015; MATHEW e ISSAC, 2020; ROCHA, 2017).

O aumento da relação Si/Al ou da concentração molar da solução, propiciada pelas matérias-primas usadas na fabricação dos geopolímeros, resulta em maior aderência da fase gel, assim como maior poder de dissolução. Porém, se a concentração molar ultrapassar a zona ótima de dosagem, aumentará a presença de hidroxilas e, conseqüentemente, resultará em perda de resistência mecânica e aumento de eflorescência. Nesse caso, em decorrência da viscosidade proporcionada pelo ativador alcalino, também há uma maior perda de tempo para evaporação do excesso de água do material (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2005; KAMSEU *et al.*, 2017; LIVI, 2013; SCHWAAB, 2019). Esses comportamentos podem ser vistos na Figura 7.

FIGURA 7: RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO, TEMPO DE CURA E RELAÇÃO SI/AL DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS



FONTE: Brito (2018).

A Figura 7 mostra que os maiores resultados de resistência à compressão das amostras ocorreram com relações sílica/alumina variando entre 2,5 e 3. Além disso, quanto maior essa razão (dentro do intervalo estudado), menor a resistência à compressão.

2.5 MATÉRIAS-PRIMAS PARA CONFECÇÃO DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS

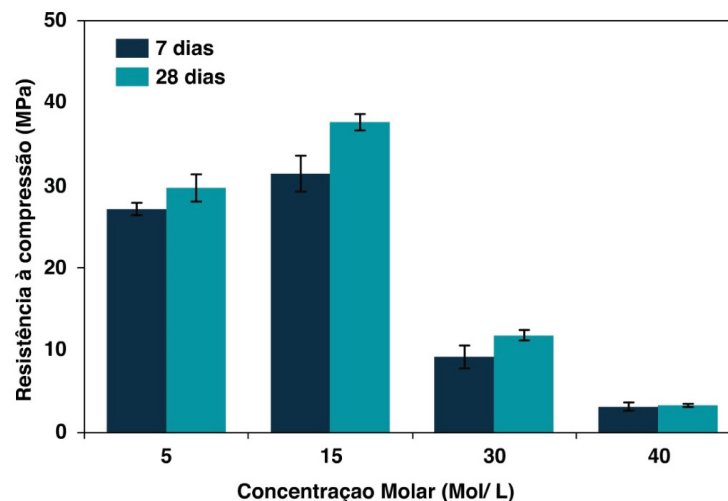
As matérias-primas para a confecção dos concretos geopoliméricos são, basicamente, precursores compostos de fontes de aluminossilicatos, ativadores alcalinos, além dos agregados graúdos, miúdos e água. Os precursores devem apresentar controle granulométrico e quantidade considerável de material amorfo. Além disso, o ativador alcalino deve conter pH elevado, para a dissolução da parcela amorfa do precursor sólido (SCHWAAB, 2019).

2.5.1 Ativadores alcalinos

As soluções ativadoras são constituídas de um metal alcalino ou alcalino-terroso e classificadas de acordo com a sua natureza química. Além disso, os materiais mais utilizados são compostos de sódio ou potássio: hidróxido de sódio (NaOH), silicato de potássio (Na_2SiO_3) carbonato de sódio (Na_2CO_3), silicato de sódio (Na_2SO_4) e hidróxido de potássio (KOH). Dentre os ativadores previamente mencionados, o KOH apresenta maior potencial de reação, e por causa da sua natureza corrosiva, possui venda controlada no Brasil (AMRAN *et al.*, 2020; DUXSON *et al.*, 2007; LIVI, 2013; PINTO, 2006; SCHWAAB, 2019).

O ativador alcalino e a sua quantidade de íons hidroxila disponíveis em solução - que são responsáveis por quebrar as ligações presentes na fase vítrea dos precursores e formar o gel - após o contato com a água, influenciam a resistência mecânica do geopolímero. Além disso, geralmente são utilizadas soluções compostas (formadas de dois ou mais ativadores de sódio e/ou potássio), que aumentam, dessa forma, a taxa de reação e, conseqüentemente, eficiência do produto nas propriedades requeridas (LIVI, 2013; SCHWAAB, 2019). A Figura 8 mostra a relação entre a resistência à compressão e a concentração molar dos ativadores (silicato de sódio e hidróxido de sódio) usados na fabricação dos concretos geopoliméricos.

FIGURA 8: RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO E O TEMPO DE CURA DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS COM A CONCENTRAÇÃO MOLAR DOS ATIVADORES QUÍMICOS (HIDRÓXIDO DE SÓDIO E SILICATO DE SÓDIO)



FONTE: Brito (2018).

A Figura 8 mostra que a amostra com concentração molar de 15 mol/L foi a que obteve melhor resultado, em torno de 40 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

A presente pesquisa utilizou, durante a fase experimental, o hidróxido de sódio e o silicato de sódio alcalino como ativadores na confecção das misturas de concretos. Dessa forma, por ser foco da presente tese, as características desses materiais são detalhadas a seguir.

a. Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) é muito utilizado na confecção de geopolímeros, principalmente pelo seu baixo custo (em torno de R\$ 17,00/kg) e por ser facilmente encontrado no mercado. As soluções que contém este material reagem rapidamente e são mais viscosas, porém geram uma matriz mais porosa e, possivelmente, menos resistente (ASSI *et al.*, 2020; MING *et al.*, 2016).

A presença do ativador NaOH mostra uma solução rica em álcalis, com tendência à formação de estruturas zeolíticas. Além disso, a utilização em excesso do material pode provocar redução de 50% na resistência mecânica ao longo dos primeiros 28 dias de cura (APOLONIO, 2017; PROVIS *et al.*, 2005; VARGAS *et al.*, 2007). O material tem, ainda, natureza altamente corrosiva (LONGHI, 2015).

Os geopolímeros produzidos com NaOH apresentam tendência de formação de eflorescência. Isto ocorre devido a menor reatividade antes do endurecimento, podendo formar uma estrutura porosa e uma solução rica em álcalis. Além disso, o menor raio atômico do sódio permite mais mobilidade na matriz, aumentando também a viscosidade da solução com esse componente. (LONGHI, 2015).

Mathew e Issac (2020) estudaram o efeito da relação silicato de sódio/hidróxido de sódio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) na resistência de concretos geopoliméricos e chegaram a uma relação ideal de 2,5. Além disso, com o aumento dessa relação há o aumento do teor de sódio da mistura. Embora o sódio seja importante para a formação do geopolímero, seu excesso impede a evaporação de água, acarretando em menor resistência à compressão. Quando esta razão foi aumentada para 3, por exemplo, houve uma redução de 24% de resistência à compressão.

A Tabela 1 cita os ativadores alcalinos utilizados por algumas pesquisas encontradas na literatura. Por meio da tabela, é possível verificar que, embora a maioria das pesquisas citadas utilizem dois ativadores alcalinos, com exceção de Livi (2013) e Cesari (2015), todas essas utilizaram o hidróxido de sódio combinado com outro ativador. Essa afirmação demonstra, de certa forma, consenso literário na sua aplicação e influência na geopolimerização.

TABELA 1: RELAÇÃO DE ALGUMAS PESQUISAS COM TIPOS DE PRECURSORES E ATIVADORES ALCALINOS UTILIZADOS

Autor	Precursores utilizados	Ativadores alcalinos utilizados	Material produzido	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Relação A/C	Tipo de cura
Mazza (2010)	Metacaulim	Hidróxido de potássio e silicato de sódio	Argamassa	34	-	Submerso
Santa (2012)	Cinza pesada e metacaulim	Hidróxido de sódio e silicato de sódio	Pasta	5,1-22	-	Ambiente
Livi (2013)	Cinza volante	Hidróxido de sódio	Pasta	7,5-24	0,55-0,70	Térmica
Cesari (2015)	Cinza volante	Hidróxido de sódio	Pasta	14	0,50-0,60	Térmica
Nath e Sarker (2015)	Cinza volante	Hidróxido de sódio e silicato de sódio	Pasta, argamassa e concreto	~60	0,20	Ambiente
Wongsa <i>et al.</i> (2016)	Cinza volante	Hidróxido de sódio e silicato de sódio	Concreto	~16,9	0,70 – 0,80	Ambiente
Kamseu <i>et al.</i> (2017)	Metacaulim	Silicato de sódio, hidróxido de sódio e cinza de casca de arroz	Argamassa	-	1	Ambiente
Brito (2018)	Cinza volante e metacaulim	Hidróxido de sódio e silicato de sódio	Pasta	31,45	-	Ambiente
Pelisser <i>et al.</i> (2018)	Metacaulim	Hidróxido de sódio e silicato de sódio	Concreto armado	55,1	0,75	Ambiente
Schwaab (2018)	Metacaulim, escória de alto forno e cinza volante	Hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, aluminato de sódio, hidróxido de alumínio, silicato de sódio alcalino e silicato de potássio	Pasta e Argamassa	~35	1,87	Ambiente
Jaya <i>et al.</i> (2020)	Metacaulim	Hidróxido de sódio e silicato de sódio	Pasta	6	0,8	Térmica e ambiente

Obs.: (~: em média) FONTE: o autor (2022).

b. Silicato de sódio alcalino

O silicato de sódio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) é um líquido viscoso, com baixo custo (cerca de R\$ 4,00/litro) e, por isso, é muito utilizado na fabricação de materiais geopoliméricos. O material é altamente solúvel em água e, quanto maior o seu pH, mais viscoso se apresenta (ASSI *et al.*, 2020; LONGHI, 2015).

Além disso, a aplicação do material altera a relação sódio/alumina (Na/Al) da geopolimerização. Essa proporção apresenta importância e influência no grau de reação dos produtos, assim como a temperatura e a relação Si/Al, em menor grau de importância (ZHANG *et al.*, 2013). A relação sílica/sódio também altera o grau de polimerização dos materiais dissolvidos no silicato de sódio.

Ramos *et al.* (2018) estudaram as propriedades de pastas e argamassas geopoliméricas variando a relação entre os ativadores alcalinos hidróxido de sódio e silicato de sódio alcalino e tiveram resistências à compressão acima de 70 MPa quando utilizado cimento geopolimérico (7, 48 e 45%, em massa, de hidróxido de sódio, silicato de sódio alcalino e metacaulim, respectivamente).

Wongsa *et al.* (2016) estudaram a confecção de concretos geopoliméricos de cinza volante com hidróxido de sódio e silicato de sódio alcalino com razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 0,5; 1,0 e 1,5. Por meio do estudo, foi possível a confecção de concretos com resistência à compressão média de 16,9 MPa aos 28 dias de idade.

2.5.2 Precursores

Os principais precursores utilizados em pesquisas para a confecção de geopolímeros são o caulim, o metacaulim, a cinza volante, a cinza de carvão pesada, a escória de alto-forno, a cal, os feldspatos alcalinos e a cinza de casca de arroz. A utilização de um ou outro precursor para a confecção dos concretos, apesar destes serem similares, pode alterar a microestrutura do material, bem como as suas propriedades físicas, mecânicas, químicas, térmicas e de durabilidade (AMRAN *et al.*, 2020; DAVIDOVITS, 1991; DUXSON *et al.*, 2007; JINDAL, 2019; REPETTE, 2010).

Dentre todos os materiais precursores utilizados em pesquisas, destaca-se o metacaulim, principalmente por apresentar elevada taxa de dissolução em meio alcalino e facilidade de controle da relação sílica/alumina (Si/Al). O metacaulim,

porém, tem custos mais elevados na sua produção, se comparado ao cimento Portland, o que o torna um material nobre. Por isso, o valor do quilo do metacaulim pode custar até 4 vezes mais caro que o quilo do cimento Portland convencional, conforme pesquisa de mercado realizada por este autor nas regiões sul e sudeste do país no ano de 2020. Porém, apesar do seu alto custo, a utilização de metacaulim traz menor carga ambiental para a produção de concreto. Borges *et al.* (2014) compararam a análise do ciclo de vida (ACV) para produção de 1 m³ de concretos convencionais, com cimento CP II-E, e concretos geopoliméricos, à base de metacaulim e, constataram que, enquanto o cimento Portland produziu 271,9 kg de CO₂/m³ de concreto, a utilização de metacaulim produziu cerca de 75 kg de CO₂/m³ de concreto; portanto, cerca de 3,6 vezes menos CO₂.

Dessa forma, a utilização de outros materiais, como os resíduos industriais de cinza de casca de arroz, cinza volante e a escória de alto-forno vêm sendo estudados para diminuição do custo de produção, tendo em vista que muitas vezes são descartados e não possuem valor comercial, além de não precisarem de calcinação e, conseqüentemente, não emitirem gases poluentes na atmosfera (CESARI, 2015; DAVIDOVITS, 2013; SCHWAAB, 2019).

Apesar de todas as fontes de aluminossilicatos que passaram por tratamento térmico poderem ser utilizadas como precursores, a variação da quantidade de sílica e alumina, bem como dos seus outros componentes vai interferir nas propriedades finais do produto, formando materiais com características diferentes, que podem se apresentar satisfatórias ou não, para as aplicações desejadas (SANTA, 2012; ZHANG *et al.*, 2020).

A Tabela 1 apresenta a relação de algumas pesquisas com os precursores utilizados em cada uma delas. Na presente tese, são utilizados, para confecção de concretos geopoliméricos, o metacaulim e a cinza de casca de arroz. Dessa forma, as principais características desses dois materiais são apresentadas com mais detalhes nos itens 2.6 e 2.7.

2.6 METACAULIM

O metacaulim apresenta inúmeras aplicações na construção civil e está presente na confecção de concretos leves, de alta resistência ou alto desempenho, estruturas industriais pré-fabricadas, produtos de fibrocimento e ferrocimento,

concreto armado com fibras de vidro, argamassas, estuques, materiais de reparação e rebocos de piscina (SIDDIQUE, KLAUS, 2009). Apesar de não existirem, no mercado, cimentos Portland com alguma substituição de clínquer por metacaulim (assim como ocorre com a escória ou a cinza volante, por exemplo), há empresas que vendem o material, ensacado ou a granel, para que haja uma mistura direta dessa adição mineral com outros componentes do concreto na obra ou na indústria, principalmente com o cimento Portland, em concretos convencionais, ou ainda com ativadores alcalinos, em concretos geopoliméricos (METACAULIM HP ULTRA, 2020).

2.6.1 Definição, obtenção e composição

O metacaulim é definido pela NBR 12653 (ABNT, 2014, p. 2) como “produto de calcinação e moagem de argilominerais cauliníticos. Constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina”. Cunha *et al.* (2010) definem o material como material pozolânico amorfo e de estrutura cristalina desordenada, obtido por um procedimento industrial com temperaturas entre 600 °C e 850 °C e com moagem de argilas cauliníticas e caulins.

A palavra caulim é originária da palavra chinesa kauling e é empregada para tratar um grupo de silicatos hidratados de alumínio, incluindo a caulinita e a haluisita (MONTE *et al.*, 2003). O termo meta é utilizado como forma de apresentar uma transformação. No caso do metacaulim, refere-se à desoxidração da estrutura cristalina da caulinita, que forma uma fase de transição de alta reatividade, oriunda da queima em seu processo de fabricação. O metacaulim é composto, basicamente, por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e menor quantidade de ferro (Fe_2O_3) (GARDOLINSKI, 2003; MEDINA, 2011; JINDAL, 2019; ASSI *et al.*, 2020).

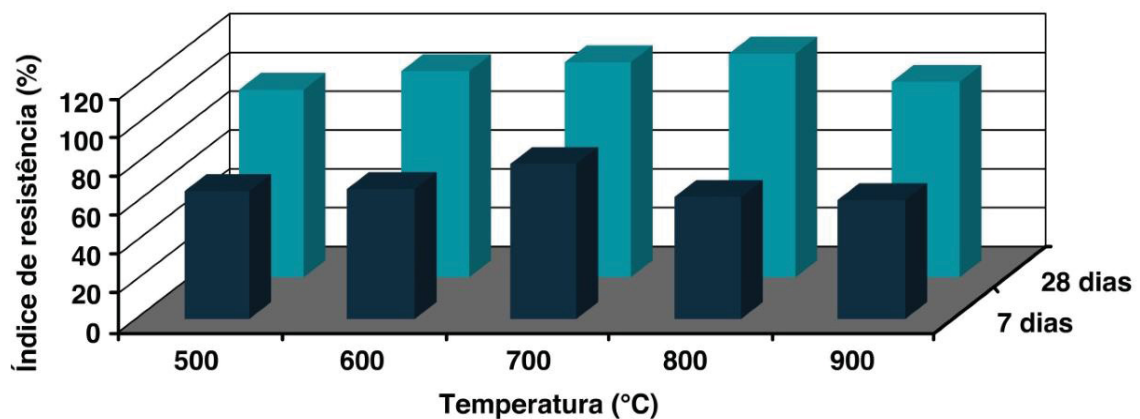
2.6.2 Características mineralógicas

O metacaulim é originário de alguns tipos de argila e, por isso, é classificado, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), como pozolana do tipo N. Dependendo do tipo de argila utilizada, porém, o material pode apresentar variação em sua atividade

pozolânica, fator importante para a produção de concreto convencional (MEDINA, 2011).

Menores graus de cristalização em argilas caulínicas proporcionam maiores taxas de desidroxilação durante o processo de queima do metacaulim, conferindo, assim, maior taxa de atividade pozolânica. A pureza das argilas caulínicas também tem grande relevância. Recomenda-se um teor mínimo de 90% de pureza para produção de um metacaulim de alta reatividade. Além disso, a temperatura de calcinação entre 600 °C e 800 °C conferem ao material similar e ideal reatividade (ASSI *et al.*, 2020; JINDAL, 2019; MEDINA, 2011; RASHAD 2013). A Figura 9 ilustra a relação entre a temperatura de calcinação do metacaulim e a resistência mecânica à compressão do concreto.

FIGURA 9: RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO DO METACAU LIM E RESISTÊNCIA DO CONCRETO



FONTE: Rashad (2013) – adaptado.

De acordo com a Figura 9 é possível verificar que os maiores valores de resistência se encontram, em torno de 750 °C ou ainda entre as temperaturas de 600 °C e 800 °C, com índice de resistência, considerando a atividade pozolânica do metacaulim, superior a 100 % aos 28 dias de cura.

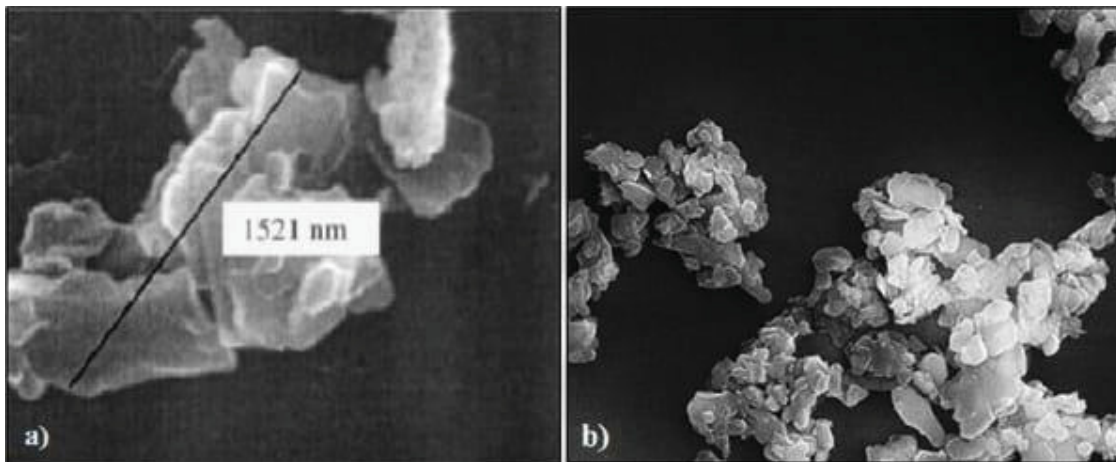
2.6.3 Características físicas

As características físicas, tais como o tamanho da partícula e sua área superficial, têm grande importância na garantia de uma atividade pozolânica que atenda às exigências técnicas (MEDINA, 2011). Weng *et al.* (2005) mostraram que

quanto maior a área superficial específica do metacaulim, mais rápido ocorreu o endurecimento de concretos e, conseqüentemente, maior foi a resistência mecânica do material. Dessa forma, a área superficial específica do metacaulim pode oferecer uma mistura homogênea à matriz cimentícia.

Os minerais de metacaulim consistem em placas contínuas em plano, sendo empilhadas na direção perpendicular por pontes de hidrogênio entre camadas, de modo que o metacaulim não se disperse em água. Com partículas muito pequenas, possuem dimensões laterais entre 0,3 μm e 0,4 μm e espessuras entre 0,05 μm e 2 μm . A área superficial do material tem, geralmente, valores superiores a 12.000 m^2/kg (MOTA *et al.*, 2016; NITA e JOHN, 2007). Além disso, por causa da estrutura lamelar do metacaulim e branda ligação entre os grãos, gera-se uma facilidade de escorregamento entre os mesmos. A Figura 10 apresenta a micrografia de uma partícula de metacaulim (a) e partículas de metacaulim empilhadas (b).

FIGURA 10: MICROGRAFIA DE PARTÍCULA DE METACAILIM



FONTE: Mota *et al.* (2016).

A NBR 15894-1 (ABNT, 2010) apresenta diversos requisitos físicos para a utilização de metacaulim em concretos e argamassas, conforme a Tabela 2:

TABELA 2: REQUISITOS FÍSICOS PARA UTILIZAÇÃO DO METACAULIM

Requisito	Unidade	Limite
Umidade	%	≤2
Perda ao fogo	%	≤4
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 µm	%	≤10
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥105
Índice de atividade pozolânica Chappelle (opcional)	Mg _{Ca(OH)₂} /g material	≥750
Área específica B.E.T (opcional)	m ² . g ⁻¹	≥15

FONTE: ABNT (2010) – adaptado.

2.6.4 Características químicas

As características químicas do metacaulim, assim como as físicas, exercem grande influência na aplicação do material. Deve-se levar em consideração o tipo de argila utilizada para a produção do produto, bem como a sua composição química (ASSI *et al.*, 2020; MOTA *et al.*, 2016).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece requisitos químicos de composição de materiais pozolânicos, como o metacaulim. Entre eles, a existência de, pelo menos, 70% de (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃), no máximo, 4% de (SO₃) e perda ao fogo máxima de 10%. Souza (2003) afirma que apesar da norma exigir teores acima de 70% de sílica, alumina e ferro em sua composição, para um metacaulim de alta reatividade, esse valor deve ser superior a 90%, bem como perda ao fogo inferior a 3%, diferente do estabelecido pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010) e NBR 12653 (ABNT, 2014).

Além disso, maiores quantidades de Al₂O₃ e CaO resultam em um metacaulim com maior atividade pozolânica. Em contrapartida, a medida que a quantidade SiO₂ no material é aumentada, a quantidade de materiais com pouca atividade pozolânica também cresce, como o quartzo (SIDDIQUE; KLAUS, 2009).

A Tabela 3 mostra a composição química de diferentes tipos de metacaulins reportados em artigos recentes em diferentes países.

TABELA 3: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DIFERENTES METACAULINS

Composição (%)	CAI <i>et al.</i> (2020b)	QIN <i>et al.</i> (2020)	TAFRAOUI <i>et al.</i> (2016)	SCHWAAB (2019)
	China	China	Argélia	Brasil
CaO	0,13	0,07	1,15	0,06
SiO ₂	61,45	54,83	58,10	55,79
Al ₂ O ₃	32,45	42,15	35,14	33,69
Fe ₂ O ₃	0,89	0,37	1,21	2,97
MgO	2,08	0,02	0,20	0,89
K ₂ O	0,81	0,14	1,05	2,98
Na ₂ O	0,77	0,24	0,07	< 0,05

FONTE: o autor (2021).

De acordo com a Tabela 3, é possível observar que não há grande alteração na composição química dos metacaulins utilizados nas pesquisas. Os principais componentes continuaram a ser a sílica e a alumina, sendo que, possivelmente, o metacaulim utilizado na pesquisa de Qin *et al.* (2020) é mais reativo por apresentar maior quantidade de Al₂O₃, bem como o material utilizado por Cai *et al.* (2020b) ser o menos reativo por possuir maior quantidade de SiO₂ e seus materiais amorfos. Por fim, todos os materiais apresentaram a soma de (sílica + alumina + ferro) superior a 90% na composição química, o que mostra se tratar de metacaulins de alta reatividade.

2.6.5 Influência do metacaulim em concretos

a. Influência do metacaulim no concreto fresco

A consistência de concretos convencionais com metacaulim é menor que em concretos sem incorporação dessa adição mineral. Além disso, algumas pesquisas evidenciam tal fato relacionando-o ao aumento no tempo de endurecimento da massa, diminuição de fluidez e maior demanda de água ou aditivos químicos superplastificantes (SIDDIQUE, KLAUS, 2009). Badogiannis *et al.* (2005) apontaram que concretos contendo teores de até 10% de metacaulim tiveram comportamento em estado fresco semelhante ao concreto convencional; porém, concretos com teores acima de 20% de metacaulim apresentaram, proporcionalmente, menor trabalhabilidade. Os autores relacionaram o resultado com a maior finura do metacaulim em comparação com a do cimento Portland.

Inúmeras pesquisas mostraram que a hidratação dos grãos de metacaulim fornece rápida geração de calor na mistura; tal fato decorre da atividade pozolânica e reatividade do material, similar ao do cimento Portland. Além disso, o comportamento do metacaulim é similar ao da sílica ativa e difere do comportamento da cinza volante, que apresenta menor atividade pozolânica. Por isso, apesar de apresentar excelente potencial como adição ativa em concretos, o calor liberado durante o processo de hidratação do metacaulim pode ter um efeito negativo quanto à retração e fissuração (FRÍAS *et al.*, 2000; SIDDIQUE, KLAUS, 2009).

Billong *et al.* (2018) confeccionaram pastas geopoliméricas com substituição de metacaulim por cinza de casca de arroz em 12,5, 25 e 50% e ativados alcalinamente por hidróxido de sódio. Os resultados mostraram que as amostras com cinza de casca de arroz tiveram 40 cm de abatimento, em comparação a 20 cm, nas amostras somente com metacaulim. Além disso, a cinza de casca de arroz atuou como retardador de pega na amostra com 50% do material, cerca de 162 minutos a mais que na amostra de referência. Tal fato é explicado pelo maior teor de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, que inibiu a geopolimerização, o que evitou o contato entre o material reativo e a solução.

Xie *et al.* (2019) estudaram as propriedades de concretos geopoliméricos no estado fresco com metacaulim e escória de alto forno, variando misturas com 50% de cada material ou ainda com 70 e 30% de cada, respectivamente. A ativação alcalina ocorreu com silicato de sódio e hidróxido de sódio. Os resultados sinalizaram que todas as amostras compostas dos dois minerais apresentaram consistência (*slump flow*) acima de 150 mm, chegando em até 280 mm nas amostras com 70% de metacaulim e 30% de escória de alto forno. Esse aumento da consistência é explicado por três motivos: as partículas de metacaulim são menores que as partículas de escória; pela menor quantidade de escória que remete a menos partículas angulares na mistura; e pelo menor teor de cálcio da mistura, que retarda a densificação do concreto geopolimérico, facilitando o escoamento. As menores partículas de metacaulim conferem, também, maior densidade ao concreto geopolimérico (JAYA *et al.*, 2020; SABOO *et al.*, 2019).

b. Influência do metacaulim no concreto endurecido

A inclusão do metacaulim em concretos foi tratada pela pesquisa de Badogiannis *et al.* (2005). A pesquisa mostra que o metacaulim favoreceu a resistência mecânica a partir do 2º dia de idade, além do seu benefício ser comprovado aos 28 e 180 dias. Além disso, o teor de substituição de cimento Portland pelo metacaulim em concretos convencionais foi testado em diversas proporções, sendo que o teor de 10% foi o que obteve melhores resultados para a resistência mecânica à compressão e à flexão. Houve, também, um aumento de 36% no consumo de água com a inclusão de 20% de metacaulim na mistura.

De acordo com Siddique e Klaus (2009) e Nuaklong (2018b), a utilização do metacaulim promove o refinamento, a diminuição e a descontinuidade dos poros em concretos convencionais e geopoliméricos, promovendo, dessa forma, a densificação da massa e tornando o material menos permeável e com melhor empacotamento de partículas.

Cai *et al.* (2020a) testaram o comportamento mecânico de concretos geopoliméricos à base de cinza volante, escória de alto forno e metacaulim e mostraram que as maiores resistências mecânicas foram atingidas por concretos geopoliméricos à base de metacaulim. O crescimento de resistência após 28 dias também foi maior nos concretos de metacaulim em comparação aos concretos confeccionados com as demais adições minerais. Tal fato decorre do maior teor de reatividade do metacaulim em comparação aos outros materiais.

Mehdipour *et al.* (2020) concluíram que concretos convencionais com teor de adição de 10 a 20% de metacaulim e cura em temperatura ambiente obtiveram cerca de 20% a mais de resistência mecânica à compressão. Tal crescimento de resistência mecânica é explicado por Muduli e Mukharjee (2020), que notaram uma quantidade menor de portlandita nas misturas com metacaulim, o que indica o consumo do hidróxido de cálcio na reação pozolânica do metacaulim, fornecendo gel CSH.

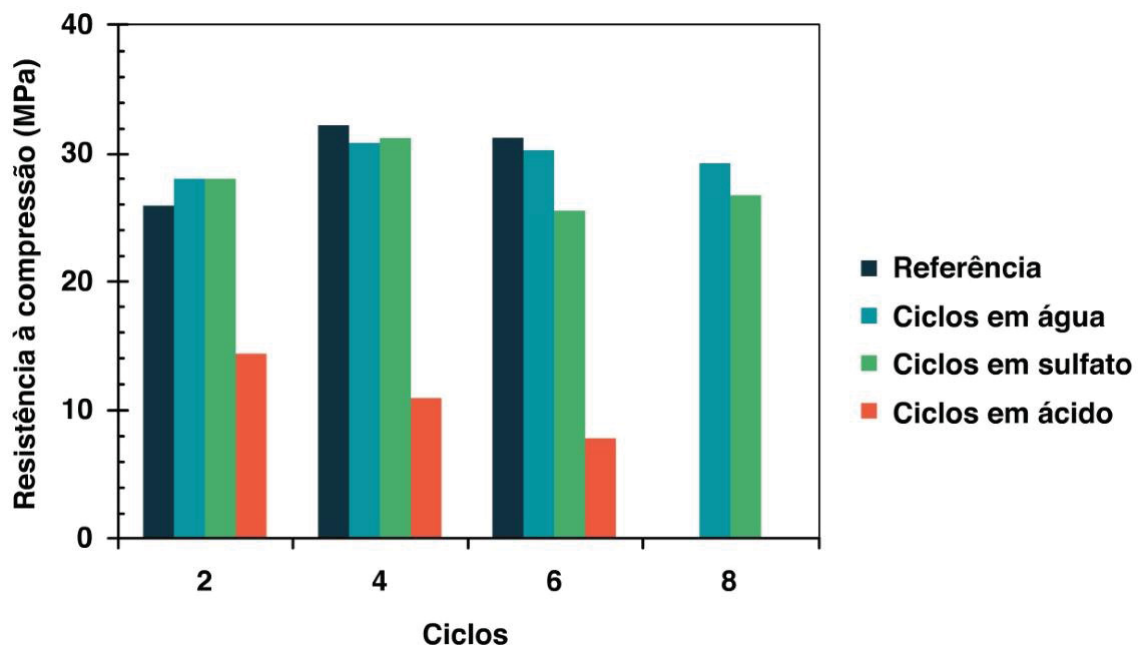
c. Influência do metacaulim na durabilidade do concreto

Em decorrência da diminuição de poros, do melhor empacotamento de partículas e também da maior resistência mecânica, algumas pesquisas mostraram

que concretos geopoliméricos com metacaulim apresentaram melhor resistência à ação de agentes agressivos em comparação ao concreto convencional. Há pesquisas que evidenciaram, ainda, redução do potencial de eflorescência, redução da reação álcali-sílica, menor condutibilidade térmica e maior resistência ao fogo, bem como maior resistência à abrasão superficial (SCHWAAB, 2019, LIVI, 2013, YAN *et al.*, 2017).

Mauri *et al.* (2009) compararam a durabilidade de argamassas convencionais e geopoliméricas de metacaulim ao ataque cíclico de sulfato de sódio e ácido sulfúrico. A resistência mecânica das argamassas foi testada após 2, 4, 6 e 8 ciclos de molhagem e secagem. Os resultados estão expostos na Figura 11.

FIGURA 11: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS EXPOSTAS A DIFERENTES CONDIÇÕES DE AGRESSIVIDADE



FONTE: Mauri *et al.* (2009).

A Figura 11 mostra que até o 6º ciclo não houve alteração significativa entre a resistência à compressão da argamassa de referência e a argamassa geopolimérica exposta a ciclos de molhagem em água. Em comparação, a argamassa exposta ao sulfato de sódio, apresentou 17% de queda na resistência entre o 4º e o 6º ciclo, mesmo assim, mostrando certa estabilidade pelo equilíbrio químico que se estabeleceu entre o meio interno (composição de silicato de sódio alcalino) e o meio externo (sulfato de sódio). A argamassa exposta à solução com ácido sulfúrico

apresentou 72% de queda na resistência mecânica, consequência da elevada agressividade.

Cai *et al.* (2020a) exploraram a resistividade elétrica de concretos geopoliméricos de cinza volante, cinza volante com escória e metacaulim. Os resultados mostraram que a resistividade das amostras com metacaulim (19,5 Ωm) foram menores que a amostra com cinza volante (98 Ωm). Esses valores são explicados, pois os geopolímeros com base de metacaulim exigem maior quantidade de ativadores alcalinos. Estes, induzem mais conexões na rede elétrica, reduzindo a resistividade. Além disso, a área superficial do metacaulim é maior que a da cinza volante, densificando o material final e, conseqüentemente, criando mais circuitos eletrônicos, o que diminuiria a resistividade elétrica do material.

A influência do metacaulim na durabilidade de concretos geopoliméricos submetidos ao desgaste por abrasão superficial é explorado no capítulo 3 deste trabalho, que trata exclusivamente do fenômeno do desgaste superficial por abrasão.

2.7 CINZA DE CASCA DE ARROZ

A cinza de casca de arroz é um resíduo da queima da casca do arroz e é utilizada em substituição parcial ao cimento Portland ou em adição suplementar em concretos (THOMAS, 2018; ZHU *et al.*, 2019). Além disso, pode ser usada como fonte de aproveitamento energético em centrais termoelétricas, para produção de energia, ou ainda, como forma de produzir sílica de alta pureza, por processos de calcinação (APOLONIO, 2017; FLORIANO, 2014; NUERNBERG, 2018) A cinza de casca de arroz também é, frequentemente, denominada de sílica de casca de arroz, fazendo-se uma analogia a sua composição, majoritariamente constituída por sílica.

Algumas empresas que comercializam a cinza de casca de arroz a denominam sílica como forma de valoração comercial, relacionando-a com sílica de alta pureza ou ainda com a baixa quantidade de carbono. Como forma de padronização, essa tese vai utilizar o termo cinza de casca de arroz para denominar esse material.

2.7.1 Definição, obtenção e composição

A cinza de casca de arroz pode ser definida como o produto gerado da queima incompleta da casca do arroz, geralmente utilizada em processos de parbolização ou secagem do grão, sem valoração econômica. Ao longo dos anos esse resíduo foi depositado de forma inadequada, promovendo degradação ambiental (APOLONIO, 2017; NUERNBERG, 2018).

A produção nacional de arroz, em 2020, foi de 11,2 milhões de toneladas (G1, 2020), e o procedimento para obtenção do arroz para consumo é realizado por meio da moagem, separando o grão e a casca, correspondentes a 78% e 22% do peso, respectivamente. Há a estimativa de que 25%, em peso, do material queimado em caldeiras originará a cinza de casca de arroz, cerca de 616 mil toneladas do produto (RAO *et al.*, 2011; THOMAS, 2018). A casca do arroz é, ainda, composta por cerca de 50% de celulose, 30% de lignina e outros 20% de resíduos orgânicos (APOLONIO, 2017).

A temperatura de queima da casca influencia as propriedades finais da cinza de casca de arroz. A Tabela 4 mostra a influência da temperatura de queima nas propriedades da cinza.

TABELA 4: EFEITO E CONDIÇÕES DE QUEIMA NAS PROPRIEDADES DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

Condições de queima (°C/tempo)	Ambiente de combustão	Estrutura da cinza	Área superficial (m ² /g)
500 – 600 (1 min)	Moderada oxidação	amorfa	122
500 – 600 (30 min)	Moderada oxidação	amorfa	97
500 – 600 (120 min)	Moderada oxidação	amorfa	76
700 – 800 (15 min)	Moderada oxidação	amorfa	42
700 – 800 (15 min)	Alta oxidação	Cristalina parcial	6 – 10
> 800 (> 60 min)	Alta oxidação	cristalina	< 5

FONTE: Apolônio (2017) – adaptado.

Por meio da Tabela 4 é possível verificar que a queima da casca de arroz por temperaturas controladas abaixo de 600 °C resulta em uma cinza amorfa com moderada oxidação de carbono. Temperaturas menores que essa não são suficientes para eliminar o carbono, fazendo com que o material se apresente com coloração escura. Acima de 600 °C, a cinza apresentará alta oxidação do carbono, bem como estrutura parcialmente cristalina ou totalmente cristalina, apresentando

coloração mais clara. O resfriamento após o processo de queima da cinza de casca de arroz também influencia suas propriedades finais. Resfriamentos mais rápidos estão ligados à melhores resultados quanto à amorficidade da cinza (FRARE, 2018).

É importante ressaltar que a qualidade das cinzas de casca de arroz está relacionada com as condições durante a combustão da casca, a temperatura e o tempo de queima e o tipo de equipamento utilizado (EL-AZIZ, *et al.*, 2004; FRARE, 2018; HUANG, *et al.*, 2001; THOMAS, 2018).

2.7.2 Características mineralógicas

A cinza de casca de arroz é classificada, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), como uma pozolana do tipo N. As características de queima da cinza vão influenciar diretamente na sua atividade pozolânica, que por sua vez irá afetar as propriedades do concreto, como sua resistência mecânica.

Bie *et al.* (2015) estudaram a influência da temperatura de queima da casca de arroz nas propriedades mecânicas de concretos. O estudo mostrou que os concretos confeccionados com cinza de casca de arroz queimadas a 600 °C e com 5, 10 e 20% de substituição de cimento Portland pelo material obtiveram 48 MPa, 56 MPa e 54 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, respectivamente. Em contrapartida, concretos com 5, 10 e 20% de substituição de cimento Portland pela cinza de casca de arroz queimada a 700 °C apresentaram, respectivamente, 48 MPa, 44 MPa e 36 MPa de resistência à compressão, em 28 dias.

Os autores explicam essa variação na resistência do material pela sua composição. A cinza oriunda do processo de queima a 600 °C tem alta atividade pozolânica devido ao seu alto teor de SiO₂ amorfa e sua maior área superficial (85,74 m²/g). Além disso, a cinza originária do processo de queima mais alto, 700 °C, tem natureza cristalina, baixa área superficial (26,95 m²/g) e, por isso, apresenta baixa atividade pozolânica. O comportamento mais baixo de resistência mecânica também é explicado pelo maior teor residual de carbono, provocado pela decomposição do K₂O, na temperatura de 700 °C (BIE *et al.*, 2015).

2.7.3 Características físicas

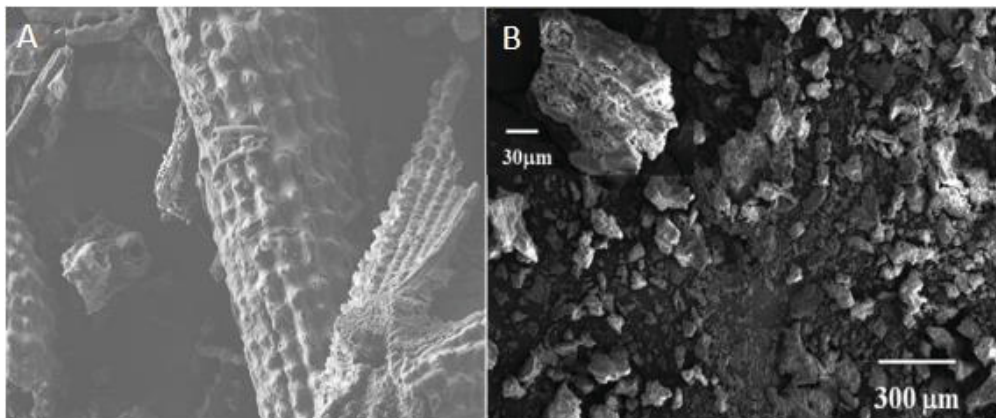
Xu *et al.* (2015) afirmam que as propriedades físicas da cinza de casca de arroz podem afetar as propriedades finais do composto cimentício, incluindo seu peso específico, tamanho médio de partículas, granulometria e finura blaine.

O peso específico da cinza de casca de arroz varia entre 2,05 a 2,53 g/cm³, e por isso, é ligeiramente menor que o do cimento Portland, que varia entre 3,10 e 3,14 g/cm³, e se utilizada na fabricação de concretos indica menor densidade. Além disso, para ter alta reatividade e alta atividade pozolânica, a área específica da cinza deverá ser de pelo menos 7000 cm²/g. Dessa forma, alguns estudos indicam a moagem do produto antes da sua utilização, se utilizada como material suplementar do concreto (MARTHONG, 2012; XU *et al.*, 2015). Nehdi *et al.* (2003) mostraram que as partículas do material deverão ter tamanho inferior a 45 µm para participar ativamente da reação pozolânica. A moagem do material também pode ser utilizada como fator de compensação para o aumento da pozolanicidade da cinza com alto teor de carbono.

A coloração da cinza pode variar em diversos tons de cinza. O controle da temperatura e o tempo de queima diminui a quantidade de carbono, o que resulta em diferença na sua coloração. Quanto mais escuro for o material, maior a quantidade de carbono residual e, por isso, menor a reatividade da cinza. Dessa forma, normalmente associa-se cinza amorfa na coloração escura e cinza cristalina na coloração clara (TASHIMA, 2006; TRINDADE, 2011).

A Figura 12 representa a micrografia característica da cinza de casca de arroz.

FIGURA 12: MICROGRAFIA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ



FONTE: Liang *et al.* (2019) e Reis *et al.* (2008).

A Figura 12 ilustra a micrografia porosa da cinza de casca de arroz com morfologia tubular, com diâmetro superior a 200 μm e comprimento de 1000 μm (a). A figura mostra além da estrutura porosa, uma superfície multicamada e com formato irregular (b).

2.7.4 Características químicas

A composição química da cinza de casca de arroz é resultante do processo de queima, no qual a lignina e a celulose são retiradas. Os principais componentes da cinza de casca de arroz remontam ao alto teor de sílica, além de quantidades de carbono, óxido de potássio (K_2O), óxido fosfórico (P_2O_5), CaO e quantidades menores de ferro (Fe) e sódio (Na) (ARMESTO *et al.*, 2002; TRINDADE, 2011).

A temperatura do processo de queima da casca de arroz é muito importante e afeta diretamente a morfologia da cinza. Sob queima controlada, em temperaturas inferiores a 600 $^\circ\text{C}$, a cinza possui em sua morfologia a presença de silício em seu estado amorfo, que reagirá melhor com o cimento Portland. Sob queima descontrolada ou com temperaturas acima de 600 $^\circ\text{C}$, há o surgimento de fases cristalinas na cinza, diminuindo a reatividade com outros componentes (APOLONIO, 2017; PEREIRA *et al.*, 2015; PINHEIRO, 2016; TASHIMA *et al.*, 2006).

A Tabela 5 mostra a composição química de diferentes tipos de cinzas de casca de arroz reportados em artigos da literatura.

TABELA 5: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE DIFERENTES TIPOS DE CINZAS DE CASCA DE ARROZ

Composição (%)	Pereira <i>et al.</i> (2015)	Pouey (2006)	Freire <i>et al.</i> (2020)	Olutoge e Adesina (2019)	Xu <i>et al.</i> (2015)
	Brasil	Brasil	Brasil	Nigéria	China
CaO	1,03	0,51	0,7	0	2,42
SiO ₂	92,99	85,81	87,0	95,41	81,4
Al ₂ O ₃	0,18	0,06	0	0	0,26
Fe ₂ O ₃	0,43	0,05	0,1	0,82	0,93
MgO	0,35	0,46	1	1,24	1,02
SO ₃	0,10	-	0	0,07	1,47
K ₂ O	0,72	1,7	1,6	0,22	6,79
Na ₂ O	0,02	0,11	0,1	0,22	0,18
MnO	-	-	0,2	-	-

FONTE: o autor (2021).

De acordo com a Tabela 5, é possível observar que não há grande alteração na composição química das cinzas de casca de arroz utilizados nas pesquisas. Os

principais componentes foram a sílica, sendo que, o material proveniente da Nigéria apresentou o composto em seu maior teor (95,41%). Os materiais utilizados na pesquisa de Xu *et al.* (2015) e Pereira *et al.* (2015) serão, possivelmente, os materiais com maior reatividade, por apresentarem maiores quantidades de Al_2O_3 . Para concluir, todas as cinzas de casca de arroz apresentaram composição de ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) superior a 70% e menos de 4% de SO_3 , conforme estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

2.7.5 Influência da cinza de casca de arroz em concretos

a. Influência da cinza de casca de arroz no estado fresco

Sathurshan *et al.* (2021) estudaram propriedades no estado fresco de concretos autoadensáveis com substituição de cimento Portland pela cinza de casca de arroz em 5, 10, 15, 20 e 25%, mantendo-se relação *a/c* constante em 0,34. Os resultados do *slump flow* tiveram redução de (35 mm) em comparação com a amostra de referência (725 mm). O aumento de viscosidade é explicado pela maior área superficial da cinza de casca de arroz em comparação com o cimento Portland. Além disso, os autores testaram a passagem das misturas pelo anel J. Os resultados se apresentaram satisfatórios, comprovando boa capacidade de passagem (685 mm – 715 mm), cerca de 5 mm a 25 mm inferiores a amostra padrão. A densidade do concreto fresco também foi ligeiramente menor nas amostras com cinza de casca de arroz: 2431 kg/m^3 para a amostra de referência e 2400 kg/m^3 para a amostra com 25% de cinza de casca de arroz.

Mahdi *et al.* (2022) confeccionaram argamassas geopoliméricas compostas de silicato de sódio alcalino, hidróxido de sódio e cinza volante, com substituição parcial por cinza de casca de arroz em 10%, 30% e 50%. A pesquisa mostrou que o precursor utilizado afeta diretamente a consistência da argamassa, e que a mistura padrão com cinza volante teve maior consistência (222 mm) em decorrência da sua granulometria e, conforme o teor de cinza de casca de arroz aumentou nas proporções estudadas, o espalhamento, por meio do *slump flow*, diminuiu para 211 mm, 194 mm e 172 mm, respectivamente.

Patel e Shah (2018) publicaram um artigo sobre as propriedades do concreto geopolimérico no seu estado fresco com amostras com níveis de substituição de 5%,

15% e 25% de escória por cinza de casca de arroz e uma amostra padrão com cinza volante e outra com escória. Os resultados de *slump flow* apresentaram pequena variação nas amostras de concreto com cinza volante e escória de alto forno, 720mm e 710 mm. Contudo, com a substituição pelo resíduo da casca de arroz em 5%, 10% e 15%, o espalhamento diminuiu para 690 mm, 680 mm e 655 mm. Os autores explicaram que essa diminuição do espalhamento ocorreu devido à alta adsorção da cinza de casca de arroz, que diminui a quantidade de água disponível no sistema para lubrificação.

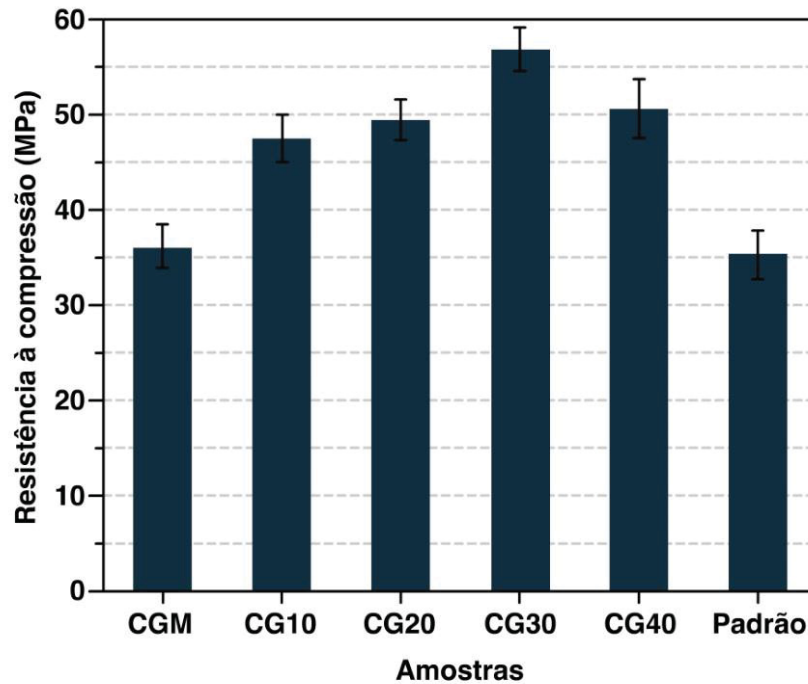
b. Influência da cinza de casca de arroz no estado endurecido

lacks (2018) estudou a adição de cinza de casca de arroz em concretos convencionais com cimento Portland. O estudo mostrou diminuição da resistência à compressão de 45,44 MPa, da amostra de referência, para 29,49 MPa, para a amostra com 5% de adição do material. Além disso, a cinza também aumentou a absorção de água de 4,02%, da amostra de referência, para 5,71% e 15,95%, nas amostras com 5% e 10% de adição, respectivamente.

Em contrapartida, Londero (2017) confeccionou amostras de concreto convencionais com substituição parcial de cimento Portland por cinza de casca de arroz em 10, 15 e 20%. O autor testou a resistência à compressão aos 28 dias e teve uma diferença média de 34,71 MPa, da amostra padrão, para 31,27 MPa, para a amostra com 20% de substituição por cinza de casca de arroz, representando cerca de 10% de diminuição de resistência à compressão.

Liang *et al.* (2019) pesquisaram a resistência à compressão de concretos alcalinamente ativados com silicato de sódio à base de metacaulim com substituição parcial por cinza de casca de arroz em 10, 20, 30 e 40%. Os resultados são mostrados na Figura 13.

FIGURA 13: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS ATIVADOS ALCALINAMENTE



FONTE: Liang *et al.* (2019) – adaptado.

A Figura 13 mostra que todas as amostras de concretos geopoliméricos apresentaram resistência à compressão superior ao concreto de referência. É visto também que a amostra com 30% de substituição de metacaulim por cinza de casca de arroz obteve a maior resistência entre as amostras estudadas, cerca de 56 MPa, o que representa 55% a mais que a amostra geopolimérica que apresentou apenas metacaulim em seu traço. O resultado é explicado pois a inclusão de cinza de casca de arroz em matrizes geopoliméricas de metacaulim alterou a sua densidade e estrutura de poros. Observou-se a aumento da densidade conforme a quantidade de cinza foi aumentada na massa. Este efeito foi visto pelo preenchimento dos poros, que contribui para uma estrutura mais compacta, que expulsa a água livre em todo o sistema (LIANG *et al.*; 2019).

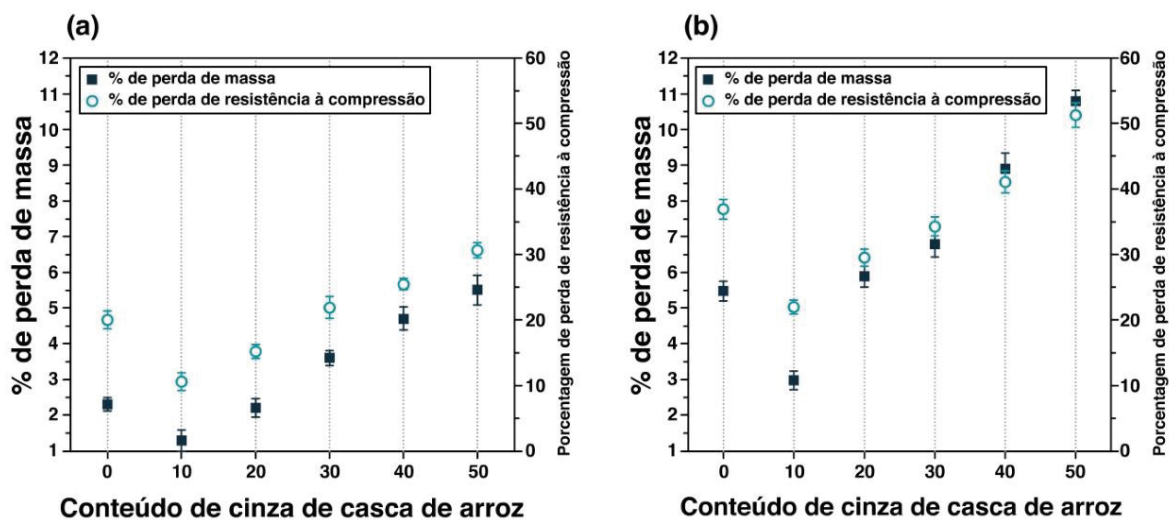
c. Influência da cinza de casaca de arroz na durabilidade do concreto

lacks (2018) estudou a influência da adição de cinza de casca de arroz na fabricação de concretos convencionais para pavimentação. O estudo mostrou que a adição de 5% e 10% de cinza de casca de arroz no concreto aumentou 28% e 71% o desgaste por abrasão superficial, respectivamente. Isso foi relacionado com a

diminuição da resistência à compressão das misturas, bem como maior índice de vazios, que foi de cerca de 28% para a amostra com 10% de adição do material.

Zhu *et al.* (2021) investigaram a resistência ao congelamento de amostras de concretos geopoliméricos de escória com substituição parcial por cinza de casca de arroz em 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Os resultados para a perda de massa e perda de resistência à compressão após 25 e 50 ciclos são mostradas na Figura 14.

FIGURA 14: % DE PERDA DE MASSA E DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 25 (a) E 50 (b) CICLOS DE CONGELAMENTO



FONTE: ZHU *et al.* (2021) – adaptado.

Os dados apresentados pela pesquisa anteriormente citada indicaram que a cinza de casca de arroz, em teores de substituição de até 30%, pode ser utilizada como forma de reduzir a perda de massa do concreto exposto a ciclos de congelamento. A cinza também diminuiu o índice de perda de resistência mecânica após os ciclos de congelamento. Os autores concluíram que isto aconteceu, pois a cinza de casca de arroz melhorou a microestrutura do concreto, com refinamento dos poros e menor interligação entre os mesmos, com a mesma tendência com que diminuiu o índice perda de massa, além de melhorar a resistência mecânica do concreto.

2.8 MICROESTRUTURA DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS COM METACAULIM E CINZA DE CASCA DE ARROZ

O estudo da microestrutura de concretos geopoliméricos é importante, pois tem características distintas do concreto de cimento Portland. Essas características advêm da variabilidade de precursores e ativadores alcalinos, únicos ou combinados, utilizados em sua fabricação. Por causa da variabilidade dessas matérias-primas usadas na fabricação de concretos geopoliméricos, a comparação entre as pesquisas científicas se torna limitada, o que torna importante este tipo de abordagem (HASSAN *et al.*, 2019).

É conhecido que o concreto geopolimérico possui uma estrutura mais densa que o concreto de cimento Portland e, por causa disso, apresenta menor porosidade e maior quantidade de mesos poros, o que desempenha papel fundamental no aumento da resistência à compressão e no aumento da durabilidade desses compósitos (HASSAN *et al.*, 2019).

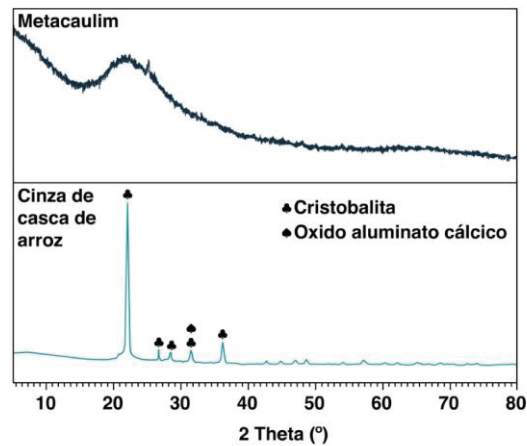
A difração de Raios X (DRX) pode ser usada para evidenciar os componentes cristalinos do material geopolimérico, que são oriundos dos materiais precursores utilizados, bem como os produtos da reação, como as estruturas zeolíticas. Os estudos de concretos geopoliméricos que usaram ensaios de DRX mostraram uma rede desordenada de materiais de curto alcance, com estruturas similares a feldspatos vítreos e zeólitas cristalinas (VALADARES, 2019).

Além disso, o ensaio de DRX mostra, em seu resultado, a maior característica que representa um material geopolimérico: uma estrutura de caráter tipicamente amorfo, com um halo amorfo centralizado, um pico em torno de $27-29^\circ 2\theta$, podendo ser considerada como a característica distintiva na identificação da microestrutura de um material geopolimérico (VALADARES, 2019)

Os aluminossilicatos utilizados na confecção de matrizes geopoliméricas podem conter, ainda, materiais altamente cristalinos como: hematita, corundum, quartzo, óxido de titânio, muscovita, caulinita e illita (FELIZARDO *et al.*, 2016; VALADARES, 2019; ZHANG *et al.*, 2014).

Zhu *et al.* (2019) evidenciaram, por meio de um ensaio de DRX, a composição mineralógica do metacaulim e da cinza de casca de arroz, conforme Figura 15.

FIGURA 15: COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO METACAULIM (MK) E DA CINZA DE CASCA DE ARROZ (RHA)

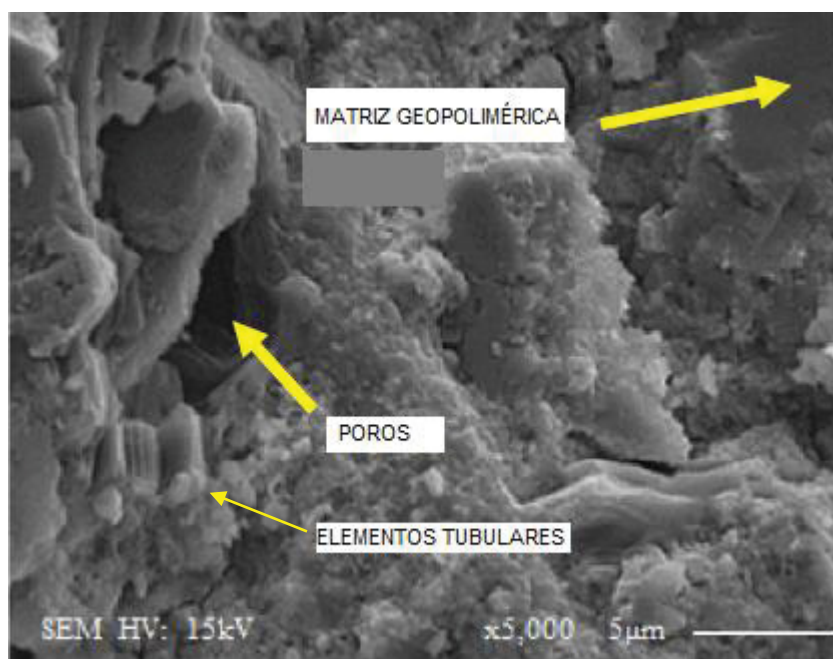


Fonte: ZHU *et al.* (2019).

A Figura 15 mostra as curvas obtidas no ensaio com o metacaulim em comparação com a cinza da casca de arroz, evidenciando a diferença das fases amorfas em cada material. A Figura também mostra a presença de sílica cristalina, além das fases cristalinas de Al_2O_3 e CaO na cinza de casca de arroz (ZHU *et al.*, 2019).

Saloni *et al.* (2020b) ilustraram por meio da Figura 16 uma matriz geopolimérica composta de cinza de casca de arroz.

FIGURA 16: IMAGEM MEV DE MATRIZ GEOPOLIMÉRICA COM CINZA DE CASCA DE ARROZ

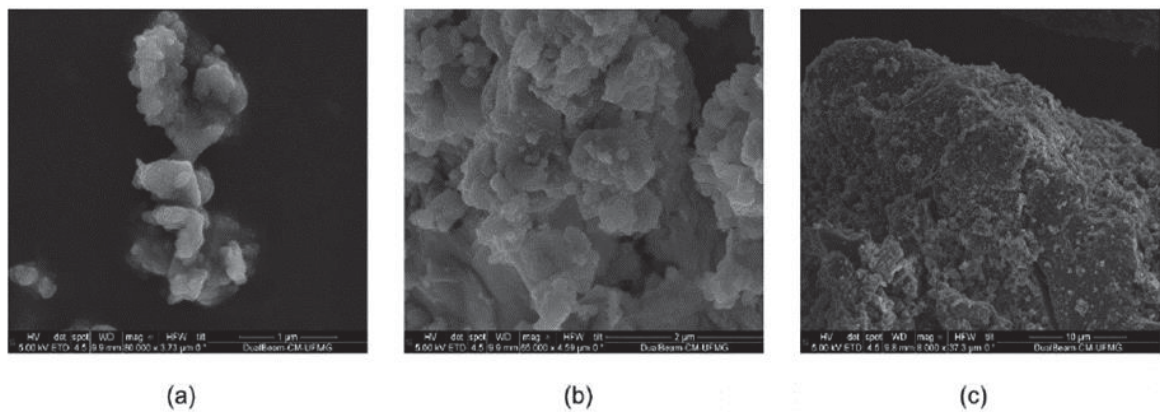


FONTE: SALONI *et al.* (2020b).

A Figura 16 evidencia a estrutura compacta, densa e homogênea da matriz geopolimérica, aos 28 dias de idade. Mostra também os poros presentes na estrutura, além da formação de vários géis em flocos e elementos tubulares que representam partículas da cinza de casca de arroz que não reagiram ou que reagiram de forma incompleta.

Duarte (2017) mostrou em sua pesquisa imagens de microscopia eletrônica de varredura dos concretos geopoliméricos, conforme Figura 17.

FIGURA 17: MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO



Obs.: Magnitude: 80.000x (a), 65.000x (b) e 8.000x (c). FONTE: Duarte (2017).

A Figura 17 apresenta uma cadeia de cristais irregular (a) estruturas semelhantes a azulejos (b) e também esféricas (c) que representam as zeólitas, em várias escalas diferentes, conforme encontrado por Gonçalves (2016). Além disso, a pesquisa evidenciou a presença de cristais de $0,64 \mu\text{m}$ (DUARTE, 2017).

3 O FENÔMENO DE DESGASTE DE MATERIAIS

3.1 INTRODUÇÃO AO DESGASTE FÍSICO DE MATERIAIS

O processo de desgaste de materiais consiste na sua deterioração ao longo do tempo, no qual há relação direta com a vida útil. A vida útil é influenciada pelo meio em que o material está exposto, segundo o grau de agressividade, incluindo condições de intempéries e utilização (ABITANTE, 2004; SILVA, 2015).

O desgaste superficial tem início assim que o material é produzido. A ação ambiental inicia o processo de degradação por meio do movimento de partículas devido ao vento e à água. Posteriormente, a presença de pessoas, veículos e máquinas provoca a penetração e o arraste de partículas. Além disso, o material passa por sucessivos processos de degradação que não são, necessariamente, lineares (ABITANTE, 2004; SILVA, 2015).

A literatura mostra, por meio de várias pesquisas, tipos de mecanismos com que o desgaste se manifesta, relacionando-os ou os apresentando de forma isolada, sendo mais comum a sobreposição de mecanismos de desgaste. Tais mecanismos são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6: MECANISMOS DE DESGASTE SUPERFICIAL

Mecanismo de desgaste	Definição
Adesão	Ocorre em decorrência da proximidade entre duas superfícies, relacionando suas asperezas e forças interatômicas. Ao deslizar uma sobre a outra, há a remoção de partículas. Isso porque o contato entre dois materiais pode gerar ligações mais fortes do que as presentes em um mesmo substrato;
Fadiga	Acontece em decorrência de cargas cíclicas, nas quais há a formação de fissuras e trincas subsuperficiais ou superficiais e, conseqüentemente, remoção de material;
Químico	Denominado também de desgaste corrosivo, ocorre quando duas superfícies se atiram em meio corrosivo; pode haver formação de produtos como um resultado das reações químicas nesse meio;
Impacto	Relacionado aos choques sucessivos ao longo da vida útil do material até a sua fratura/ruptura, geralmente em ângulos de impacto de 90°;
Abrasão	Relação de movimento entre um material mais duro e outro mais macio, associando, também, com irregularidades presentes nos materiais. Esse tipo de desgaste ocorre em ângulos inferiores a 90°;
Erosão	Relacionado ao choque sucessivo de partículas pontiagudas suspensas em um fluido em movimento, com desgaste semelhante à abrasão. Tal mecanismo está presente, principalmente, em obras hidráulicas como tubulações, vertedouros e canais;
Cavitação	Há a formação de bolhas superficiais e conseqüente perda de massa. Ocorre em locais onde há mudanças bruscas na direção do fluxo e pressão da água (não-linear), com velocidade superior a 12 m/s, e tem como conseqüência o colapso da estrutura.

FONTE: Abitante (2004); Liu (2017); Mehta e Monteiro (2014); Schackelford (1999); Silva (2011b); Silva (2015) – adaptado.

Apesar das várias definições para os processos de desgaste previamente descritos, uma vez que o desgaste pode ocorrer simultaneamente, vários estudos acabam unificando definições, principalmente as de abrasão e erosão, que se diferem pelo tipo de meio no qual ocorre o desgaste. Neste contexto, a ASTM C1138 (ASTM, 2019a) trata o tema pela definição “abrasão hidráulica”, contrariando algumas definições da literatura.

Além dos mecanismos de desgaste anteriormente mencionados, cabe salientar que as características e propriedades do material solicitado, bem como as características intrínsecas e propriedades do material que sofre o contato, além da natureza e severidade com que há interação entre ambos, exercem grande influência no fenômeno de desgaste superficial (ABITANTE, 2004).

O presente trabalho tem foco no estudo das propriedades relacionadas à abrasão superficial, em seu amplo contexto. Podendo o material, desta forma, ser solicitado por mais de um tipo de desgaste apresentado pela Tabela 6.

3.2 DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO

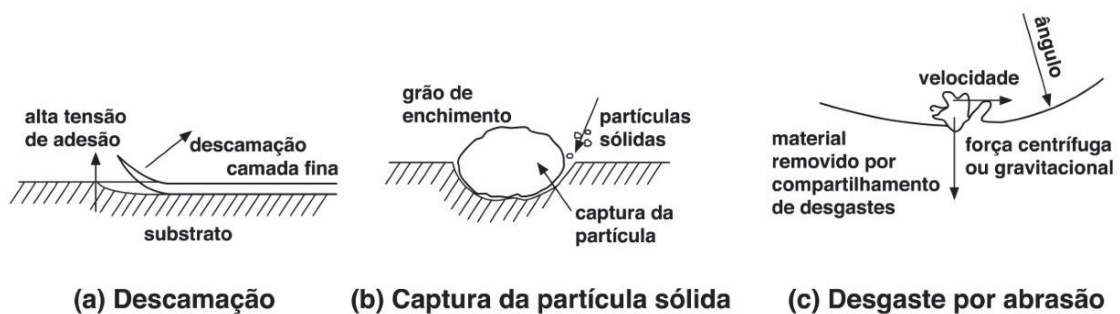
A abrasão superficial é, dentre muitos fatores que causam a degradação do concreto, um tipo recorrente que reflete em deterioração e perda progressiva de massa da superfície. Tal processo ocorre por meio seco, sendo comum em pavimentos industriais e em locais com tráfego de veículos. Esse desgaste pode ocorrer por fricção, raspagem, derrapagem ou deslizamento de objetos na superfície do material (KUMAR, 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014; PYO *et al.*, 2018; SAFIUDDIN; SCOTT, 2015).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (DNIT; 2006, p. 3), “a abrasão refere-se ao atrito seco e é a perda gradual e continuada da argamassa superficial e de agregados em uma área limitada, bastante comum nos pavimentos”.

Além disso, a abrasão, ao lado de outros desgastes físicos, faz parte de um dos quatro tipos de desgastes recorrentes em estruturas de concreto, ao lado dos desgastes químico, eletroquímico e por radiação (ABITANTE, 2004; SCHAKELFORD, 1999). Há relação, ainda, do fenômeno da abrasão com a remoção de material em caráter progressivo, além da exigência do movimento entre materiais e superfícies e envolvimento de processo mecânico.

O processo de abrasão superficial, por meio dos seus mecanismos de desgaste, agride a superfície do material impondo tensões que causam trituração gradual dessas superfícies. Como resultado, a coesão entre a pasta de cimento e as partículas de agregado é enfraquecida, ocasionando deterioração, principalmente na zona de transição. Por consequência, há o deslocamento de partículas. A velocidade e o ângulo de impacto influenciam diretamente no desgaste por abrasão (ABID, 2018), conforme é mostrado pela Figura 18.

FIGURA 18: PROCESSO DE DESGASTE ABRASIVO



FONTE: Liu *et al.* (2006) – adaptado.

3.2.1 Fases do desgaste superficial por abrasão

Segundo Mohebi (2015), o desgaste por abrasão superficial em estruturas de concreto ocorre em três estágios distintos: o inicial, no qual ocorre o descascamento da superfície do concreto; o secundário, em que o impacto de sólidos na superfície causa rachaduras no concreto; e o terceiro, no qual há o colapso da estrutura.

A Norma 090 (DNIT, 2006) evidencia quatro estágios de desgaste: leve, médio, pesado e severo, conforme representado na Tabela 7.

TABELA 7: FASES DO DESGASTE POR ABRASÃO

Nível de desgaste	Características
Desgaste leve	Perda progressiva da argamassa superficial (6 mm) e exposição do agregado graúdo.
Desgaste médio	Perda da argamassa superficial (7 a 12 mm), com perda da argamassa entre o agregado graúdo também.
Desgaste pesado	Perda da argamassa superficial (13 a 25 mm), com clara exposição do agregado graúdo.
Desgaste severo	Perda da argamassa superficial, da argamassa entre os agregados em profundidade maior que 25 mm, com exposição de armaduras.

FONTE: DNIT (2006).

Independente de quantos estágios de abrasão forem elencados, o mecanismo de deterioração geralmente ocorre de forma progressiva e, quanto maior a profundidade de desgaste e perda de massa, maior o prejuízo para a estrutura. Este pode ser um mecanismo de aceleração de penetração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos, além de expor, em casos mais graves, a armadura na superfície, o que acelera o processo de corrosão (AYGÖRMEZ *et al.*, 2020; ÇAVDAR e YETGIN, 2010). A Figura 19 mostra duas superfícies expostas ao desgaste superficial abrasivo.

FIGURA 19: DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO EM PISOS DE CONCRETO



FONTE: o autor (2021).

Çavdar e Yetgin (2010) estudaram a relação entre a resistência à abrasão superficial e a cura em uma solução de sulfato de sódio em amostras de argamassas convencionais. Os autores concluíram que, após um ano de cura, as amostras curadas na solução de sulfato tiveram, em média, desgaste abrasivo 13% maior se comparados os resultados das amostras curadas em água. Tal fato decorre, pois há abundância de etringita e gipsita no meio sulfatado, conferindo maior porosidade, diminuindo a resistência mecânica e, conseqüentemente, aumentando o desgaste por abrasão.

3.2.2 Fatores internos que influenciam o desgaste por abrasão

a. Influência do agregado graúdo

O agregado graúdo apresenta grande relevância nas propriedades de concretos, principalmente no que tange a sua resistência, dureza, durabilidade e porosidade. Além disso, um concreto exposto ao desgaste abrasivo deverá possuir agregados com alta resistência ao desgaste por abrasão. É válido mencionar que a dimensão máxima ideal do agregado graúdo para aplicação em um material que sofrerá desgaste por abrasão é de 12,5 mm (MEHTA e MONTEIRO, 2014; TUNC e ALYAMAC, 2019). A Tabela 8 mostra as características de agregados graúdos utilizados em algumas pesquisas.

TABELA 8: CARACTERÍSTICAS DE AGREGADOS GRAÚDOS UTILIZADOS EM ALGUMAS PESQUISAS SOBRE ABRASÃO SUPERFICIAL

Característica	SILVA (2011b)	SILVA (2015)		VIECILLI (2004)		NUAKLONG <i>et al.</i> (2018b)	WITZKE (2018)
Origem	Basáltica	Basáltica		Basáltica		Reciclado	Granítica
Módulo de finura	6,74	6,13	7,16	5,98	6,84	6,0	6,18
Dimensão máxima (mm)	19	12,5	25	9,5	19	9,5	12,5
Massa específica (g/cm ³)	2,86	2,93	2,88	2,72	2,72	-	2,71
Massa unitária (g/cm ³)	1,55	-	1,55	-	-	-	-
Absorção de água (%)	0,014	-	-	-	-	5,77	-

FONTE: o autor (2021).

De acordo com a Tabela 8, alguns autores utilizaram agregados com dimensão máxima superior a recomendada pela literatura. Porém, os requisitos pré-estabelecidos ao concreto muitas vezes não se limitam apenas na resistência à abrasão, fazendo com que o projetista tenha que escolher os materiais que melhor se adaptarão às exigências. Além disso, observa-se que o agregado reciclado apresenta absorção de água superior ao agregado graúdo natural de origem basáltica, valor que pode influenciar nas propriedades finais do concreto.

A dureza do agregado graúdo exerce importância para a resistência à abrasão e à compressão do concreto, principalmente para concretos com 21 MPa e 35 MPa de resistência à compressão. Este fato é explicado, pois a relação água/cimento (A/C) pode tornar a matriz cimentícia, em conjunto com a zona de transição, o elo mais frágil da massa. Em concretos com resistência à compressão superior a 56 MPa, o efeito do agregado graúdo é maior, tendo em vista que houve redução na relação A/C e, conseqüentemente, uma melhora na matriz cimentícia e, a ruptura, poderá acontecer no próprio agregado (VIECILLI, 2004).

Pacheco *et al.* (2002) investigaram as propriedades de durabilidade de três tipos diferentes de agregados graúdos (granítico, calcário e de gábro), incluindo teste de abrasão Los Angeles. O ensaio mostrou que o agregado de gábro apresentou 12% de desgaste por abrasão, enquanto os agregados de calcário e granito apresentaram cerca de 24% de desgaste por abrasão.

Duarte *et al.* (2019) estudaram a influência da incorporação de agregados reciclados nas propriedades de concretos projetados e concluíram que, embora houvesse redução na resistência à compressão e tração do material, bem como diminuição do módulo de elasticidade e da velocidade do pulso do ultrassom, houve também acréscimo na resistência à abrasão. Tal fato ocorreu, pois os agregados reciclados apresentaram maior rugosidade e porosidade, o que permite melhor adesão com a pasta de cimento.

Kumar *et al.* (2016) pesquisaram a influência da substituição de agregados graníticos por agregados de quartzo com teores de 20, 40, 60, 80 e 100% em amostras de concreto. Os resultados apontaram que houve perda de resistência mecânica à compressão, da amostra de referência para a amostra com teor de substituição de 100%, aos 28 dias de cura, de 42,3 MPa para 33,5 MPa, bem como perda de resistência à flexão, de 5,56 MPa para 4,9 MPa, comparando as mesmas amostras. O desgaste superficial por abrasão foi cerca de 36% maior nas amostras

de concreto com agregado de quartzo, em comparação com as amostras com agregado de granito.

Nuaklong *et al.* (2018b) investigaram a influência dos agregados graúdos de calcário e reciclado na resistência à abrasão de concretos geopoliméricos com cinza volante e hidróxido de sódio. Os autores concluíram que, para uma concentração molar de 8 M, 12 M e 16 M, os concretos geopoliméricos com agregado graúdo calcário apresentaram perda de massa, em grama, de 1,24; 0,92 e 1,16, enquanto os concretos geopoliméricos com agregado reciclado apresentaram, em gramas, 1,45; 0,92 e 1,53, respectivamente. Embora os resultados de resistência à abrasão com agregados reciclados foram maiores que as com agregado calcário, mesmo assim ambos apresentaram resultados adequados, viabilizando a sua utilização.

Cabe salientar que, embora a resistência do agregado graúdo influencie diretamente na resistência à compressão do concreto e, conseqüentemente, na resistência à abrasão, a maior área de contato para o desgaste abrasivo ocorrerá na camada superficial da massa, que é composta apenas de argamassa (agregados miúdos, cimento e água). Por isso, a importância de se estudar a influência, também, do agregado miúdo (FONSECA, 2009), conforme apresentado na próxima subseção.

b. Influência do agregado miúdo

A areia, assim como o agregado graúdo, exerce influência sobre as propriedades do concreto fresco, endurecido e na sua durabilidade. Por isso, Beixing *et al.* (2011) estudaram a influência de diversos tipos de areia, naturais e artificiais, na resistência à abrasão de concretos e mostraram que a textura da superfície e a rugosidade do grão de areia, além do valor de trituração (agregados artificiais) são fatores importantes para o aumento da resistência à abrasão superficial, pois aumentam a área superficial de contato e melhoram a ligação entre partículas de agregado e aglomerantes.

Além disso, o teor de SiO₂ de agregados miúdos naturais pouco influenciou na resistência à abrasão de concretos, viabilizando, assim, o uso de agregados miúdos artificiais ou reciclados (BEIXING *et al.*, 2011). Outras pesquisas também mostraram que a utilização de agregados miúdos com distribuição granulométrica mais fina provocou nucleação de CSH e CH, melhoramento do empacotamento de

partículas e aumento da densidade, melhora na estrutura de poros e na zona de transição. Além disso, uma distribuição granulométrica mais fina proporciona aumento da consistência, diminuindo a exsudação e, conseqüentemente, melhora no acabamento superficial do concreto (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; QUIRONGA *et al.*, 2006; STEWART *et al.*, 2007).

c. Influência do tipo e consumo de cimento e da inclusão de adições minerais

A resistência à abrasão superficial de concretos não depende somente da resistência mecânica, mas também da alta dureza da superfície e dureza interna, o que pode exigir maiores quantidades de cimento Portland por volume de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O manual norte-americano ACI 302.1R (2004) recomenda uma faixa ideal para consumo de cimento em concretos utilizados em pisos e, conseqüentemente, expostos à abrasão superficial. Segundo o manual, esse consumo está relacionado à dimensão máxima nominal do agregado, balanceando entre o consumo mínimo de cimento (necessário para redução da relação A/C, garantia da trabalhabilidade, redução da exsudação e a prevenção da segregação) e o consumo máximo de cimento (a fim de limitar a retração, o calor de hidratação, a fissuração, o empenamento e a delaminação da estrutura), conforme a Tabela 9.

TABELA 9: TEORES DE CIMENTO RECOMENDADOS PARA PISOS

Dimensão máxima nominal do agregado (mm)	Cimento (kg/m³)
37,5	280 a 330
25	310 a 360
19	320 a 375
12,5	350 a 405
9,5	360 a 415

FONTE: ACI (2004).

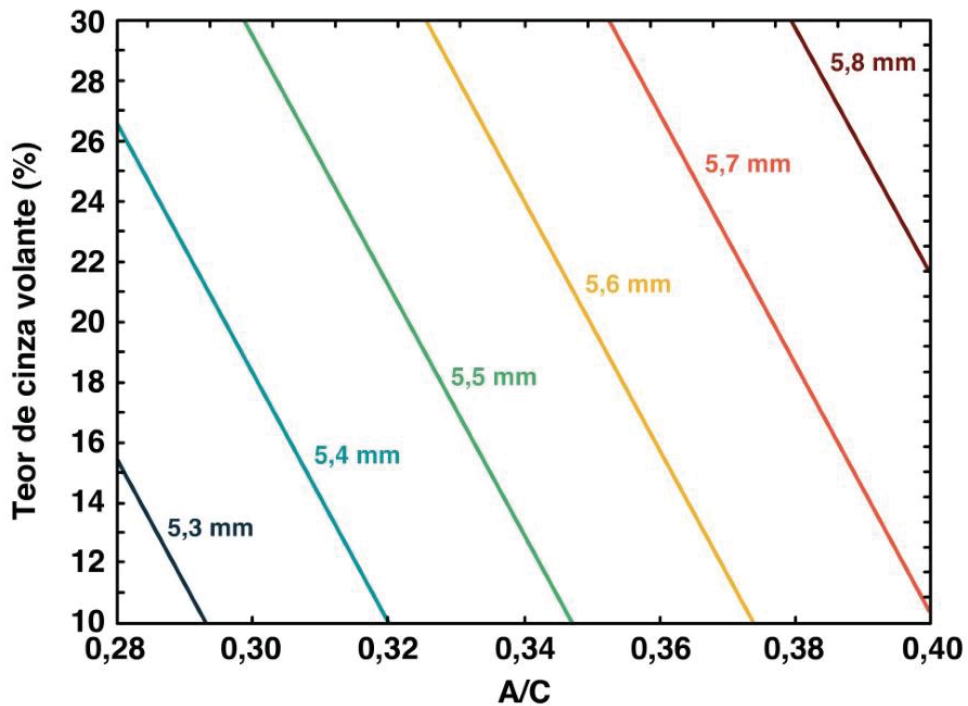
Além disso, no mercado brasileiro, existem, atualmente, diversos tipos de cimentos, possuindo cada cimento características específicas que os tornam mais adequados para certos usos, conferindo ao concreto uma boa resistência e durabilidade, de forma econômica (BATTAGIN; RODRIGUES, 2014; PUGLIESI, 2016). Esses cimentos se diferem pela sua composição química e finura, devido principalmente a presença de adições minerais, como cinza volante, fíler calcário e

escória de alto forno. Além disso, vários estudos mostram a incorporação de outras adições minerais ao concreto. Tais adições minerais podem influenciar a resistência e a abrasão superficial (ABCP, 2020; ÇAVDAR e YETGIN, 2010).

Silva (2011b) pesquisou a influência da substituição de cimento Portland por sílica ativa, em 5 e 10%, no desgaste abrasivo de amostras de concreto e concluiu que a utilização da sílica ativa, embora não tenha melhorado os resultados para o desgaste por abrasão, melhorou indiretamente as outras propriedades correlatas ao mecanismo de desgaste, como por exemplo, a resistência mecânica à compressão do concreto de 26 MPa para 31 MPa, a resistência mecânica à tração na flexão, de 3,5 MPa para 3,8 MPa, bem como a dureza superficial, de cerca de 34,9 para 36,1, e diminuiu a exsudação, de cerca de 3,6% para 0,5%.

Witzke *et al.* (2019) estudaram conjuntamente, por meio de um projeto fatorial fracionado, a influência da substituição parcial de cimento Portland por cinza volante (10, 20 e 30%), da relação água/cimento (0,28; 0,33 e 0,40) e da relação agregado/cimento (2,70; 3,10 e 3,70) na resistência à abrasão superficial. A Figura 20 mostra o resultado do ensaio de abrasão superficial.

FIGURA 20: DESGASTE ABRASIVO SUPERFICIAL DE CONCRETOS COM CINZA VOLANTE



FONTE: Witzke *et al.* (2019) – adaptado.

A Figura 20 mostra que tanto a relação água/cimento quanto o teor de substituição de cimento Portland por cinza volante influenciaram o desgaste por abrasão de amostras de concreto. Além disso, quanto maior o teor de incorporação de cinza volante e quanto maior a relação água/cimento, menor a resistência à abrasão das amostras. Por meio da figura é possível a obtenção de concretos com desgaste superficial inferior a 5,6 mm, usando quaisquer teores de substituição de cimento Portland por cinza (dentro do intervalo estudado), relação agregado/cimento constante em 3,1 e relação água/cimento inferior a 0,37.

A explicação para o comportamento da Figura 20 se deve a utilização de cinzas volantes com baixo teor de cálcio (2,05%) (característico de cinzas volantes catarinenses) e, conseqüentemente, menor reatividade. Dessa forma, quanto maior a quantidade de material de pouca reatividade na mistura, mais frágil será a matriz formada durante o processo de hidratação, aumentando a porosidade, diminuindo a resistência mecânica e, conseqüentemente, menor qualidade da camada superficial.

Além disso, a relação entre o aumento do teor de água na mistura e a menor resistência ao desgaste abrasivo ocorre, pois a oferta de água está ligada à porosidade, ao calor de hidratação e, possivelmente, ao surgimento de fissuração, o que prejudica tanto a resistência mecânica quanto o acabamento superficial (que é indispensável para a resistência ao desgaste abrasivo) (WITZKE *et al.*, 2017; WITZKE *et al.*, 2019).

Gaedicke *et al.* (2014) estudaram a abrasão superficial de concretos permeáveis com a substituição parcial de cimento Portland por escória de alto forno em até 30% e concluíram que essa substituição não gerou diminuição da resistência à abrasão das amostras. Pelo contrário, houve redução de 13 e 14% de perda de massa nas amostras com 30% de escória de alto-forno, em comparação a amostra padrão.

Çavdar e Yetgin (2010) pesquisaram a abrasão superficial de amostras de argamassas contendo adição de até 40% de escória de alto-forno, até 20% de pozolana natural e cinza volante e até 5% de sílica ativa ou calcário. Os resultados da pesquisa mostraram que amostras com 100% de clínquer e, conseqüentemente, maior teor de CaO, tiveram menor profundidade de abrasão (3,5 mm), enquanto amostras com 40% de escória tiveram 5,5 mm de profundidade de desgaste. A inclusão de pozolanas naturais, bem como cinza volante, tiveram valores próximos de profundidade de abrasão (4,5 mm). Já as amostras com inclusão de 5% de sílica

ativa e calcário tiveram profundidade de desgaste de 3,5 mm e 4 mm, respectivamente.

Os resultados descritos no parágrafo anterior são explicados, pois cada adição mineral tem sua particularidade e impõe características diferentes na formação do material. A escória de alto-forno, por exemplo, teve maior desgaste por abrasão por ser um material auto-cimentante, e não-pozolânico. Já a adição de sílica ativa e calcário, embora apresentem menores desgastes, por serem materiais com alta reatividade, não é possível compará-los com a adição de escória, pois os teores utilizados na pesquisa foram diferentes (5 e 40%). A alta variabilidade química das cinzas volantes em todo o mundo também influencia no resultado final do ensaio com este material, tendo em vista que a quantidade de CaO, em %, tem influência no resultado final.

Rao *et al.* (2016) investigaram a abrasão superficial de concretos com substituição parcial de cimento Portland por cinza volante em 20, 40 e 60% e concluíram que, quanto maior o teor de cinza volante utilizado, maior foi a perda de massa encontrada, em %. A amostra padrão teve perda de 6% de massa, enquanto as amostras com 20, 40 e 60% de substituição por cinza volante obtiveram 12%, 14% e 17% de perda, respectivamente.

d. Influência da relação água/aglomerante e da resistência mecânica

A relação água/aglomerante é um dos principais parâmetros avaliados na dosagem de uma mistura de concreto. A diminuição dessa relação, com o incremento de cimento Portland, acarreta em maior resistência mecânica e, também, maior custo. Ao mesmo tempo, concretos com baixa relação água/aglomerante apresentam baixo índice de trabalhabilidade e podem acarretar, na prática, em concretos viscosos, dificultando a sua aplicação prática (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Existem algumas medidas que podem reduzir a demanda de água e, ao mesmo tempo, dar maior rigidez superficial ao material. Entre elas, a aplicação de aditivos químicos endurecedores de superfície e aplicação de uma técnica de acabamento superficial de atraso na fase de desempenho. Tais técnicas visam a densificação da área superficial da massa do concreto, que estará expostas ao desgaste (MEHTA e MONTEIRO, 2014; SILVA, 2015).

Além disso, várias pesquisas mostram forte correlação entre a abrasão superficial e a resistência à compressão, tração, flexão e ao módulo de elasticidade do concreto. Para tanto, um aumento dessas propriedades leva a um aumento da resistência ao desgaste abrasivo do material (ABID, 2018; MEHTA e MONTEIRO, 2014; RAO *et al.*, 2016; SIDDIQUE e KHATIB, 2009; SILVA, 2015; YOSHITAKE *et al.*, 2016).

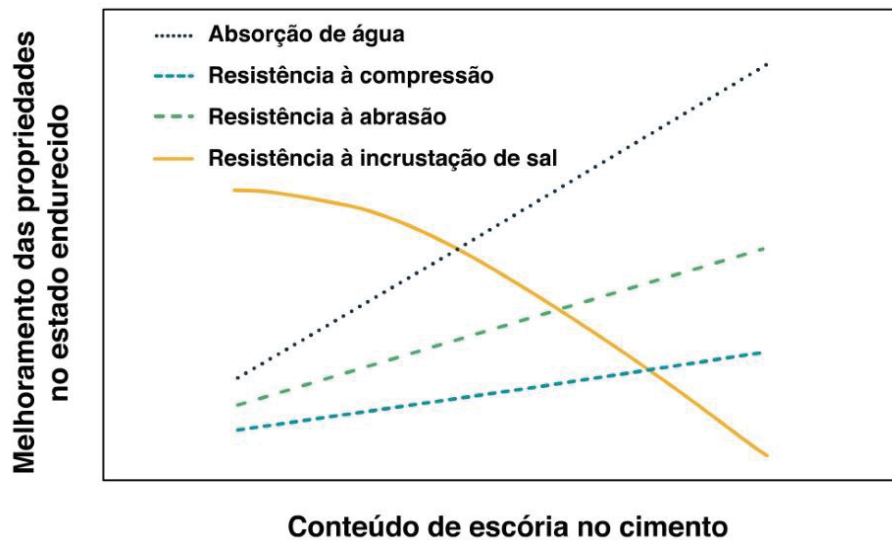
Pelisser *et al.* (2021) estudaram a resistência à compressão e a dureza superficial de pastas geopoliméricas de caulim, hidróxido de sódio e silicato de sódio alcalino, curados a 40 °C. As resistências à compressão das pastas, aos 28 dias de idade, variaram entre aproximadamente 50 e 60 MPa. Os autores atribuíram os valores encontrados à elevada relação entre os ativadores alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$) e à natureza amorfa do material.

Os resultados de dureza superficial, apresentados pelos mesmos autores no artigo, citados no parágrafo anterior, mostraram que as pastas geopoliméricas apresentaram, em média, 0,40 GPa de dureza superficial, enquanto, em comparação, as pastas de cimento convencionais apresentaram valores entre 0,2 e 1,0 GPa (PELISSER *et al.*, 2021)

Amini *et al.* (2019) explicam que é nítida a relação entre as propriedades mecânicas do concreto e a resistência à abrasão superficial. Porém, é difícil estimar essa relação entre as propriedades, pois outros fatores internos, como o traço, as condições de cura, absorção de água e dureza superficial também são influenciadores. Um concreto com cura incompleta pode apresentar água abaixo da camada superficial, formando uma camada fraca que propicia a descamação. Além disso, a descamação está intrinsecamente ligada ao estado da camada superficial, a dureza superficial e a absorção de água desta mesma área. Quanto maior a porosidade superficial do concreto, mais predisposto ele estará a descamação.

Amini *et al.*, (2019) ainda formularam uma relação entre as propriedades de concretos geopoliméricos com escória, como a absorção de água, resistência á incrustação de sal e a resistência à compressão, com a resistência à abrasão superficial (Figura 21).

FIGURA 21: RELAÇÃO ENTRE INCRUSTAÇÃO DE SAL, RESISTÊNCIA MECÂNICA E ABRASÃO SUPERFICIAL



FONTE: Amini *et al.* (2019) – adaptado.

A Figura 21 mostra que, quanto maior o teor de escória da mistura, maior a resistência à compressão, resistência à abrasão e menor a resistência à incrustação de sal. É nítido também que o crescimento dessas propriedades não é paralelo, ou seja, a resistência à abrasão cresce a uma velocidade mais rápida que a resistência mecânica, a medida que a escória é adicionada no concreto. Porém, a absorção de água cresce em velocidade superior as outras duas propriedades testadas e quase que de forma exponencial.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o concreto exposto a severas condições de abrasão deverá ter, no mínimo, 41 MPa de resistência à compressão. Mas essa recomendação não é adotada em todos os trabalhos da literatura, haja visto que nem todas as aplicações do material estão expostas a condições severas de abrasão, como trânsito pesado de máquinas e veículos, por exemplo.

Algumas pesquisas mostram que a resistência à perda de massa por abrasão é maximizada pelo aumento da resistência mecânica (ATIS, 2002; ATIS, 2003; IBRAHIM *et al.*, 2017). Ao mesmo tempo, a relação do crescimento da resistência à abrasão e da resistência mecânica se apresentam de forma linear ou hiperbólica (SILVA, 2015). Outros estudos mostram que a resistência à abrasão independe da resistência mecânica, por se tratar de uma propriedade de superfície e não de massa. Essa última teoria alia, ainda, procedimentos de cura e o acabamento superficial como influenciadores da propriedade de abrasão (ALMEIDA, 2000; SILVA, 2015).

Teoricamente há uma interligação nas duas vertentes de pensamento. Se por um lado um concreto com baixo teor de água vai propiciar uma massa compacta, densa, com baixa porosidade e, conseqüentemente, maior resistência mecânica à compressão, à tração e à flexão. Por outro lado, um traço com características pré-determinadas de resistência e que tiver moldagem adequada conforme as boas práticas no canteiro de obras, além de ser curado, por no mínimo 28 dias, terá, conseqüentemente um acabamento superficial adequado. Logo, os dois caminhos, o da relação com as propriedades de massa e também o relacionado com as propriedades de superfície vão sinalizar a melhora da resistência à abrasão superficial.

e. Influência da exsudação e cura

A exsudação é entendida como um fenômeno de aparecimento de água na superfície do concreto, logo após o lançamento e adensamento da massa, e antes da sua pega. Assim, a água, como elemento de menor densidade do produto, tende a aflorar na superfície do material, carregando consigo, partículas leves de agregado. Dessa forma, a exsudação torna a camada superficial com alta relação A/C, porosa e fraca, favorecendo o desgaste abrasivo (AMINI *et al.*, 2019; MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013; SILVA, 2015).

A exsudação, embora seja visível na superfície, ocorre também dentro da massa do concreto, nas partículas de maiores dimensões, como agregados graúdos ou armaduras, o que enfraquece a zona de transição entre a pasta e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013; VIECILI, 2004).

Todavia, várias ações podem minimizar o aparecimento da exsudação em concretos, tal como o emprego de agregados com granulometria contínua, emprego de cimentos mais finos ou a utilização de adições minerais de alta finura, redução da trabalhabilidade ao mínimo necessário, assim como redução do teor de água de amassamento na mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013; SILVA, 2015).

O processo de cura influencia inúmeras propriedades do concreto, dentre elas, resistência à compressão, tração, flexão, módulo de elasticidade, permeabilidade, retração e abrasão superficial. A cura inadequada do concreto impõe ao material pior acabamento superficial, bem como a redução da resistência

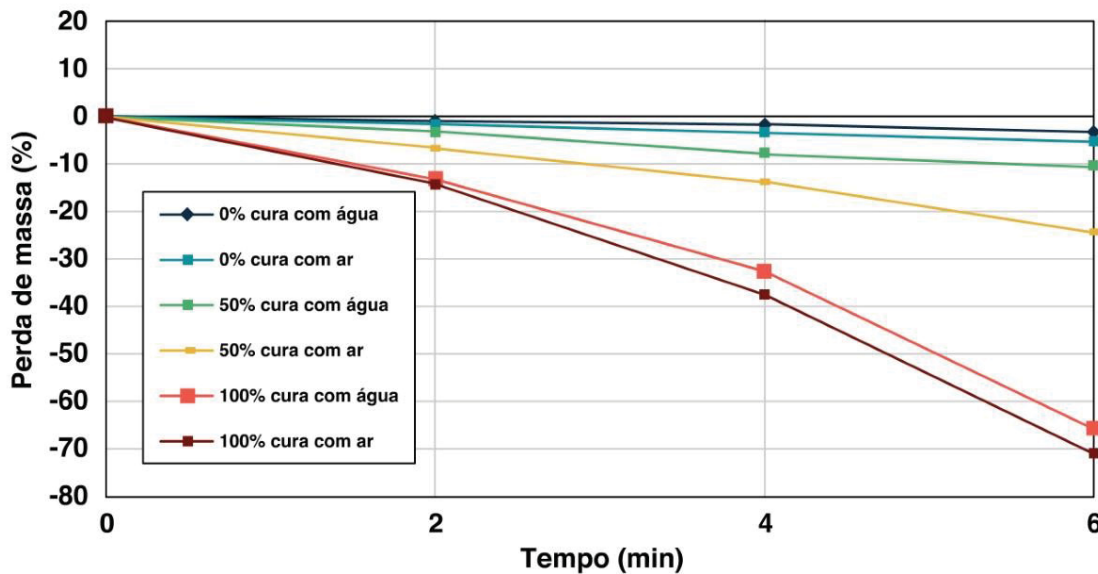
da camada superficial do concreto, favorecendo a abrasão (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013).

Çavdar e Yetgin (2010) estudaram a abrasão superficial de argamassas e mostraram que o desgaste da superfície diminui a medida com que a idade de cura aumenta. Houve o maior crescimento da resistência à abrasão até cerca de 6 a 9 meses de cura. Após isto, a resistência à abrasão cresceu de forma mais lenta até um ano de cura, intervalo de tempo estudado. Por exemplo, um traço de argamassa foi submetido ao ensaio de abrasão aos 7, 28, 90, 180 e 270 dias de cura. Os resultados mostraram desgaste, em mm, de 7,70; 6,12; 5,20; 4,66 e 4,56. Representando aumento de resistência à abrasão de cerca de 20,5%, 15%, 10% e 2,1% por idade, respectivamente.

O estudo de Yan *et al.* (2017) também evidenciaram a diminuição da abrasão superficial de concretos geopoliméricos com cinza volante ao longo de 3, 7, 14, 28 e 90 dias de cura. Essa diminuição foi de 66,9%, 70%, 71,3%, 59,1% e 60,7% para os dias de cura estudados, respectivamente. A explicação para tal fato é a formação de géis de aluminossilicato ao longo do tempo de cura. Quanto maior o tempo de cura, maior a formação de produtos que contribuirão para a resistência das amostras, formando a matriz principal e fortalecendo a ligação entre as partículas.

A pesquisa de Ibrahim *et al.* (2017) se dedicou à comparação da influência da cura submersa e da cura ambiente em concretos convencionais com adição de óleo de palma na perda de massa por abrasão superficial. A Figura 22 mostra os resultados do estudo.

FIGURA 22: PERDA DE MASSA POR ABRASÃO SUPERFICIAL DE CONCRETOS CONTENDO 0, 50 E 100% DE ADIÇÃO DE ÓLEO DE PALMA EM CURA SUBMERSA OU EM AR



FONTE: Ibrahim *et al.* (2017) – adaptado.

A Figura 22 mostra que com 50% de adição de óleo de palma, o concreto curado de forma submersa apresentou ligeira melhora na resistência à abrasão. No entanto, as amostras com 100% de adição do óleo de palma também apresentaram comportamento de desgaste similares, assim como na amostra de referência. Mohebi *et al.* (2015) concluíram que a cura submersa melhora a camada superficial do concreto, sendo ideal para materiais que são expostos a ciclos de desgaste superficial.

f. Influência de aditivos químicos

Çavdar e Yetgin (2010) estudaram a influência do aditivo químico incorporador de ar em amostras ensaiadas para abrasão superficial. Os autores concluíram que a incorporação de 1% de ar influenciou negativamente de 22 a 37% no desgaste por abrasão. Esse resultado encontrado é explicado pelo enfraquecimento da camada superficial da amostra, bem como pela formação de um produto menos denso, ambos promovidos pela inclusão do aditivo químico.

A cura química, pelo uso de aditivos, também é citada por alguns autores como forma de proteger o concreto na fase inicial de endurecimento em benefício de

uma melhor camada superficial e, conseqüentemente, melhor resistência à abrasão (CHODOUNSKY e VIECILI, 2007; SILVA, 2015).

O uso de endurecedores de superfície à base de silicato de sódio e fluorsilicato de zinco e magnésio também se mostra benéfico na diminuição ao desgaste por abrasão, pois promove menor permeabilidade, vitrificação superficial, além de reduzir o efeito de poeira na superfície dos concretos. Os endurecedores superficiais, ainda, reagem com o hidróxido de cálcio presentes na pasta de cimento para formar produtos insolúveis, obstruindo poros e aumentando a resistência à abrasão superficial, por meio de uma camada superficial mais espessa ou ainda um filme superficial de elevada dureza (CHODOUNSKY e VIECILI, 2007; MEHTA e MONTEIRO, 2014; SILVA, 2015).

Apesar de não existir algum estudo que relacione a utilização de aditivos químicos plastificantes ou superplastificantes à base de policarboxilato com a propriedade de abrasão superficial, é conhecido que a utilização destes reduz a quantidade de água de amassamento, confere maior fluidez à mistura, além de diminuir a quantidade de ar aprisionado no concreto. Portanto, essas características, mesmo que indiretamente, influenciam positivamente na propriedade de resistência superficial por abrasão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

3.2.3 Métodos para determinação do desgaste superficial por abrasão

O fenômeno do desgaste abrasivo está ligado a diversos tipos de estruturas de concreto, bem como a tubulações de água e esgoto, canais de irrigação, obras marítimas, pisos industriais, pavimentos de concretos, passeios públicos e pavers, e pode ser agravado por inúmeros fatores externos e internos, além de ocorrer também em argamassas autonivelantes ou ainda em rejuntas (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2013).

Por isso, normas de várias partes do mundo estabelecem diretrizes normativas para determinação acelerada da resistência à abrasão do concreto. Os parâmetros dessas normas incluem o uso de materiais abrasivos, como jatos de areia e carbetos de silício, além de jatos de água. Porém, essas normas não indicam para qual aplicação específica estaria sendo realizado o teste acelerado proposto.

Abitante (2004) explica que o desgaste de materiais consiste em um processo de envelhecimento que tem relação direta com a vida útil. Ao se tentar estimar

aceleradamente o regime de deterioração, está se presumindo que o produto passará por uma condição pré-determinada de agressividade e sem variação, o que não acontece no envelhecimento natural temporal do produto.

Além disso, ao se estimar a vida útil do material por esse meio, se está possivelmente, simplificando mecanismos de desgaste e, conseqüentemente, omitindo dados relevantes no processo. Também é importante estimar o crescimento progressivo do desgaste (ABITANTE, 2004). Por estes motivos, essas limitações devem ser levadas em consideração nas análises e extrapolação dos resultados. Além disso, a utilização de mais técnicas aceleradas dão maior confiabilidade aos resultados finais; confiabilidade que ainda não foi explorada em outros trabalhos acadêmicos e, portanto, é uma inovação na presente tese, uma vez que diferentes tipos de ensaios de abrasão são aplicados.

Dessa forma, torna-se difícil estimar as condições reais de desgaste por meio de ensaios acelerados e, por isso, tem-se a necessidade de pesquisar, complementarmente aos ensaios acelerados, formas de estudar o desgaste abrasivo natural, aquele que ocorre temporalmente e sob diversas condições de uso e agressividade ao longo do tempo de ensaio.

A seguir (Tabela 10), estão listados alguns métodos acelerados, nacionais e internacionais, encontrados e discutidos na revisão bibliográfica deste trabalho para determinação do desgaste por abrasão de concretos. Existem outros ensaios internacionais, como o ensaio de Cantabro e Bohne, ou ainda normas chinesas e europeias, para a mesma finalidade, porém a maioria deles adota o mesmo procedimento das normas elencadas na Tabela 10, com pouca ou nenhuma alteração em seus textos.

TABELA 10: CARACTERÍSTICAS DAS NORMAS QUE MENSURAM O DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO

Norma	Material abrasivo	Ciclos de desgaste	Corpo de prova	Medida de resultado
NBR 12042 (2012a)	Areia n. 50 (0,3 mm)	Eixo de rotação com leitura aos 500 e 1000 m	70 x 70 mm	Profundidade de desgaste
NBR 9781 (2013)	Óxido de alumínio	Disco aço (Diâmetro: 200 mm; espessura: 70 mm)	Paver de concreto	Profundidade de desgaste
Método abrasão (CIENDEC/INMETRO)	Carbeto de silício	Eixo de rotação com leitura aos 500m	50 x 50 mm	Profundidade de desgaste
ASTM C 779 (2019b) – MÉTODO A	Carbeto de silício	Discos metálicos com leitura em 30 e 60 min	300 x 300 x 100 mm	Profundidade de desgaste
ASTM C 779 (2019b) – MÉTODO B	Peso próprio das rodas (7,5 kg)	Rodas de aço com leitura em 15, 30, 45 e 60 min.	300 x 300 x 100 mm	Profundidade de desgaste
ASTM C 779 (2019b) – MÉTODO C	Pressão de 120 N	Esferas de aço com leitura de desgaste a cada 50 seg. até 20 min ou 3 mm	300 x 300 x 100 mm	Profundidade de desgaste
ASTM 1138 (2019a)	Peso próprio das esferas	Esferas metálicas e água. Leitura a cada 12 h até 72 h	Diâmetro 6 mm menor que o do aparelho, com espessura de 100 ± 13 mm	Perda de massa
ASTM C944 (2019c)	98 ± 1 N	3 cortes rotativos por 2 min	-	Perda de massa
ASTM C418 (2012)	Areia n. 20-30 lançada a 100 psi	Jato de areia	-	Perda de volume
ASTM C1747 (2013)	Peso próprio do equipamento	500 ciclos de impacto, abrasão, atrito e esmerilhamento	Corpo de prova cilíndrico	Perda de massa

FONTE: o autor (2021).

Em geral, os ensaios apresentados na Tabela 10 foram os métodos encontrados na revisão bibliográfica sobre o tema de desgaste superficial. O material abrasivo desses métodos varia entre areia, de diversas graduações, e o próprio peso dos equipamentos, com ou sem água. Além disso, as normas não possuem um tamanho único para os corpos de prova, e há duas normas que não estabelecem esse tamanho (ASTM C418 e ASTM C944). O resultado é medido em perda de massa, perda de volume ou ainda profundidade de desgaste.

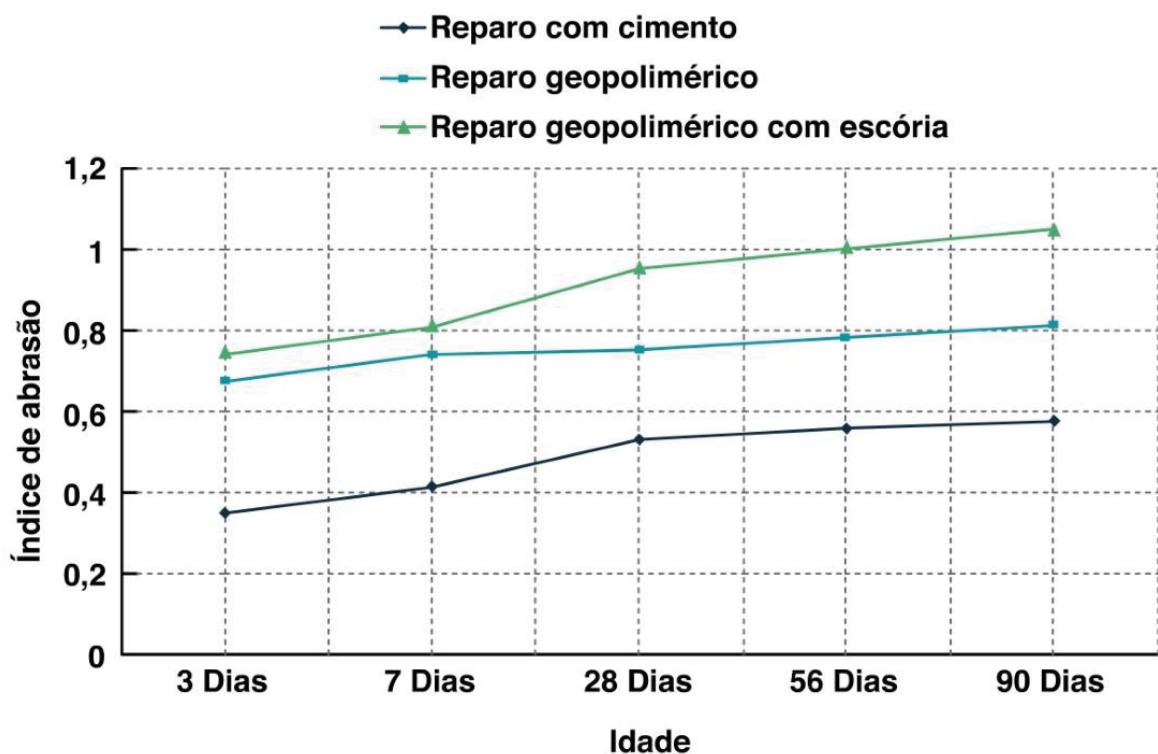
Embora existam inúmeros tipos de concretos expostos a diversas categorias de desgaste por abrasão, não há, ainda, consenso literário que prevê a aplicação de um determinado teste para um concreto que será utilizado para um tipo específico

de aplicação. Dessa forma, o presente trabalho estudará três diferentes métodos de desgaste por abrasão, comparando os resultados adquiridos e as tendências obtidas entre si e seus métodos, com a finalidade de determinar o tipo de aplicação que cada teste deveria dar enfoque.

3.2.4 Resistência à abrasão superficial de concretos geopoliméricos

A resistência à abrasão de materiais geopoliméricos é tratada em algumas pesquisas, como a de Hu *et al.* (2008), que compararam a resistência à abrasão superficial de amostras de material de reparo convencional, com cimento Portland, e geopolimérico, com escória de alto forno, caulinita, silicato de sódio e hidróxido de sódio. A profundidade de desgaste por abrasão nos corpos de prova foi mensurada em 3, 7, 28, 56 e 90 dias, e foi ilustrado representando a massa média das amostras de concreto, descontando a massa abrasionada (Figura 23).

FIGURA 23: RESISTÊNCIA À ABRASÃO, POR IDADE, DE MATERIAIS DE REPARO GEOPOLIMÉRICOS E CONVENCIONAL

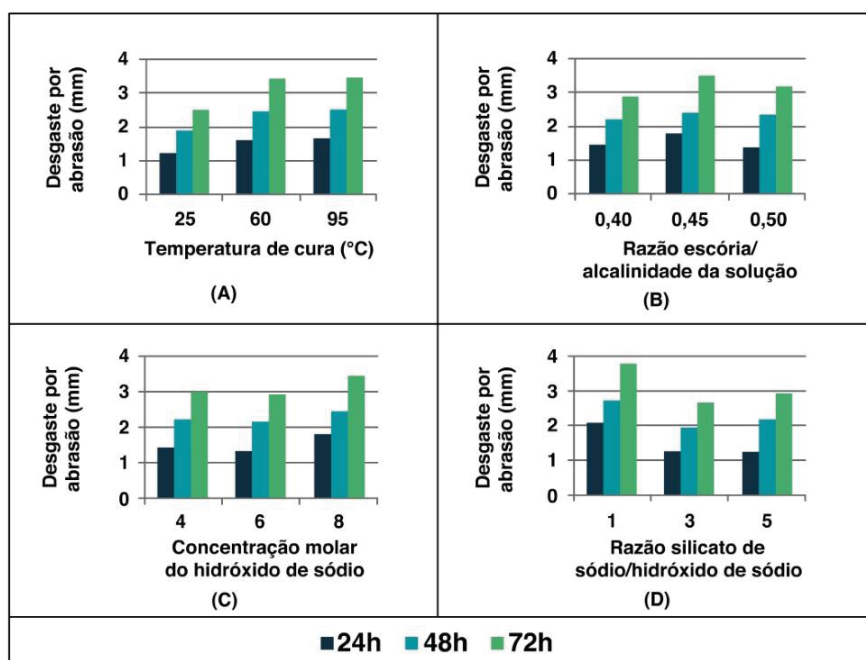


FONTE: Hu *et al.* (2008) – adaptado.

A Figura 23 mostra que o desgaste superficial das amostras geopoliméricas foi 48 %, 44 %, 29 %, 28 % e 29 % menor em comparação com as amostras de reparo convencional nas idades de 3, 7, 28, 56 e 90 dias, respectivamente. A figura mostra também que os materiais geopoliméricos apresentam melhor resistência ao desgaste abrasivo que os materiais convencionais, com cimento Portland. Além disso, as diferenças entre os valores de desgaste são maiores em idades precoces, pois os geopolímeros têm a capacidade de formar uma matriz mais densa precocemente e tal densidade está intimamente ligada à resistência à abrasão. Diferentemente da presente tese, que tem por objetivo avaliar a resistência à abrasão de concretos geopoliméricos com metacaulim e cinza de casca de arroz, o estudo de Hu *et al.* (2008) avaliou a resistência à abrasão de argamassas de reparo convencionais e geopoliméricas com metacaulim e escória por meio de um método acelerado.

Mohebi *et al.* (2015) estudaram a influência da temperatura de cura, concentração molar, alcalinidade da solução de ativadores e a relação de hidróxido e silicato de sódio para a resistência à abrasão de escórias álcali-ativadas. Os resultados da pesquisa encontram-se na Figura 24.

FIGURA 24: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA, CONCENTRAÇÃO MOLAR, ALCALINIDADE DA SOLUÇÃO E RELAÇÃO ENTRE ATIVADORES NA RESISTÊNCIA À ABRASÃO SUPERFICIAL.

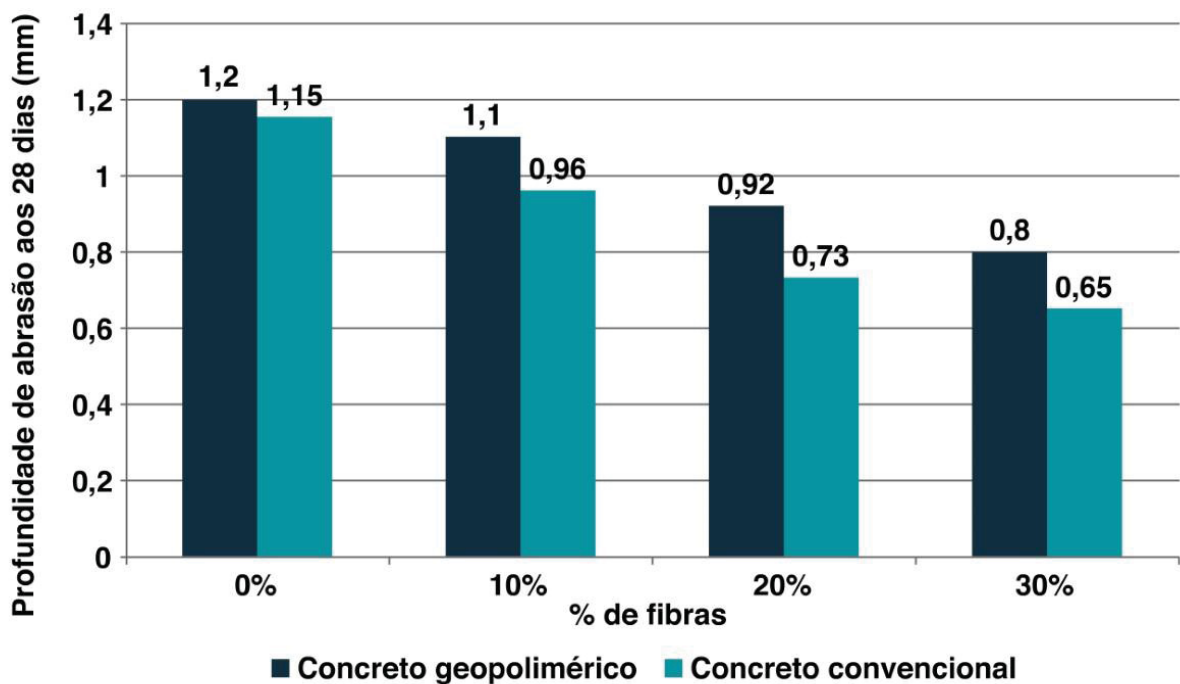


FONTE: Mohebi *et al.* (2015) – adaptado.

A Figura 24 mostra que concretos que foram curados em temperatura ambiente (25 °C) tiveram menor desgaste abrasivo que os curados a 60 e 95 °C. Além disso, a concentração molar ideal de hidróxido de sódio foi de 6 e a concentração molar de silicato de sódio alcalino foi de 5. Ademais, a condição de cura submersa propiciou melhor acabamento superficial e, conseqüentemente, melhor resistência à abrasão.

Luhar *et al.* (2019) pesquisaram a resistência à abrasão superficial de concretos geopoliméricos com base de cinza volante e fibras de borracha. Os resultados da pesquisa estão expostos na Figura 25.

FIGURA 25: RESISTÊNCIA À ABRASÃO SUPERFICIAL DE CONCRETOS GEOPOLIMÉRICOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE BORRACHA



FONTE: Luhar *et al.* (2019) – adaptado.

A Figura 25 mostra que quanto maior o teor de fibras de borrachas no concreto geopolimérico, menor o desgaste abrasivo das misturas. A figura mostra, também, que os concretos geopoliméricos com fibras apresentam valores ligeiramente superiores de desgaste abrasivo quando comparados aos concretos convencionais com as mesmas fibras de borracha, cerca de 4,2%, 12,7%, 20,6% e 18,7%, para 0 %, 10%, 20% e 30% de incorporação de fibras, respectivamente. Tal

fato é explicado pela melhora na camada superficial dos concretos fabricados com fibras.

Arslan *et al.* (2019) exploraram a resistência à abrasão superficial de concretos geopoliméricos com metacaulim, escória de alto forno, resíduos de boro colemanita, além de fibras de basalto e PVA, ativados alcalinamente por hidróxido de sódio e silicato de sódio. Os resultados para o ensaio de abrasão foram medidos por comprimento de desgaste e perda de massa. Os resultados mostraram que quanto maior a incorporação de fibras de PVA, maior a resistência ao desgaste por abrasão, tendo em vista que as fibras formam uma camada superficial resistente. As fibras de basalto também diminuíram entre 2 e 18% o desgaste abrasivo de concretos.

Durante a confecção desta revisão bibliográfica, nenhuma pesquisa foi encontrada até o momento comparando a resistência à abrasão de geopolímeros à base de metacaulim e cinza de casca de arroz, em diferentes proporções, com a aplicação de três testes acelerados diferentes. Isso enfatiza o grau de inovação deste trabalho e a importância que os resultados desta pesquisa poderão trazer para o avanço do conhecimento nesta área. Além disso, considera-se que a etapa de validação dos resultados em condições naturais de exposição também agrega um caráter de inovação a tese.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta tese visou atender o objetivo de investigar o desgaste superficial por abrasão em concretos geopoliméricos. Para tanto, foram adotados procedimentos normatizados por organizações nacionais e internacionais para todas as etapas do programa experimental (caracterização das matérias-primas, confecção e cura dos corpos de prova, execução dos ensaios e na criação dos protótipos).

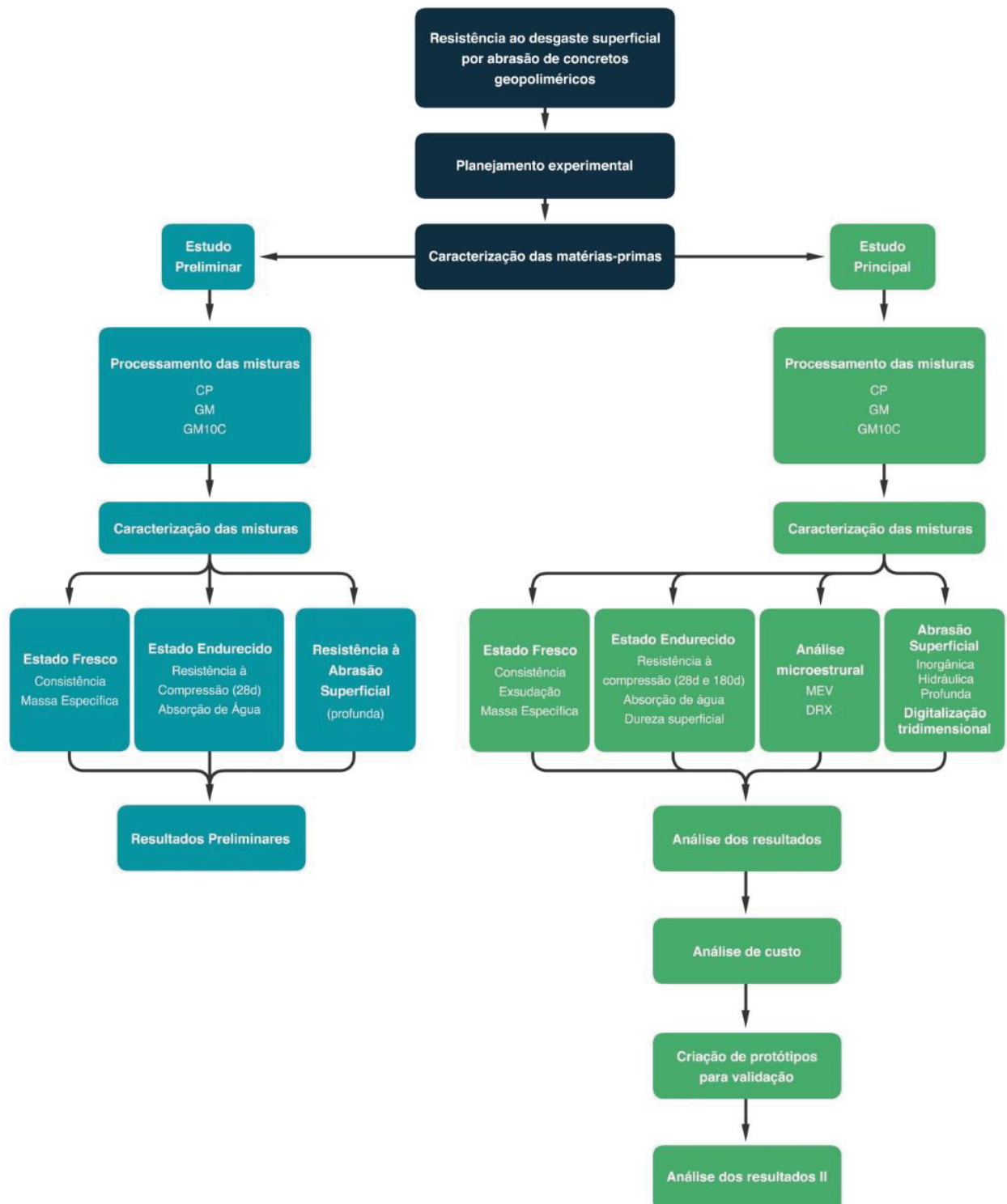
Além disso, o trabalho se concentrou na confecção de três misturas distintas de concreto: uma mistura padrão de concreto convencional, uma mistura de concreto geopolimérico à base de metacaulim e outra mistura de concreto geopolimérico com substituição parcial do metacaulim por cinza de casca de arroz. Todos esses concretos têm resistência à compressão compatíveis entre si aos 28 dias (em torno de 30 MPa), de maneira a padronizar essa variável e permitir uma comparação de materiais sujeitos a uma mesma aplicação.

Esta seção da tese se concentrou resumidamente nas fases de: (i) caracterização das matérias-primas; (ii) confecção das misturas e produção dos corpos de prova; (iii) execução dos ensaios físicos, mecânicos e de abrasão; e (iv) criação de placas de concreto para validação da pesquisa em campo (condições naturais de exposição).

Por isso, o programa experimental foi concentrado, primeiramente, no estudo preliminar, composto pela definição do traço com a confecção de testes piloto para definir as misturas de concreto e testar a resistência à compressão e um método de resistência à abrasão superficial. A partir daí foi realizado o estudo experimental principal, composto de todos os ensaios correspondentes da pesquisa.

A Figura 26 apresenta o fluxograma do programa experimental adotado na pesquisa.

FIGURA 26: FLUXOGRAMA RESUMIDO DA PESQUISA



FONTE: o autor (2022).

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa estão detalhados nas subseções a seguir.

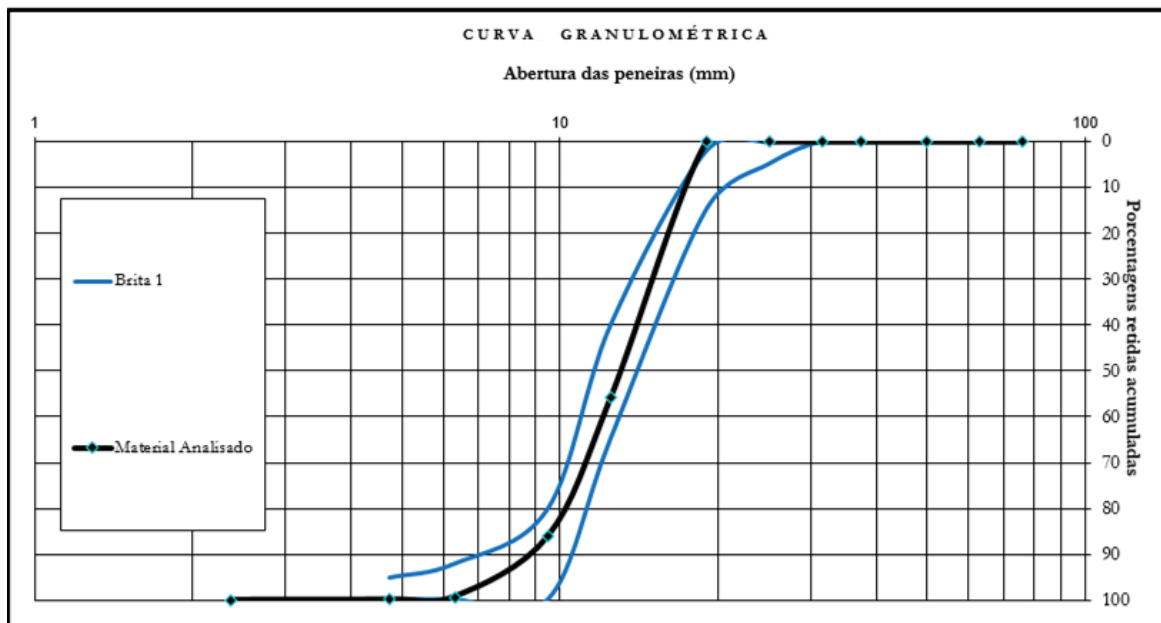
4.1.1 Agregados

a. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi brita de origem granítica. O material foi preparado a fim de que não contivesse impurezas, e que permanecesse seco para a sua utilização. A escolha da origem granítica foi embasada na disponibilidade de material na região do Vale do Itajaí e o tamanho máximo do agregado foi escolhido com base em estudos de resistência à abrasão de concretos (SILVA, 2015; WITZKE, 2018)

Os resultados encontrados para o módulo de finura (6,86), dimensão máxima (19 mm), massa específica aparente ($2,53 \text{ g/cm}^3$), massa unitária (1310 kg/m^3) e a massa específica do agregado seco ($2,60 \text{ g/cm}^3$) são parecidos com os encontrados na Tabela 8, descrita na revisão de literatura desta tese. A determinação da composição granulométrica do agregado graúdo está listada na Figura 27.

FIGURA 27: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO



FONTE: o autor (2022).

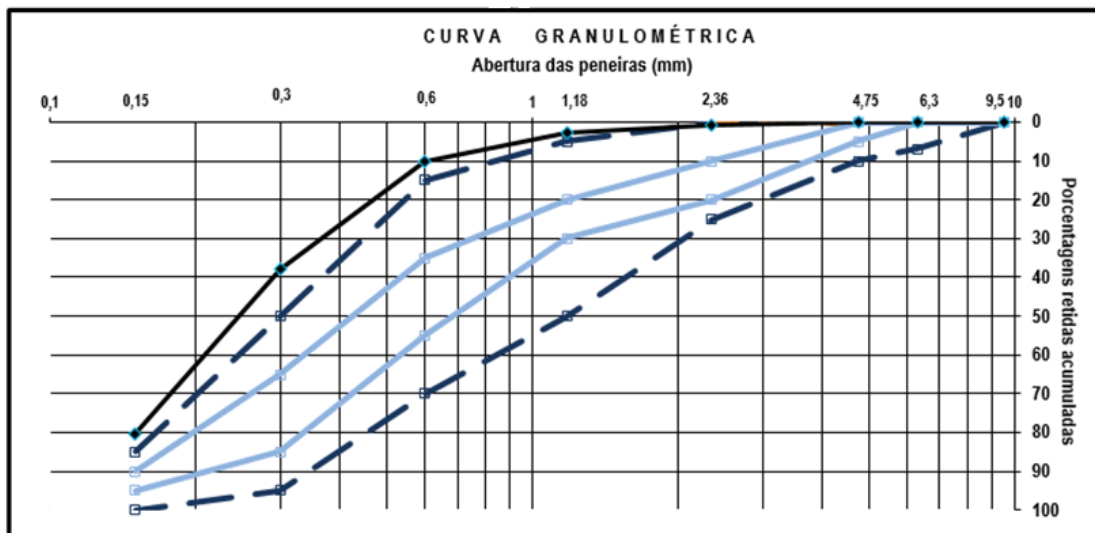
Os dados da Figura 27 mostram que o agregado utilizado está majoritariamente de acordo com o estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009a). O agregado graúdo também passou por um ensaio de abrasão Los Angeles (ABNT, 2001), que constatou um desgaste por abrasão de 27,44%, que vai ao encontro do resultado encontrado na pesquisa de Pacheco *et al.* (2002).

b. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia média originária da região do Vale do Itajaí - SC. O material foi preparado a fim de que não contivesse impureza e permanecesse seco para a sua utilização.

Além disso, o módulo de finura do agregado corresponde a 1,32, a massa específica do agregado seco foi de 2,34 g/cm³, a massa unitária foi de 1580 kg/m³ e o DMC de 2,4 mm. Os valores da distribuição granulométrica do agregado miúdo estão apresentados na Figura 28.

FIGURA 28: CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO



FONTE: o autor (2022).

A Figura 28 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009a).

4.1.2 Cimento Portland

Para a confecção do concreto convencional, o cimento Portland utilizado foi do tipo CP II-F 40, que possui entre 75 e 89% de clínquer e sulfato de cálcio e entre 11 e 25% de material carbonático suplementar (ABNT, 2018). O cimento foi escolhido por não conter nenhuma adição pozolânica ou de escória de alto forno que pudesse influenciar no resultado das propriedades analisadas. A caracterização química e física do cimento é apresentada na Tabela 11 e foram fornecidas pelo fabricante.

TABELA 11: CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E MECANICA DO CIMENTO PORTLAND CP II-F 40

Propriedade	Unidade	CP II- F 40	NBR 16697 (2018)
SiO ₂	%	17,50	
Al ₂ O ₃	%	4,10	
Fe ₂ O ₃	%	2,90	
CaO	%	58	
MgO	%	5,60	
SO ₃	%	2,50	≤ 4,5
K ₂ O	%	0,86	
Na ₂ O	%	0,20	
Cl	%	-	
CO ₂	%	5,90	≤ 11,5
Cal livre	%	0,70	
Perda ao fogo	%	7,40	≤ 12,5
Resíduo insolúvel	%	2,50	≤ 7,5
Tempo de pega – inicial	min	262	≥ 60,0
Tempo de pega – final	min	324	≤ 600,0
Massa específica	g/cm ³	3,09	-
Resistência à compressão (3 dias)	MPa	37	≥ 15
Resistência à compressão (7 dias)	MPa	42	≥ 25
Resistência à compressão (28dias)	MPa	48	≥ 40
Finura Blaine	cm ² /g	4807	≥ 2800
Silicato tricálcico	%	51,96	
Silicato bicálcico	%	8,61	
Aluminato tricálcico	%	2,88	
Ferro-aluminato tetracálcico	%	8,70	

FONTE: o fabricante (2022).

A Tabela 11 apresenta, na última coluna, as exigências previstas pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Dessa forma, é possível concluir que as exigências estabelecidas por norma são atendidas pelo cimento utilizado.

4.1.3 Metacaulim

O metacaulim utilizado na pesquisa foi obtido em empresa com sede em Jundiaí – SP. A localização geográfica da jazida do material se localiza em Ijaci – MG. A Figura 29 mostra uma amostra do metacaulim.

FIGURA 29: AMOSTRA DE METACAUULIM



FONTE: o autor (2022).

A análise química do metacaulim está representada na Tabela 12 e foi fornecida pelo fabricante.

TABELA 12: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METACAUULIM

Elemento	Conteúdo (%)
SiO ₂	58,7
Al ₂ O ₃	33,6
Fe ₂ O ₃	1,6
TiO ₂	1,1
CaO	0,3
MgO	0,3
K ₂ O	1,4
Na ₂ O	0,2
SO ₃	0,2
Perda ao fogo	2,6

FONTE: o fabricante (2022).

Conforme a Tabela 12, a composição química do metacaulim atende aos limites estabelecidos pela NBR 15894-1, (ABNT, 2010), que trata dos requisitos para uso do metacaulim em concretos e que prevê quantidades inferiores a 1,5% de (CaO + MgO), inferior a 0,5% de Na₂O e inferior a 1,0% de SO₃. Além disso, o

metacaulim tem 58,7% de SiO_2 e 33,6% de Al_2O_3 , sendo que o intervalo admitido pela norma é de 44 a 65% e 32% e 46%, respectivamente.

A Tabela 13 apresenta as características físicas do metacaulim, que foram fornecidas pelo fabricante.

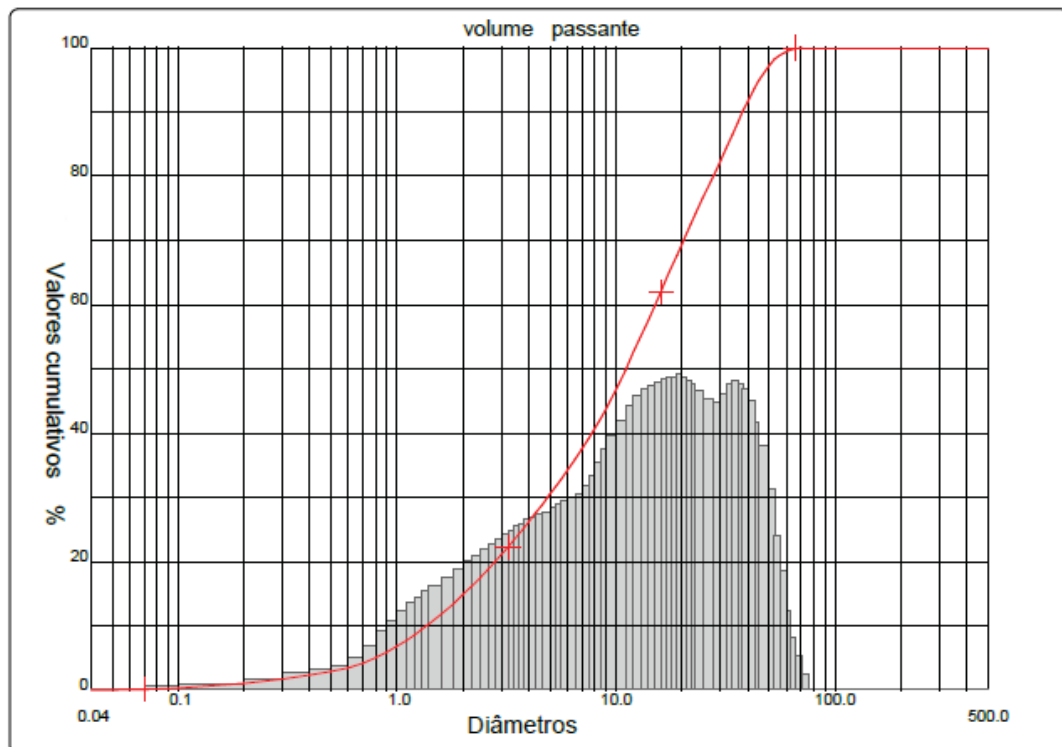
TABELA 13: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO METACAULIM

Propriedade física	Resultado
Finura (<#325 - $44\mu\text{m}$)	5,9%
Área específica (BET, cm^2/g)	205.000
Massa específica (kg/dm^3)	2,53
Massa unitária (kg/dm^3)	0,60
Atividade pozolânica (7 dias)	118%

FONTE: o fabricante (2022).

A Figura 30 apresenta a curva granulométrica de uma amostra do metacaulim usado na pesquisa, realizada pelo Laboratório de Cerâmica e Construção Civil do SENAI (Criciúma – SC), por meio de um ensaio de granulometria a laser.

FIGURA 30: CURVA GRANULOMÉTRICA DO METACAULIM



FONTE: o autor (2022).

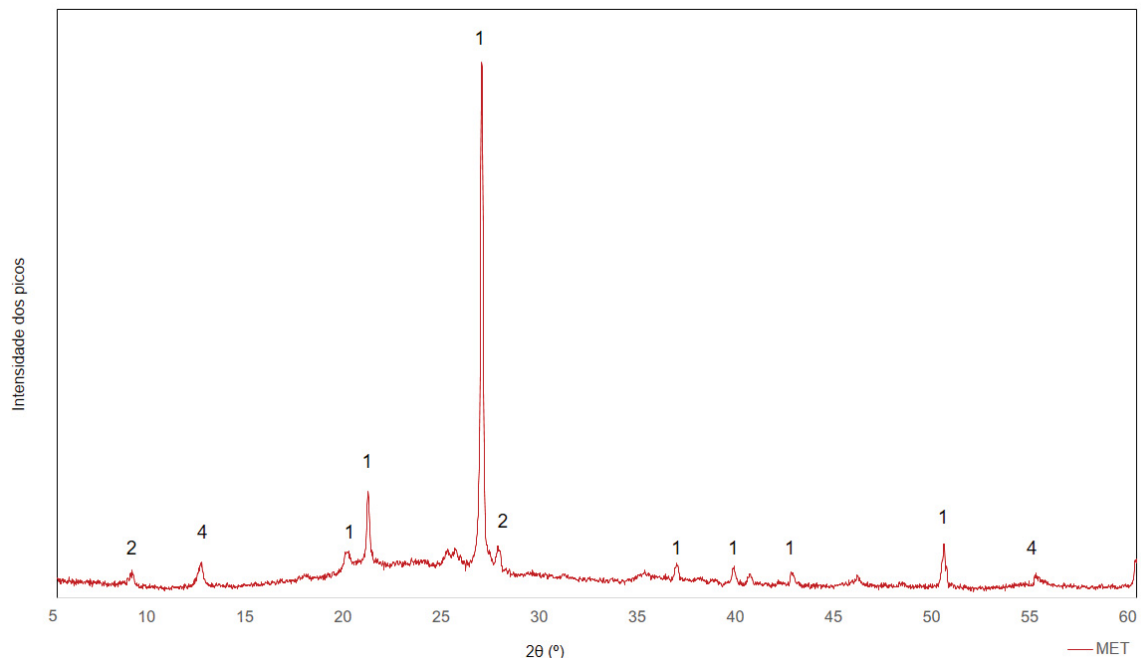
A Figura 30 ilustra que a amostra de metacaulim possui 10% das partículas menores que $1,37 \mu\text{m}$, 50% das partículas com tamanho inferior a $11,09 \mu\text{m}$, 90% das partículas menores que $37,92 \mu\text{m}$ e 100% das partículas com tamanho inferior a $71 \mu\text{m}$.

A amostra, portanto, atende à norma NBR 15894-1 (ABNT, 2010) no que diz respeito a finura, com no máximo 10% do material passante na peneira #325, melhorando, dessa forma, a dissolução e aumentando a produtividade do geopolímero. A área específica exigida pela norma (> 150.000) também é atendida pelo material (Tabela 13).

No que diz respeito a atividade pozolânica, a amostra ensaiada atende aos requisitos impostos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), apresentando índice de desempenho de 118%, superior ao exigido pela norma ($>90\%$), classificando o material como classe N.

Uma amostra de metacaulim passou por um ensaio de difração de raios x (DRX), conforme Figura 31.

FIGURA 31: DIFRATOGRAMA DO METACAILIM



Obs.: 1-Quartzo; 2-Muscovita; 4-Caulinita. FONTE: o autor (2022).

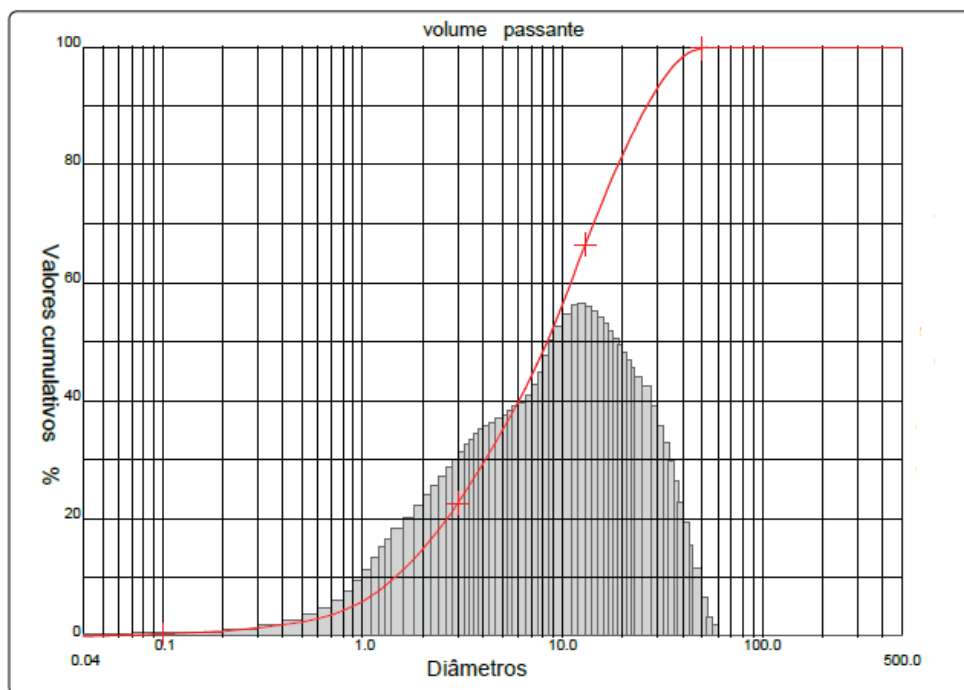
A Figura 31 mostra as características de metacaulins com um discreto e típico halo amorfo. A banda larga entre 18 e $38^\circ 2\theta$ demonstra a presença de material com ordenamento atômico de curto alcance. A presença do metacaulim como

aluminossilicato amorfo, na mistura geopolimérica, é de extrema importância devido à elevada taxa de dissolução destes no ambiente altamente alcalino (AZEVEDO *et al.*, 2018). Há a presença de cristobalita ou quartzo, além de menor quantidade de picos de caulinita e cristobalita.

4.1.4 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz teve sua granulometria mensurada por um ensaio a laser. A Figura 32 apresenta a curva granulométrica do material. O ensaio foi realizado pelo Laboratório de Cerâmica e Construção Civil do SENAI (Criciúma – SC), por meio de um ensaio de granulometria a laser.

FIGURA 32: CURVA GRANULOMÉTRICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ



FONTE: o autor (2022).

A Figura 32 mostra que a cinza de casca de arroz possui 10% das partículas com tamanho inferior a 1,45 µm, 50% das partículas com tamanho inferior a 8,40 µm, 90% das partículas menores que 26,58 µm e todas as partículas com tamanho inferior a 56 µm. Nehdi *et al.* (2003) em seu estudo, mostraram que as partículas do material deverão ter tamanho inferior a 45 µm para participar ativamente da reação pozolânica. A análise química da cinza de casca de arroz foi realizada por meio de

um ensaio de fluorescência de raios x foi no Laboratório de Cerâmica e Construção Civil do SENAI (Criciúma – SC) e está apresentada na Tabela 14.

TABELA 14: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

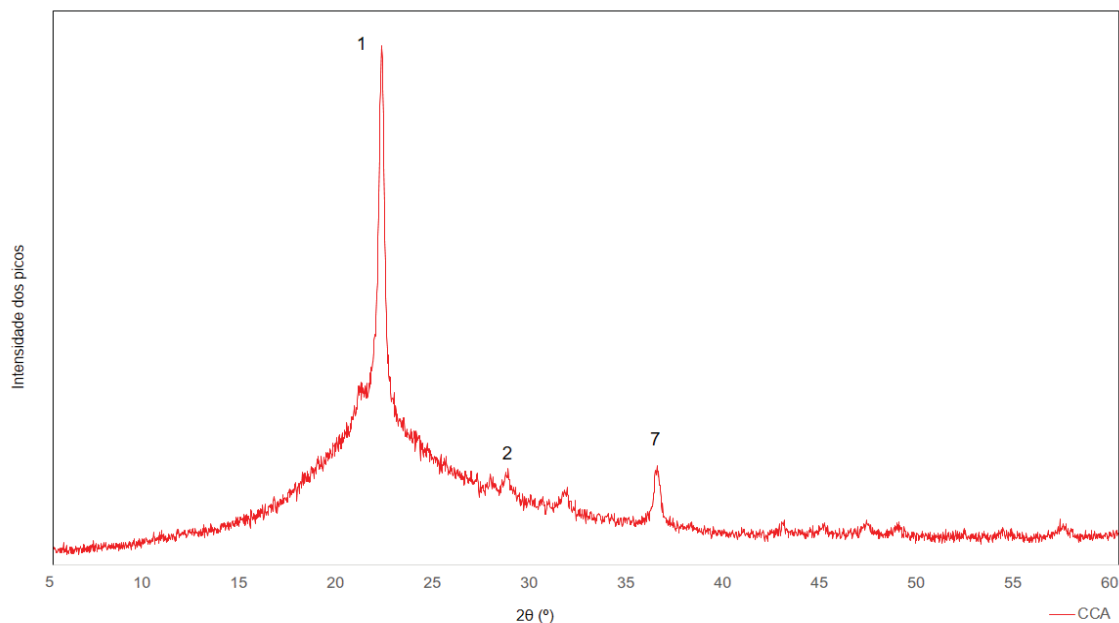
Elemento	Conteúdo (%)
SiO ₂	92,96
Al ₂ O ₃	0,105
Fe ₂ O ₃	< 0,05
TiO ₂	< 0,05
CaO	0,53
MgO	0,27
K ₂ O	1,78
Na ₂ O	< 0,05
P ₂ O ₅	0,314
MnO	0,315
SO ₃	< 0,05
Perda ao fogo	3,67

FONTE: o autor (2022).

De acordo com a Tabela 14, a composição química da cinza de casca de arroz é composta majoritariamente por SiO₂ (92,96%), e também por 1,78% de K₂O. O material se enquadrou ao estabelecido pela norma que trata dos materiais pozolânicos, NBR 12653 (ABNT, 2014), quanto à proporção de (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) ser superior a 70% e menos de 4% de SO₃, que se apresentou com valor insignificante.

Uma amostra de cinza de casca de arroz passou por um ensaio de difração de raios x (DRX), conforme Figura 33.

FIGURA 33: DIFRATOGRAMA DA CINZA DE CASCA DE ARROZ



Obs.: 1-Quartzo; 2-Muscovita; 7-Hematita. FONTE: o autor (2022).

A Figura 33 mostra o pico definido no espectro, que ocorreu entre os ângulos de 20° a 25°, o pico apresenta a presença sílica cristalina sob forma de quartzo ou cristobalita (SiO_2), e que caracteriza a amostra como uma estrutura parcialmente cristalina. Em um procedimento de queima da cinza de casca de arroz, quando a temperatura de 800 °C é atingida, se chega a um material com a estrutura da amostra testada (CORDEIRO, 2006). Além disso há a presença de muscovita e hematita, provavelmente reações entre os componentes químicos K, Al, Si, O e F, e F e O, respectivamente.

4.1.5 Ativador alcalino: Silicato de sódio alcalino

O silicato de sódio alcalino ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) utilizado é composto por um líquido viscoso (Figura 32), com 47,03% de sólidos, umidade 52,97%, densidade de 2,6 g/cm^3 , massa molar de 122,06 g/mol , pH igual a 12, com a presença de 14,77% de Na_2O e 37,26% de SiO_2 e relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,52.

FIGURA 34: AMOSTRA DE SILICATO DE SÓDIO ALCANINO

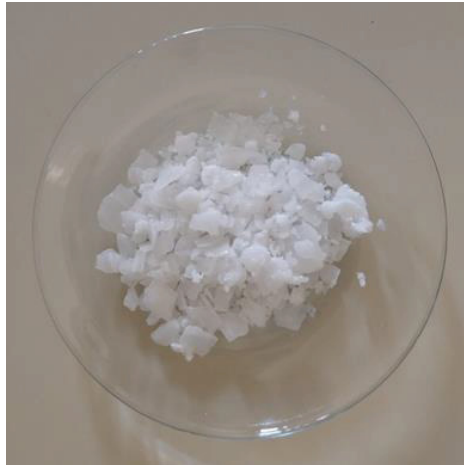


FONTE: o autor (2022).

4.1.6 Ativador alcalino: Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) utilizado foi um material sólido branco (Figura 33), em escamas, hidroscópico, solúvel em água, com pH igual a 14, densidade aparente de 2,13 kg/dm^3 , massa molar de 39,99 g/mol , e grau de pureza de 99 %.

FIGURA 35: AMOSTRA DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO



FONTE: o autor (2022).

4.1.7 Água

A água utilizada na pesquisa foi proveniente da rede de abastecimento público da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) da cidade de Ibirama – SC.

4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental da pesquisa está ilustrado na Figura 26. Houve, primeiramente, a caracterização das matérias-primas (item 3.1) e, após, a elaboração do estudo preliminar e estudo principal.

4.2.1 Estudo preliminar

O estudo preliminar foi composto de três misturas de concreto. A primeira delas é uma mistura de concreto geopolimérico com metacaulim (GM), que teve a dosagem do cimento geopolimérico, proporção entre ativadores e precursores e razões molares baseadas no artigo de Pelisser *et al.* (2018). Tal estudo foi escolhido pelo fato de ser um trabalho nacional e utilizar materiais similares ao desta pesquisa, como o metacaulim e os ativadores alcalinos. Além disso, a proporção ideal entre os ativadores e os precursores permitiu atingir resistências mecânicas adequadas em seus concretos e que permitissem a utilização do material em diversas aplicações.

A partir desta mistura inicial, foi elaborada uma mistura de concreto geopolimérico, que teve substituição parcial de 10 % de metacaulim pela cinza de casca de arroz (GM10C), mantendo-se constante as quantidades dos outros componentes. Esse teor (10%) foi escolhido com base no artigo de Shatat (2016), Zhu *et al.* (2021) e de Bie *et al.* (2015), que mostraram que a adição de 10% de cinza de casca de arroz se apresentou ideal, com melhores resistências à compressão em comparação com as amostras referências com cimento Portland. Os trabalhos mostraram, também, que a utilização de teores de 20% ou mais de cinza de casca de arroz não obtiveram resultados aceitáveis de resistência mecânica, o que diminuiria as possibilidades de aplicação do concreto produzido.

Além disso, foi confeccionada uma terceira amostra de concreto, composta de concreto convencional com cimento Portland (CP), com a finalidade de comparação dos resultados obtidos nas outras duas misturas geopoliméricas. Para a confecção dessa terceira mistura foram adotados parâmetros de dosagem trazidos no artigo de Buest, Silva e Campitelli (2005) e no método da ABCP.

Procurou-se confeccionar um concreto convencional que tivesse as mesmas características do concreto padrão geopolimérico, principalmente no que tange à resistência mecânica à compressão (30 MPa) e trabalhabilidade (100 mm), para poder comparar de forma mais próxima os resultados e, também, para que o concreto produzido tivesse o mínimo de limitações em sua aplicabilidade.

Dessa forma, estabeleceram-se as misturas para execução na pesquisa, cada qual com seu teor água/cimento ou água/metacaulim ou ainda água/ (metacaulim + cinza de casca de arroz) (A/C), agregado/aglomerante (AGR/C) e teor de substituição de metacaulim por cinza de casca de arroz (TS), conforme a Tabela 15.

TABELA 15: MISTURAS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Mistura	A/C	AGR/C	TS (%)	Teor de Argamassa (%)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Na ₂ O	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	Razão molar (Na ₂ SiO ₃ /NaOH)
CP	0,40	3,01	-	53,98	-	-	-	-
GM	0,49	3,06	-	62,57	3,95	5,02	0,78	1,60
GM10C	0,49	3,06	10	62,57	4,58	5,25	0,87	1,60

FONTE: o autor (2022).

A concentração molar de NaOH foi de 12 molar. A Tabela 16 mostra a quantidade de material que foi utilizado na confecção das três misturas de concreto do estudo.

TABELA 16: QUANTIDADE DE MATERIAL NECESSARIA PARA PRODUÇÃO DE 1m³ DAS MISTURAS DO ESTUDO

Material	Constituintes	Quantidade para 1m³	Unidade
CP	Água	218,93	L
	Areia média natural	632,67	kg
	Brita n.1	1000,56	kg
	Cimento CP II-E	541,91	kg
GM	Água	70,17	L
	Areia média natural	767,62	kg
	Brita n.1	901,25	kg
	Hidróxido de sódio	35,56	kg
	Metacaulim	333,75	kg
	Silicato de sódio alcalino	369,37	kg
GM10C	Água	70,17	L
	Areia média natural	767,62	kg
	Brita n.1	901,25	kg
	Cinza de casca de arroz	33,37	kg
	Hidróxido de sódio	35,56	kg
	Metacaulim	300,37	kg
	Silicato de sódio alcalino	369,37	kg

FONTE: o autor (2022).

A parte do programa experimental que é composta dos testes iniciais fez o processamento das misturas de forma a respeitar as normas vigentes e se concentrou na caracterização das amostras em alguns ensaios.

No estado fresco, os concretos foram caracterizados pela sua consistência e massa específica. No estado endurecido, as amostras foram testadas quanto a sua resistência à compressão, aos 28 dias, bem como absorção de água e dureza superficial. Foi executado, ainda, um ensaio acelerado de resistência ao desgaste superficial por abrasão profunda. Foi escolhido apenas um ensaio acelerado de abrasão nos testes iniciais (e não três testes, como executado no estudo principal), para se ter uma experiência inicial com os resultados de um ensaio de abrasão.

Os métodos de execução desses ensaios foram os mesmos aplicados para o estudo principal da tese, e portanto, são descritos no próximo item.

4.2.2 Estudo principal

A elaboração do estudo principal foi composta da descrição sobre a fabricação e o processamento das misturas e apresentação dos métodos de caracterização das mesmas por ensaios no estado fresco, estado endurecido, análise microestrutural e dos ensaios acelerados de abrasão superficial. Ao final, foi apresentada a maneira em que os resultados obtidos nos ensaios de caracterização foram analisados, bem como descrição da análise econômica e de aplicabilidade, informações sobre a criação das placas de concreto para validação da pesquisa e análise final das placas.

As quatro misturas de concreto, apresentadas anteriormente na Tabela 15, foram executadas no estudo principal. O procedimento de determinação das proporções das misturas foi descrito no item anterior. A seguir, são detalhados os procedimentos de confecção dos concretos.

a. Concreto convencional

A mistura de concreto convencional foi elaborada em conformidade com a NBR 12655 (ABNT, 2015a). A betoneira utilizada na pesquisa tem capacidade para 120 litros. Após o umedecimento da betoneira, foi adicionado 1/3 da água da mistura, em seguida o agregado graúdo, o cimento Portland, o agregado miúdo e 2/3 da água, nessa ordem.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Os moldes foram preenchidos até a metade com concreto. Após o preenchimento das formas com o concreto no estado fresco, os corpos de prova receberam 12 golpes com um bastão para adensamento e depois foram preenchidos até o topo, repetindo o procedimento, a fim de remover possíveis bolhas de ar da massa. Os concretos permaneceram nesses moldes por um período de 24 horas.

Os corpos de prova foram desmoldados e colocados em um tanque, sob cura submersa, a 25 °C, permanecendo por 28 dias ou até a sua utilização para os ensaios.

b. Concreto geopolimérico

A fabricação dos concretos geopoliméricos se iniciou na preparação dos ativadores alcalinos. A água de amassamento foi misturada ao hidróxido de sódio e misturada até a sua completa dissolução. Imediatamente após este processo, foi adicionado o silicato de sódio alcalino. Após, a solução foi mantida em repouso por cerca de 24 horas.

Depois disso, a solução dos ativadores foi misturada mecanicamente ao metacaulim, formando uma pasta de coloração marrom escura. Após, ocorreu a mistura desta pasta com o agregado miúdo e, depois, com o agregado graúdo. Para a fabricação e a mistura dos componentes do concreto geopolimérico optou-se em utilizar um misturador mecânico de argamassa.

Os corpos de prova dos concretos geopoliméricos foram desmoldados e colocados sob cura ambiente em um local com pouca variação de umidade (em torno de 60 %) e temperatura (em torno de 27 °C), permanecendo assim por 28 dias ou até a sua utilização nos ensaios. A Figura 36 mostra os corpos de provas das misturas geopoliméricas sendo curados ao ar, em temperatura ambiente.

FIGURA 36: CURA AMBIENTE DE CORPOS DE PROVA GEOPOLIMÉRICOS



FONTE: o autor (2021).

Cabe salientar que os métodos de cura da mistura de concreto convencional e das misturas de concretos geopoliméricos são diferentes, pois a literatura (WITZKE, 2018; SILVA, 2015) mostra que ao se utilizar tais métodos de cura se adquirem melhores propriedades finais, tais como resistência à compressão e abrasão. Além do mais, o concreto convencional curado de forma submersa favorece a hidratação do cimento Portland. Por outro lado o concreto geopolimérico e sua reação de polimerização são beneficiados pela cura térmica (LIVI, 2013; CESARI, 2015) porém, na prática, a utilização da cura térmica torna, muitas vezes, sua aplicação inviável na construção civil.

Mesmo que a literatura tenha apresentado estudos que mostraram a eficiência da cura térmica em concretos geopoliméricos, preferiu-se não utilizar cura térmica nas amostras de concreto geopolimérico, tendo em vista que, na prática, limitaria o número de locais em que o material poderia ser utilizado ou fabricado, além disso, várias pesquisas também utilizaram cura ambiente para geopolímeros e obtiveram resultados satisfatórios (SCHWAAB, 2018; BRITO, 2018; PELISSER *et al.*, 2018).

c. Considerações gerais

A Tabela 17 relaciona os ensaios realizados na pesquisa com a quantidade de corpos de prova (CPs) confeccionados por ensaio. Para os ensaios de consistência, massa específica, esclerometria e de análise microestrutural não foram confeccionados corpos de prova adicionais e, por isso, não estão listados na tabela.

TABELA 17: RELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DA PESQUISA E OS CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS

Ensaio	CPs por mistura	Dimensão dos CPs (cm)	Total de CPs
Resistência à compressão (RC28)	7	10 x 20	21
Resistência à compressão (RC180)	3	10 x 20	9
Resistência à tração por compressão diametral	3	10 x 20	9
Absorção de água	3	10 x 20	9
Abrasão superficial inorgânica	3	7 x 7 x 3	9
Abrasão superficial profunda	4	10 x 20 x 6	12
Abrasão superficial hidráulica	2	10 x 20	6
Placas de validação (protótipos)	1	40 x 40 x 5	3

Obs.: Não foram confeccionados corpos de prova específicos para a exsudação e dureza superficial.
 FONTE: o autor (2022).

4.2.3 Caracterização das misturas

Conforme apresentado no fluxograma da pesquisa (Figura 26), os concretos foram caracterizados no seu estado fresco e endurecido, além dos ensaios de resistência à abrasão superficial e microestruturais.

a. Concreto fresco

No seu estado fresco, o concreto foi caracterizado pelo seu índice de consistência (*slump test*), massa específica e exsudação.

Após a mistura dos elementos na betoneira ou misturador foi realizado o ensaio do teste do abatimento do tronco de cone (*slump test*), a fim de mensurar a consistência do concreto. A metodologia adotada foi a NBR NM 67 (ABNT, 1998). O procedimento para cálculo da massa específica é estabelecido pela NBR 9833 (ABNT, 2009b).

A determinação da exsudação dos concretos ocorreu segundo procedimentos da NBR 15558 (2008), no corpo de prova do ensaio de desgaste natural, no qual logo após a moldagem, em ambiente com umidade (em torno de 60 %) e temperatura (23 °C) controladas, uma amostra de concreto foi colocada em um

recipiente e foi retirado com uma pipeta a água excedente acumulada na superfície do concreto em intervalos de 10 minutos nos primeiros 40 minutos e, depois desse período, em intervalos de 30 minutos. A coleta ocorreu até quando não houvesse mais água exsudada na superfície. Após esse procedimento, a exsudação foi calculada, conforme estabelecido pela norma citada.

b. Concreto endurecido

Para o concreto endurecido, foram mensuradas a resistência à compressão (28 e 180 dias), dureza superficial por esclerometria e absorção de água, aos 28 dias. Para os ensaios de resistência mecânica, os corpos de prova foram retificados antes da sua utilização.

A resistência à compressão dos concretos foi realizada de acordo com a NBR 5739 (2018) e a resistência à tração na compressão diametral foi mensurada de acordo com a NBR 7222 (2011). O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica elétrica automática, modelo INSTRON PC200I conectada a um computador, instalada no Laboratório da TESTECON Engenharia LTDA, em Blumenau (SC).

O ensaio de dureza superficial por esclerometria foi realizado de acordo com a NBR 7584 (2012b), com a aplicação de 16 impactos na área de ensaio em cada corpo de prova testado, sendo testado um corpo de prova de cada mistura. Como se trata de um ensaio não-destrutivo, durante a execução do programa experimental, utilizou-se os protótipos de concreto, no local do assentamento, para a realização do ensaio de esclerometria.

Após a aplicação dos 16 impactos sobre o corpo de prova, foi calculada a média aritmética dos valores obtidos e, excluiu-se qualquer valor que tenha ultrapassado a média em 10%, para mais ou para menos. Esse procedimento foi adotado o número de vezes necessárias até que todos os valores utilizados tenham no máximo 10% de variação em relação à média aritmética, conforme a NBR 7584 (ABNT, 2012b). O resultado final foi um índice de esclerometria.

O procedimento para mensurar a absorção de água por imersão ocorreu de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009c) afim de estudar a porosidade da matriz.

c. Caracterização microestrutural

A análise microestrutural das amostras de concreto foi composta de uma técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o intuito de verificar a morfologia dos concretos, bem como fissuração, porosidade ou estado da camada superficial abrasionada. Para realização deste ensaio foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura modelo TESCAN VEGA3 LMU, do laboratório de microscopia eletrônica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), ou ainda um microscópio óptico de bancada, modelo BIOPTIKA L50T, com aproximação de até 50x. As amostras de concreto foram retiradas após 28 dias de cura, com secagem em estufa a 40 °C por 24 horas antes de serem utilizadas.

Foi realizado também o ensaio de difração de raios X (DRX), no laboratório da UTFPR de Pato Branco, com o intuito de verificar as fases cristalinas das diferentes amostras. Para este ensaio as amostras, após 28 dias de cura, foram secas a 40 °C em estufa por 24 horas. Após esse tempo, as amostras foram trituradas por pistilo cerâmico e foi selecionado o pó passante na peneira 0,075 mm. Utilizou-se um difratômetro de raios X da marca Panalytical, modelo EMPYREAN, com intervalo de varredura de 5° até 60° (2 θ), passo de 0,02°, tempo de passo igual a 10 segundos, com comprimento de onda de 1,54 Å.

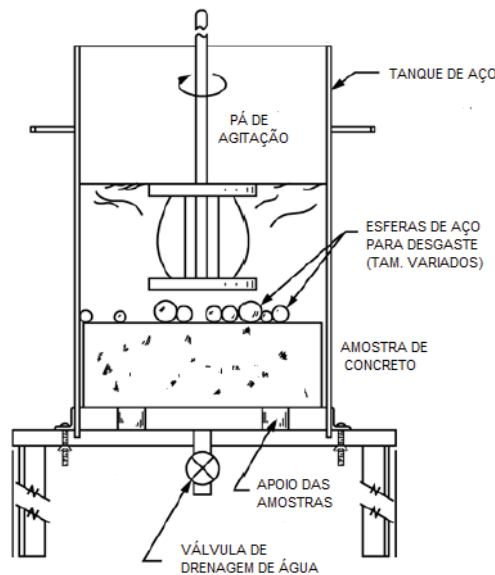
d. Resistência ao desgaste por abrasão superficial

As amostras de concretos produzidas tiveram suas resistências ao desgaste por abrasão medidas por três métodos diferentes (inorgânica, profunda e hidráulica). Esses métodos foram escolhidos, pois apresentam técnicas definidas e distintas entre si para determinação da resistência à abrasão. Além disso, a disponibilidade da execução de tais ensaios, por parte dos laboratórios existentes em nosso país, foi outro quesito levado em consideração. Os testes foram realizados após o período de 28 dias de cura do concreto dos corpos de prova, que foram moldados no tamanho necessário para execução de cada ensaio.

Os corpos de prova submetidos aos ensaios de desgaste por abrasão tiveram suas superfícies digitalizadas, com um escâner tridimensional, antes e depois dos ensaios, a fim de compreender melhor o efeito de cada normativa no corpo de prova. Para tanto, foi utilizado um scanner tridimensional com precisão de 0,25 μ m.

A resistência à abrasão hidráulica, segundo a ASTM C 1138 (2019a), foi determinada por um equipamento composto de um motor elétrico, pá de agitação e um recipiente de aço. 10, 25 e 35 esferas metálicas de 25, 20 e 12,5 mm de diâmetro, respectivamente, são responsáveis pelo desgaste abrasivo em um corpo de prova cilíndrico (10 x 20) cm submerso em água. O corpo de prova é pesado antes de iniciar o procedimento, e depois, tem seu peso medido, ao ar e na água, por períodos de 24 horas, até completar 72 horas, tempo de duração do ensaio. A Figura 37 esquematiza o ensaio de abrasão hidráulica. O resultado final é dado em volume de abrasão (m^3) ou profundidade média de abrasão (mm).

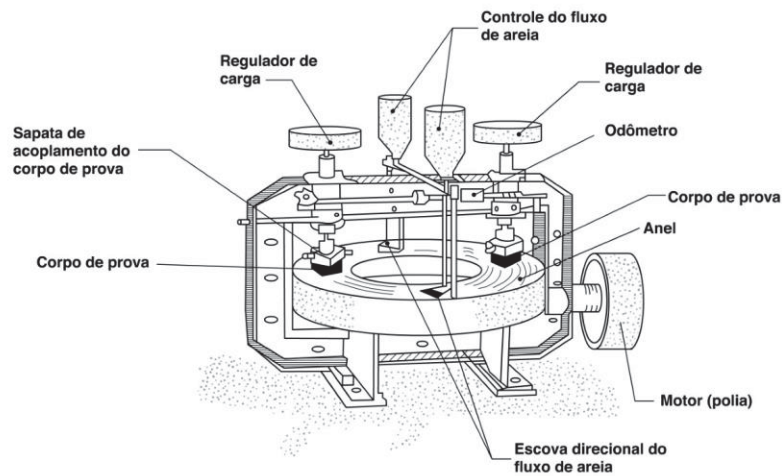
FIGURA 37: ESQUEMA DE ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA



FONTE: ASTM C 1138 (ASTM, 2019a).

O método determinado pela NBR 12042 (2012a) (abrasão inorgânica) consiste na simulação de um trajeto de 1000 m, com dois corpos de prova de (70 x 70) mm, simultaneamente. Cada corpo de prova gira em torno do seu próprio eixo, além de um trajeto circular no abrasímetro, similar aos movimentos de rotação e translação. O material abrasivo utilizado é a areia seca n. 50 (0,3 mm). O resultado é mensurado pela média da diferença de altura em quatro pontos distintos, no início, aos 500 e 1000 m, respectivamente. A Figura 38 mostra um exemplifica o ensaio de abrasão inorgânica.

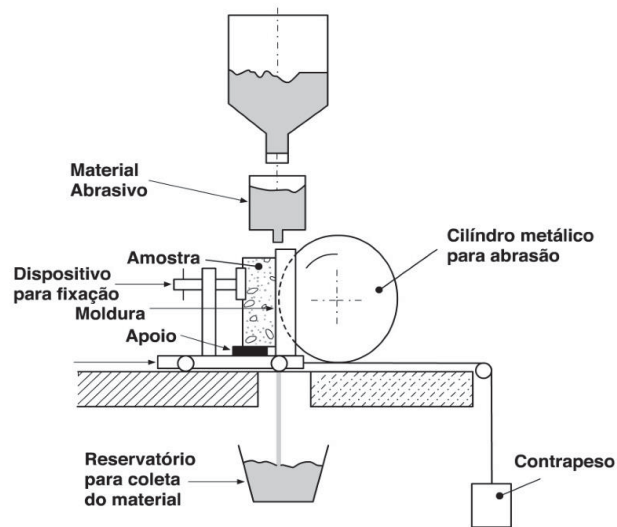
FIGURA 38: ESQUEMA DE ENSAIO DE ABRASÃO INORGÂNICA



FONTE: NBR 12042 (ABNT, 2012a).

A terceira técnica aplicada nesta tese foi o método de abrasão profunda, determinado pela NBR 9781 (2013). Esse método é direcionado a peças de concreto para pavimentação, no qual os corpos de prova de tamanho (10 x 20 x 6) cm, previamente umedecidos, são expostos a 75 rotações de um disco de aço de 200 mm de diâmetro e 70 mm de espessura, por um minuto. Enquanto o material é exposto às rotações do disco, ocorre o lançamento do material abrasivo, o óxido de alumínio. Ao final, classifica-se o material, de acordo com a profundidade de desgaste, para utilização para tráfego leve (≥ 23 mm de desgaste e ≥ 35 MPa de resistência à compressão) ou tráfego pesado (até 20 mm de desgaste e ≥ 50 MPa de resistência à compressão). São ensaiados 4 corpos de prova, sendo que para obtenção do resultado final, o pior resultado é descartado. O resultado final é a largura de abertura de abrasão, proporcionada pelo cilindro metálico, em mm. A Figura 39 apresenta o ensaio de abrasão profunda.

FIGURA 39: ESQUEMA DE ENSAIO DE ABRASÃO PROFUNDA



FONTE: NBR 9781 (ABNT, 2013).

4.2.4 Análise estatística

Os resultados obtidos durante a execução dos ensaios do programa experimental foram tratados por meio de uma análise de variância (ANOVA) com significância de 5%. Caso fosse constatado que se tratavam de misturas estatisticamente diferentes, foi calculado o limite de decisão para averiguar quais das três misturas estudada fossem diferentes estatisticamente e quais não. Além disso, média, desvio padrão e coeficiente de variação foram calculados de forma a entender o comportamento dos dados. No caso de alta variabilidade ou heterogeneidade dos dados, métodos de identificação de *outliers* foram empregados (método do boxplot e resíduos). Para a análise de correlação foram utilizados os resultados de cada mistura nas propriedades correlacionadas.

Além disso, duas propriedades, resistência à abrasão profunda e dureza superficial, tiveram seus resultados pré-tratados, conforme determinado pelas normas específicas de cada análise e que já foram detalhadas juntamente com o procedimento experimental.

4.2.5 Análise de custo

A análise de custo foi elaborada levando-se em consideração o custo direto dos insumos necessários para confecção dos concretos, além do transporte de cada material até a cidade, quando necessário. O valor da água foi baseado no valor mínimo cobrado pela Companhia Catarinense de Saneamento Básico - CASAN. O preço dos outros materiais foi oriundo de pesquisa de preços de mercado.

4.2.6 Criação de protótipos de concreto para validação em campo sob condição natural de exposição

Placas de concreto foram produzidas com a finalidade de identificação do desgaste natural do concreto sob condições normais de exposição. Para tanto, foram confeccionadas três unidades, chamadas de “protótipos”, uma para cada mistura de concreto estudada. As placas de concreto têm dimensões de 40 x 40 x 6 cm. O tamanho foi escolhido por ser tipicamente utilizado em pisos de concreto permeável aplicado em passeios públicos, além de que, placas com dimensões maiores que esta poderiam apresentar dificuldades no seu transporte e instalação, por causa do seu peso.

Os três protótipos foram moldados em formas de madeira em duas camadas, no qual o concreto recebeu vários golpes com um bastão metálico ao final de cada uma delas, com a finalidade de melhorar o adensamento do material. Ao final, o concreto foi alisado com uma desempenadeira, a fim de eliminar as irregularidades nas superfícies. Optou-se por não utilizar armação metálica ou tela na confecção do material.

As peças foram assentadas sobre uma base de areia nivelada em um gramado de forma linear, de modo que o veículo que promoveu o desgaste passou por cima de todas as placas uniformemente com o pneu dianteiro e traseiro. Cada passagem de um pneu sobre o material representou um ciclo de desgaste. Conforme mostra a Figura 40.

FIGURA 40: APLICAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DE FORMA LINEAR



FONTE: O autor (2022).

Simulou-se, por meio dos ciclos de desgaste, a aplicação dos protótipos em um local com baixo tráfego de veículos, neste caso, um estacionamento empresarial. Neste estacionamento, seriam estacionados 20 veículos diariamente, que passariam por cima das placas 2x ao dia cada um (entrada e saída), 5 dias por semana (segunda à sexta-feira), durante meio ano (26 semanas), resultando em 5200 passagens. Considerando ainda, que toda passagem de veículo contaria com dois ciclos de desgaste (pneu dianteiro e pneu traseiro), totalizou 10.400 ciclos de desgaste (número total de aplicações sobre os protótipos neste estudo).

Neste caso, ainda, não foram considerados feriados e pontos facultativos, e foi proposto supostamente a aplicação dos protótipos em um local de entrada ou saída dos veículos (tendo em vista que nem todas as áreas do estacionamento sofreriam o mesmo número de ciclos de desgaste que o proposto neste estudo).

As placas foram secas sob condições naturais, fotografadas e digitalizadas tridimensionalmente e, então, aplicadas no local de utilização, conforme Figura 52. Após este período, as placas foram recolhidas, secas sob condições naturais, fotografadas e digitalizadas tridimensionalmente, com medição da profundidade do desgaste por abrasão nas áreas afetadas.

h), períodos de seca e a presença de terra e areia, como fatores de potencialização da degradação do concreto.

Por fim, os resultados dos ensaios acelerados de abrasão foram relacionados com os ensaios de abrasão das placas, por meio da comparação proporcional entre a perda de massa e profundidade de desgaste, de forma a validar as tendências de comportamentos identificadas dos materiais dos ensaios acelerados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, estão apresentados os resultados e discussões dos ensaios desta tese. Os dados estão expostos de acordo com a propriedade avaliada.

5.1 ESTADO FRESCO

A Tabela 18 mostra os resultados dos ensaios do concreto fresco, para o índice de consistência, massa específica e exsudação das amostras produzidas durante o estudo.

TABELA 18: RESULTADOS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Mistura	A/C	AGR/C	TS (%)	Índice de consistência (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Exsudação (mm)
CP	0,40	3,01	-	65	2.403	0
GM	0,49	3,06	-	210	2.295	0
GM10C	0,49	3,06	10	235	2.376	0

Obs.: TS: Teor de substituição; A/C: relação água/cimento; AGR/C: relação agregado/cimento; FONTE: o autor (2022).

a. Consistência

De acordo com a Tabela 18, o concreto convencional (CP) obteve 65 mm de consistência (*slump test*), que é menor do que as consistências das misturas geopoliméricas. Em comparação, a mistura geopolimérica de metacaulim (GM) teve a consistência aproximadamente 323% maior em relação à amostra de referência, e para a mistura geopolimérica de metacaulim com 10% de substituição por cinza de casca de arroz, essa diferença teve valor aproximado de 361%. Entre as misturas GM e GM10C houve em torno de 12% de variação.

Embora os concretos de cimento Portland e geopolimérico sejam distintos, em termos de consistência, a literatura traz algumas comparações entre os materiais. A significativa variação de valor de abatimento entre os dois tipos de concretos também foi encontrada por Asayesh *et al.* (2021), que encontrou variações entre 288% e 500% na avaliação de misturas geopoliméricas contendo escória, sílica ativa e pedra-pomes.

As partículas de metacaulim se apresentam em camadas sobrepostas, originárias de argilas caulínicas, que têm formato estratificado. Essas camadas

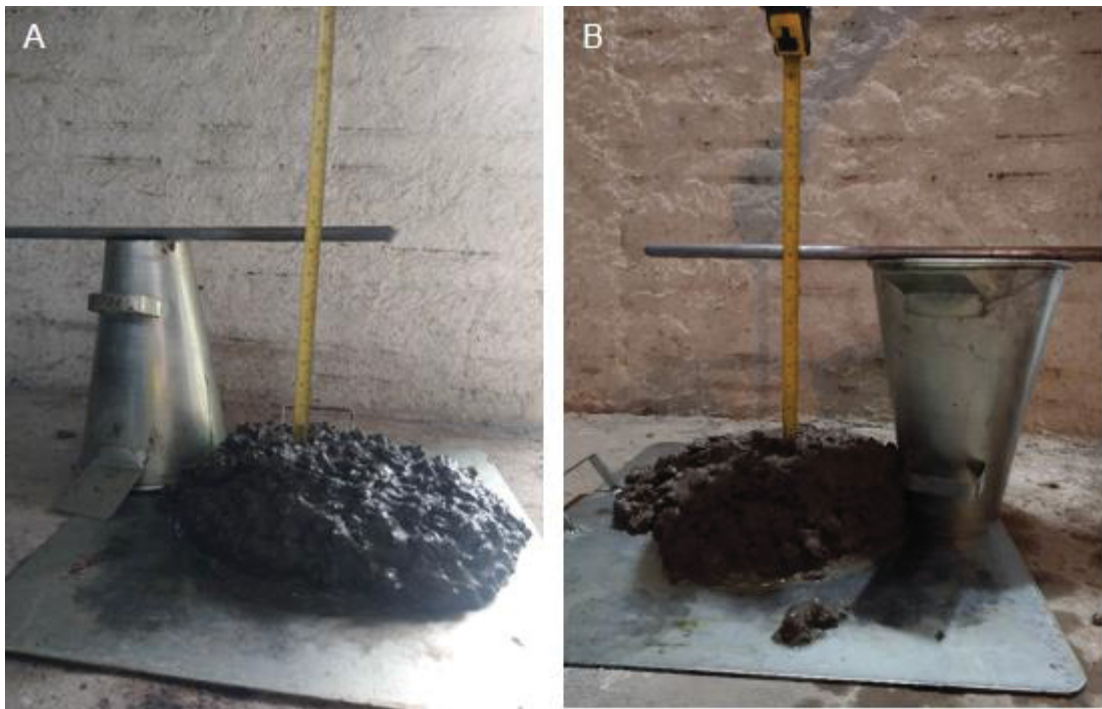
possuem fraca ligação entre elas, concedendo um efeito de deslizamento entre as partículas, aumentando a fluidez do concreto (XIE *et al.*, 2019).

Assim como o metacaulim, a cinza de casca de arroz aumentou a fluidez do concreto convencional. Givi *et al.* (2010) obtiveram aumento de 225% na consistência do concreto com a substituição de 20% de cimento Portland por cinza de casca de arroz. Os autores explicam esse resultado pelo fato de as partículas de cinza de casca de arroz possuírem estrutura porosa e, por isso, teriam o mesmo mecanismo dos aditivos incorporadores de ar, liberando mais água para a trabalhabilidade da mistura. Além disso, o empacotamento de partículas ofertado pela cinza de casca de arroz pode auxiliar na diminuição de demanda por pasta e aumento da fluidez. A baixa quantidade de carbono das cinzas pode auxiliar na redução da absorção de água por parte das partículas e, dessa forma, ocorrer a liberação de água para conferir maior fluidez da mistura (SINGH, 2021).

Alguns trabalhos estudaram a influência das matérias-primas na consistência de concretos geopoliméricos. Pouhet e Cyr (2016) afirmaram que é possível confeccionar geopolímeros com slump de 0 a 250 mm variando o teor de sólidos do traço e atingiram 230 mm de abatimento usando um teor de sólidos de 71%. Albidah *et al.* (2021) mostraram que concretos geopoliméricos com teor de agregado de 67,8% apresentaram slump de 100 mm e, assim que o teor aumentou para 71,8% e 73,8%, o índice de consistência diminuiu, para 20 mm e 30 mm, respectivamente. Em comparação, no presente trabalho dosou-se os concretos geopoliméricos com um teor de agregados de 67,35%. A relação água/sólidos também influenciou o abatimento dos concretos geopoliméricos da pesquisa de Albidah *et al.* (2021). A variação de 0,38 para 0,54 variou o abatimento de 20 mm para 180 mm, respectivamente. Para comparação, a presente tese utilizou relação água/sólidos de 0,49.

Durante a confecção das misturas geopoliméricas, pode-se perceber que o material apresentou, apesar do seu alto índice de consistência, maior viscosidade em relação ao concreto convencional de cimento Portland. Embora não tenha sido mensurada, a maior viscosidade é claramente perceptível ao se manusear o concreto geopolimérico. Tal característica é originária da natureza de seus componentes, como o silicato de sódio alcalino (NaOH) (GASPERI *et al.*; 2021). A Figura 42 mostra o ensaio de slump test das duas misturas geopoliméricas confeccionadas.

FIGURA 42: SLUMP TEST DAS AMOSTRAS GM10C (A) E GM (B)



FONTE: o autor (2022).

Oliveira *et al.* (2018) estudaram a relação entre trabalhabilidade e viscosidade de argamassas geopoliméricas com metacaulim e constataram que, o aumento da relação ativador/precursor, de 0,25 para 0,40, gerou aumento no índice de consistência de argamassas, bem como aumentou a sua viscosidade. O presente estudo tem como relação ativador/precursor o valor de 0,62, o que justifica a alta viscosidade aparente do material. O fato é explicado, pois para uma maior massa de hidróxido há a necessidade de aumento da massa de água, mantendo-se assim constante a relação água/sólidos. Além disso, aumenta-se a relação solução/precursor. O maior volume de solução aumenta a fluidez do material. Essas duas relações são, ainda, interdependentes: assim, para manter a relação água/sólido constante é necessário aumentar a massa de água, levando a um aumento da massa da solução.

A aplicabilidade do material, segundo a sua consistência, é trazida pela NBR 8953 (ABNT, 2015b), que indica possíveis utilizações para o concreto com baixo slump (50 a 100 mm) para alguns tipos de pavimentos, tais como calçadas e passeios públicos, o que seria aplicável ao concreto confeccionado com cimento Portland nessa pesquisa. Em contrapartida, para elementos com maior presença de armaduras e que necessite de melhor espalhamento quando lançado (piso

industrial) a mesma norma recomenda consistência acima de 160 mm, o que seria aplicável para as duas misturas de concretos geopoliméricas.

b. Massa específica

A Tabela 18 também mostra uma diminuição (cerca de 4,5% e 1,13%) na massa específica entre o concreto convencional e os concretos geopoliméricos. A massa específica do concreto convencional vai ao encontro de dados trazidos por outras pesquisas encontradas na literatura (LI *et al.*, 2022; NIYASOM e TANGBORIBOON, 2021), com valores próximos a 2.400 kg/m³.

A massa específica do concreto geopolimérico de metacaulim é similar ao encontrado na pesquisa de Asayesh (2021) (cerca de 2.300 kg/m³). Nesse mesmo sentido, o teor de substituição de 10% de metacaulim pela cinza de casca de arroz, presente na amostra GM10C, elevou a massa específica em 3,41%. O aumento foi obtido em decorrência do teor de sílica reativa da cinza de casca de arroz, que promoveu refinamento dos poros e formação de gel no interior dos vazios, e conseqüentemente, elevou a densidade do material, conforme foi mostrado e discutido, pela Figura 46, e também conforme foi evidenciado na pesquisa de Mahdi *et al.* (2020).

c. Exsudação

Durante a execução do ensaio, nenhuma exsudação foi encontrada nas amostras de concreto produzidas. A não-observação de exsudação e, também, segregação, em amostras geopoliméricas é trazida em algumas pesquisas encontradas na literatura (HU *et al.*, 2019; THOMAS *et al.*, 2022; HAMIDI *et al.*, 2022; AMIN *et al.*, 2022).

A inexistência de exsudação dos concretos geopoliméricos produzidos está ligada a viscosidade da matriz, que impede ou dificulta a passagem da água entre os poros e o posterior surgimento do líquido na superfície do material. Além disso, a diferença entre a densidade da solução ativadora com os sólidos é menor no concreto geopolimérico do que a água com os outros componentes no concreto convencional (LUO *et al.*, 2022). A inexistência de exsudação é mostrada na Figura 43.

FIGURA 43: INEXISTÊNCIA DE EXSUDAÇÃO DE CP (a), GM (b) e GM10C (c)



FONTE: O autor (2022).

Na amostra de concreto convencional, a baixa consistência, a correta dosagem e granulometria dos agregados graúdos e miúdos e correto preparo do concreto teve efeito benéfico no resultado de exsudação na mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Embora não foi possível coletar a água exsudada na superfície do corpo de prova, foi possível notar uma mínima camada na superfície, que é benéfica e promove proteção contra a dessecação prematura da superfície.

Para complementar essa teoria, uma análise macroestrutural foi realizada, com a finalidade de verificação da distribuição dos agregados graúdos dentro do corpo de prova, bem como da existência de vazios ou poros que pudessem ser vistos a olho nu, pois ambos são fatores que poderiam afetar as propriedades de abrasão superficial. A Figura 44 mostra três corpos de prova das três misturas de concreto estudadas que foram fatiados ao meio.

FIGURA 44: ANÁLISE MACROESTRUTURAL DE CP (a), GM (b) e GM10C (c)



FONTE: o autor (2022).

A Figura 44 revela que as três misturas de concreto apresentaram a distribuição dos grãos de agregado graúdo de forma homogênea e uniforme, descartando a possibilidade de ocorrência de segregação e também de exsudação do material. Além disso, a distribuição homogênea dos agregados graúdos na superfície descarta a influência dos mesmos na comparação dos resultados de dureza superficial por esclerometria. Outra característica importante foi que os três corpos de prova não apresentaram vazios ou macroporos que pudessem ser vistos a olho nu, indicando o correto adensamento da mistura e a adequada densidade do material.

d. Considerações finais

Embora haja diferença nos índices de consistência da mistura convencional para as geopoliméricas, ambas podem ser utilizadas em aplicações no cotidiano das obras que requerem esforços de abrasão (pavimentos, calçadas e pisos, por exemplo). A ausência de exsudação também se mostra fundamental para execução de um concreto com uma camada superficial adequada, principalmente se o mesmo for aplicado em locais onde os esforços de abrasão são preponderantes. Além disso, os resultados de massa específica das amostras, apesar de terem dosagens e materiais constituintes diferentes, se apresentaram de forma parecida.

5.2 ESTADO ENDURECIDO

a. Resistência à compressão (RC28 e RC180)

A Tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão após 28 e 180 dias de idade. Ao lado, estão expostos o desvio padrão e o coeficiente de variação das amostras.

TABELA 19: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (RC28 E RC180)

Misturas	Resistência à compressão (RC28) (MPa)	CV (%)	Resistência à compressão (RC180) (MPa)	CV (%)
CP	30,26 ± 3,02	9,99	35,37 ± 2,38	6,70
GM	29,29 ± 1,71	5,83	25,39 ± 0,20	0,01
GM10C	27,43 ± 1,18	4,29	23,09 ± 0,33	0,01

FONTE: o autor (2022).

A Tabela 19 aponta que todos os concretos produzidos possuem valores próximos de resistência mecânica à compressão, aos 28 dias de idade. A NBR 8953 (2015b) enquadra-os com classe de resistência C25 e C30. Além disso, o desvio padrão das amostras se mostrou abaixo de 3,02 nos três casos. O coeficiente de variação das misturas foi menor que 10%, demonstrando homogeneidade e baixa dispersão dos dados. O Apêndice C mostra todos os dados de resistência mecânica à compressão (RC28) que foram utilizados na análise estatística.

Outras pesquisas apresentam a resistência mecânica de concretos geopoliméricos (ALIABDO *et al.*, 2016; NATH e SARKER, 2015; WONGSA *et al.*, 2016). As resistências mecânicas à compressão das pesquisas foram avaliadas geralmente em 28 dias de idade, e apresentaram variações de acordo com seus componentes, precursores, ativadores alcalinos ou ainda o tipo de cura adotado. Embora a cura térmica tenha sido utilizada em alguns estudos e se mostrado eficaz na elevação da resistência mecânica (SALONI *et al.*, 2020b), a cura ambiente também se mostrou adequada na confecção de concretos geopoliméricos com resistências mecânicas competitivas e menor custo de produção.

A análise estatística de variância (Apêndice C) mostrou que não há variação estatística significativa, aos 28 dias, ao nível de significância de 5%, nas três amostras de concreto estudadas. Portanto, pode-se concluir que as três amostras de concretos possuem, estatisticamente, a mesma resistência à compressão. Essa foi uma escolha estratégica desta tese para possibilitar uma comparação mais direta da resistência à abrasão entre o concreto convencional e os concretos geopoliméricos, tendo em vista que um concreto com maior resistência mecânica poderia apresentar maiores resultados de resistência à abrasão superficial, assim como poderia influenciar, da mesma forma, em outros ensaios, como o de dureza superficial. Dessa forma, apesar de terem consistência diferentes, as resistências à compressão dos três concretos aos 28 dias são similares.

Conforme a Tabela 19, a amostra de concreto convencional apresentou maior resistência após 180 dias de cura do que as amostras geopoliméricas. A diferença foi de cerca de 28% para a amostra GM e cerca de 35% para a amostra GM10C. A diferença entre as amostras geopoliméricas ficou em torno de 9%. Uma análise de variância (ANOVA) mostrou haver diferença significativa, ao nível de significância de 5%, entre as amostras geopoliméricas e a amostra convencional. Além disso, a análise de variância mostrou não haver diferença significativa para a resistência à compressão entre as amostras GM e GM10C aos 180 dias de idade.

Outra análise de variância (ANOVA) foi realizada e constatou que todas as três misturas de concreto estudadas têm diferença significativa, quando analisadas de forma isolada, comparando aos 28 e 180 dias de idade.

A amostra CP teve cerca de 17% de crescimento de resistência à compressão de 28 para 180 dias de idade. O resultado vai ao encontro de outros estudos que apresentaram crescimento de resistência mecânica do concreto com cimento Portland em idades mais avançadas (MEHTA, MONTEIRO, 2014; WITZKE, 2017). Com o passar do tempo, há continuidade no processo de formação de subprodutos e refinamento dos poros do concreto convencional, conferindo ao material maior densidade e maior resistência à compressão.

Em contrapartida, houve decréscimo de resistência à compressão, de 28 para 180 dias de idade, nas amostras GM e GM10C, cerca de 13 e 15%, respectivamente.

A queda de resistência de concretos geopoliméricos ativados alcalinamente com NaOH foi citado pela pesquisa de Provis *et al.* (2005), que explicaram o fato de o concreto ter tendência à formação de estruturas zeolíticas e que, por isso, apresentam tendência de diminuição de parte da resistência mecânica ao longo do tempo. Além disso, a utilização de hidróxido de sódio promove uma solução rica em álcalis, que resulta em uma matriz geopolimérica porosa e, conseqüentemente, com menor resistência mecânica (SCHWAAB, 2018).

Ao longo do programa experimental notou-se que as superfícies das amostras de concreto geopoliméricas apresentaram eflorescência. Longhi *et al.* (2021) e Longhi *et al.* (2022) relacionam o aparecimento de eflorescência com redução na resistência mecânica do concreto ou ainda no desenvolvimento da resistência mecânica a longo prazo. O motivo pelo qual ocorre o decréscimo de resistência

mecânica são as alterações microestruturais que acontecem devido à remoção de álcalis e deterioração superficial por cristalização excessiva da superfície.

Os geopolímeros contém grandes quantidades de álcalis oriundos dos metais alcalinos. Quando há excesso na utilização dos ativadores, há sobra desses álcalis e geração de desequilíbrio na formação do gel NASH, com uma fraca ligação entre o gel e o sódio ou com o potássio. Os autores afirmam que a lixiviação pode acometer cerca de 55% dos álcalis totais da mistura. Além disso, a eflorescência ocorre por meio da mobilidade alcalina livre, no qual a pressão capilar induz o transporte de água e o movimento alcalino ocorre por meio de processos de difusão e conectividade, tendo o tamanho dos poros grande influência para aumento da lixiviação e eflorescência. A subeflorescência, que ocorre no interior do concreto, ainda pode provocar tensões internas que afetam a integridade da matriz geopolimérica.

Dessa forma, tendo em vista que a eflorescência cresceu ao longo do tempo de cura do material, ela pode não ter influenciado os dados de resistência mecânica aos 28 dias, mas, em contrapartida, reduziu a resistência dos concretos geopoliméricos em cerca de 13-15% aos 180 dias. A Figura 45 mostra um corpo de prova de cada mistura de concreto, comparando a eflorescência das duas amostras geopoliméricas (GM10C e GM) com a amostra de cimento Portland (sem eflorescência).

FIGURA 45: EFLORESCÊNCIA NAS AMOSTRAS GM10C E GM



Fonte: O autor (2022).

b. Absorção de água

A Tabela 20 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água após 28 dias de idade. Ao lado, estão expostos o desvio padrão e o coeficiente de variação das amostras.

TABELA 20: RESULTADOS DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS

Misturas	Absorção de água (%)	CV (%)
CP	8,25 ± 0,02	0,2
GM	6,92 ± 0,22	3,2
GM10C	6,67 ± 0,08	1,3

FONTE: o autor (2022).

A Tabela 20 mostra os dados de desvio padrão, além do coeficiente de variação de todas as três misturas, que ficou abaixo de 3,2%. Dessa forma, concluiu-se que os dados se apresentam de forma homogênea com baixa dispersão dos resultados. O apêndice D mostra todos os resultados de absorção de água das misturas de concreto estudadas e que foram usadas para a análise estatística.

A Tabela 20 apresenta ainda que a mistura de concreto convencional apresentou absorção de água cerca de 19% maior que a amostra geopolimérica de metacaulim e cerca de 24% maior que a amostra geopolimérica com cinza de casca de arroz. A diferença entre as duas amostras geopoliméricas foi discreta (cerca de 4%). Porém, a análise estatística de variância, mostrou haver variação estatística significativa, ao nível de significância de 5%, entre as três misturas de concreto, tratando-se de misturas estatisticamente diferentes.

Os valores encontrados, em %, para absorção de água de geopolímeros vão ao encontro aos dados trazidos por outros artigos (NUACKLONG *et al.*, 2016; THOKCHOM *et al.*, 2009; CHI e HUANG, 2014).

Houve uma densificação da matriz geopolimérica, promovida pelo metacaulim e pela cinza de casca de arroz, que diminuiu a porosidade e, conseqüentemente, a absorção de água de GM e GM10C em relação à amostra CP (AMIN *et al.*, 2022).

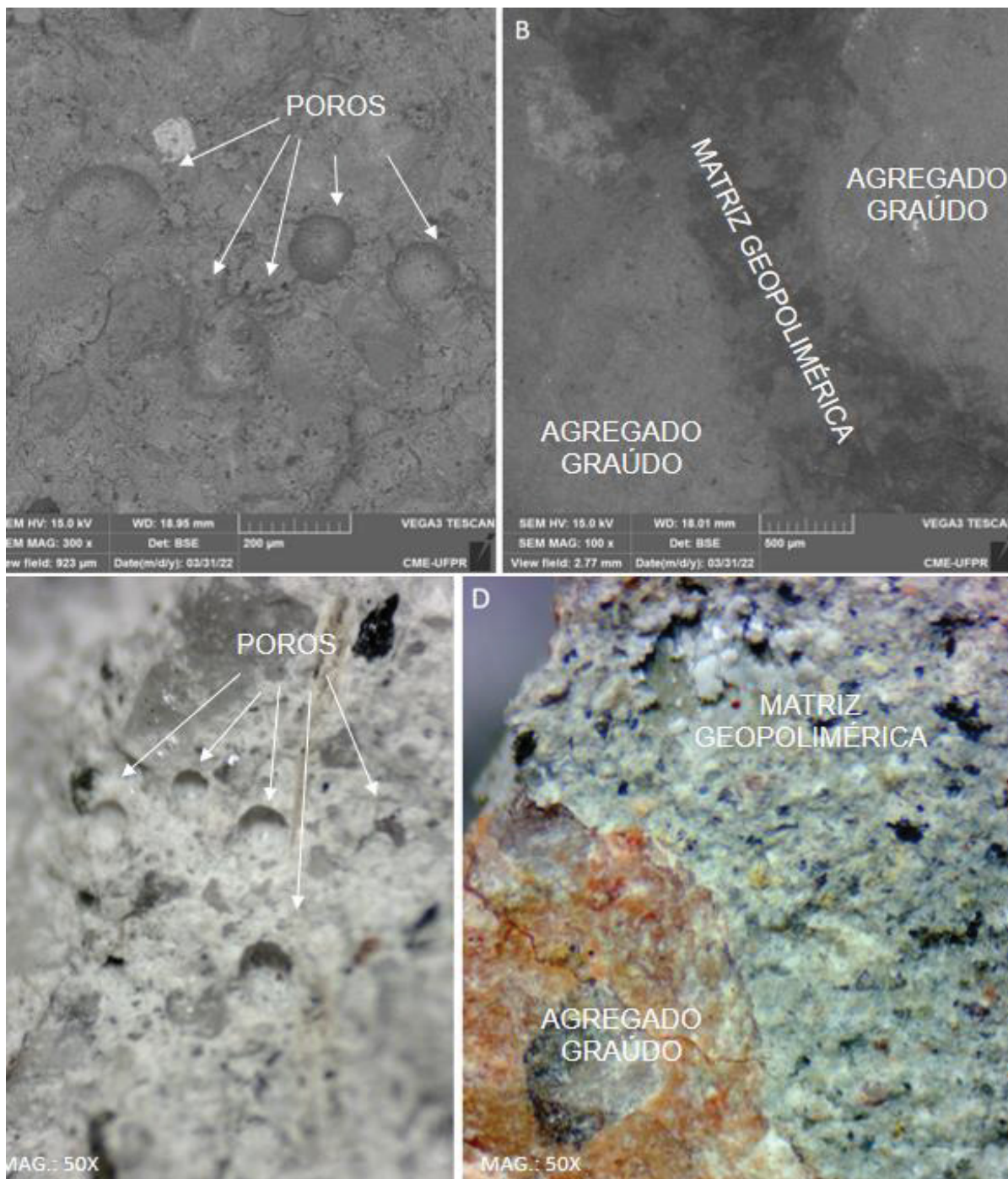
A absorção de água foi estudada como forma de caracterização e comparação da estrutura interna de poros do concreto geopolimérico de metacaulim com ou sem a cinza de casca de arroz com o concreto convencional de cimento Portland. Além disso, para a aplicação de um concreto em um pavimento/piso no qual o desgaste físico por abrasão superficial é preponderante, torna-se fundamental

o estudo da sua permeabilidade, tendo em vista que uma estrutura porosa vai propiciar uma aceleração do processo de desgaste abrasivo que está em andamento, no qual as extremidades dos poros, quando abertos, criam uma espécie de zona de tensão, onde se tornam focos para lascamento, quebra e conseqüentemente, perda de material superficial. Em contrapartida, uma estrutura densa e maciça vai dificultar esse processo.

A fluidez da amostra geopolimérica GM10C, promovida pela cinza de casca de arroz, conferiu ao material maior densidade e, conseqüentemente, menor permeabilidade (absorção de água). Isso ocorreu pela maior finura dos grãos de cinza de casca de arroz, em GM10C, em relação ao metacaulim, em GM, conforme já mostrado pela Figura 42, e também evidenciado na pesquisa de Thokchom *et al.*,(2009).

Frare (2018) também evidenciou a maior formação de produtos de misturas ativadas alcalinamente com adição de cinza de casca de arroz, que apresentaram estrutura de poros melhorada (LIANG *et al.*, 2021). Além disso, a maior relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e aumento da quantidade de CaO da amostra GM10C está ligada a um concreto de densidade mais robusta e, conseqüentemente, com menor permeabilidade, que a amostra GM (FRARE, 2018). A absorção de água está ligada, ainda, com os resultados de massa específica (item 5.1), no qual os valores de GM10C foram aproximadamente 3,5% maiores que GM.

FIGURA 46: IMAGENS DE MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA E MICROSCOPIA OTICA DAS AMOSTRAS CP (A e C), GM (B) e GM10C (D)



Obs.: Aproximação: A (300x) B (100x) C e D (50x). FONTE: o autor (2022).

A Figura 46 evidencia a estrutura mais porosa da matriz cimentícia da amostra CP, no qual há a presença de inúmeros poros. Enquanto isso, a matriz geopolimérica da amostra GM e GM10C se mostra mais densa e com nenhum poro visível em sua composição (comparação entre C e D). Há também a fissuração de um agregado graúdo em (D), evidenciando a maior densidade e resistência dos

geopolímeros, no qual há a criação de uma zona de tensão no grão de agregado graúdo.

O estudo da absorção de água se torna importante, pois a permeabilidade do material influencia diretamente na ação de agentes químicos deterioradores do concreto. Além disso, a porosidade do material pode ser um fator desencadeante de desgaste abrasivo na superfície do material, tendo em vista que a borda dos poros ou de fissuras podem apresentar zonas de enfraquecimento e de tensões que potencializam o desgaste físico em pisos ou pavimentos de concreto.

d. Dureza superficial

A Tabela 21 mostra os resultados para a dureza superficial das amostras estudadas. Tendo em vista que a NBR 7584 (2012) prevê um pré-tratamento de dados no qual os valores superiores ou inferiores a 10% do valor da média são excluídos, o desvio padrão e o coeficiente de variação se mostraram inferiores a 2,11 e 5,86%. O apêndice E mostra todos os resultados de dureza superficial das misturas de concreto estudadas e que foram usadas para a análise estatística.

TABELA 21: RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL

Misturas	Dureza superficial (índice esclerométrico)	CV (%)
CP	27,55 ± 1,61	5,86
GM	39,29 ± 2,11	5,38
GM10C	36 ± 1,63	4,53

FONTE: o autor (2022).

A Tabela 21 exhibe que a mistura de concreto convencional possui a menor dureza superficial das três misturas estudadas, sendo 29,89% menor que GM e 23,50% menor que GM10C. A diferença entre as duas amostras geopoliméricas foi cerca de 8,40%. A análise de variância mostrou que as variações entre as três misturas de concreto são significativas, ao nível de significância de 5%, tratando-se de misturas diferentes.

Os maiores valores de dureza superficial das amostras geopoliméricas podem ser explicados pela densificação da camada superficial dos corpos de prova de concreto, promovido pela utilização dos precursores, como o metacaulim e a cinza de casca de arroz. Além disso, a formação de gel NASH na superfície das amostras

mostrou menor porosidade e maior dureza do que os produtos hidratados de cimento Portland, como o gel CSH (LODEIRO *et al.*, 2011), conforme já evidenciado pela Figura 46.

Vale ressaltar que, apesar dos concretos apresentarem valores distintos de dureza superficial, todos se apresentaram estatisticamente iguais para o ensaio de resistência à compressão em 28 dias de idade. A comparação entre os resultados dos dois ensaios é comum, porém deve ser evitada. A dureza superficial analisa o estado da camada superficial do concreto (30 a 50 mm), sendo analisado como uma propriedade de superfície, enquanto o ensaio de resistência à compressão tem influência também na camada interna do concreto, analisando, assim, como uma propriedade de massa, ou seja, como um todo (SILVA, 2015).

e. Considerações finais

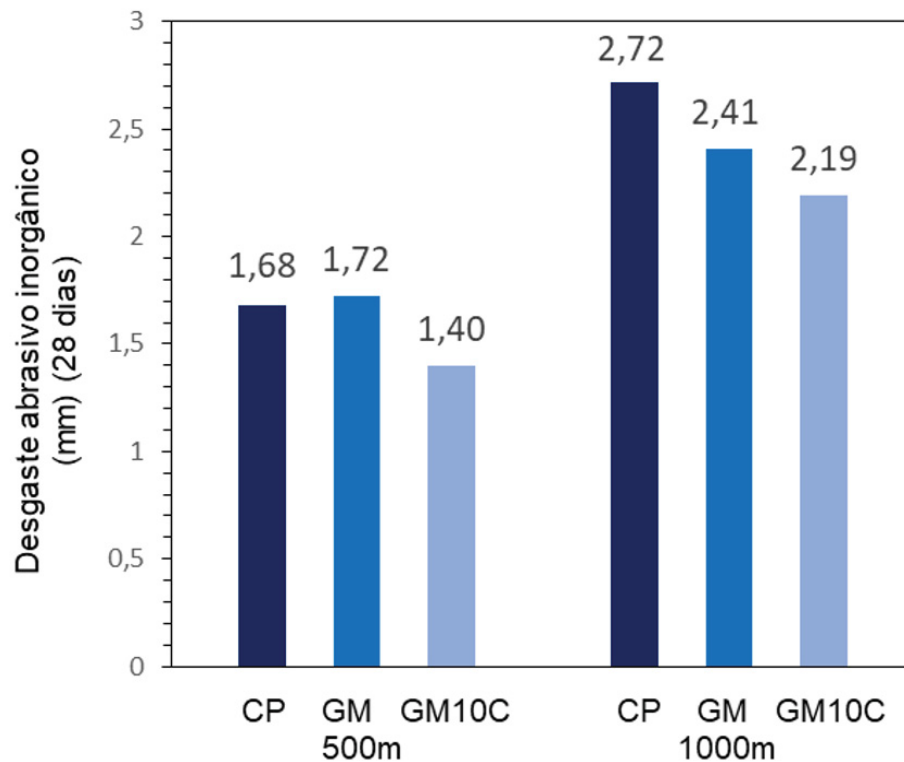
Vários trabalhos que relacionam propriedades do concreto endurecido com ensaios acelerados de resistência à abrasão são encontrados na literatura. Por isso se torna fundamental o estudo de tais propriedades de modo que, a melhora das mesmas poderá estar interligada com a melhora da resistência à abrasão. Além disso, como discutido no texto, o estudo da resistência mecânica, da dureza superficial e da absorção de água do material se torna importante, pois são parâmetros de partida para o estudo da durabilidade de um material, e exprimem o resultado inicial de uma dosagem adequada.

5.3 ENSAIOS ACELERADOS DE ABRASÃO SUPERFICIAL

a. Abrasão inorgânica (28 dias)

A Figura 47 revela os resultados do ensaio de resistência à abrasão superficial inorgânica aos 500 metros e 1000 metros de desgaste das amostras estudadas.

FIGURA 47: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (28 DIAS)

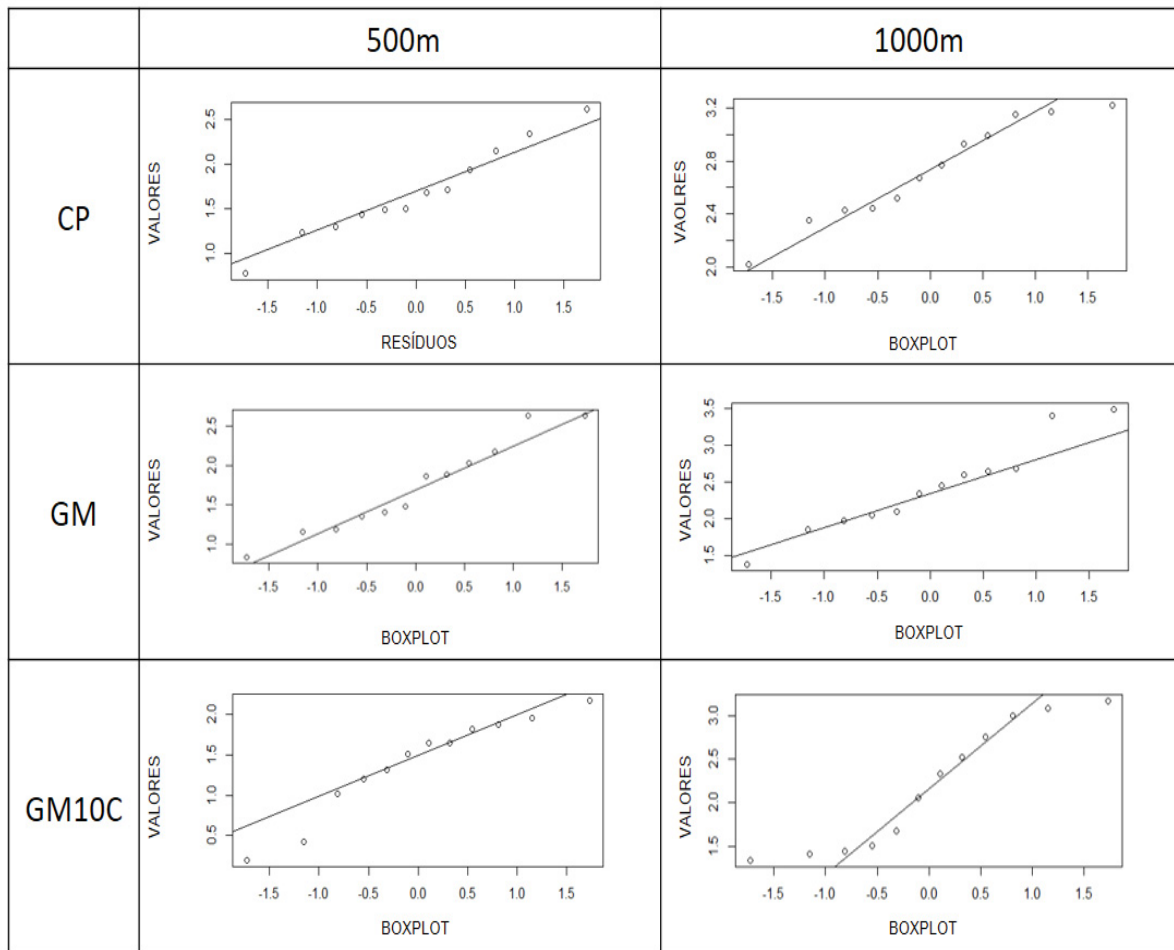


Obs.: Desvio Padrão: 500m (CP: 0,12; GM: 0,16; GM10C: 0,11.) 1000m (CP: 0,09; GM: 0,08; GM10C: 0,05). FONTE: o autor (2022).

Em decorrência do alto número de resultados medidos pelo ensaio (quatro dados por corpo de prova e três corpos de prova por mistura), foram empregados dois métodos de identificação de *outliers*, com a finalidade de descobrir se há valores que não pertencem ao conjunto de dados e que podem estar influenciando a média final, por mistura e por idade, ou ainda valores discrepantes por se diferenciarem drasticamente de todos os outros valores dos conjuntos de dados (MONTGOMERY, 1991).

O primeiro método utilizado para identificação dos *outliers* foi o método da análise dos resíduos, conforme Figura 48.

FIGURA 48: ANÁLISE DE RESÍDUOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (28 DIAS)

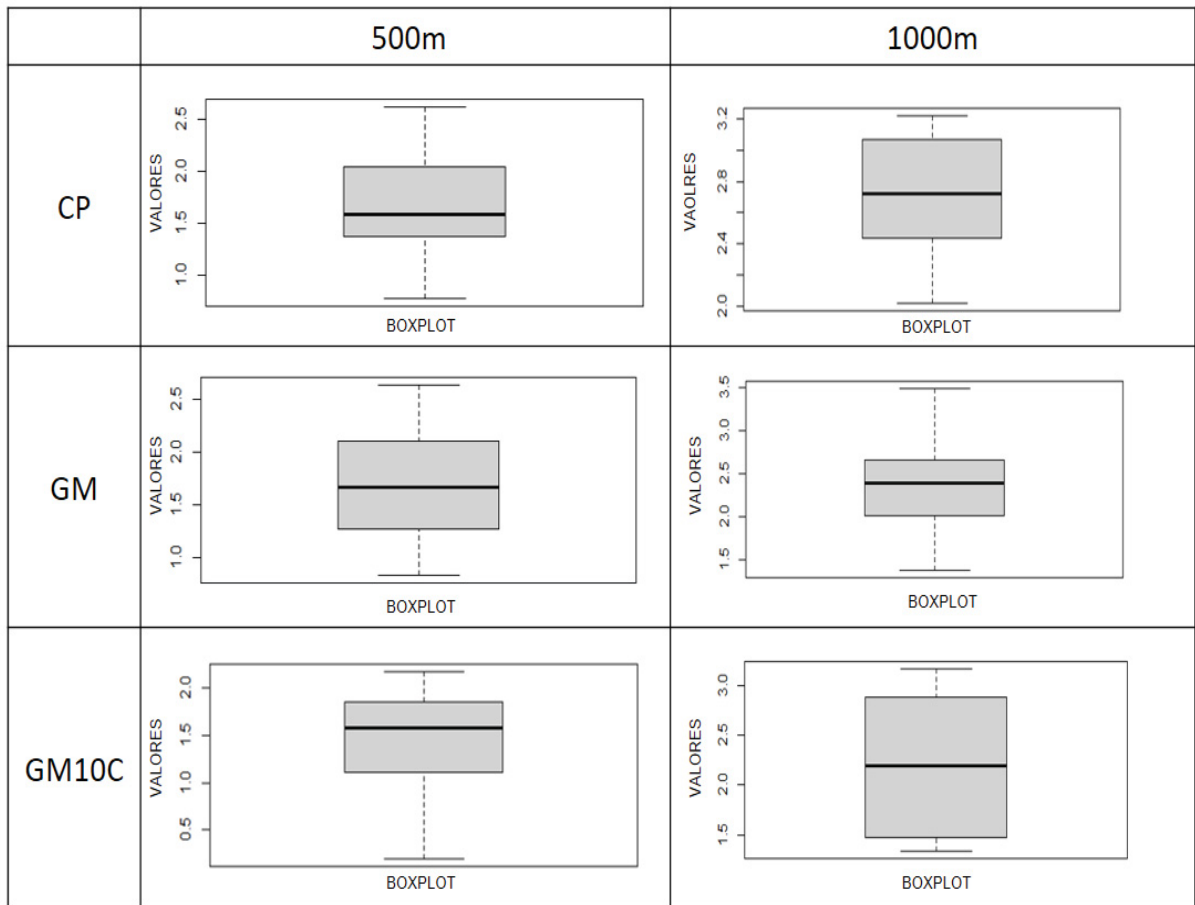


FONTE: o autor (2022).

A Figura 48 apresenta os resíduos juntamente com uma linha de tendência central dos resultados do ensaio de resistência à abrasão inorgânica de 500 m (esquerda) e aos 1000 m (direita) aos 28 dias de idade. Nota-se que em geral os pontos seguem uma tendência de distribuição normal, não estão distantes entre si e estão concentrados próximos a linha central, o que indica a inexistência de *outliers* na propriedade analisada.

O segundo método para identificação dos *outliers* utilizado foi o método do *boxplot*. Com esse método é possível identificar o valor do 1º e 3º quartil, a amplitude interquartilica, bem como a mediana. Além disso, valores representados fora da caixa indicam a presença de *outliers*. A Figura 49 mostra a análise pelo método do *boxplot* para a abrasão inorgânica das amostras estudadas aos 500 m e aos 1000 m.

FIGURA 49: BOXPLOT DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGANICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (28 DIAS)



FONTE: o autor (2022).

A Figura 49 mostra que todos os valores dos resultados estão concentrados dentro da área delimitada pelo valor máximo e mínimo, que estão representados por traços na parte inferior e superior de cada gráfico, não havendo dessa forma a presença de *outliers*. Além disso, a linha em negrito, no centro da caixa, é representada pela mediana dos valores analisados e a caixa (*boxplot*) concentra 50% dos valores de cada conjunto de dados, sendo que o limite superior da caixa é representado pelo 3º quartil e o limite inferior da caixa é representado pelo 1º quartil. Dessa forma, assume-se que não há a presença de *outliers* nos conjuntos de dados da propriedade analisada.

Para a análise da identificação de *outliers*, partiu-se da suposição de que para um dado ser considerado discrepante, teria que ser apontado nos dois testes aplicados. Dessa forma, considerou-se que todos os dados fazem parte do conjunto de dados e que não há a existência de *outliers*.

Para o tratamento estatístico dos dados de 500 metros de desgaste, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada, ao nível de significância de 5%, que mostrou haver diferença estatística entre as misturas GM10C (1,40) e as demais misturas estudadas (1,68 e 1,72). Da mesma forma, a análise de variância mostrou não haver diferença estatística significativa entre as amostras GM e CP (1,68 e 1,72). Assim, não é possível afirmar qual das duas amostras possui maior resistência à abrasão superficial aos 500 metros de desgaste.

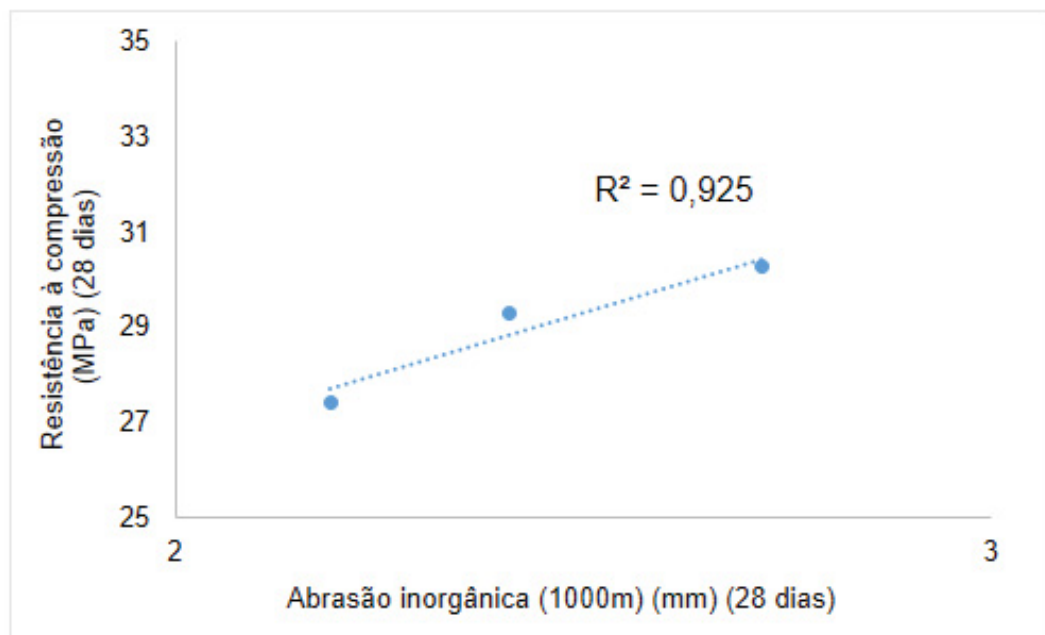
O teste de ANOVA aplicado aos resultados dos 1000 metros de desgaste mostrou haver diferença estatística entre as três misturas estudadas. Dessa forma, o desgaste superficial por abrasão na amostra contendo cimento Portland foi cerca de 24% maior que a amostra GM10C e cerca de 13% maior que a amostra GM. A diferença entre as amostras geopoliméricas ficou em cerca de 10%.

O apêndice F mostra todos os resultados de abrasão inorgânica das misturas de concreto que foram usadas para a análise estatística.

O crescimento do desgaste superficial, de 500m para 1000m, foi maior na amostra com cimento Portland, cerca de 61%, do que nas amostras geopoliméricas, cerca de 56% para GM10C e 40% em GM.

O ensaio de abrasão inorgânica aos 1000m apresentou tendência de correlação ($R^2=0,925$) com os resultados de resistência mecânica aos 28 de idade. Esse resultado vai ao encontro de outras literaturas (ATIS, 2002; ATIS, 2003; IBRAHIM *et al.*, 2017), que afirmam que as mudanças na estrutura do concreto promovidas pela melhora da resistência à compressão, influenciam na resistência à abrasão superficial. Conforme mostra a Figura 50.

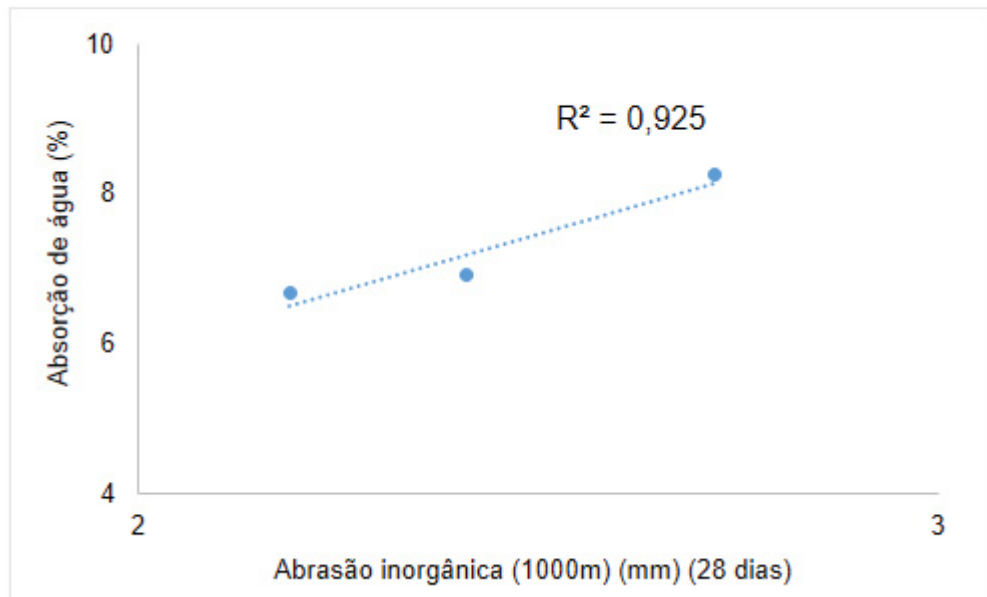
FIGURA 50: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (28 DIAS)



FONTE: o autor (2022).

Além disso, o ensaio teve tendência de correlação com a absorção de água ($R^2=0,925$), o que indica que, quanto menos permeável for o concreto submetido à abrasão superficial, maior será a tendência de aumentar a resistência aos esforços de abrasão. Dessa forma, o concreto convencional de cimento Portland teve o maior índice de absorção de água e também o maior desgaste superficial por abrasão inorgânica. Em contrapartida, a amostra GM10C teve o menor desgaste superficial por abrasão inorgânica e o menor índice de absorção de água, conforme Figura 51.

FIGURA 51: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA E A ABSORÇÃO DE ÁGUA

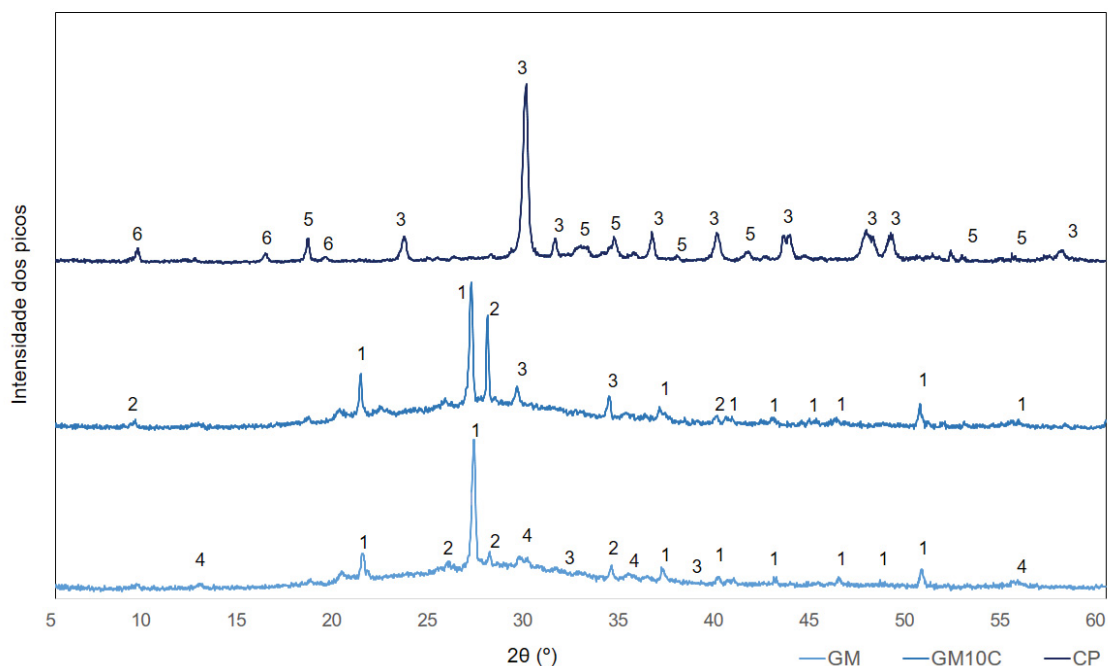


FONTE: o autor (2022).

Além disso, a presença da sílica na amostra GM10C densificou a matriz geopolimérica, promovendo menor porosidade e maior estabilidade da matriz, conforme evidenciado pelo ensaio de massa específica do concreto. A finura dos grãos de cinza de casca de arroz também influenciou no aumento da densidade do material, conforme apresentado na Figura 46.

A Figura 52 mostra o resultado do ensaio de difração de raios x (DRX) das três misturas analisadas, evidenciando o maior número de picos de quartzo em GM10C.

FIGURA 52: DIFRATOGRAMAS DAS PASTAS DAS TRÊS MISTURAS ESTUDADAS



Obs.: 1-Quartzo; 2-Muscovita; 3-Calcita; 4-Caulinita; 5-Portlandita; 6-Etringita. FONTE: o autor (2022).

A amostra da pasta de CP apresenta características típicas de pastas de cimento Portland, bem como pico de calcita, oriunda do fíler contido no cimento Portland, assim como foi pesquisado por Manzano *et al.* (2016). Além disso, picos de quartzo e portlandita já eram esperados e são frequentemente encontrados em difratograma de materiais cimentícios de outras pesquisas (ROMANO, 2016; UGIONI, GODINHO, 2017).

As amostras geopoliméricas apresentaram características típicas de materiais geopoliméricos de metacaulim, como o pico de caulinita e o halo amorfo. Na amostra GM10C há um maior e mais intenso número de picos de quartzo, evidenciando a substituição de metacaulim pela cinza de casca de arroz. Além disso foram encontrados picos de muscovita e de calcita, este em menor número que a amostra CP.

Silva *et al.* (2019) estudaram a resistência à abrasão inorgânica de concretos convencionais sob condições similares aos desta pesquisa (relação água/cimento de 0,40 e cura submersa). Os autores obtiveram resultados de desgaste por abrasão, entre 3,0 e 3,3 mm, cerca de 15% maior do que o resultado alcançado neste estudo.

Viecilli (2004) utilizou o método de abrasão inorgânica, segundo a NBR 12042 (2012), para determinação do desgaste superficial de concretos convencionais com

relação água/cimento 0,45 e com 40 MPa resistência à compressão aos 28 dias, e obteve cerca de 1,25 mm e 2,45 mm de desgaste abrasivo aos 500 e 1000m, respectivamente.

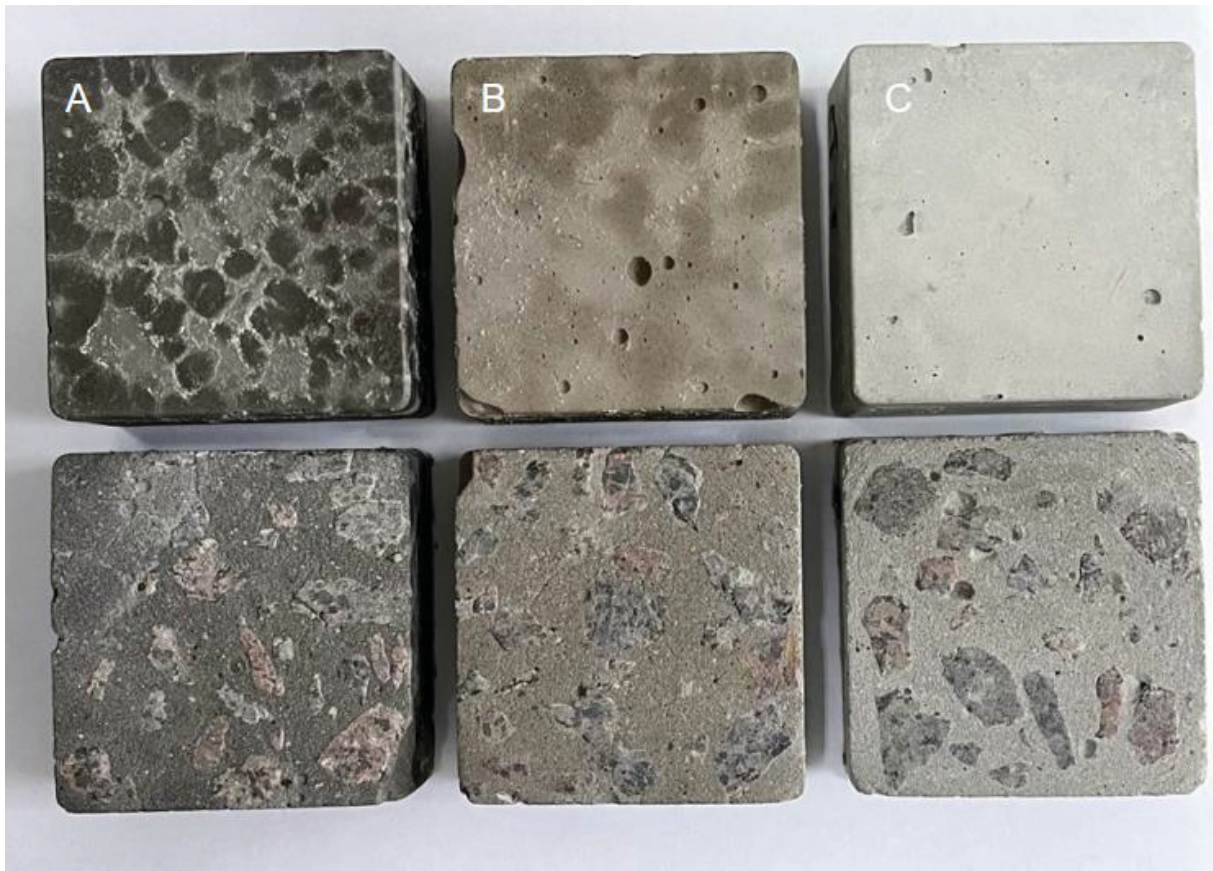
Outros estudos utilizaram métodos similares ao proposto pela NBR 12042 (2012) para determinação do desgaste superficial por abrasão. É o caso do método desenvolvido pelo Centro de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – CIENTEC, que consiste na simulação de desgaste por 500 m de corpos de prova de 50 x 50 mm de dimensão.

Witzke (2018) estudou a resistência à abrasão de concretos convencionais com relação água/cimento de 0,33 e 36 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade, pelo método do CIENTEC, e constatou desgaste abrasivo de 4,83 mm nas amostras estudadas. Vicilli (2004) também utilizou o método do CIENTEC para determinação do desgaste abrasivo de concretos convencionais e obteve um desgaste médio de 3,96 mm.

A NBR 11801 (ABNT, 2012) classifica os desgastes por abrasão inorgânica, aos 1000 m de desgaste, em três categorias distintas. Todas as três misturas foram classificadas como grupo C, no qual a abrasão foi ocasionada pelo arraste e rolar de cargas leves, tráfego de veículos e rodas macias e pequeno trânsito de pedestres.

Para fins de comparação, até o presente momento não foram encontradas pesquisas que estudem a resistência à abrasão superficial inorgânica, pelo método da NBR 12042, de concretos geopoliméricos. A Figura 53 mostra o aspecto macro visual dos corpos de prova antes e depois de serem abrasionados pelo método da abrasão inorgânica.

FIGURA 53: ANTES E DEPOIS DOS CORPOS DE PROVA DE GM10C (A), GM (B) E CP (C) DESGASTADOS PELO MÉTODO DA ABRASÃO INORGÂNICA

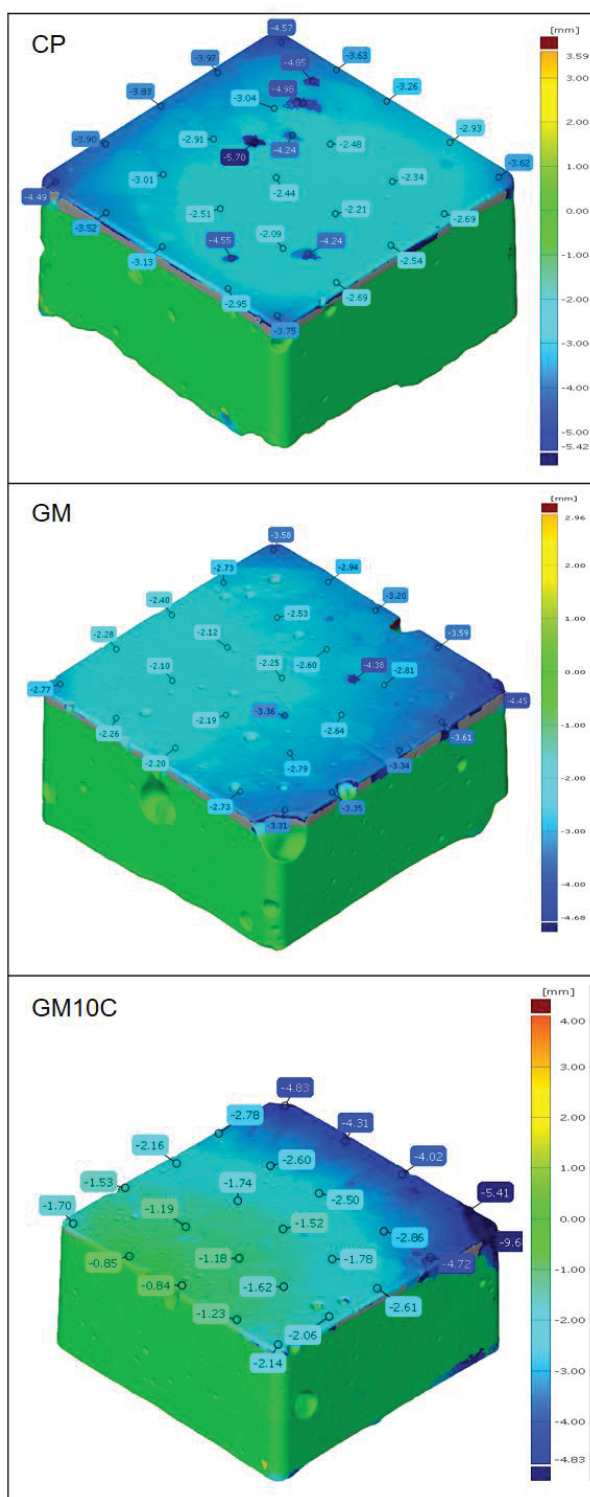


FONTE: o autor (2022).

A Figura 53 mostra que uma parte da superfície abrasionada é composta pela superfície do agregado. Como se tratam de duas superfícies com propriedades de dureza, rugosidade e resistência distintas, pode haver uma variação de valores finais no ensaio, que são representados, em parte, pela resistência à abrasão do agregado graúdo. Essa discussão também é abordada no estudo de Viecilli (2004) que menciona que o agregado graúdo tem forte influência nos resultados de desgaste por abrasão superficial quando utilizado o ensaio do CIENTEC, que possui metodologia similar ao da NBR 12042 (2012).

A Figura 54 mostra as imagens da digitalização tridimensional das três misturas de concreto estudadas. A imagem é o cruzamento da digitalização inicial (antes de submeter o corpo de prova ao ensaio de abrasão) com a digitalização final (após o ensaio de abrasão), tendo sua coloração variada de acordo com o nível de desgaste.

FIGURA 54: DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS MISTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO INORGÂNICA AOS 28 DIAS DE IDADE



FONTE: o autor (2022).

Conforme a Figura 54, nota-se, dessa forma, que toda a superfície do material sofreu alteração pela abrasão. A medição foi realizada em pontos aleatórios, ao

longo de toda a superfície externa abrasionada dos corpos de prova, de modo que foi assegurado, somente, que se tivesse um número de leituras suficientes para conseguir medir qualquer alteração de nível na superfície.

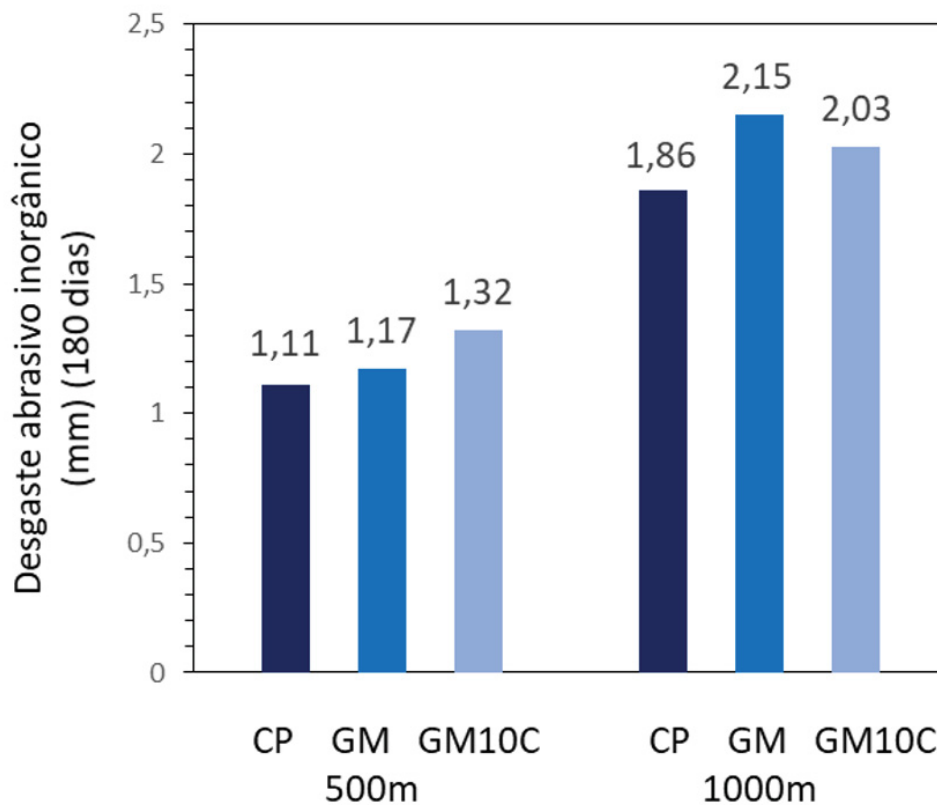
As bordas dos três corpos de prova tiveram ligeiro aumento no desgaste superficial, demonstrando um efeito de borda no resultado da digitalização. Além disso, a amostra GM10C sofreu um lascamento em uma das bordas da superfície (região azul escuro), evidenciando que se trata de uma área frágil às tensões impostas pelo ensaio.

Na amostra CP verifica-se cinco pontos com maior desgaste na superfície central do material. Esses pontos são, provavelmente, partículas de agregados que se desprenderam ou ainda poros que foram descobertos e passaram a ficar aparentes na superfície. Além disso, o efeito de borda, mencionado no parágrafo anterior, também pode ser aplicável ao entorno dos poros que foram descobertos no centro do corpo de prova. Assim, a formação da zona de tensão potencializa o desgaste naquele local e faz com que o poro, com formato circular, passe a ser um desnível da superfície, em formato côncavo com bordas alongadas (com formato parecido a uma colher).

b. Abrasão inorgânica (180 dias)

A Figura 55 mostra os resultados do ensaio de resistência à abrasão inorgânica aos 500 metros e 1000 metros de desgaste das amostras estudadas aos 180 dias.

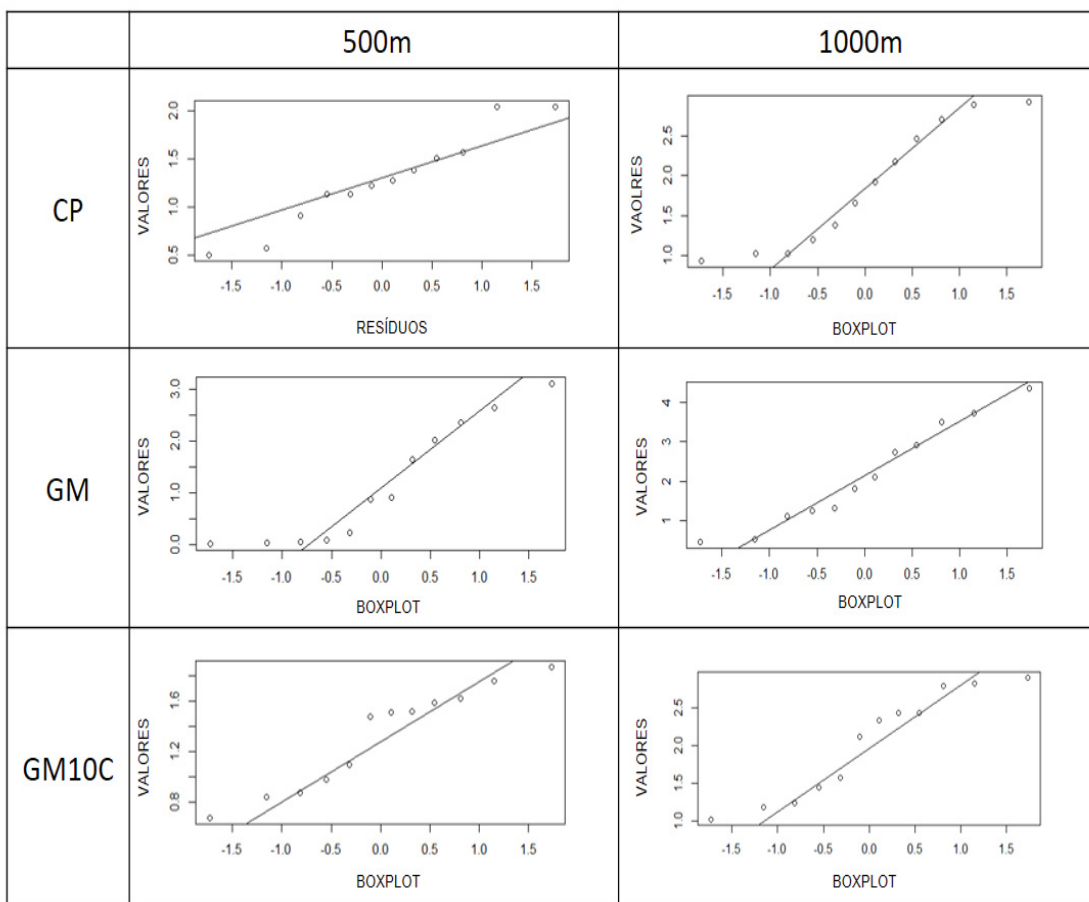
FIGURA 55: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (180 DIAS)



Obs.: Desvio padrão: 500m (CP: 0,12; GM: 0,30; GM10C: 0,04.) 1000m (CP: 0,15; GM: 0,27; GM10C: 0,14). FONTE: o autor (2022).

Os resultados apresentados na Figura 55 se apresentaram, no geral, com baixa dispersão de dados, com exceção da amostra GM, aos 500m de desgaste, que apresentou coeficiente de variação de 26%, com média dispersão de dados. A Figura 56 mostra a avaliação da existência de *outliers*, pela análise de resíduos.

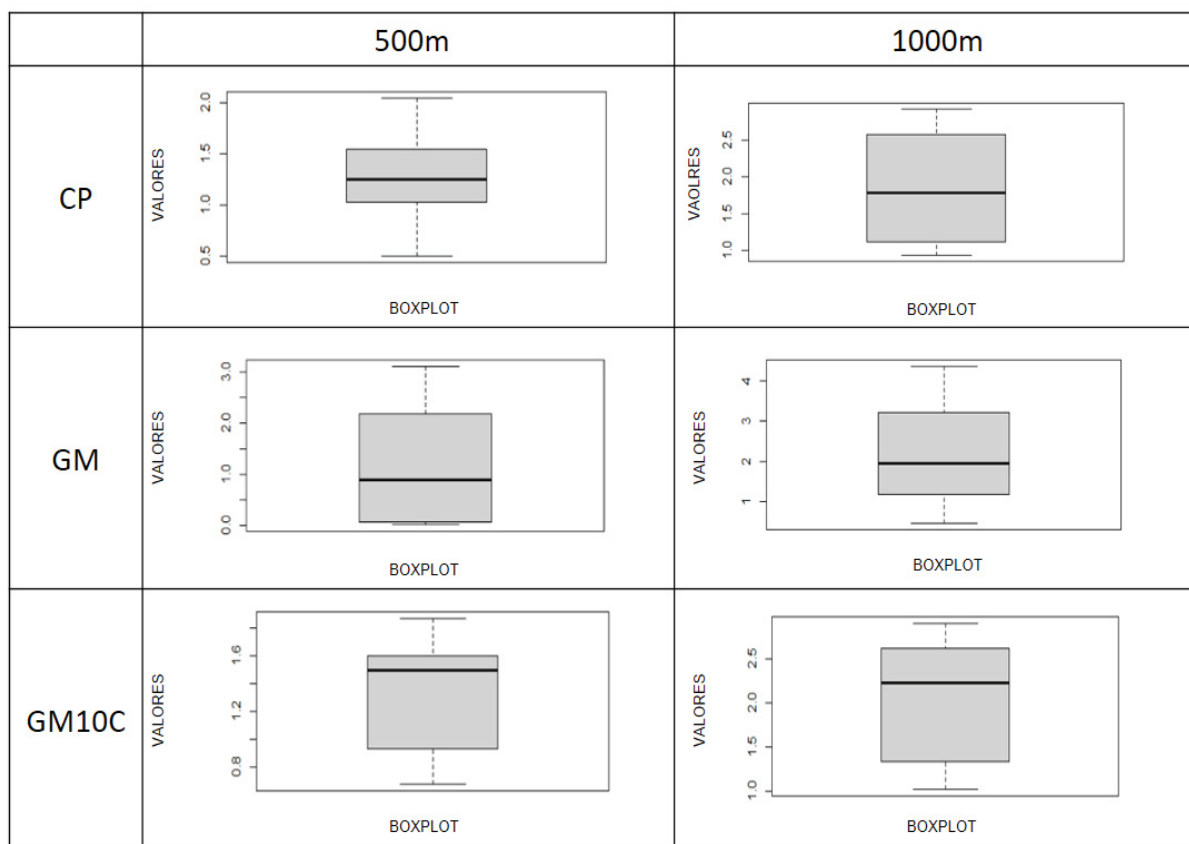
FIGURA 56: ANÁLISE DE RESÍDUOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGANICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (180 DIAS)



FONTE: o autor (2022).

A Figura 56 revela que os pontos, no geral seguem uma tendência de distribuição normal, estão próximos entre si e estão concentrados próximos a linha central, o que indica a inexistência de *outliers* na propriedade analisada. A Figura 57 mostra a análise da existência de *outliers*, pelo método do *bloxplot*.

FIGURA 57: BOXPLOT DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS DE CONCRETO (180 DIAS)



FONTE: o autor (2022).

A Figura 57 revela que todos os valores dos resultados estão concentrados dentro da área delimitada pelo valor máximo e mínimo, que estão representados por traços na parte inferior e superior de cada gráfico. Dessa forma, assume-se que não há a presença de *outliers* nos conjuntos de dados da propriedade analisada.

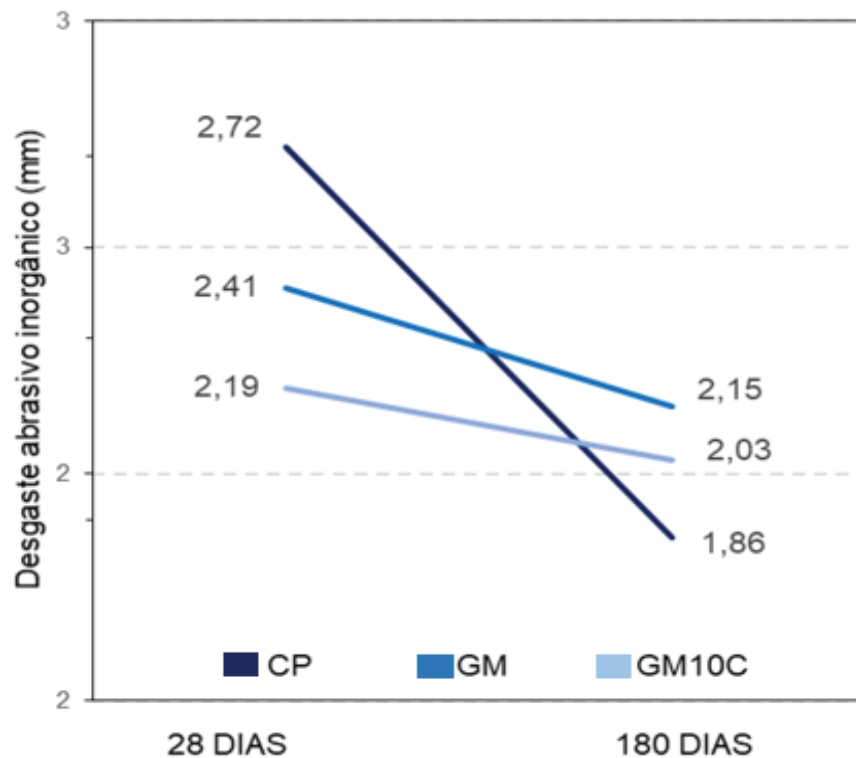
Para a análise dos resultados de 500 metros de desgaste, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada, que não mostrou haver diferença estatística significativa entre três misturas estudadas. Assim, não é possível afirmar qual das três misturas possui maior resistência à abrasão superficial aos 500 metros de desgaste aos 180 dias.

A análise estatística, aos 1000m de desgaste, foi realizada sob os mesmos parâmetros, e não foi possível encontrar diferença significativa entre os resultados das três misturas estudadas. Dessa forma, as três misturas de concreto têm a mesma resistência ao desgaste superficial por abrasão inorgânica, aos 180 dias.

O apêndice F mostra todos os resultados de abrasão inorgânica das misturas de concreto que foram usadas para a análise estatística.

A Figura 58 apresenta a diferença dos resultados de resistência à abrasão superficial inorgânica, aos 1000 metros de desgaste, em 28 e 180 dias de idade.

FIGURA 58: DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO INORGÂNICA AOS 1000 M EM 28 E 180 DIAS DE IDADE



Fonte: o autor (2022).

A Figura 58 revela que todas as três misturas estudadas apresentaram maior resistência ao desgaste superficial por abrasão aos 180 dias de idade em comparação com 28 dias de idade. O aumento da resistência à abrasão, nos dois períodos estudados, para as amostras geopoliméricas foi parecido: cerca de 10,70% para GM e 7,30% para GM10C. A amostra de concreto convencional (CP) obteve aumento de resistência à abrasão maior, cerca de 31,62%.

Novamente, aos 180 dias com 1000 metros de desgaste, as três misturas de concreto ficaram classificadas no grupo C de desgaste abrasivo, no qual a abrasão foi ocasionada pelo arraste e rolar de cargas leves, tráfego de veículos e rodas macias e pequeno trânsito de pedestres (ABNT, 2012).

O aumento da resistência à abrasão superficial de concretos convencionais, em idades superiores a 28 dias de cura, foi evidenciado por outras pesquisas (WANG *et al.*, 2022; ZOLGHADRI *et al.*, 2022), que mostraram que houve maior resistência à abrasão superficial em concretos com 90 dias de idade do que aos 28 dias de idade. Com o passar do tempo há a formação de mais produtos de hidratação do cimento Portland que, conseqüentemente, diminuem a quantidade de poros, fortalecem a camada superficial do concreto, aumentando a resistência ao desgaste por abrasão, uma espécie de maturação do concreto. Esse resultado vai ao encontro dos resultados de resistência à compressão que a amostra CP teve em 180 dias de idade, em comparação com 28 dias de idade (acréscimo de 17%).

O aumento da resistência à abrasão das amostras geopoliméricas GM e GM10C foi mais discreto, por se tratarem de misturas sem a presença do cimento Portland e dos produtos de hidratação por ele formados. No concreto geopolimérico há o ganho de resistência e maturação da matriz por polimerização em idades iniciais, logo após sua fabricação e nos primeiros dias de idade. Logo, o concreto terá propriedades mecânicas e de durabilidade satisfatórias de forma também precoce (CHEYAD *et al.*, 2022). É importante destacar que a resistência à abrasão inorgânica dos geopolímeros aumentou de 28 dias para 180 dias, mesmo com a redução na resistência à compressão identificada na Tabela 19.

A Tabela 22 mostra a relação entre o desgaste abrasivo inorgânico pela resistência à compressão do concreto, em mm/MPa.

TABELA 22: RELAÇÃO ENTRE DESGASTE ABRASIVO INORGANICO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

	Relação RAS28 (1000 m)/ RC28 (mm/MPa)	Relação RAS180 (1000m)/ RC180 (mm/MPa)
CP	0,09	0,05
GM	0,08	0,08
GM10C	0,08	0,08

Obs.: RAS: Resistência à abrasão superficial. FONTE: o autor (2022).

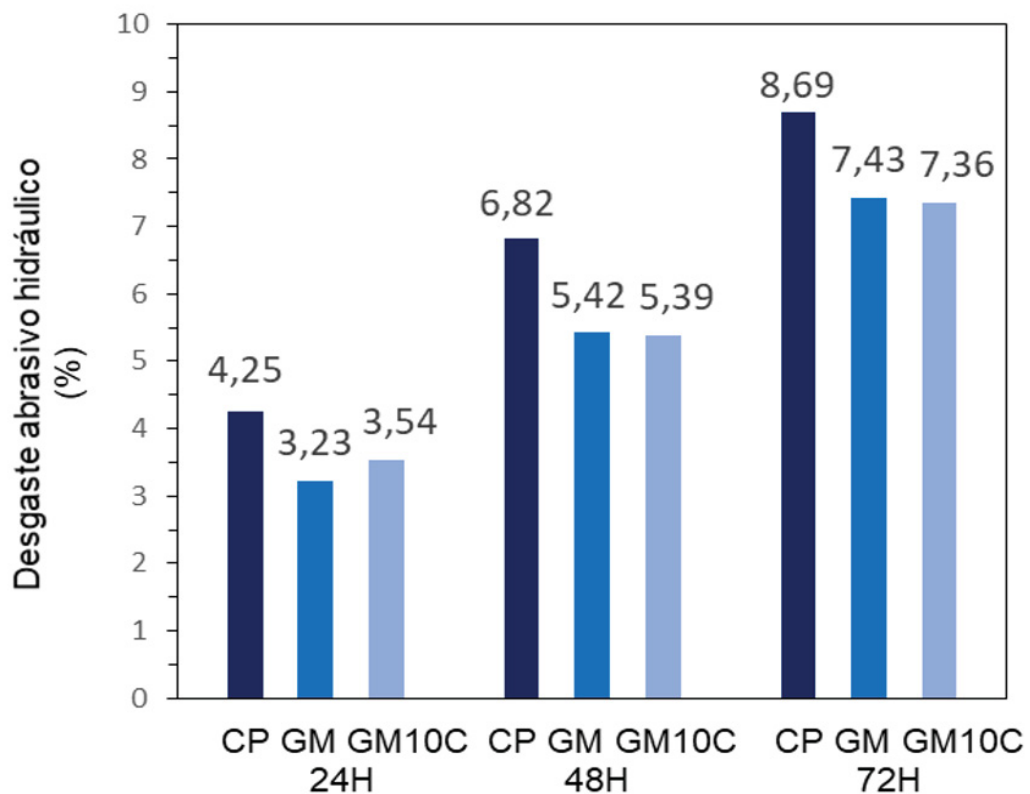
A Tabela 22 mostra que, em 28 dias de idade, as três misturas estudadas apresentaram relação mm/MPa similares. Ou seja, para cada 1 MPa de resistência à compressão do concreto houve 0,08 ou 0,09 milímetros de desgaste por abrasão na superfície das amostras.

Em contrapartida, aos 180 dias de idade, em decorrência das alterações de resistência à compressão e à abrasão, a relação aumentou para o concreto convencional de cimento Portland. Dessa forma, para cada 1 MPa de resistência à compressão, houve um 0,05 mm de desgaste superficial por abrasão. As amostras geopoliméricas permaneceram com a mesma relação.

c. Abrasão hidráulica

A Figura 59 mostra os resultados do ensaio de resistência à abrasão hidráulica após 24, 48 e 72 horas de abrasão.

FIGURA 59: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA



Obs.: Desvio padrão: 24h (CP: 0,14; GM: 0,19; GM10C: 0,29) 48h (CP: 0,12; GM: 1,21; GM10C: 1,23) 72h (CP: 0,25; GM: 1,43; GM10C: 0,96). FONTE: o autor (2022).

A análise de variância (ANOVA) mostrou, ao nível de significância de 5%, que há variação significativa entre a amostra convencional e as amostras geopoliméricas, na perda de massa, nas primeiras 24 horas de ensaio, no qual CP teve perda de massa cerca de 23,76% maior que GM e 16,74% maior que GM10C.

Além disso, a análise de variância mostrou que, apesar da diferença de 9,56% entre as duas amostras geopoliméricas, elas são estatisticamente iguais, no período estudado.

Tendo em vista que para execução do ensaio em questão foram utilizados corpos de prova relativamente grandes (diâmetro: 30 cm; altura: 10 cm), com grande consumo de material, e também levando em consideração o alto custo para execução do teste, optou-se pela utilização do padrão estabelecido pela própria norma da ASTM C1138 (2019) que indica a utilização de dois corpos de prova por mistura. Dessa forma, não foram realizados métodos para a identificação de possíveis *outliers*.

O apêndice G mostra todos os resultados de abrasão hidráulica das misturas de concreto estudadas e que foram usadas para a análise estatística.

Abid *et al.* (2021) estudaram a norma de abrasão hidráulica C1138 (ASTM, 2019) e proporam mudanças na execução do ensaio. Os autores relacionaram diversos estudos que utilizaram a norma para verificação do desgaste por abrasão, e concluíram que, se o comportamento da perda de massa se apresentar de forma linear ao longo das 72 horas de ensaio e se o R^2 da correlação linear for maior que 0,9 é possível reduzir o tempo de execução do ensaio de 72 horas para 24 horas. Ou seja, é possível utilizar somente os resultados de desgaste abrasivo hidráulico das primeiras 24 horas para explicar e discutir os resultados da pesquisa. Na presente pesquisa, a perda de massa ao longo do tempo de ensaio se apresentou de forma linear, bem como o valor de R^2 da correlação linear foi maior que 0,90, conforme a Tabela 23. Dessa forma, os dados de abrasão hidráulica das primeiras 24 horas de ensaio foram utilizados para discussão dos resultados. Os resultados das primeiras 24 horas do ensaio de abrasão hidráulica também foram utilizados em outros estudos (CHEYAD *et al.*, 2022; RAMUJEE e PHOTARAJU, 2014).

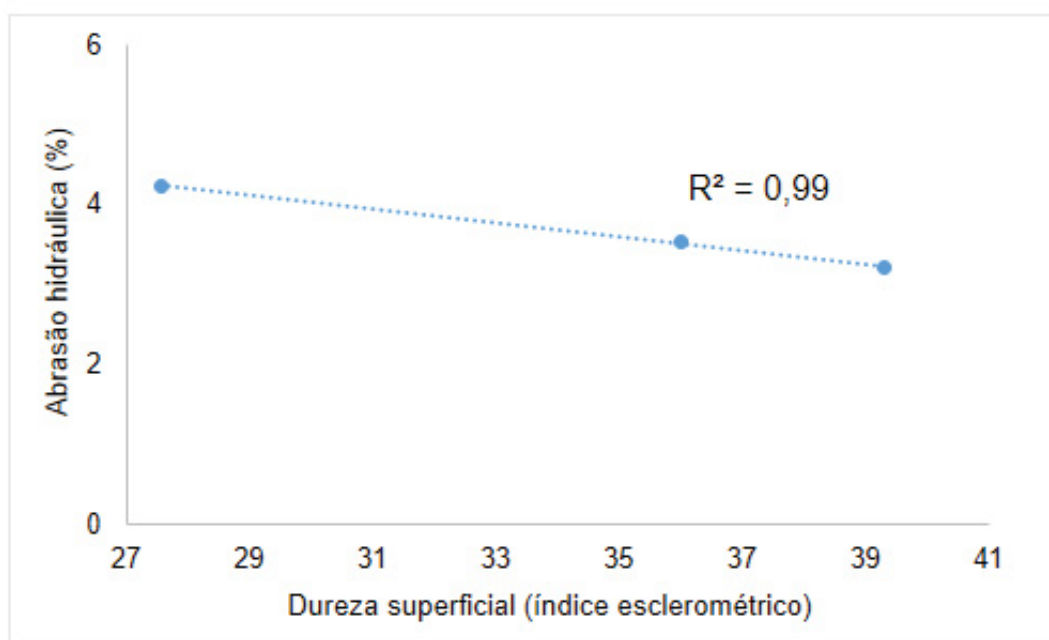
TABELA 23: R^2 DAS MISTURAS ESTUDADAS PARA O ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA

Misturas	Valor de R^2
CP	0,965
GM	0,982
GM10C	0,968

FONTE: o autor (2022).

A resistência à abrasão hidráulica apresentou tendência de correlação com os resultados de dureza superficial. A correlação (R^2) foi de 0,999, 0,916 e 0,899 para os dados de 24, 48 e 72 horas de abrasão, respectivamente.

FIGURA 60: CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (24H) E A DUREZA SUPERFICIAL



FONTE: o autor (2022).

A dureza superficial quantifica, pelo índice esclerométrico, o estado da camada superficial do concreto, no qual justamente houve a degradação total pela abrasão hidráulica, durante o ensaio. Dessa forma, há a tendência de quanto mais dura for a superfície do concreto, menor será o desgaste por abrasão hidráulica da sua superfície. A Tabela 24 mostra a relação entre o índice de esclerometria e a % de perda de massa nas idades estudadas, das misturas de concreto.

TABELA 24: RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO E RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA DO CONCRETO

	Relação RAH (%) (24h) / índice esclerométrico
CP	0,15
GM	0,08
GM10C	0,10

Obs.: RAH: Resistência à abrasão hidráulica. FONTE: o autor (2022).

Conforme A Tabela 24, as duas amostras geopoliméricas apresentaram menor relação RAH/índice esclerométrico do que a amostra de cimento Portland, indo ao encontro dos resultados apresentados nessa pesquisa (maior dureza superficial e maior resistência ao desgaste por abrasão hidráulica).

Kumar e Sharma (2014) estudaram o desgaste por abrasão hidráulica, com perda de volume, em m^3 , de concretos convencionais com média de 30 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade e constataram valores próximos a $0,000467 m^3$. Para fins de comparação, o presente estudo teve desgaste abrasivo de, em média, $0,0065 m^3$ para a mistura CP.

Ramujee e Potharaju (2014) compararam a resistência superficial por abrasão de concreto geopolimérico de cinza volante e convencional utilizando o método proposto pela ASTM C1138. Os resultados mostraram, em 24 horas de ensaio, maior perda de massa na amostra de concreto convencional (9,77%) do que na amostra geopolimérica (7,22%). Na presente pesquisa houve perda de massa de 4,25% para CP, 3,23% para GM e 3,54% para GM10C.

A resistência à abrasão está ligada com a densidade do material. Materiais mais densos e, conseqüentemente, com menor porosidade, apresentam menores perdas de material superficial quando expostos à abrasão (RAMUJEE e POTHARAJU, 2014).

O concreto geopolimérico, em seu estado fresco, é um fluido que pode se apresentar de 10 a 100 x mais viscoso que a água. A viscosidade é conferida pela utilização de ativadores alcalinos, como o hidróxido de sódio e o silicato de sódio alcalino e que resulta em maior taxa de fluxo do material, bem como maior resistência ao escoamento do concreto.

No seu estado fresco, durante a mistura dos materiais para a confecção do concreto geopolimérico, a viscosidade imposta pelos ativadores aumenta a capacidade de retenção de partículas sólidas suspensas (metacaulim e cinza de casca de arroz), levando a uma maior estabilização do concreto. Dessa forma, há menos água na superfície do material, diminuindo exsudação e, conseqüentemente, a segregação. Além disso, a viscosidade confere maior aglutinação e ligação do material, gerando maior estabilidade do concreto geopolimérico. Para fins de comparação, no concreto convencional, tal estabilidade seria atingida somente com a adição de maiores quantidades de cimento Portland, o que acarretaria em maior custo e maior emissão de CO_2 (ZAIDI *et al.*, 2021; HWALLA *et al.*, 2020).

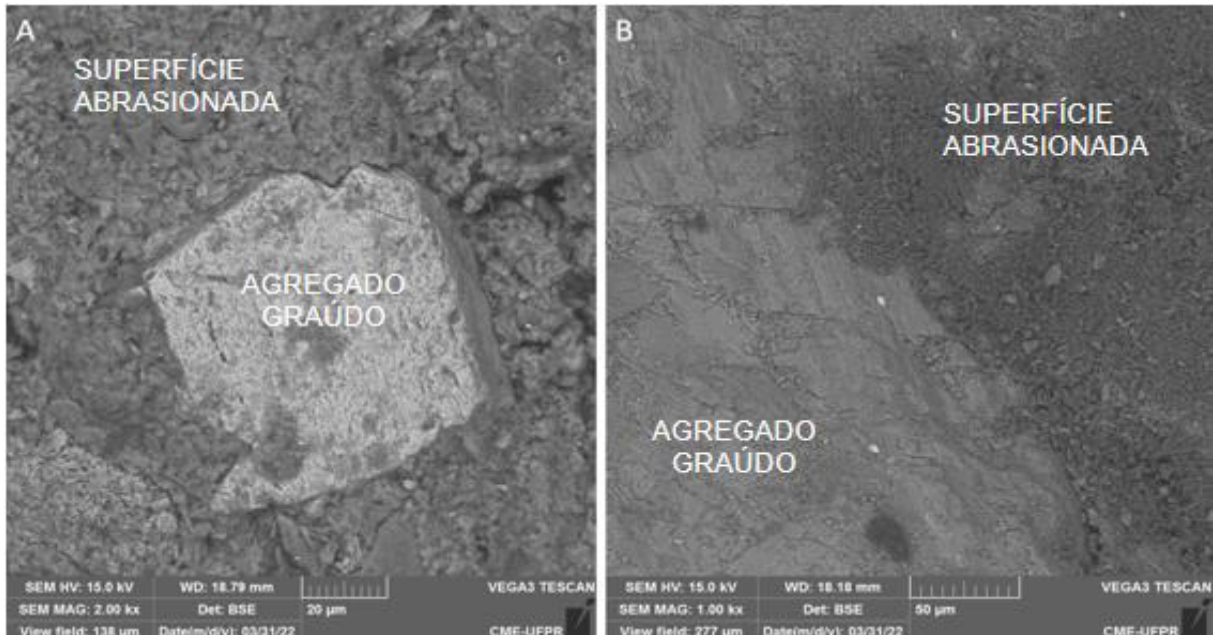
A estabilidade do sistema, juntamente com a diminuição da possibilidade de exsudação e segregação, é de fundamental importância para a melhora da camada superficial e da matriz geopolimérica, tornando-se menos diluível em água e resultando em maior resistência à abrasão do concreto geopolimérico. Além disso, o gel NASH formado na superfície mostra maior durabilidade frente à abrasão do que o os produtos cimentícios, como o gel CSH (ZAIDI *et al.*, 2021; HWALLA *et al.*, 2020).

Ademais, em concretos convencionais a zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo tem influência na resistência à abrasão (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Concretos convencionais que apresentam boa resistência ao desgaste superficial por abrasão apresentam boa aderência entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia, que impedem o desgaste diferencial na superfície.

Peçanha (2012) afirma que pelo fato do concreto geopolimérico não passar por um processo de hidratação, ele não possui zona de transição e, por isso, terá na sua interface uma matriz mais densa, menos permeável e com menor ligação entre os poros, com maior rigidez. Dessa forma, o concreto geopolimérico possui uma maior adesão da matriz geopolimérica com os agregados.

Porto *et al.* (2019) evidenciaram em sua pesquisa que a interface do agregado miúdo com a matriz geopolimérica à base de metacaulim e escória de alto forno se apresentou com uma boa aderência, não contendo a formação de hidróxido de cálcio e a etringita nas interfaces. Essas discussões vão ao encontro com as análises de microestrutura realizadas nesta tese. A Figura 61 mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura dos concretos CP e GM10C.

FIGURA 61: IMAGENS DE MEV DAS AMOSTRAS CP (A) E GM10C (B) APÓS ENSAIO DE ABRASÃO



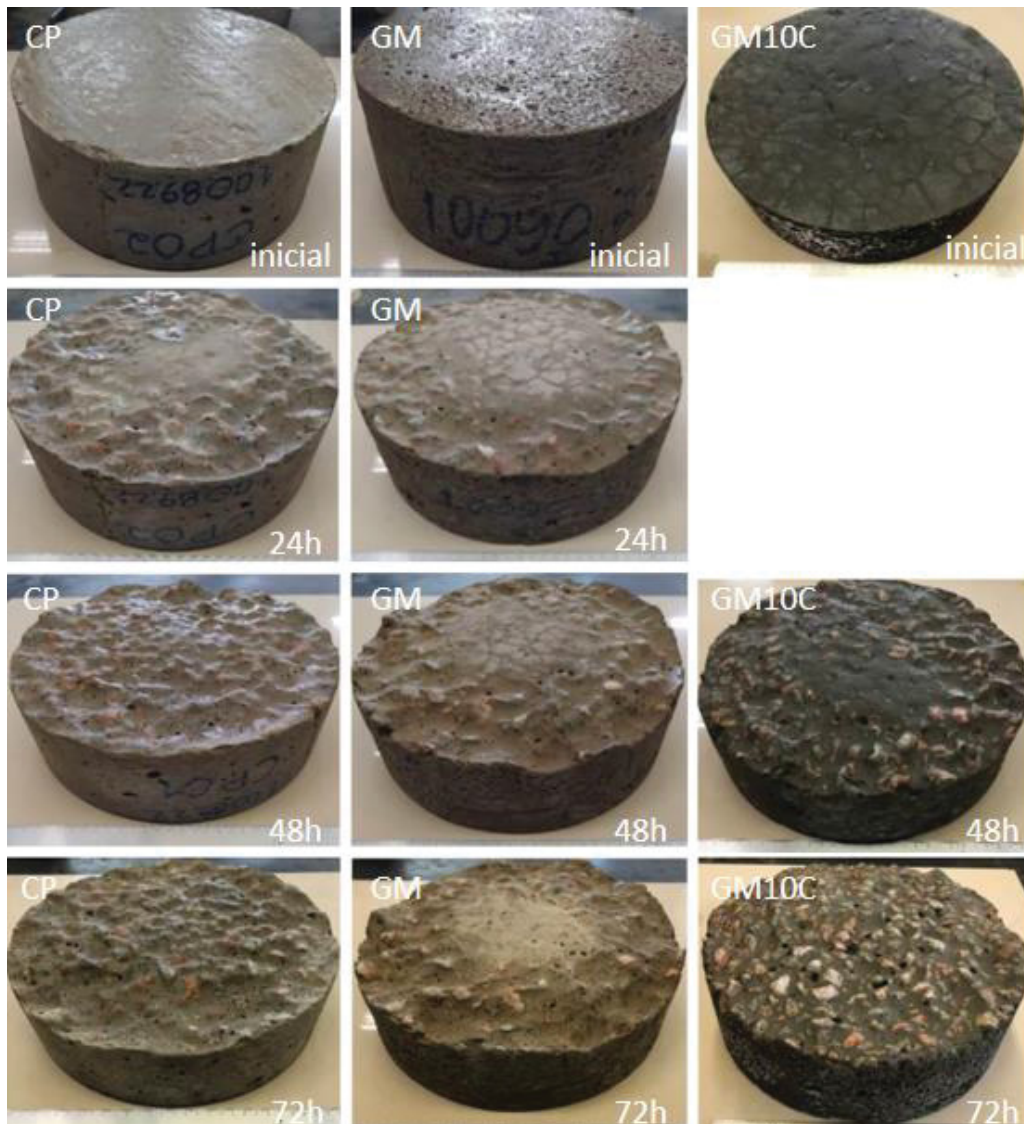
FONTE: o autor (2022).

A Figura 61 mostra duas superfícies de concreto abrasionadas. Em (a) percebe-se a zona de transição de CP com maior destaque do grão de agregado graúdo e evidencia a interligação entre os dois componentes. A Figura 61 mostra em (b) a interface matriz geopolimérica e agregado graúdo e evidencia a densificação dessa região, proporcionada pela maior viscosidade do sistema.

Assim, a ausência de exsudação e segregação, a elevada viscosidade, maior densidade e a ausência de uma zona de transição do concreto propiciam uma melhora na camada superficial e na matriz geopolimérica, fazendo com que haja menor perda de argamassa superficial, no primeiro estágio de abrasão hidráulica, bem como maior dificuldade na captura dos agregados graúdos, em um estágio abrasivo severo. A Figura 62 mostra as fotos dos corpos de prova tiradas durante o ensaio de abrasão hidráulica.

Essas características listadas também vão ao encontro do avanço dos resultados ao longo das 72 horas do ensaio, tendo em vista que a amostra de cimento Portland teve maior variação de perda de massa, de 24 horas para as 72 horas de ensaio, em comparação com as amostras geopoliméricas (Figura 62).

FIGURA 62: DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO HIDRÁULICA DOS CORPOS DE PROVA ESTUDADOS

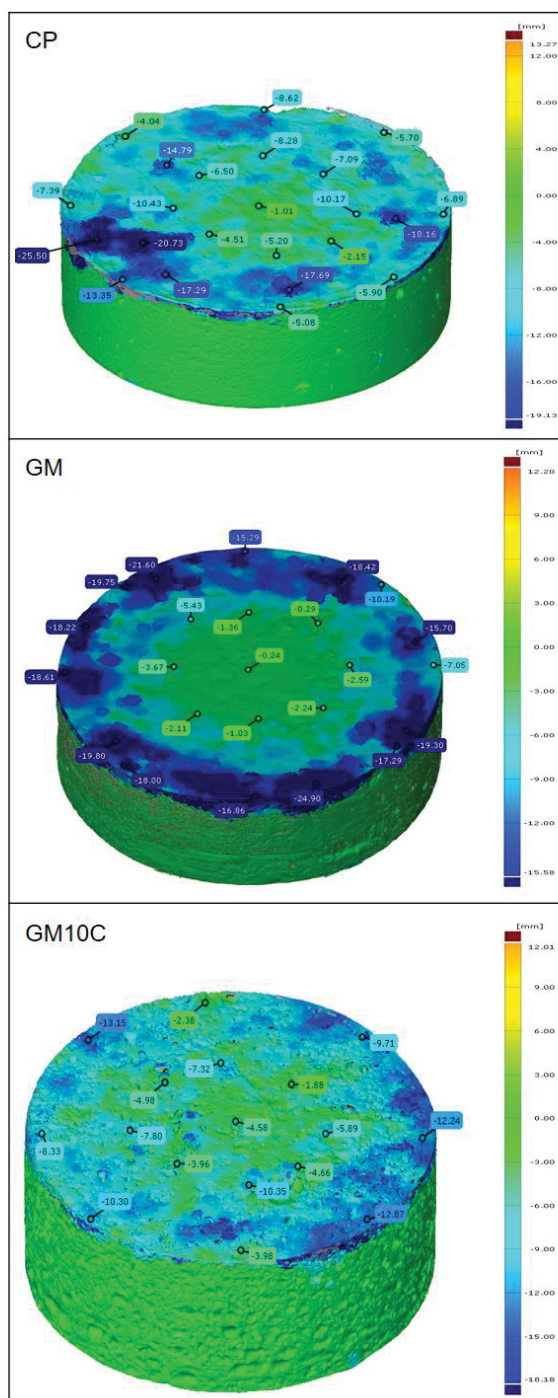


FONTE: o autor (2022).

A Figura 62 mostra os corpos de prova em estágio inicial, antes de serem ensaiados, e após 24, 48 e 72 horas de exposição ao desgaste pelo método de abrasão hidráulica. A imagem da amostra GM10C, para 24h, não foi fornecida pela empresa que realizou o ensaio. É possível notar que, diferentemente do ensaio de abrasão inorgânica, há a perda mais profunda de massa do concreto. Enquanto no ensaio de abrasão inorgânica há a perda da argamassa superficial do corpo de prova, no ensaio de abrasão hidráulica a abrasão se concentra em um estágio mais profundo, retirando até mesmo as partículas de agregado graúdo do corpo de prova, expondo vazios e acelerando ainda mais o processo de abrasão. Por isso podem ser

considerados procedimentos metodológicos totalmente diferentes para medir a abrasão superficial. A Figura 63 evidencia essa discussão por meio da exposição dos resultados das imagens de digitalização tridimensional das três misturas estudadas.

FIGURA 63: DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS MISTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA (72H)



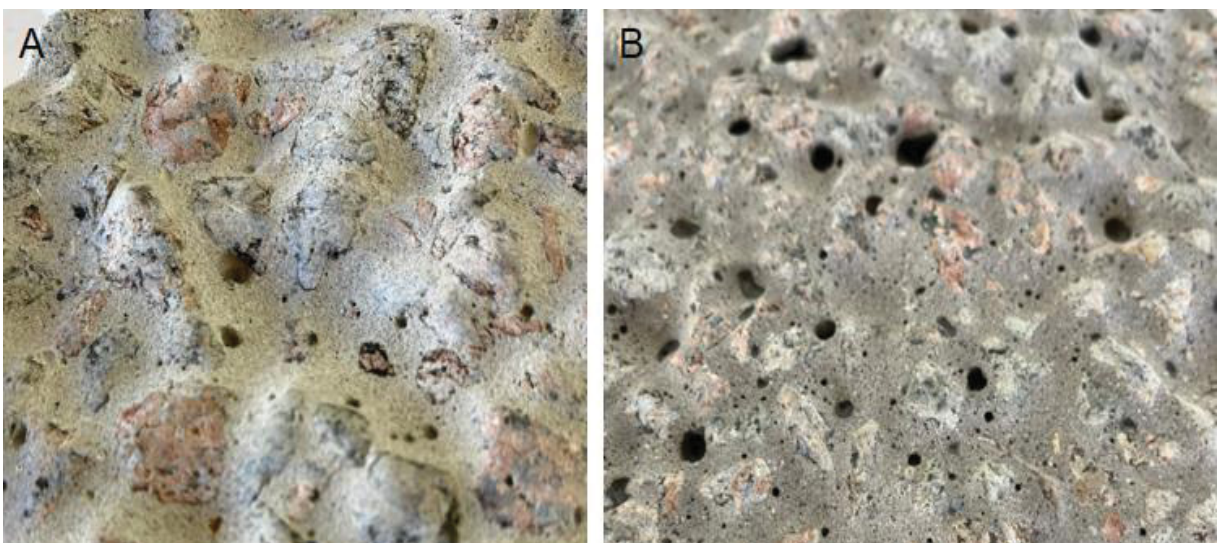
FONTE: o autor (2022).

A Figura 63 mostra que a perda da camada superficial do concreto se concentra na região próxima às bordas do corpo de prova e evidencia, mais uma vez as tensões existentes nessa região. Além disso, as esferas metálicas que promovem a abrasão neste ensaio acabam se concentrando nas laterais dos corpos de prova, em decorrência do fluxo da água promovido pela pá de agitação.

Alguns pontos específicos e com profundidade maior de abrasão, evidenciados principalmente em CP e GM (azul escuro), indicam perda de argamassa entre agregados graúdos e, também, perda dos grãos de agregados. Foram encontrados poros ou cavidades nas superfícies dos materiais, que podem ter sido originárias tanto de ar aprisionado no interior do corpo de prova, bem como pasta ou grãos de agregados que foram retirados durante o ensaio (Figura 62).

Embora a análise estatística e os dados mostrem que não houve influência da cinza de casca de arroz na resistência à abrasão hidráulica, em comparação com a amostra GM, fica nítido, por meio da Figura 63, que a cinza de casca de arroz promoveu uma melhora da camada superficial e aumento da resistência. A cinza atuou na densificação da matriz e, aliado a todas as outras justificativas expostas, evidenciam a melhor resistência à abrasão hidráulica do material. A Figura 64 mostra duas superfícies de concretos após o ensaio de abrasão hidráulica.

FIGURA 64: SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS GM (A) E GM10C (B) SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA

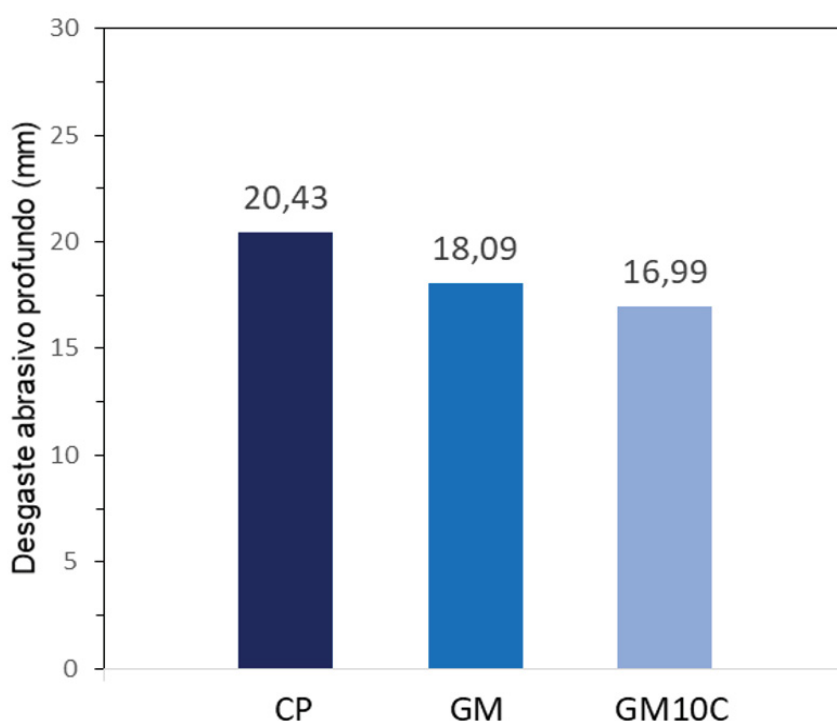


FONTE: o autor (2022).

d. Abrasão profunda

A Figura 65 mostra os resultados do ensaio de resistência à abrasão profunda após 28 dias de idade e apresenta a média dos três melhores corpos de prova, de um total de quatro amostras, conforme estabelecido pela NBR 9781 (2013). O apêndice H mostra todos os resultados de desgaste por abrasão profunda e que foram usadas para a análise estatística.

FIGURA 65: RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA



Obs.: Desvio Padrão: (CP: 1,59; GM: 0,47; GM10C: 1,56). FONTE: o autor (2022).

A Figura 65 comprova que mistura de concreto convencional possui o maior desgaste por abrasão profunda, em mm. A diferença, estatisticamente significativa, de CP para as amostras geopoliméricas foi de cerca de 11,45% para a amostra GM e de 16,84% para a amostra GM10C. Não houve diferença estatística entre as duas amostras geopoliméricas.

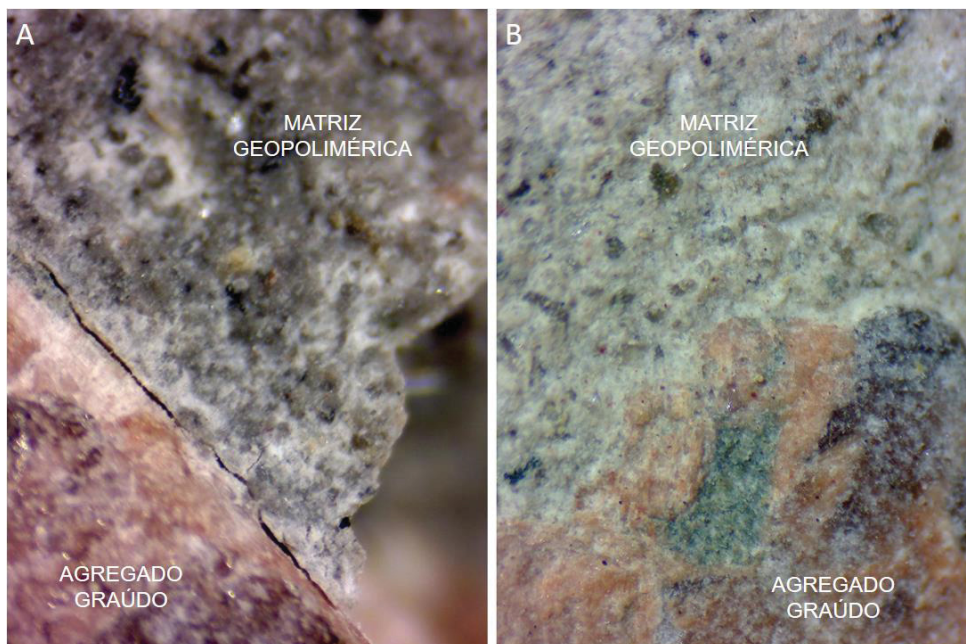
Dessa forma, é improvável que há influência do agregado graúdo no resultado do ensaio, tendo em vista que ele precisaria estar concentrado exatamente na pequena área que o abrasímetro utilizou para mensurar a abrasão profunda, na altura da camada superficial. Portanto, os resultados desta tese vem evidenciando

que as diferenças encontradas são de fato devido às diferentes matrizes cimentícias e a adesão das mesmas com os agregados.

A amostra CP teve resistência à abrasão profunda maior que outros estudos similares encontrados na literatura, com cimento Portland. Fioriti (2007) teve 36,34 mm de abertura da cavidade em ensaio de resistência de abrasão profunda em um concreto convencional com 19,39 MPa de resistência à compressão em 28 dias. O autor relacionou o aumento no teor de resíduos de borracha de pneus no concreto com a melhora na matriz cimentícia, aumento na densidade, bem como menor atrito do aço (material abrasivo) no concreto, aumentando a resistência à abrasão superficial. Não foram encontradas literaturas que tratam da resistência à abrasão profunda de concretos geopoliméricos.

A Figura 66 mostra duas superfícies de concreto geopoliméricas abrasionadas e a interface pasta/agregado graúdo das mesmas. A Figura 66 evidencia as características de duas superfícies de concreto abrasionadas, mostrando a aspereza da superfície, indicando a perda de partículas pequenas de material na superfície do concreto. Há também a presença de uma fissura em GM10C, que mostra que o desgaste superficial pode provocar tensões na superfície do material, levando ao aparecimento de fissuras.

FIGURA 66: INTERFACE PASTA/AGREGADO GRAÚDO DE GM10C (A) E GM (B)



Obs.: Aproximação 50 x. FONTE: o autor (2022).

A Figura 67 mostra um corpo de prova abrasionado pelo método da abrasão profunda.

FIGURA 67: CORPO DE PROVA ABRASIONADO UTILIZADO NO ENSAIO DE ABRASÃO PROFUNDA

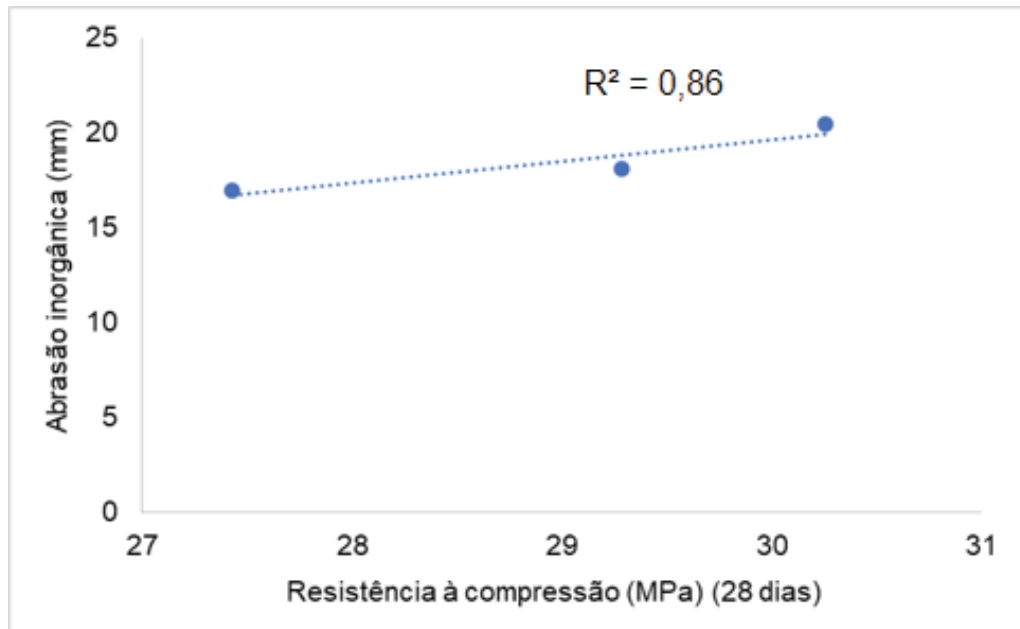


FONTE: O autor (2022)

A NBR 9781 (ABNT, 2013) classifica os desgastes por abrasão em duas categorias de concreto. As duas amostras geopoliméricas (GM e GM10C), com desgaste menor que 20 mm, foram classificadas como capazes de resistir a solicitações acentuadas de abrasão e tráfego de veículos especiais. A amostra de concreto CP obteve classificação inferior, por ter desgaste maior que 20 mm, e se enquadrou na categoria capaz de resistir ao tráfego de pedestres e veículos leves ou comerciais de linha.

O ensaio de resistência à abrasão profunda, assim como o ensaio de resistência à abrasão inorgânica, apresentou tendência de correlação com a resistência mecânica, aos 28 dias de idade, (R^2 : 0,86). Dessa forma, vai ao encontro da pesquisa de Silva (2015), que já discutiu a relação entre essas duas propriedades e concluiu que a melhora da matriz cimentícia como um todo vai proporcionar melhora na resistência à abrasão. A Figura 68 mostra a correlação entre as duas propriedades.

FIGURA 68: CORRELAÇÃO ENTRE A ABRASÃO PROFUNDA E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (28 DIAS)



FONTE: O autor (2022)

Além disso, a densificação da camada superficial do concreto, promovida pela cinza de casca de arroz, conferiu ao material maior resistência ao desgaste por abrasão superficial profunda. Outrossim, a matriz geopolimérica com metacaulim ou metacaulim/cinza de casca de arroz também mostrou ser adequada para aplicação em locais no qual o esforço de abrasão superficial é preponderante.

A Tabela 25 mostra a relação entre a resistência à compressão do concreto, aos 28 dias de idade, com a resistência à abrasão profunda.

TABELA 25: RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E A RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA DO CONCRETO

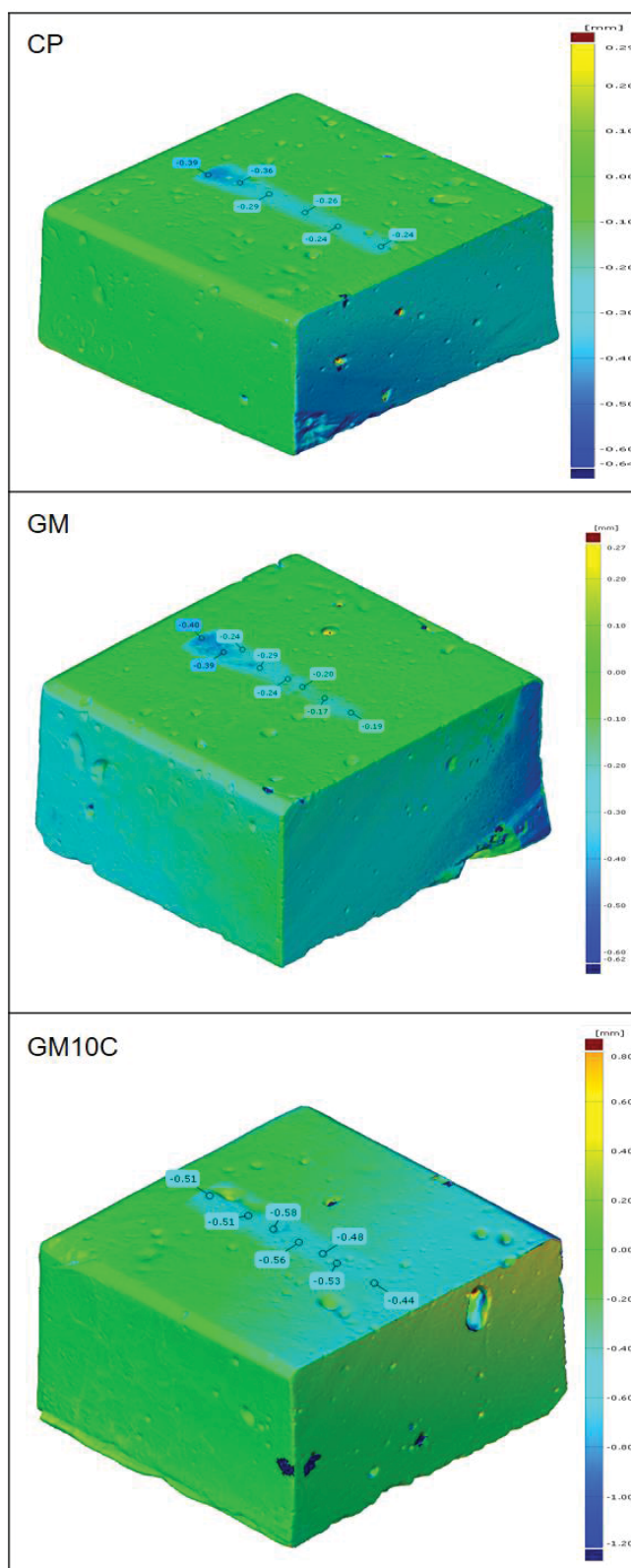
	Relação entre RAP e Resistência à compressão (28d) (mm/MPa)
CP	0,68
GM	0,61
GM10C	0,62

Obs.: RAP: Resistência à abrasão profunda. FONTE: o autor (2022).

A Tabela 25 mostra que para cada 1 MPa de concreto convencional são gerados 0,68 mm de desgaste superficial pelo método da abrasão profunda. Além disso, as amostras geopoliméricas representam relação inferior, 0,61 e 0,62, respectivamente.

A Figura 69 mostra a digitalização tridimensional dos três corpos de prova estudados.

FIGURA 69: DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS MISTURAS DE CONCRETO SUBMETIDAS AO ENSAIO DE ABRASÃO PROFUNDA



FONTE: o autor (2022).

A Figura 69 mostra as áreas dos corpos de prova que sofreram com o desgaste por abrasão profunda. Dos três métodos estudados, o método de abrasão profunda foi o que menos desgastou a superfície para atingir o resultado final. O ensaio aconteceu em um ponto específico do corpo de prova e o que pôde ser verificado foi a largura da cavidade provocada pelo aparelho abrasímetro, conforme previsto pelo método de ensaio. Dessa forma, medir uma determinada propriedade, no caso dessa tese, a resistência à abrasão, por diferentes técnicas é importante para complementar as análises e avaliar o desempenho dos materiais quanto a uma determinada requisição de esforços solicitantes. Por exemplo, se apenas a técnica da abrasão profunda tivesse sido executada, informações importantes a respeito da resistência à abrasão dos materiais avaliados, tal como o efeito da cinza de casca de arroz, não teriam sido descobertas.

e. considerações finais

Existem diversas formas de estimar a resistência à abrasão do concreto de forma acelerada. Assim, a presente pesquisa explorou três métodos distintos para mensurar o desgaste superficial por abrasão. Tendo em vista a compreensão e organização desses resultados, a Tabela 26 foi criada com a finalidade de classificar o comportamento das misturas em cada ensaio de abrasão.

TABELA 26: RESUMO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA POR ABRASÃO SUPERFICIAL DAS MISTURAS ESTUDADAS.

Misturas	Ensaio de abrasão							
	Abrasão inorgânica (28d)		Abrasão inorgânica (180d)		Abrasão hidráulica			Abrasão profunda
	500m	1000m	500m	1000m	24h	48h	72h	-
CP	2º	3º	INC	INC	2º	INC	INC	2º
GM	2º	2º	INC	INC	1º	INC	INC	1º
GM10C	1º	1º	INC	INC	1º	INC	INC	1º

Obs.: 1º, 2º e 3º representam a ordem dos melhores desempenhos para um determinado ensaio. INC: inconclusivo. FONTE: O autor (2022).

De forma geral, a mistura GM10C teve maior resistência ao desgaste por abrasão em todos os ensaios analisados. A amostra geopolimérica GM também teve boa resistência ao desgaste abrasivo e teve comportamento similar a GM10C na

abrasão hidráulica e na abrasão profunda. Por último, a amostra de concreto convencional com cimento Portland ficou em terceiro lugar e teve o pior comportamento, dentre as três misturas estudadas, em todas os ensaios analisados.

O ensaio de abrasão profunda mediu a largura da abertura da cavidade superficial promovida por uma superfície circular de aço e potencializada pelo material abrasivo óxido de alumínio. Esse processo ocorreu durante 75 rotações e durou cerca de 1 minuto para exprimir o resultado de desgaste em um paver.

Enquanto isso, em um ensaio parecido, o ensaio de abrasão inorgânica, mediu a diferença de altura do corpo de prova e a perda da camada superficial do concreto, em 4 pontos. Esse ensaio abrangeu a área total do corpo de prova, em um ensaio onde há a perda de material promovida pelo atrito entre o corpo de prova e uma superfície (mesa) de aço, potencializada pela areia normatizada n. 50. O ensaio dura cerca de 8 minutos ou 1000 metros de desgaste, tempo e percurso maior que o primeiro ensaio e em um corpo de prova menor.

Por outro lado, o ensaio de abrasão hidráulica, que dura cerca de 72 horas (tempo absolutamente maior que os outros dois ensaios) estima a perda de massa (%) em um corpo de prova também maior que o estabelecido pelas outras normas, onde há a perda de massa é promovida por esferas metálicas e potencializada pela ação da água. Neste ensaio não há somente perda da camada superficial do concreto, mas também a perda de material de enchimento e agregados graúdos, e promove assim um estágio severo de desgaste.

Nos ensaios de abrasão hidráulica e inorgânica, o agregado graúdo tem participação importante nos resultados de desgaste por abrasão. No primeiro caso pode haver a retirada do agregado e a potencialização do desgaste na área onde o mesmo estava localizado. No segundo caso, por causa do tamanho reduzido do corpo de prova e do desgaste de toda a superfície do material, o agregado graúdo fica exposto e parte do resultado de abrasão superficial pode ser, na verdade, a resistência à abrasão do próprio agregado. Como foi utilizado o mesmo agregado graúdo nos três concretos, esse efeito foi minimizado nesta tese.

Além disso, os três ensaios utilizaram fontes de metal para desgastar a superfície do concreto e materiais em pó para potencializar o efeito de abrasão no material. A única exceção foi o ensaio de abrasão hidráulica, que no lugar do material abrasivo em pó, se utilizou da água como fonte potencializador de desgaste.

Embora os três ensaios apresentem características similares e distintas em sua metodologia para obtenção de resultados, podem funcionar como complementação uma da outra. Durante a elaboração de um estudo, é imprescindível a obtenção do contexto geral sobre o material, o que torna a execução de dois ou três ensaios favorável para uma tomada de decisão de forma mais eficiente e precisa.

Por exemplo, a aplicação do ensaio de abrasão hidráulica seria interessante para o desgaste de alguma estrutura que tenha contato direto com ambientes marinhos com ação da maré; fluviais com ação de correntezas; pluviais; de drenagem ou calhas que sofrem com o fluxo da água ou de saneamento com fluxo de efluentes.

Já o ensaio de abrasão inorgânica seria interessante para ser aplicado em calçadas e passeios públicos, estruturas que tenham contato com silos de areia ou ainda em locais litorâneos, pois simula a ação da areia sobre o concreto.

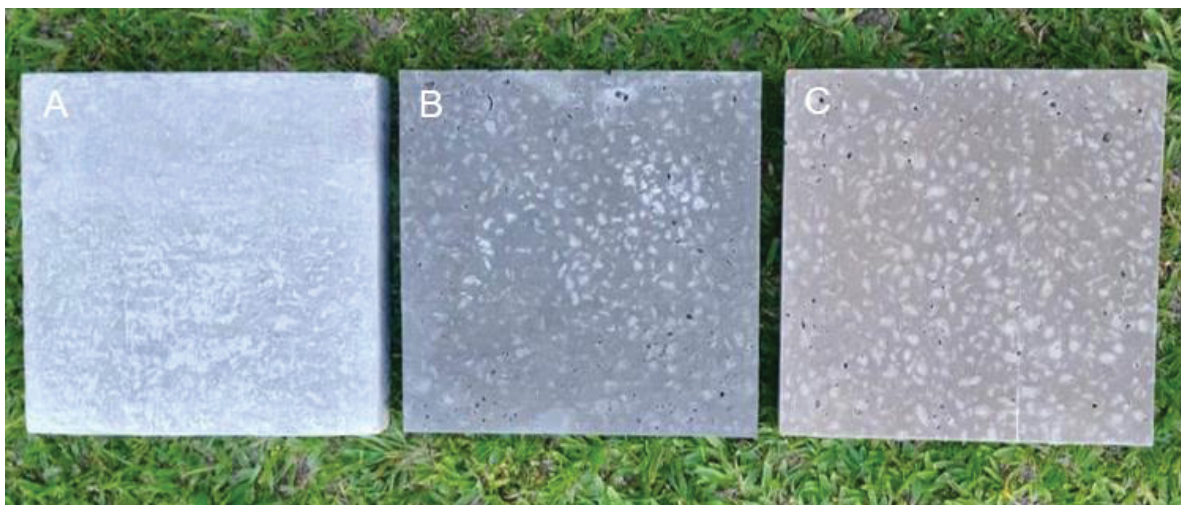
Por último, o ensaio de abrasão profunda seria ideal para aplicação em um piso industrial, pois simula o desgaste com carbetão de silício e uma esfera metálica, imitando uma máquina abrasionando o material.

De um modo geral, as duas misturas geopoliméricas tiveram melhores resultados de resistência à abrasão superficial nos três ensaios acelerados, aos 28 dias de idade, do que a amostra de concreto padrão com cimento Portland. Esse comportamento acontece, pois a matriz geopolimérica, formada pelo gel NASH, se mostra com uma microestrutura mais densa e também apresenta menor porosidade, conforme também foi evidenciado pelo ensaio de massa específica, absorção de água, complementado pelo ensaio de dureza superficial, e também pela viscosidade imposta pelos ativadores alcalinos, que conferem maior estabilidade ao material e dificultam a quebra da ligação entre as partículas, processo que ocorre durante o desgaste abrasivo). Como desvantagem, foi identificada perda de resistência à compressão de 28 para 180 dias das amostras geopoliméricas, bem como a eflorescência a longo prazo. Contudo, mesmo com essas desvantagens, esses materiais ainda se comportaram melhor que o concreto convencional.

5.4 DESGASTE SOB CONDIÇÕES NATURAIS DE EXPOSIÇÃO E COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS ACELERADOS

A Figura 70 mostra as placas de concreto antes da exposição aos ciclos de desgaste natural.

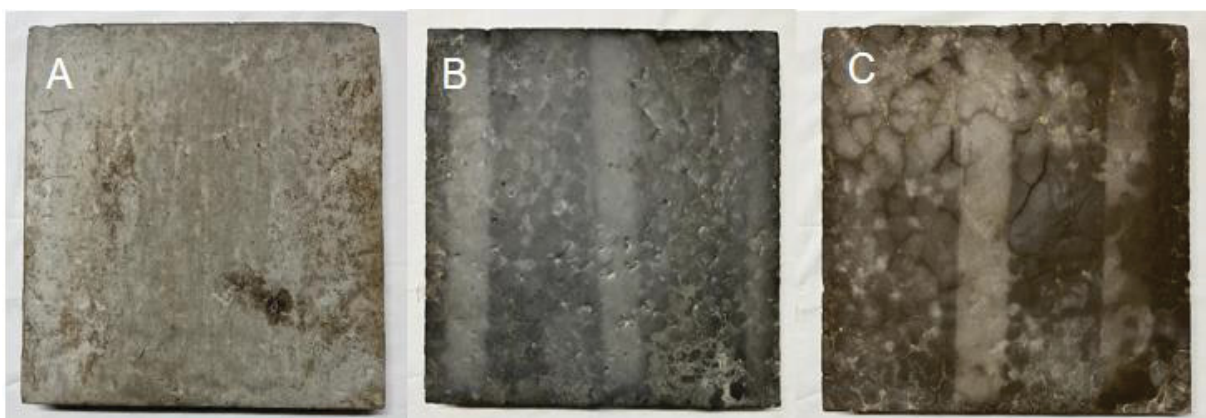
FIGURA 70: PROTÓTIPOS DE CP (A), GM10C (B) E GM (C) ANTES DA EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE DESGASTE NATURAL



FONTE: o autor (2022).

A Figura 71 mostra a superfície desgastada dos protótipos após a exposição aos 10.400 ciclos de desgaste natural.

FIGURA 71: PROTÓTIPOS DE CP (A), GM10C (B) E GM (C) DEPOIS DA EXPOSIÇÃO AOS CICLOS DE DESGASTE NATURAL



FONTE: O autor (2022).

Conforme a Figura 72, as duas placas de concreto geopoliméricas apresentaram fissuração nas bordas do material, que ficaram representados com cor azul escuro, mostrando uma variação de até 2,47 mm nesses pontos. Tal efeito não aconteceu na amostra convencional (CP). É importante ressaltar que qualquer lascamento ocorrido durante o transporte desse material imprimi resultado na leitura final do equipamento. Por isso, a análise desses pontos precisa ocorrer de forma criteriosa.

Além disso, a área central dos três materiais foi desgastada de forma similar, com desgastes inferiores a 1 mm. Alguns pontos das placas GM10C e CP mostraram aumento de tamanho em comparação com a leitura inicial (0,04 até 0,36 mm), o que pode ser resultado da calibração do equipamento que realizou a digitalização.

Em decorrência do comportamento similar de desgaste entre os três protótipos, é possível afirmar que, no geral, não houve influência significativa da queda de resistência à compressão, aos 180 dias de idade, em GM e GM10C, no desgaste por abrasão dos protótipos. Porém, há a necessidade de exploração dos resultados em idades posteriores.

Também, o desgaste natural das placas de concreto, promovido pelo pneu do carro bem como pela ação natural de intempéries promoveu desgaste discreto nas superfícies dos materiais, diferente do comportamento dos corpos de prova que foram expostas aos ensaios acelerados de abrasão.

Há algumas diferenças na aplicação de métodos acelerados e do desgaste natural do concreto quanto à abrasão superficial. Uma questão importante a ser analisada nessa comparação é sobre a dureza, impacto e adesão promovida pelo material que exerce o desgaste superficial em ensaios acelerados. Se por um lado há a exposição de superfícies a esferas metálicas para exprimir resultados em minutos, na aplicação prática, sob condições normais de exposição, é improvável que isso aconteça.

Quando um corpo de prova é exposto em um local preponderante à abrasão superficial, ele sofre desgaste de diversos tipos de superfície, principalmente borracha (pneus e solas de calçados), mas também de polímeros e diversos tipos de metais, madeiras e materiais orgânicos. Dificilmente essa exposição de minutos do aço no concreto, promovido por um ensaio acelerado, vai conseguir imprimir o real

desgaste da peça, que poderá levar muitos anos para ter um desgaste visível, tornando árdua a tarefa da criação de um paralelo entre as duas maneiras de desgastar. Essa é a principal questão a ser analisada e questionada em ensaios acelerados. O mais importante identificado e validado por meio dos ensaios de desgaste natural é que as placas de geopolímeros se comportaram de maneira similar ao material comumente utilizado em pisos sujeitos a abrasão, no caso os concretos de cimento Portland. Portanto, o bom comportamento dos concretos geopoliméricos observados nos três ensaios acelerados foram confirmados em condições naturais.

Além disso, considerou-se na aplicação dos protótipos sob condições naturais de exposição que o material que tivesse contato com o concreto e promovesse a abrasão seria o pneu de borracha do veículo, além da pressão exercida pelo peso próprio do mesmo. Diferentemente do promovido pelo ensaio acelerado, que impõe somente o aço como agente de deterioração.

Outra questão a ser analisada é a severidade com que os corpos de prova são expostos à abrasão superficial. Embora o ambiente proporcionado pelo ensaio acelerado seja rude e hostil, dificilmente seria encontrado algum ambiente parecido em uma aplicação sob condições normais de exposição.

A presença de água, no ensaio de abrasão hidráulica, ou de materiais finos, como a areia e o carbetto de silício, são inseridos em abundância nos ensaios acelerados, o que é incomum na exposição natural da peça.

Quando se submete um material a um determinado ensaio, está se pressupondo que ele passe por tal situação durante a sua vida útil. Além disso, ensaios acelerados podem simplificar os processos de desgaste dos materiais e facilmente omitir atuações de desgaste que acontecem no decorrer da vida útil do material. Por isso é tão importante associar os resultados de vários ensaios acelerados com uma validação natural para a tomada de decisões.

Dessa forma, fazer um paralelo entre os ensaios acelerados de abrasão e o desgaste natural das peças de concreto se torna uma tarefa árdua, porém a discussão dessa comparação se torna de fundamental importância para execução da correta dosagem do concreto, aumento da vida útil do material e diminuição de custos com reparo.

5.5 ANÁLISE DE CUSTO

Foi realizada uma análise de custo direto para a produção de 1 m³ de concreto de cada mistura estudada (Tabela 27). Para a execução do levantamento foram utilizados preços cobrados em lojas de materiais de construção de Santa Catarina (areia, brita e cimento), bem como o preço cobrado pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (água). O preço do metacaulim foi baseado na pesquisa de Ferreira (2017) e da cinza de casca de arroz na pesquisa de Londero (2017). O preço do hidróxido de sódio e do silicato de sódio alcalino foram encontrados em lojas virtuais de produtos químicos, na internet.

TABELA 27: CUSTO PARA A PRODUÇÃO DAS MISTURAS DE CONCRETO

Material	Constituintes	Quantidade para 1m ³	Und.	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)	Total (R\$)
CP	Água	218,931	L	R\$ 0,01	R\$ 1,97	R\$ 439,28
	Areia natural	632,668	kg	R\$ 0,07	R\$ 46,01	
	Brita n.1	1000,565	kg	R\$ 0,07	R\$ 66,15	
	Cimento CP II-E	541,909	kg	R\$ 0,60	R\$ 325,15	
GM	Água	70,16875	L	R\$ 0,01	R\$ 0,63	R\$ 2.610,74
	Areia natural	767,625	kg	R\$ 0,07	R\$ 55,83	
	Brita n.1	901,25	kg	R\$ 0,07	R\$ 59,58	
	Hidróxido de sódio	35,5625	kg	R\$ 17,59	R\$ 625,54	
	Metacaulim	333,75	kg	R\$ 0,93	R\$ 310,39	
	Silicato de sódio alcalino	369,375	kg	R\$ 4,22	R\$ 1.558,76	
GM10C	Água	70,16875	L	R\$ 0,01	R\$ 0,63	R\$ 2.584,04
	Areia natural	767,625	kg	R\$ 0,07	R\$ 55,83	
	Brita n.1	901,25	kg	R\$ 0,07	R\$ 59,58	
	Cinza de casca de arroz	33,375	kg	R\$ 0,13	R\$ 4,34	
	Hidróxido de sódio	35,5625	kg	R\$ 17,59	R\$ 625,54	
	Metacaulim	300,375	kg	R\$ 0,93	R\$ 279,35	
	Silicato de sódio alcalino	369,375	kg	R\$ 4,22	R\$ 1.558,76	

FONTE: o autor (2022).

A Tabela 27 mostra que o concreto geopolimérico apresenta custo superior de fabricação, cerca de 590% maior em relação ao custo do concreto convencional. Esta diferença ocorre, principalmente, devido ao elevado custo dos seus ativadores alcalinos, principalmente o silicato de sódio alcalino, que é responsável por cerca de

60% do custo global de cada mistura geopolimérica. Além disso, a substituição de 10% de metacaulim pela cinza de casca de arroz foi responsável pela diminuição de cerca de 1% do custo global para a produção de GM10C. A diferença de custo na produção de concreto geopolimérico também foi evidenciado por Araújo (2018) que encontrou uma diferença de 10x no custo da produção de concreto geopolimérico em comparação com o concreto convencional. Dessa forma, para reduzir o custo das amostras geopoliméricas usadas nesta pesquisa, seria importante avaliar no futuro uma nova mistura de geopolímero com uma menor quantidade de silicato de sódio alcalino e com um maior teor de cinza de casca de arroz.

Há a perspectiva de que, com o passar do tempo, a utilização dos materiais geopoliméricos sejam mais difundidas no universo da construção civil, passando a ter matérias-primas com custo mais acessível. Também, há a possibilidade de surgirem novos estudos e que seja possível a substituição do silicato de sódio alcalino por outros materiais ativadores com menor custo (ARAÚJO, 2018).

Além disso, há também a tendência de que materiais poluidores do meio ambiente, como o cimento Portland se tornem cada vez mais caros. Portanto, os materiais geopoliméricos, por se utilizarem de fontes de resíduos para sua fabricação podem se tornar cada vez mais competitivos nesse cenário (ARAÚJO, 2018).

6 CONCLUSÕES

A utilização do metacaulim e da cinza de casca de arroz, bem como o silicato de sódio alcalino e o hidróxido de sódio se mostraram adequados para a confecção de concretos geopoliméricos com propriedades similares e resistência à compressão, aos 28 dias, estatisticamente igual ao do concreto convencional.

Concretos convencionais e geopoliméricos foram testados quanto as suas propriedades no estado fresco e endurecido, no qual pôde-se mostrar que as amostras geopoliméricas apresentaram, no estado fresco, menor massa específica e maior consistência e viscosidade em relação à amostra de cimento Portland. Além disso, nenhuma amostra apresentou exsudação ou segregação.

No estado endurecido, apesar de apresentarem resistência mecânica à compressão similar aos 28 dias de cura, concretos geopoliméricos apresentaram maior dureza superficial e menor absorção de água. Além disso, concretos geopoliméricos tiveram decréscimo médio de 14% na resistência à compressão, aos 180 dias de idade, e eflorescência. Enquanto isso, no mesmo período, o concreto convencional teve aumento de 17% na resistência à compressão.

Os três ensaios acelerados de abrasão superficial mostraram que as misturas geopoliméricas apresentaram menor desgaste superficial por abrasão que a amostra de concreto convencional. No ensaio de abrasão profunda e no de abrasão hidráulica (24h), as duas misturas geopoliméricas apresentaram desgaste estatisticamente igual.

No ensaio de abrasão inorgânica, em 28 e 180 dias, a amostra GM10C teve menor desgaste que a amostra GM e evidencia a influência da cinza de casca de arroz no resultado final. Além disso, a resistência à abrasão do concreto convencional teve maior crescimento em 180 dias de idade do que as amostras geopoliméricas, associado ao aumento de resistência à compressão do concreto convencional ao longo do tempo.

A aplicação de protótipos de concreto sob condições normais de exposição à abrasão e intempéries, durante 6 meses e cerca de 10.400 ciclos de desgaste, demonstrou comportamento similar entre as três misturas estudadas e menor desgaste abrasivo que os ensaios acelerados.

Dessa forma, concluiu-se que há influência direta do tipo de material que promove a abrasão, bem como seu potencializador, nos ensaios acelerados de

desgaste superficial por abrasão. Além disso, a simplificação e omissão de processos durante os ensaios acelerados são fatores preocupantes na correta determinação da resistência à abrasão e na futura especificação da aplicação do concreto. Dessa forma, a execução de mais ensaios de abrasão é encorajada na etapa de planejamento e dosagem dos materiais.

A principal conclusão desta tese, não encontrada em nenhuma outra pesquisa anterior, é de que os concretos geopoliméricos apresentaram comportamento similar ou superior ao concreto de cimento Portland em aplicações onde os esforços de abrasão são preponderantes, independentemente do tipo de material abrasivo ou ensaio acelerado de abrasão utilizado. Além disso, o desgaste natural de abrasão mostrou que em condições reais de abrasão, o desgaste é muito inferior aos ensaios acelerados.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a execução desta pesquisa surgiram alguns questionamentos que não puderam ser respondidos. Por isso, sugere-se a realização dos mesmos em novas pesquisas da área de materiais de construção civil:

- Estudar o efeito da variação da viscosidade dos concretos geopoliméricos na resistência à abrasão superficial;
- Substituir o ativador alcalino NaOH por KOH, ou algum outro ativador de menor custo, na fabricação de concretos geopoliméricos submetidos a aplicações onde os esforços de abrasão superficial são preponderantes;
- Aplicar os protótipos de concreto convencional e geopolimérico por períodos mais longos de exposição para compreensão da resistência à abrasão superficial em idade avançada;
- Substituir teores maiores que 10% de metacaulim pela cinza de casca de arroz para produção de concretos geopoliméricos expostos à abrasão.
- Aplicar os ensaios acelerados de resistência à abrasão superficial em concretos com idade avançada.

REFERÊNCIAS

ABID, Sallal R.; HILO, Ali N.; DAEK, Yasir H.. Experimental tests on the underwater abrasion of Engineered Cementitious Composites. **Construction and Building Materials**. v. 171. n. 11. p. 779-792. 2018. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818306706>>. Acesso em 20 abr. 2020.

ABID, Sallal R.; ALI, Sajjad H.; MURALI, Ali, G.; AL-GASHAM, Thaar S.. A simple suggested approach to reduce the testing time of concrete surface abrasion using ASTM C1138. **Case Studies in Construction Materials**. v.15. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952100200X>>. Acesso em 20 abr. 2022.

ABITANTE, A. L. R. Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados. 2004. 250 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

ACI Committee 302. **ACI 302.1R-04 - Guide to Concrete Floor and Slab Construction**. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2004.

ADAM, Andi Arham. Strength and Durability Properties of Alkali Activated Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. 2009. 219f. **Tese** (Doutorado em Filosofia) Escola de Engenharia Civil, Ambiental e Química. RMIT University, Melbourne. 2009.

ALBIDAH, A.; ALGHANNAM, M.; ABBAS, H.; ALMUSALLAM, T.; AL-SALLOUM, Y. Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters. **Journal of Materials Research and Technology**. v. 10. n. 1. p. 84-98. 2021.

ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Adb Elmoaty M. Adb Elmoaty; SALEM, Hazem A. Effect of Cement Addition, Solution Resting Time and Curing Characteristics on Fly Ash Based Geopolymer Concrete Performance. **Construction and Building Materials**. v. 123, n. 19, p. 581-593, 2016. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816311424>>. Acesso em 25 ago. 2016.

ALONSO, S.; PALOMO, A. Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide–metakaolin solid mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 1. p. 25-30, 2001.

ALMEIDA, I. R. Influência da resistência à abrasão do agregado graúdo na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho. In: REIBRAC-IBRACON, 42, Fortaleza/CE, 2000. **Anais...** Fortaleza: Ibracon. 2000.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C418**: Abrasion resistance of concrete by sandblasting: West Conshohocken, 2012.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C 1138**: Abrasion resistance of concrete (underwater method): West Conshohocken, 2019a.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C 779**: Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces: Pennsylvania, 2019b.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C 944**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method: West Conshohocken, 2019c.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C1747**: Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion: West Conshohocken, 2013.

AMIN, Mohamed; ELSAKHAWY, Yara; EL-HASSAN, KHALED Abu; ABDELSALAM, Abdelsalam, Bassan. Behavior evaluation of sustainable high strength geopolymer concrete based on fly ash, metakaolin, and slag. **Case Studies in Construction Materials**. v. 16. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952201085>>. Acesso em 25 mar. 2022.

AMINI, Kamran; CEYLAN, Halil; TAYLOR, Peter C.. Effect of curing regimes on hardened performance of concrete containing slag cement. **Construction and Building Materials**. v. 211. n. 1. p. 771-778. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819307706>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

AMRAN, Y. H. M.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR; H.; EL-ZEADANI, M.. Clean production and properties of geopolymer concrete: a review. **Journal of Cleaner Production**. v. 251. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619345494>>. Acesso em 17 abr. 2020.

APOLONIO, Priscila Honorio. **Produção de geopolímeros usando cinza de casca de arroz como fonte complementar de sílica**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2017.

ARAÚJO, Lucas Giovanni Costa de Araújo e. **Caracterização destrutiva e não destrutiva de concreto geopolimérico álcali-ativado com base em metacaulim**. João Pessoa: UFPB. 2018.

ARMESTO, L.; BAHILLO, A.; VEIJONEN, K.; CABANILLAS, A.; OTERO, J. Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. **Biomass and Bioenergy** v. 23. n. 3. p. 171-179. 2002.

ARSLAN, Ahmet Ali; UYSAL, Mucteba; YILMAZ, Arin; MASHHADANI, Mukhallad M.; CANPOLAT, Orhan; SAHIN, Furkan; AYGÖRMEZ, Yurdakul. Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites. **Construction and Building Materials**. v. 125. n.1. p.909-926. 2019. Acesso em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819319063>>. Acesso em 25 jan. 2021.

ASAYESH, S.; JAVID, A. A. S.; ZIARI, H.; MEHRI, B.. Evaluating fresh state, hardened State, thermal expansion and bond properties of geopolymers for the repairing of concrete pavements under restrained conditions. **Construction and Building Materials**. v. 292. n. 1. p. 1-13. 2021.

ASSI, Lateef N.; CARTER, Kealy; DEEVER, Edward; ZIEHL, Paul. Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 263. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620315249#bib58>>. Acesso em 15 jun. 2020.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. **Tipos de Cimentos**. 2020. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/tipos/>>. Acesso em 25 mar. 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 67**. Concreto: Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro, 1998.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 5738**. Concreto: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7211**. Agregados para concreto: Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8953**: Concreto para fins Estruturais - Classificação pela Massa Específica, por Grupos de Resistência e Consistência, Rio de Janeiro, 2015b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 9778**. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009c.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 9781**. Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 9833**. Concreto Fresco: Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro. 2009b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR11801**. Argamassa de alta resistência mecânica para pisos. Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12042**. Materiais Inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 2012a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12653**. Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland: Preparo, controle, recebimento e aceitação: Procedimento. Rio de Janeiro, 2015a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15558**: Concreto – Determinação da exsudação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: requisitos. São Paulo, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT. **NBR 16697**: Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ATIS, Cengiz Duran. Heat evolution of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 32. n. 5. p 751-756, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601007554>>. Acesso em 06 set. 2020.

ATIS, Cengiz Duran. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**. v. 17. n. 3. p 147-152, 2003. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061802001162>>. Acesso em 06 set. 2020.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T.; Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**. v. 64. p. 388-396. 2018. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/ce/a/NXBhYRkFNXVwqZsFjJMshnP/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 06 jun. 2022.

AYGÖRMEZ, Yurdakul; CANPOLAT, Orhan; AL-MASHHADANI, Mukhlallad. Assessment of geopolymer composites durability at one year age. **Journal of Building Engineering**. v. 32. 2020. Acesso em 10 jun. 2020.

BARROSO, M. D. B. **Desenvolvimento de compósitos com matriz de Geopolímeros reforçados com partículas de quasicristais AlCuFe**. 2009, 164p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2009.

BADOGIANNIS, E.; G. KAKALI; G. DIMOPOULOU; E. CHANIOTAKIS; TSIVILIS, S.. Metakaolin as a main cement constituent. Exploitation of poor Greek kaolins.

Cement and Concrete Composites. v. 27. n. 2. p. 197-203. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504000228>>. Acesso em 06 set. 2020.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; RODRIGUES, Hugo. Recomendações sobre o uso dos distintos tipos de Cimento Portland nas diferentes aplicações. **Concreto e Construções**. São Paulo. v. 1, n. 73, p. 30–38, 2014.

BEIXING, Li; GUOJU, Ke; MINGKAI, Zhou. Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete. **Construction and Building Materials**. v. 25, n. 10. p. 3849-3853. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811001449#b0070>> . Acesso em 25 mar. 2020.

BIE, R. S.; SONG, X. F.; LIU, Q. Q.; JI, X. Y.; CHEN, P. Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. **Cement and Concrete Composites**. v. 55. n.1. p.162-168. 2015.

BILLONG, Ndigui; KINUTHIA, John; OTI, Jonathan; MELO, Uphie Chinje. Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin (MK) and Rice Husk Ash (RHA): Effect on tensile strength and microstructure. **Construction and Building Materials**. v. 189. n. 1. p. 307-313. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818321603?via%3Dihub>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

BORGES, Paulo Henrique Ribeiro; LOURENÇO, Thuany Marra de Figueiredo; FOUREAUX, Ana Flávia Souza; PACHECO, Luiza Soares. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**. v. 14. n. 2. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000200011>>. Acesso em 25 ago. 2020.

BRITO, W. DA S. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo industrial**. 2018, 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal do Pará, Belém. 2018.

BUEST Guilherme Teodoro; SILVA, Narciso G.; CAMPITELI, Vicente Coney. Dosagem de finos em concretos com agregados miúdos e graúdos britados. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47. 2005. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon. 2005. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/ARTIGO%20IBRACON.pdf>>.

CAI, Jingming; PAN, Jinlong; LI, Xiaopeng; TAN, Jiawei; LI, Jiabin. Electrical resistivity of fly ash and metakaolin based geopolymers. **Construction and Building Materials**. v. 234. n. 1. p. 117868 – 117877, 2020a. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0950061819333215?token=8B7254FBE553F39D86165B253295B140C933675D2FD85D64B9A71ED5810BD3AB4FF8EDF4935FF5DB3326E1E638E31A40>>. Acesso em 20 mar. 2020.

CAI, Jingming; LI, Xiaopeng; TAN, Jiawei; VANDEVYVERE, Brecht. Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymer. **Journal of Building Engineering**. v. 30. 2020b. Acesso em: 10 jun. 2020.

CAMOES, Aires. Betões de Elevado Desempenho com Elevado Volume de Cinzas Volantes. **Engenharia Civil**. v. 10, n. 23, p. 55-64, 2005.

ÇAVDAR, Ahmet; YETGIN, Sükrü. Investigation of abrasion resistance of cement mortar with different pozzolanic compositions and subjected to sulfated medium. **Journal of Materials in civil engineering**. v. 24, n.4. p. 461-470. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809003535>>. Acesso em 25 mar. 2020.

CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015, 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2015.

CHEYAD, Shams M.; HILO, Ali N.; AL-GASHAM, Thaar S. Comparing the abrasion resistance of conventional concrete and geopolymer samples. **Materials Today: proceedings**. v. 56. n. 4. p. 1832-1839. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532107036X>>. Acesso em 30 jun. 2016.

CHI, Maochieh; HUANG, Ran. Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete. **Cement and Concrete Composites**. v.45, n.1. p.148-156. 2014.

CHODOUNKY, M.A., VIECILI, F.A. **Pisos Industriais de Concreto: aspectos teóricos e executivos**. São Paulo: Reggenza, 2007

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia. Metodologia para Determinação de Resistência a Abrasão Superficial de Concreto. 2016.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese (Doutorado). COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

CUNHA M. F.; FORTI B.A.; SILVA B.I. Tendências da normalização de metacaulim para uso em concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 52, NOVAS TECNOLOGIAS DO CONCRETO PARA O CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL, outubro 2010, Ceará. **Anais: IBRACON 2010**, p. 46.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**. v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and Concretes**. 1994. Kiev, Ukraine, p. 131-144, 1994.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer cement, a review**. 3^a Ed. Saint Quentin – France: Geopolymer Institute. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 090: Patologias do concreto – Especificações de serviço**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DIAS, D. P. **Cimentos geopoliméricos: estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura**. 2001. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia) Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro. 2001.

DUARTE, Laura Medina. **Estudo da Aderência em perfis tubulares de aço preenchidos com concreto geopolimérico**. 107 f. 2017. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2017.

DUARTE, Gonçalo; BRAVO, Miguel; BRITO, Jorge de; NOBRE, José. Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete. **Construction and Building Materials**. v. 210. n.1. p. 696-708. 2019. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819306476>>. Acesso em 21 mar. 2020.

DUXSON, P.; MALLICOAT, S.W.; LUCKEY, G. C.; KRIVEN, W.M.; VAN DEVENTER, J. S. J.. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Materials Science and Engineering and Mechanical Science and Engineering**. v. 292, n. 1, p. 8-20, 2007.

EL- AZIZ, M. A.; HEIKAL, M.; EL-AWNEY, S. A. M.. Effect of polycarboxylate on rice husk ash pozzolanic cement. **Silicates Industriels**. v. 69. n. 1. p. 73-84, 2004.

FELIZARDO, V.; NANDI, V. S.; DONADEL, K.; NOVAIS, R.; LABRINCHA J.; ZACARON, A.. Desenvolvimento de geopolímeros de baixa condutibilidade térmica. **Matéria**. v. 21. n.1. p. 429-436, 2016.

FERREIRA, Everton Henrique. **Desempenho estrutural e viabilidade econômica do uso do metacaulim em concreto dosado em central**. Santa Cruz do Sul: UNISC. 2017.

FIORITI, Cesar Fabiano. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. 218 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

FLORIANO, Fernando Joaquim. **Valorização dos resíduos do processo de anodização de alumínio e cinza de casca de arroz por meio da obtenção de**

zeólitas. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

FRARE, Andreza. **Uso da cinza de casca de arroz em cimentos álcali-ativados como fonte alternativa de sílica**. 2018. 70 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2018.

FREIRE, Alisson Lopes; MOURA-NICKEL, Camila Daniela; SCARATTI, Gidiane; ROSSI, Andreia de; ARAÚJO, Maria Helena; JÚNIOR, Agenor de Noni; RODRIGUES, Alírio Egídio; CASTELLÓN, Enrique Rodriguez; MOREIRA, Regina de Fátima Peralta Muniz. Geopolymers produced with fly ash and rice husk ash applied to CO₂ capture. **Journal of Cleaner Production**. v. 273. n.1. p. 1-16. 2020.

FREITAS, S. M. B. A. **Adição de geomanta e tecido não tecido de polipropileno em cimentos geopoliméricos de pega rápida**. 2008, 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, Natal. 2008.

FRÍAS, M.; SANCHÉZ DE ROJAS, M. I.; CABRERA, J. The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars. **Cement and Concrete Research**. v. 30. n.1. p. 209–216. 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884699002318/pdf?md5=3305e87cca552bbe0261d061820cc5a7&pid=1-s2.0-S0008884699002318-main.pdf>> . Acesso em 21 mar. 2020.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; CRIADO, M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. **Cement and Concrete Research**, v. 35. n.1, p. 1204-1209, 2005.

FONSECA, N. M. S. **Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão**: influência das condições de cura no desempenho mecânico. 2009. 248 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2009.

GAEDICKE, Cristian; MARINES, Armando; MIANKODILA, Farel. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**. v. 68. n.1. p. 701-708. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814007144>>. Acesso em 25 mar. 2020.

GARDOLINSKI, J.E.; MARTINS FILHO, H.P.; WYPYCH, F. Comportamento térmico da caulinita hidratada. Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná, Curitiba. **Química Nova**, v.26, n.1, p.30-35, 2003.

GASPERI, Jessica de; HOLTHUSEN, Doerthe; HOWES, Maria Fernanda Dornelles; SATTLER, Naquiele; LONGHI, Marlon A.; RODRÍGUEZ, Erich D. Temporal dynamics of rheological properties of metakaolin-based geopolymers: Effects of synthesis parameters. **Construction and Building Materials**. v. 289. n. 1. p. 1-11. 2021.

GIVI, A. N.; RASHID, S. A.; AZIZ, F. N.; SALLEH, M. A. M.. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. **Construction and Building Materials**. v. 24. n. 11. p. 2145-2150. 2010.

GRANIZO, N.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMÉNEZ, A. Effect of temperature and alkaline concentration on metakaolin leaching kinetics. **Ceramics International**. v. 40, n.7. p. 8975-8985, 2014.

GRANJA, L. P. V. de O. **Desempenho comparado entre argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com condutibilidade térmica melhorada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2014, 134f. Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Braga. 2014.

GONÇALVES, D. K.. **Síntese e Caracterização de cimentos geopoliméricos comerciais**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

G1. **Governo confirma safra recorde de 257,8 milhões de toneladas de grãos; produção de arroz cresce, mas não evita disparada de preços**. 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2020/09/10/governo-confirma-safra-recorde-de-2578-milhoes-de-toneladas-de-graos-producao-de-arroz-cresce-mas-nao-evita-disparada-de-precos.ghtml>>. Acesso em 18. jan. 2021.

HAMIDI, Fatemeh; VALIZADEH, Afsaneh; ASLANI, Farhad. The effect of scoria, perlite and crumb rubber aggregates on the fresh and mechanical properties of geopolymer concrete. **Structures**. v. 38. p. 895-909. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012422001229>>. Acesso em 24 mar. 2022.

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**: Research Report GC1. 1. ed. Perth, Austrália: Curtin University of Technology. 103 p . 2005. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/228794879_Development_and_Properties_of_Low-calcium_Fly_Ash_Based_Geopolymer_Concrete>. Acesso em 18 abr. 2021.

HASSAN, Amer; MOHAMMED, Arif.; SHARIQ, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. **Journal of Cleaner Production**. v. 223. n.1. p. 704-728. 2019.

HU, Shunguang; WANG, Hongxi; ZHANG, Gaozhan; DING, Q ingjun. Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. **Cement and Concrete Composites**. v. 30. n. 3. p. 239-244. 2008. Disponível em: <<https://www.science direct.com/science/article/pii/S0958946507000662>>. Acesso em 15 jun. 2020.

HU, Y.; TANG, Z.; LI, W.; LI, Y.; TAM, VWY.; Physucal-mechanical properties of fly ash/GGBFS geopolymer composities with aggregates. **Constructions and Building Materials**. v. 226. p. 139-151. 2019.

HUANG, S.; JING, S.; WANG, J.; WANG, Z. JIN, Y.. Silica white obtained from rice husk in a fluidized bed. **Powder Technology**. v. 117. n. 3. p. 232-238, 2001.

HWALLA, J.; SABA, M.; ASSAD, J. J. Suitability of metakaolin-based geopolymers for underwater applications. **Material and Structures**. v. 53. n. 5. 2020. Disponível em: <[https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Suitability%20of%20meta kaolin-based%20geopolymers%20for%20underwater%20applications&publication _year=2020&author=J.%20Hwalla&author=M.%20Saba&author=J.J.%20Assaad](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Suitability%20of%20meta%20kaolin-based%20geopolymers%20for%20underwater%20applications&publication_year=2020&author=J.%20Hwalla&author=M.%20Saba&author=J.J.%20Assaad)>. Acesso em 20 jul. 2022.

IACKS, Jonathan Aires. **Uso de Cinza de Casca de Arroz para obtenção de blocos de Concreto para pavimentação**. 2018. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pelotas. Pelotas. 2018.

IBRAHIM, Hussein Adebayo; RAZAK, Hashim, Abdul. ABUTAHA, Fuad. Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method. **Construction and Building Materials**. v. 147. n.1. p. 576-587. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817307250>>. Acesso em 15 jun. 2020.

JAYA, Nur Ain; MING, Liew Yun; YONG, Heah Cheng; ABDULLAH, Mohd Mustafa Al Bakri; HUSSIN, Kamarudin. Correlation between pore structure, compressive strength and thermal conductivity of porous metakaolin geopolymer. **Construction and Building Materials**. v. 247. n.1. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820306462>>. Acesso em 15 jun. 2020.

JINDAL, B. B.; SINGHAL, D.; SHARMA, S. K.; ASHISH, D. K.. Parveen. Improving compressive strength of low calcium fly ash geopolymer concrete with alccofine, Advances In Concrete. **Advances in Concrete Construction** v. 5. n.1. p. 17-29. 2017.

JINDAL, Bharat Bhushan. Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: a review. **Construction and Building Materials** v. 227. n.1. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819320549#b0430>>. Acesso em 17 abr. 2020.

KAMSEU, E.; MOUNGAM, L. M. B.; CANNIO, M.; BILLONG, N.; CHAYSUWAN, D.; MELO, U. C.; LEONELLI, C.. Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. **Journal of Cleaner Production**, v. 142. n. 4. p. 3050-3060, 2017.

KORF, Edgar Munaretto. **Avaliação das Propriedades de um material geopolimérico espumígeno desenvolvido com diferentes tipos de metacaulim**. 2019. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade IMED. Passo Fundo. 2019.

KUMAR, Ramesh G. B.; SHARMA, U. K.. Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates. **Construction and Building Materials**. V.66. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814005856>>. Acesso em 20 abr. 2022.

KUMAR, Sanjeev; GUPTA, Ramesh Chandra; SHRIVASTAVA, Sandeep. Strength, abrasion and permeability studies on cement concrete containing quartz sandstone coarse aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 125. n.1. p. 884-891. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181631368X>>. Acesso em 25 mar. 2020.

KUMAR, Rakesh. Influence of Recycled Coarse Agregate Derived From Construction and Demolition Waste (CDW) on Abrasion Resistance of Pavement Concrete. **Construction and Building Materials**. v. 124, n. 11, p. 248-255, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181730449X>>. Acesso em 18 mar. 2017.

KUMAR, Pratyush; PANKAR, Chaitanya; MANISH, Divyank; SANTHI, A. S. Study of mechanical and microstructural properties of geopolymer concrete with GGBS and Metakaolin. **Materials today**. v. 5. n.1. p. 28127-28135. 2018.

LI, L. G.; FENG, J. J.; LU, Z. C.; XIE, H. Z.; XIAO, B. F.; KWAN, A. K. H.; JIAO, C. J. Effects of aggregate bulking and film thicknesses on water permeability and strenght of pervious concrete. **Powder Technology**. v. 396. p. 743-753. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591021009700>>. Acesso em 25 mar. 2022.

LIANG, Guangwei; ZHU, Huajun; ZHANG, Zuhua; WU, Qisheng. Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and termal stability of metakaolin based geopolymer. **Construction and Building Research**. v. 222. n.1. p. 872-881. 2019.

LIANG, Guangwei; ZHU, Huajun; LI, Haoxin; LIU, Tiejun; GUO, Henghui. Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**. v. 293. n.1. p. 1-10. 2021.

LIU, Yu-Wen; HSU, Tsao-Hua. Abrasion erosion of concrete by water-borne sand. **Cement and Concrete Research**. v. 36. n. 10. p 1814-1820. 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884606001682>> . Acesso em 06 set 2020.

LIU, You-Wen. Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume. **Construction and Building Materials**. v. 21, n. 5, p. 972-977. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806000353>>. Acesso em 10 abr. 2020.

LIVI, Carolina Noda. **Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio**. 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.

LODEIRO, I. Garcia.; PALOMO, A.; FERNANDÉZ-JIMÉNEZ, A.; MACPHEE, D. E. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. **Cement and Concrete Research**. v. 41. n. 1. p. 923-931. 2011.

LONDERO, Charles. **Valorização da cinza da casca de arroz com aplicação no concreto**. Araranguá: UFSC. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/182270>>. Acesso em 10 maio. 2022.

LONDERO, Charles. **Valorização da cinza de casca de arroz com aplicação no concreto**. 2017. 43 f. TCC (Graduação em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá. 2017.

LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo**. 2015, 184f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.

LONGHI, Marlon A.; ZHANG, Zuhua; WALKLEY, Brant; RODRIGUEZ, Erich D.; KIRCHHEIM, Ana Paula. **Cement and Concrete Research**. Strategies for control and mitigation of efflorescence in metakaolin-based geopolymers. v. 144. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884621000806>>. Acesso em 16 ago. 2022.

LONGHI, Márton A.; RODRÍGUEZ, Erich D.; WALKLEY, Brant; ECKHARD, Diego; ZHANG, Zuhua; PROVIS, John L.; KIRCHHEIM, Ana P.. **Ceramics International**. Metakaolin-based geopolymers: Efflorescence and its effect on microstructure and mechanical properties. v. 48. n. 2. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221031230>>. Acesso em 20 abr. 2022.

LUHAR, Salmabanu; CHAUDHARY, Sandeep; LUHAR, Ismail. Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies. **Construction and Building Materials**. v. 204. n.1. p. 740-753. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181930220X>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

LUO, Zhiyu; LI, Wengui; WANG, Kejin; SHAH, Surendra P.; SHENG, Daichao. Nano/micromechanical characterisation and image analysis on the properties and heterogeneity of ITZs in geopolymer concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 152. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884621003264#bb0165>>. Acesso em 23 mar. 2022.

LUUKKONEN, Tero; ABDOLLAHNEJAD, Zahra; YLINIEMI, Juho; KINNUNEN, Paivo; ILLIKAINEN, Mirja. One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research**. v. 103. n. 1. p 21-34. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>>. Acesso em 25 ago. 2020.

MA, Chau-Khun; AWANG, Abdullah Zawawi; OMAR, Wahid. Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. **Construction and Building Materials**. v. 186. n. 20. p. 90-102. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818317835>>. Acesso em 17 abr. 2020

MAHDI, Saik Numan; BABU R, Dushyanth V.; SHASHISHANKAR, A.; ARUNRAJ, A. Influence of brick industrial rice husk ash on properties of ambient cured geopolymer mortar matrix. **Materials today: proceedings**. v.7. n. 1. 2020.

MAHDI, Shaik Mahdi; BABU R, Dushyanth V., HOSSINEY, Nabil; ABDULLAH, Mohd Mustafa Al Bakri. Strength and durability properties of geopolymer paver blocks made with fly ash and brick kiln rice husk ash. **Case Studies in Construction Materials**. v. 16. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521003156>>. Acesso em 25 mar. 2022.

MANZANO, Manuel Alejandro Rojas; SILVA, Eugenia; LOPES, Anne N. M.; Estudo da hidratação de pastas de cimento de alta resistência contendo polímero superabsorvente (PSA), pela técnica da difração de raios-x (DRX). In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 58, Belo Horizonte/MG, 2016. **Anais...** Belo Horizonte: Ibracon. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/341600578_ESTUDO_DA_HIDRATAÇÃO_DE_PASTAS_DE_CIMENTO_DE_ALTA_RESISTÊNCIA_CONTENDO_POLÍMERO_SUPERABSORVENTE_PSA_PELA_TÉCNICA_DA_DIFRAÇÃO_DE_RAIO-X_DRX>. Acesso em 10 jun. 2022.

MARTHONG, C. Effect of rice husk ash (RHA) as partial replacement of cement on concrete properties. **International Journal of Engineering Research & Technology**. v. 1. n. 6. p. 1-8, 2012.

MATHEW, George; ISAAC, Binu M. Effect of molarity of sodium hydroxide on the aluminosilicate content in laterite aggregate of laterised geopolymer concrete. **Journal of Building Engineering**. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219308976>>. Acesso em 10 abr. 2020.

MAURI, J.; DIAS, D. P.; CORDEIRO, G. C.; DIAS, A. A.. Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico. **Matéria**. v. 14. n. 3. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762009000300015&lang=pt>. Acesso em 05 set. 2020.

MAZZA, S. D. C. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland**. 2010. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2010.

MEDINA, Engler Ampaza. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-graduação em Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

MEHDIPOUR, Sadegh; NIKBIN, Iman M.; DEZHAMPANAH, Soudabeh; MEHEBBI, Reza; MOGHADAM, Hamid Habibi; CHARKTAB, Sharin; MORADI, Abolhasan. Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures. **Journal of Cleaner Production**. v. 254. n.1. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620301736>>. Acesso em 15 jun. 2020.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, A.; SIDDIQUE, R.. Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash. **Construction and Building Materials** v. 150. n. 1. p. 792-807. 2017.

MELO, L. G. A. **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos**. 2011, 185f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2011.

METACAULIM HP ULTRA. 2020. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>> . Acesso em 21 mar. 2020.

MING, L.; CHENG-YONG, H.; MUSTAFA, M.; BAKRI, A.; HUSSIN, K.. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A Review. **Progress in Materials Science**. v. 83, n.1. p. 595-629. 2016.

MOHEBI, Reza; BEHFARNIA, Kiachehr; SHOJAEI, Mohammad. Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method. **Construction and Building Materials**. v. 98, n.1. p. 792-798, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815303457>> . Acesso em 20 mar. 2020.

MONTE, M. B. M; PAIVA, P. R. P; TRIGUEIRO, F. E. **Técnicas alternativas para modificação do caulim**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Série Rochas e Minerais Industriais, v. 8, 50p. 2003.

MONTGOMERY D. C.. Design and analysis of experiments. 3. Ed. John Wiley and Sons, 1991.

MOTA, João Manuel Freitas; OLIVEIRA, Romilde Almeida de Oliveira; CARNEIRO, Arnaldo Manuel Pereira. Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. **Matéria**. v. 21, n.4. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762016000401105&lng=pt&tlng=pt> . Acesso em 20 mar. 2020.

MUDULI, Rakesh; MUKHARJE, Bhusan. Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach. **Construction and Building Materials**. v. 233. n.1. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819326753>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

NATH, P.; SARKER, P. K.; Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. **Cement and Concrete Composites** v. 55. n.1. p. 205-214. 2015. Acesso em 17. abr. 2020.

NATH, P., SARKER, P.K.. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building**

Materials. v. 130. n.1. p. 22-31. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816317871?via%3Dihub>>. Acesso em 15 jun. 2020.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; DAMATTY, E. L.. Performance of Rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. **Cement and Concret Research**. v. 33. n. 8. p. 1203-1209, 2003.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. São Paulo: BOOKMAN, 2013.

NITA, C., JOHN, V.M., **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**, Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: USP. 2007.

NIYASOM, Samit; TANGBORIBOON, Nuchnapa. Development of biomaterial fillers using eggshells, water hyacinth fibers, and banana fibers for green concrete construction. **Construction and Building Materials**. v. 283. 2021. Acesso em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821003871#t0015>>. Acesso em 25 mar. 2022.

NUACKLONG, P.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P.. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. **Journal of Cleaner Production**. v. 112. n. 1. p. 2300-2307. 2016.

NUAKLONG, P.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P.. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. **Journal of Cleaner Production**. v. 112, n.1. p. 2300-2307. 2018a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181711152>>. Acesso em 15 jun. 2020.

NUAKLONG, P.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens. **Construction and Building Materials**, v. 161, n.1. p. 365-373, 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.152>>. Acesso em 25 mar. 2020.

NUERNBERG, Natassia Bratti Da Silva. **Desenvolvimento e caracterização de geopolímeros a partir da cinza de casca de arroz e do lodo de anodização de alumínio**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma. 2018.

OLAWALE, M. D.. Syntheses, Characterization and Binding Strenght of Geopolymers: a review. **International Journal of Materials Science and Applications**. v. 2, n. 6, p. 185-193, 2013.

OLIVEIRA, Alexandre Magno Alves de; DIAS, Dylmar Penteadó; FRANÇA, Fernando Cesar Coelho. Influence of the viscosity of the alkaline activator solution on the workability of geopolymer mortars. **Materia**. v. 23. n. 3. p. 1-9. 2018.

OLUTOGE, Festus A.; ADESINA, Peter A.. Effects of rice husk ash prepared from charcoal-powered incinerator on the strength and durability properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 196. n. 1. p. 386-394. 2019.

PATEL, Yamini J.; SHAH, Niraj. Enhancement of the properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag based Self Compacting Geopolymer Concrete by incorporating Rice Husk Ash. **Construction and Building Materials**. v. 171. n.1. p. 654-662. 2018.

PACHECO Torgal F.; CASTRO-GOMES J.P.; LOPES S.M.R.. Experimental study of concrete durability parameters produced with different types of aggregates. In: Proceedings of the XXX IAHS world Congress on Housing; 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Joao_Castro-Gomes/publication/236345740_Experimental_Study_of_Concrete_Durability_Parameters_produced_with_Different_Types_of_Aggregates/links/0c960517da65ff2813000000/Experimental-Study-of-Concrete-Durability-Parameters-produced-with-Different-Types-of-Aggregates.pdf>. Acesso em 25 mar. 2020.

PEÇANHA, Erica Ferreira. **Estudo sobre retração, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto geopolimérico**. 2012. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goitacazes. 2012.

PELISSER, F.; SILVA, B. V.; MENGER, M. H.; FRASSON, B. J.; KELLER, T. A.; TORRI, A. J.; LOPEZ, R. H.. Análise estrutural do compósito de concreto geopolimérico à base de metacaulim. **IBRACON Estruturas e Materiais**. v. 11, n. 3, p. 535-543. 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1983-41952018000300535&sc_rpt=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em 20 out. 2019.

PELISSER, Fernando; BERNARDIN, Adriano Michael; MICHEL, Milton Domingos; DA LUZ, Caroline Angulski da. Compressive strenght, modulus of elasticity and hardness of geopolimeric cement synthetized from non-calcined natural kaolin. **Journal of Cleaner Production**. v. 280, n. 1, 2021. p. 1-9.

PEREIRA, A.M; SILVA, C. A. R; QUEIROZ, D. C. A; MORAES, M. J. B; MELGES, J. L. P; TASHIMA, M.M; AKASAKI, J.L. Estudo das propriedades Mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Matéria**, v.20, n.1, p. 227-238. 2015.

PINHEIRO, Divino Gabriel Lima. **Avaliação da atividade pozolânica em cinza de Casca de arroz (CCA) com diferentes teores de sílica amorfa**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade Nacional de Brasília. Brasília. 2016.

PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. 92p. 2006.

PORTO, A. B. R.; FANJAS, A. V. L.; OLIVEIRA, M. A. B.; MONTEIRO, S. N.; SILVA, A. C. R.. Produção de concreto de cimento geopolimérico com substituição parcial

do metacaulim por escória de alto forno. In: Congresso annual ABM Week, 74, 2019, São Paulo, Brasil. **Anais...** 2019.

POUHET, R.; CYR, M.. Formulation and performance of fly ash metakaolin geopolymer concretes. **Construction and Building Materials**. v. 120. n. 1. p 150-161. 2016.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre. 2006.

PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S. J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**. v. 17, n.1. p. 3075-3085, 2005.

PROVIS, L.; VAN DEVENTER, J. Geopolymerisation kinetics. 1. In situ energy dispersive X-ray diffractometry. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 1. p. 2309-2317, 2007.

PUGLIESI, Nataly, **Cimento: diferentes tipos e aplicações**. 2016. Disponível em: <http://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/cimentodiferentestiposeaplicacoes_11959_01>. Acesso em 01 dez. 2016

PYO, Sukhoon; ABATE, Selamu Yihune; KIM, Hyeong-Ki. Abrasion resistance of ultra high performance concrete incorporating. **Construction and Building Materials**. v. 165, n. 1. p. 11-16, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818300369>> . Acesso em 20 mar. 2020.

QIN, Zhaohui; MA, Cong; ZHENG, Zhiqin; LONG, Guangcheng; CHEN, Bing. Effects of metakaolin on properties and microstructure of magnesium phosphate cement. **Construction and Building Materials**. v. 234. n. 1. p. 117353–117364. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819328053>>. Acesso em 20 mar. 2020.

QUIRONGA, Pedro N.; NAMSHIK, Ahn; FOWLER, David W.. Concrete Mixtures with High Microfines. **ACI Materials Journal**. v. 103, n. 4. 2006. Disponível em: <<https://search.proquest.com/docview/197940604?pq-origsite=gscholar>>. Acesso em 25 mar. 2020.

RAKHIMOVA, Nailia R., RAKHIMOV, Ravil Z.. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – a review. **Journal of Materials Research and Technology**. v. 8, n.1. p. 1522-1531. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785418302229>>. Acesso em 21 mar. 2020.

RAMOS, Giovanni Antonio; PELISSER, Fernando; GLEIZE, Philippe Jean Paul; BERNARDIN, Adriano Michael; MICHEL, Milton Domingos. Effect of porcelain tile polishing residue on geopolymer cement. **Journal of Cleaner Production**. v. 191. n.

1. p. 297-303. 2018. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618312782>>. Acesso em 10 jun. 2020.

RAMUJEE, Kolli; POTHARAJU, M.. **Abrasion Resistance of Geopolymer Composites**. V. 5. 2014. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812814005951>>. Acesso em 20 abr. 2022.

RAO, K.; PRANAV, D.; ANUSHA, P. Stabilization of Expansive Soil with Rice Husk Ash, Lime and Gypsum - An Experimental Study. **International Journal of Engineering Science and Technology**. v. 3, n. 11. p. 8076-8085, 2011.

RAO, S. Krishna; SRAVANA P.; RAO, Chandrasekhar. Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of Fly Ash Roller Compacted Concrete (FRCC). **Construction and Building Materials**. v. 118. n. 8. p. 352-363. 2016. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181630736X>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

RASHAD, Alaa M. Metakaolin as cementitious material: history, scours, production and composition – A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**. v. 41. n.1. p. 303-318. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812009543>>. Acesso em 20 mar. 2020.

REIS, L. A.; FOLGUEIRAS, M.V.; REIS, J. P.; LEUREANO, P. Obtenção da sílica amorfa através da casca e da cinza do arroz. 2008. Disponível em: < https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjT5N-I5K3uAhVESzABHd3YBnEQFjABegQIBBAC&url=%3A%2F%2Fwww.metallum.com.br%2F20cbecimat%2Fresumos%2Ftrabalhos_completos%2F106-004.doc&usg=AOvVaw0Rv0cxm3O5jKveW3tHOMKT> . Acesso em 20 jan. 2021.

REPETTE, W. L. Cimentos Especiais de Base Mineral. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON. v. 2, p. 825-862. 2010.

RIBEIRO, D. B. **Influência da adição de cálcio nas propriedades de pastas geopoliméricas destinadas a cimentação de poços de petróleo**. 2012, 169f. Dissertação. (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2012.

ROCHA, T. S. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. 2017, 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro. 2017.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A.. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**. São Paulo, v.62, n. 363, p.215-223. 2016.

SABOO, Nikhil; SHIVHARE, Shekhar; KORI, Krishna Kumar; CHANDRAPPA, Anush K.. Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. **Construction**

and Building Materials. v. 223. n.1. p. 322-328. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819316149>>. Acesso em 15 jun. 2020.

SAFIUDDIN, M.; SCOTT, B. Abrasion resistance of concrete – design, construction and case study, **Concrete Research Letter**. v. 6, n. 3, p. 136-148. 2015. Disponível em: < www.challengejournal.com/index.php/cjrl/article/view/194> . Acesso em 20 mar. 2020.

SALONI; PARVEEN; PHAM T. M. Enhanced properties of high-silica rice husk ash-based geopolymer paste by incorporating basalt fibers. **Construction and Building Materials**. v. 245. n.1. 2020a.

SALONI; SINGH, Abhishek; SANDHU, Vaibhav; JATIN; PARVEEN. Effects of alccofine and curing conditions on properties of low calcium fly ash-based geopolymer concrete. **Materials Today**. v. 32. n. 4. p. 620-625. 2020b. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532031542X>>. Acesso em 20 ago. 2020.

SANTA, R. A. A. B.. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da industrial de papel**. 2012. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2 ed. São Paulo: Blücher. 1989.

SATHURSHAN, M.; YAPA, I.; THAMBOO, J. JEYAKARAN, T.; NAVARATNAM, S.; SIDDIQUE, R.; ZHANG, R.. Untreated rice husk ash incorporated high strength self-compacting concrete: Properties and environmental impact assessments. **Environmental Challenges**. v.2. n.1. 2021.

SCHWAAB, Samoel. **Efeito de cinzas volantes, escória de alto forno e ativadores nas propriedades de cimentos geopoliméricos**. 2019. 191f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Joinville. 2019.

SCHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers**. 5 ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.

SHATAT, M. R.. Hydration behavior and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin. **Arabian Journal of Chemistry**. v. 9. n. 2. p. S1869-S1874. 2016. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535213004346>>. Acesso em 21. jan. 2021.

SIDDIQUE, Rafat; KLAUS, Juvas. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**. v. 43. n. 3. p. 392-400. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131708002706>>. Acesso em 06 set. 2020.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J. M. Abrasion resistance and mechanical properties of high volume fly ash concrete. **Materials and Structures**. v. 43, n. 5, p. 709-718, 2009.

SILVA, F. J. da; OLIVEIRA, M. C. de; MACHADO, M. V. S.; DUARTE, F. P.; THAUMATURGO, C.. Cimentos Geopoliméricos. **Matéria**. v. 7, n. 3. 2002.
Disponível em: <www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10055/>. Acesso em: 06 set. 2020.

SILVA, Mario Lucas Santana. **Ca, Na, K-PSS como revestimento anticorrosivo em aço**. 2011a, 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais). Centro de Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro. 2011.

SILVA, Cristina Vitorino da. **Contribuição ao Estudo do Desgaste Superficial por Abrasão em Concretos Empregados em Pisos**. 2011b. 181f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011.

SILVA, Cristina Vitorino da. **Estudo da influência das propriedades relacionadas à superfície e à matriz na resistência à abrasão de concretos para pisos**. 2015. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2015.

SILVA, Cristina V.; ZORZI, Janete E.; CRUZ, Robinson C. D.; DAL MOLIN, Denise C. C.. Experimental evidence that micro and macrostructural surface properties markedly influence on abrasion resistance of concretes. **Wear**. v. 422-423. 2019.
Acesso em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164818305313#ec0005>>. Acesso em 29 abr. 2022.

SILVERSTRIM, T.; ROSTAMI, H.; LARRALDE, J.; SAMADI, A. **Fly ash cementitious material and method of making a product**. US Patent 5.601.643, 1997.

SINGH, P. K. Analysis of rice husk ash concrete utilization in construction field. **Materials Today: Proceedings**. v. 1. n. 1. p. 1-3. 2021.

SOUSA, S. M. **Efeito da ativação alcalina dos aluminossilicatos nas propriedades mecânicas e microestruturais de compósitos argilosos pesados**. 2011, 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2011.

SOUZA, P.S. **Verificação do uso do metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. 2003. 203f. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia da UFRGS. Porto Alegre, 2003.

STEWART, Jane G.; NORVELL, Justin K.; JUENGER, Maria C. G.; FOWLER, David W.. Influence of Microfine Aggregate Characteristics on Concrete Performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 19, n. 11. 2007. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282007%2919%3A11%28957%29>>. Acesso em 25 mar. 2021.

TAFRAOUI, Ahmed; ESCADEILLAS, Gilles; VIDAL, Thierry. Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**. v. 112. n.1. p. 980 – 987.2016. Disponível em: <<https://www.science-direct.com/science/article/pii/S0950061816302288>>. Acesso em 20 mar. 2020.

TASHIMA, M. M.; Silva, C. A. R. L.; Akasaki, J. L. Concreto com adição de cinza de casca de arroz (CCA) obtida através de um processo de combustão não controlada. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 31, 2006, Mendoza, Argentina. **Anais...** Mendoza, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, 2006.

THOKCHOLM, Suresh; GHOSH, Partha; GHOSH, Somnath. Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 4. n. 7. p. 1-6. 2009.

THOMAS, B. S.. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious materials - A comprehensive review. **Renewable Sustainable Energy**. v. 82. n.3. p. 3911–3923. 2018.

THOMAS, Blessen Skariah; YANG, Jian; BAHURUDEEN, A. CHINNU, S. N.; ABDALLA, Jamal A.; HAWILEH, Rami A.; MAMADA, Hussein M.. Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. **Cleaner Materials**. v. 3. 2022. Disponível: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397622000168>>. Acesso em 24 mar. 2022.

TRINDADE, Guilherme Höehr. **Durabilidade de concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-silica e penetração de clorestos**. 2011. 200 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2011.

TUNC, Esra Tugrul; ALYAMAC, Kursat Esat. A preliminary estimation method of Los Angeles abrasion value of concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 222, n.1. p. 437-446. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181931606X#b0140>>. Acesso em 25 mar. 2020.

UGONI, Vinicius Marcos; GODINHO, Daiane dos Santos da Silva. **Análise das propriedades mecânicas do concreto produzido com substituições parciais e totais dos agregados graúdos e miúdos por agregados reciclados**. Criciúma: UNESC, 2017. 23 p.

VALADARES, Juliane. **Síntese e Caracterização de Geopolímeros macroporosos com uso de Peróxido de Hidrogênio**. 2019. 102 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Belo Horizonte. 2019.

VARGAS, A. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F.; JALALI, S.; GOMES, J. C.. Cinzas volantes álcali-ativadas com solução combinada de NaOH e Ca(OH)₂. **Matéria**. v. 12. n. 3. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-70762007000300006>>. Acesso em 22 ago. 2020.

VIECILI, F. A. **Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto**. 2004. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WANG, Qinghe; LIU, Ruixin; LIU, Puyuan; LIU, Changyong; SUN, Liye; ZHANG, Huan. Effects of silica fume on the abrasion resistance of low-heat Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**. v. 329. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822008467>>. Acesso em 30 jun. 2022.

WENG, Luqian; SAGOE-CRENTSIL, Kwesi; BROWN, Trevor; SONG, Shenhua. Effects of aluminates on the formation of geopolymers. **Materials Science and Engineering: B**. v. 117. n. 2. p. 163-168. 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510704005926>> . Acesso em 17. jan. 2021.

WITZKE, Franky Bruno; CORREIA, Sivaldo leite; SCHACKOW, Adilson; GROCHOWICZ, Ivana. Cost and property optimisation of concretes containing fly ash using mathematical and statistical strategies. International Symposium on Materials an International Conference, 8. 2017. Aveiro. **Anais...** Aveiro: SPM. 2017.

WITZKE, Franky Bruno. **Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland**. 2018. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciências Tecnológicas. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2018.

WITZKE, Franky Bruno; CORREIA, Sivaldo Leite; MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo Alves de. Abrasão superficial de concretos contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland. **Revista Técnico-científica do CREA-PR**. Edição especial. v.1. n.1. p 1-12. 2019. Disponível em: < <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/656>>. Acesso em 01 abr. 2020.

WONGSA, A.; ZAETANG, Y.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 111. n. 1. p. 637-643, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816301933?via%3Dihub>>. Acesso em 15 jun. 2016.

XIE, Jinhe; CHEN, Wei; WANG, Junjie; FANG, Chi; ZHANG, Bingxue; LIU, Feng. Coupling effects of recycled aggregate and GGBS/metakaolin on physicochemical properties of geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**. v. 226. n.1. p. 345-359. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819319853>>. Acesso em 15 jun. 2020.

XU, H.; VAN DEVENTER, J.; JANNIE, S. Geopolymerization of multiple minerals. **Minerals Engineering**, v. 15, n.1. p. 1131-1139, 2003.

XU, M. X.; HE, Y.; WANG, C. Q.; HE, X. F.; HE, X. Q.; LIU, J.; CUI, X. M. Preparation and characterization of a self-supporting inorganic membrane based on metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science** V. 115, n.1. p. 254-259, 2015.

YAN, Bing; DUAN, Ping; REN, Daming. Mechanical strength, surface abrasion resistance and microstructure of fly ash-metakaolin-sepiolite geopolymer composites. **Ceramics International**. v. 43. n. 1. p. 1052-1060. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216318053>>. Acesso em 15 jun. 2020.

YOSHITAKE, Isamu; UENO, Sayaka; USHIO, Yuta; ARANO, Hiroki; FUKUMOTO, Sunao. Abrasion and skid resistance of recyclable fly ash concrete pavement made with limestone aggregate. **Construction and Building Materials**. v. 112. n. 1. p. 440-446. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816302434>>. Acesso em 10 abr. 2020.

ZAIDI, F. H. A.; AHMAD, R.; ABDULLAH, M. M. A. B.; RAHIM S. Z. A.; YAHYA. Z.; LI, L. Y.; EDIATI, R.. Geopolymer as underwater concreting material: A review. **Construction and Building Materials**. v. 291. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821010369#b0280>>. Acesso em 20 jul. 2022.

ZHANG, Z.; PROVIS, J. L.; WANG, H.; BULLEN, F.; REID, A. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers, Parte 2. Thermodynamic of sodium silicate activation of metakaolin. **Thermochim Acta**. v. 565, n.1. p. 163-171, 2013.

ZHANG. Z.; PROVIS, J. L.; REID, A.; WANG, H. Geopolymer from concrete: an emerging material for sustainable construction. **Construction and Building Materials**. v. 56, n. 1. p. 113-127, 2014.

ZHANG, Peng; WANG, Kexun; LI, Qingfu; WANG, Juan; LING, Yifeng. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. **Journal of Cleaner Production**. v. 258. n.1. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620309434#bib103>>. Acesso em 15 jun. 2020.

ZHIHUA, P.; DONGXU, L.; JIAN, Y.; NANRU, L. Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material. **Cement and Concrete Research**. v. 38. n. 41. p. 1437-14, 2013.

ZHU, H.; LIANG, G.; ZHANG, Z.; WU, Q.; DU, J. Partial replacement of metakaolin with thermally treated rice husk ash in metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**. v. 221. n.1. p. 527-538. 2019.

ZHU, Huajun; LIANG, Guangwei; WU, Qisheng; ZHANG, Changsen; HUA, Sudong. Experimental study on the freezing resistance and microstructure of slag based geopolymer in the presence of rice husk ash. **Journal of Building Engineering**. v.8. n.1. 2021.

ZOLGHADRI, Ali; AHMADI, Babak; TAHERKHANI, Hassan. Influence of natural zeolite on fresh properties, compressive strength, flexural strength, abrasion resistance, Cantabro-loss and microstructure of self-consolidating concrete.

Construction and Building Materials. v. 334. 2022. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822011175#f0020>>.
Acesso em 30 jun. 2022.

APÊNDICE A – LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS INTERNACIONAIS SOBRE GEOPOLÍMEROS

TABELA A1: LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS INTERNACIONAIS SOBRE GEOPOLÍMEROS

Autor	Ano	Título original	Título traduzido
Glukhovsky	1959	Soil silicate	Silicato de sódio
Glukhovsky	1965	Soil silicate: Their properties, technology and manufacturing and fields of application	Silicato de sódio: suas propriedades, tecnologia, produção e campos de aplicação
Davidovits	1972	Sintered composite panels	Painéis compostos sinterizados
Davidovits	1975	Agglomerating compressible mineral materials in the form of powder, particles, or fibers	Aglomeração de materiais minerais compressíveis na forma de pó, partículas ou fibras
Davidovits	1976	Solid phase synthesis of mineral blockpolymer by low temperature polycondensation of alumino-silicate polymers	Síntese de fase sólida de polímero de bloco mineral por policondensação de baixa temperatura de polímeros de alumino-silicato
Davidovits e Sawyer	1985	Early high-strength mineral polymer	Polímeros minerais de alta resistência inicial
Davidovits	1989	Ceramic composite material and production method	Material compósito cerâmico e seu método de produção
Palomo; Grutzeck e Blanco	1999	Alkali-activated fly ash: A cement for the future	Cinzas volantes alcali-ativadas: um cimento para o futuro
Van Jaarsveld	2000	The Physical and chemical characterization of fly ash-based geopolymers	Caracterização física e química de geopolímeros com cinza volante
Phair	2001	Compositional effects and microstructure of fly ash-based geopolymers	Efeito da composição e da microestrutura de geopolímeros com cinza volante
Hardjito e Rangan	2005	Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete	Desenvolvimento e propriedades de concretos geopoliméricos à base de cinzas volantes com baixo teor de cálcio
Provis	2006	Modeling the formation of geopolymers	Modelagem da formação de geopolímeros
Sindhunata	2006	A Conceptual model of geopolymerisation	Um modelo conceitual de geopolimerização
Wallah e Rangan	2006	Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties	Concreto de geopolímero à base de cinza volante com baixo teor de cálcio: propriedades de longo prazo
Rees	2007	Mechanisms and kinetics of gel formation in geopolymers	Mecanismos e cinética de formação de gel em geopolímeros
Provis e Van Deventer	2009	Geopolymers structure,	Estrutura, processamento,

		processing, properties and industrial applications.	propriedades e aplicações industriais dos geopolímeros.
F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad; A. F. Camoes; M. Jamshidi; Y. Ding.	2011	Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue	Durabilidade de ligantes álcali-ativados: uma vantagem clara sobre o cimento Portland ou um problema não comprovado
Davidovits	2015	Geopolymer chemistry and applications	Química de geopolímeros e aplicação
Jindal	2017	Improving compressive strength of low calcium fly ash geopolymer concrete with alccofine	Melhora de resistência à compressão de concretos com cinza volante de baixo teor de cálcio e <i>alccofine</i>
Mehta <i>et al.</i>	2017	Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash	Propriedades do concreto de geopolímero com base em cinzas volantes com baixo teor de cálcio incorporando OPC como substituição parcial das cinzas volantes
Mennosh <i>et al.</i>	2018	Long term durability properties of concrete modified with metakaolin and polymer admixture	Propriedades de durabilidade de longo prazo do concreto modificado com metacaulim e mistura de polímero
Nuaklong <i>et al.</i>	2018b	Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens.	Propriedades do concreto geopolimérico de cinza volante de metacaulim com alto teor de cálcio contendo agregado reciclado de amostras de concreto triturado.
Jindal	2019	Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: a review	Investigações sobre as propriedades da argamassa geopolimérica e do concreto com aditivos minerais: uma revisão
Cai <i>et al.</i>	2020b	Electrical resistivity of fly ash and metakaolin based geopolymers	Resistividade elétrica de geopolímeros à base de cinzas volantes e metacaulim
Thomas <i>et al.</i>	2022	Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review	Concretos geopoliméricos incorporados com agregados reciclados: revisão
Zaidi <i>et al.</i>	2021	Geopolymer as underwater concreting material: A review	Geopolímeros como material subaquático: revisão

FONTE: LIVI (2013); SCHWAAB (2019); o autor (2022).

APÊNDICE B – LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS NACIONAIS SOBRE GEOPOLÍMEROS

TABELA B1: LEVANTAMENTO CRONOLÓGICO DE PESQUISAS NACIONAIS SOBRE GEOPOLÍMEROS

Autor	Ano	Título
Barbosa	1999	Síntese e caracterização de polissialatos
Silva	2000	Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada
Thomaz	2000	Concreto geopolimérico
Dias	2001	Cimentos geopoliméricos: Estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura
Cuiabano	2002	Comportamento Térmico de Cimento Geopolimérico
Marinho	2004	Desenvolvimento de pastas geopoliméricas para cimentação de poços de petróleo
Souza	2005	Geopolímeros à base de resíduos industriais
Vargas	2006	Cinza volante álcali-ativadas para obtenção de aglomerantes especiais
Mazza	2010	Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland.
Melo	2011	Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos
Barroso	2011	Desenvolvimento de compósitos com matriz de Geopolímeros reforçados com partículas de quasicristais AlCuFe.
Medina	2011	Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio.
Santa	2012	Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel
Livi	2013	Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio
Cesari	2015	Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio
Longhi	2015	Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo
Brito	2018	Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo industrial
Pelisser <i>et al.</i>	2018	Análise estrutural do compósito de concreto geopolimérico à base de metacaulim
Schwaab	2019	Efeito de cinzas volantes, escória de alto forno e ativadores nas propriedades de cimentos geopoliméricos
Longhi <i>et al.</i>	2021	Estratégias para controle e mitigação da eflorescência de geopolímeros de metacaulim
Longhi <i>et al.</i>	2022	Geopolímeros de metacaulim: eflorescência e seu efeito na microestrutura e propriedades mecânicas

FONTE: LIVI (2013); o autor (2022).

APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (RC28 E RC180)

TABELA C1: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 28 DIAS DE IDADE.

Resistência à compressão (RC28) (MPa)		
CP	GM	GM10C
27,18	26,95	25,61
27,90	27,03	26,66
28,59	29,44	27,15
29,99	29,54	27,23
33,33	30,19	27,66
34,54	30,46	28,55
-	31,45	29,16

Fonte: o autor (2022).

TABELA C2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 28 DIAS DE IDADE

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	27,18	2	13,59	3,23	0,06	3,59
Dentro dos grupos	71,50	17	4,21			
Total	98,68	19				

Fonte: o autor (2022).

TABELA C3: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 180 DIAS DE IDADE.

Resistência à compressão (RC180) (MPa)		
CP	GM	GM10C
32,94	25,49	22,78
37,70	25,15	23,06
35,49	25,53	23,45

Fonte: o autor (2022).

TABELA C4: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 180 DIAS DE IDADE

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	255,79	2	127,89	65,80	0,00	5,14
Dentro dos grupos	11,66	6	1,94			
Total	267,45	8				

Fonte: o autor (2022).

APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

TABELA D1: RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS

Absorção de água das misturas estudadas (%)		
CP	GM	GM10C
8,27	7,00	6,74
8,24	7,09	6,69
8,24	6,67	6,58

Fonte: o autor (2022).

TABELA D2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	4,34	2	2,17	114,13	0,00	5,14
Dentro dos grupos	0,11	6	0,02			
Total	4,45	8				

Fonte: o autor (2022).

APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DUREZA SUPERFICIAL

TABELA E1: RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS MISTURAS ESTUDADAS

Dureza superficial (índice esclerométrico)		
CP	GM	GM10C
38	38	26
36	36	28
40	34	28
36	36	26
40	38	26
38	34	28
40	36	28
42		26
40		28
36		28
42		26
42		30
42		26
38		30
38		26
40		26
40		30
		30

Fonte: o autor (2022).

TABELA E2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE DUREZA SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	1248,59	2	624,29	184,48	0,00	3,23
Dentro dos grupos	131,97	39	3,28			
Total	1380,57	41				

Fonte: o autor (2022).

APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABRASÃO INORGÂNICA

TABELA F1: RESULTADOS DE ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS ESTUDADAS (28 DIAS)

Corpos de prova	Desgaste superficial - abrasão inorgânica (mm)					
	CP		GM		GM10C	
	500m	1000m	500m	1000m	500m	1000m
CP 01	2,34	3,15	1,48	2,34	1,32	2,06
	1,44	3,17	2,03	2,68	1,82	3,09
	1,23	2,43	1,88	2,45	1,51	2,52
	2,15	2,44	1,36	1,97	1,2	1,34
CP 02	1,49	2,77	1,41	2,05	1,96	2,76
	1,94	3,22	2,17	3,40	1,88	3
	1,50	2,02	1,88	2,65	0,2	1,41
	1,30	2,52	0,84	1,38	1,02	1,44
CP 03	1,68	2,99	1,19	2,10	0,42	1,51
	0,78	2,93	1,16	1,85	2,17	3,17
	1,72	2,67	2,63	2,60	1,65	1,68
	2,62	2,35	2,63	3,49	1,65	2,33

Fonte: o autor (2022).

TABELA F2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (500 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (28 DIAS)

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	0,19	2	0,09	5,32	0,05	5,14
Dentro dos grupos	0,10	6	0,02			
Total	0,29	8				

Fonte: o autor (2022).

TABELA F3: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (1000 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (28 DIAS)

Fonte de variação	SQ	GI	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	0,43	2	0,22	37,39	0,00	5,14
Dentro dos grupos	0,03	6	0,01			
Total	0,46	8				

Fonte: o autor (2022).

TABELA F4: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (28 DIAS)

Misturas	Desvio padrão (500m)	CV (500m) (%)	Desvio padrão (1000m)	CV (1000m) (%)
CP	0,12	7	0,09	3
GM	0,16	9	0,08	3
GM10C	0,11	8	0,05	2

FONTE: o autor (2022).

TABELA F5: RESULTADOS DE ABRASÃO INORGÂNICA DAS MISTURAS ESTUDADAS (180 DIAS)

Corpos de prova	Desgaste superficial - abrasão inorgânica (mm)					
	CP		GM		GM10C	
	500m	1000m	500m	1000m	500m	1000m
CP 01	1,27	2,17	0,87	2,10	0,88	1,58
	0,5	1,03	2,01	2,74	1,87	2,9
	1,13	1,66	0,91	1,81	1,62	2,34
	2,04	2,89	0,1	1,32	0,84	1,45
CP 02	1,57	2,7	3,1	4,35	1,52	2,44
	1,22	1,92	0,24	1,24	1,76	2,83
	0,52	0,94	0,05	0,54	1,48	2,12
	0,7	1,2	2,64	3,72	0,68	1,19
CP 03	1,38	2,46	0,03	0,47	1,51	2,43
	0,57	1,03	1,65	2,92	1,59	2,79
	0,91	1,38	2,35	3,49	1,1	1,24
	1,51	2,92	0,06	1,11	0,96	1,03

Fonte: o autor (2022).

TABELA F6: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (500 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (180 DIAS)

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	0,07	2	0,03	0,98	0,43	5,14
Dentro dos grupos	0,21	6	0,03			
Total	0,28	8				

Fonte: o autor (2022).

TABELA F7: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (1000 m) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS (180 DIAS)

Fonte de variação	SQ	GI	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	0,13	2	0,06	1,67	0,26	5,14
Dentro dos grupos	0,23	6	0,04			
Total	0,36	8				

Fonte: o autor (2022).

TABELA F8: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO INORGÂNICA (180 DIAS)

Misturas	DESVIO PADRÃO (500m)	CV (500m) (%)	DESVIO PADRÃO (1000m)	CV (1000m) (%)
CP	0,12	11	0,15	8
GM	0,30	26	0,27	12
GM10C	0,04	3	0,14	7

FONTE: o autor (2022).

APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABRASÃO HIDRÁULICA

TABELA G1: RESULTADOS DE ABRASÃO HIDRÁULICA DAS MISTURAS ESTUDADAS

Desgaste superficial – abrasão hidráulica (% de perda de massa)								
CP			GM			GM10C		
24h	48h	72h	24h	48h	72h	24h	48h	72h
4,15	6,74	8,51	3,37	6,28	8,44	3,34	4,52	6,68
4,35	6,91	8,87	3,10	4,57	6,42	3,75	6,26	8,04

Fonte: o autor (2022).

TABELA G2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (24H) DAS AMOSTRAS

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	1,08	2	0,54	11,22	0,04	9,55
Dentro dos grupos	0,14	3	0,05			
Total	1,22	5				

Fonte: o autor (2022).

TABELA G3: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (48H) DAS AMOSTRAS

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	2,68	2	1,34	1,34	0,38	9,55
Dentro dos grupos	2,99	3	0,99			
Total	5,67	5				

Fonte: o autor (2022).

TABELA G4: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA (72H) DAS AMOSTRAS

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	2,24	2	1,12	1,11	0,43	9,55
Dentro dos grupos	3,03	3	1,01			
Total	5,27	5				

Fonte: o autor (2022).

TABELA G5: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO HIDRÁULICA

Misturas	Período de desgaste (horas)	Desvio padrão	CV (%)
CP	24	0,14	3,33
	48	0,12	1,76
	72	0,25	2,93
GM	24	0,19	5,90
	48	1,21	22,29
	72	1,43	19,22
GM10C	24	0,29	8,18
	48	1,23	22,83
	72	0,96	13,07

Fonte: o autor (2022).

APÊNDICE H – ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ABRASÃO PROFUNDA

TABELA H1: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.

Resistência à abrasão profunda (mm)		
CP	GM	GM10C
18,18	16,98	18,64
18,51	18,56	20,95
17,59	15,44	21,70

Fonte: o autor (2022).

TABELA H2: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F-crítico
Entre grupos	18,48	2	9,24	5,34	0,47	5,14
Dentro dos grupos	10,39	6	1,73			
Total	28,87	8				

Fonte: o autor (2022).

TABELA H3: DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO PROFUNDA

Misturas	Desvio padrão	CV (%)
CP	1,59	8
GM	0,47	3
GM10C	1,56	9

FONTE: o autor (2022).