

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Fred Maurício Ferreira da Conceição

ABRASÃO HIDRÁULICA EM CONCRETO CONVENCIONAL E GEOPOLIMÉRICO COM FIBRA DE AÇO OU FIBRA DE POLIPROPILENO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

Belém – Pará – Brasil

2024

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil



Fred Maurício Ferreira da Conceição

**Abrasão Hidráulica em Concreto Convencional e Geopolimérico com Fibra de Aço
ou Fibra de Polipropileno**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como Parte dos Requisitos para Obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

Belém
Setembro de 2024

CESSÃO DE DIREITOS

Autor: Fred Maurício Ferreira da Conceição

TÍTULO: Abrasão Hidráulica em Concretos Geopoliméricos e Convencional com Fibra de Aço ou Fibra de Polipropileno.

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Fred Maurício Ferreira da Conceição

Passagem da Pedreirinha

nº 212. Guamá

66075-620

Belém – PA - Brasil

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F383a Ferreira da Conceição, Fred Maurício.
 Abrasão Hidráulica em Concreto Convencional e
 Geopolimérico com Fibra de Aço ou Fibra de Polipropileno / Fred
 Maurício Ferreira da Conceição. — 2024.
 143 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Denio Ramam Carvalho de Oliveira
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Civil, Belém, 2024.

 1. Abrasão Hidráulica. 2. Concreto Geopolimérico. 3.
 Fibras de Aço. 4. Fibras de Polipropileno. 5. ASTM C1138. I.
 Título.

CDD 624



ABRASÃO HIDRÁULICA EM CONCRETO CONVENCONIAL E GEOPOLIMÉRICOS COM FIBRA DE AÇO OU FIBRA DE POLIPROPILENO

AUTOR:

FRED MAURÍCIO FERREIRA DA CONCEIÇÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 29 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA
Data: 15/01/2025 07:34:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Andrielli Moraes de Oliveira

Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira
Membro Externo (UFG).

Documento assinado digitalmente
PAULO SERGIO MOTA DOS SANTOS JUNIOR
Data: 22/11/2024 10:58:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Paulo Sérgio Mota dos Santos Junior
Membro Externo (SEDUC)

Documento assinado digitalmente
MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 22/11/2024 07:36:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Documento assinado digitalmente
ALCEBIADES NEGRÃO MACEDO
Data: 21/11/2024 15:08:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*Aos meus pais, avós, irmã e noiva que me apoiam
nesta busca pelo conhecimento e realização deste
sonho.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador Dênio Ramam C. Oliveira pelas orientações, conselhos e dedicação em compartilhar conhecimento, me incentivando a melhorar cada vez mais.

Aos professores do PPGEC, Marcelo Picanço, Bernardo Pompeu, Helder Chaves, Alcebíades Macedo e Bernardo Neto.

Aos amigos do GAEMA, Eloisa Azevedo, Tamires Eufrásio, Marcelo Santos pela amizade, esforço e companheirismo. Ao Joel Martins, Leonardo Ribeiro, Paulo Mota, Aaron Kadima que sempre estiveram presentes e dispostos a contribuir em todas as fases desta pesquisa. A todos, a minha gratidão.

A FADESP pelo apoio financeiro para concretização desta pesquisa e de tantas outras da Universidade.

A sabedoria de nada serve se não é posta em prática
(Jesus Cristo)

RESUMO

CONCEIÇÃO, F. M. F. **Abrasão hidráulica em concreto geopoliméricos com fibra de aço ou fibra de polipropileno.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2024.

Enormes quantidades de concreto à base de cimento Portland são abrasivados de construções parcial ou totalmente submersas, envolvendo barragens, vertedouros, pontes e bacias, devido ao impacto de longo prazo dos sólidos transportados pela água. Este fenômeno é agravado principalmente pelo fluxo de água em alta velocidade que transporta grandes quantidades de sedimentos. O concreto geopolimérico a partir do metacaulim e ativadores alcalinos (hidróxido de sódio e silicato de sódio), foi utilizado como ligante em substituição ao cimento Portland. A tecnologia do geopolímero pode reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa criadas pela fabricação comum de cimento Portland. Neste estudo, três classes de resistência para o concreto geopolimérico e concreto convencional, 20, 30 e 40 MPa, foram preparados e testadores experimentalmente a resistência à abrasão segundo a ASTM C1138 (método subaquático). No total foram moldados 21 disco geopolimérico e 3 de concreto convencional. Ainda foram adicionados aos concretos teores de 0,5, 1,0 e 1,5% de fibras de aço ou polipropileno. Para a caracterização dos concretos foram moldados junto com os discos nove corpos de prova de ($\varnothing 100 \times 200$) mm de diâmetro e altura respectivamente, para realização dos ensaios de compressão, tração e módulo de elasticidade, com três corpos de prova para cada caracterização. Com esta pesquisa foi possível constatar que o concreto geopolimérico com teor de 1,5% de fibras de aço apresenta taxa de abrasão hidráulica inferior em comparação ao concreto geopolimérico e convencional sem adição de fibras, com a fibra oferecendo resistência aos impactos das cargas abrasivas, agindo como uma malha protetora da superfície do concreto e repelindo estas cargas.

Palavras Chave: Abrasão hidráulica, concreto geopolimérico, fibra de aço, fibra de polipropileno, ASTM C1138.

ABSTRACT

CONCEIÇÃO, F. M. F. **Hydraulic abrasion in geopolymetric concrete with steel fiber or polypropylene fiber.** Master's Dissertation, Postgraduate Program in Civil Engineering, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil. 2024.

Large quantities of Portland cement-based concrete are abraded from partially or fully submerged constructions, including dams, spillways, bridges and basins, due to the long-term impact of water-borne solids. This phenomenon is aggravated mainly by high-velocity water flow carrying large amounts of sediment. Geopolymer concrete made from metakaolin and alkaline activators (sodium hydroxide and sodium silicate) was used as a binder to replace Portland cement. Geopolymer technology can reduce global greenhouse gas emissions created by the common manufacture of Portland cement. In this study, three strength classes for geopolymer concrete and conventional concrete, 20, 30 and 40 MPa, were prepared and experimentally tested for abrasion resistance according to ASTM C1138 (underwater method). In total, 21 geopolymer and 3 conventional concrete discs were cast. Steel or polypropylene fibers of 0.5, 1.0 and 1.5% were also added to the concrete. To characterize the concrete, nine specimens measuring (Ø100 x 200) mm in diameter and height respectively were molded together with the discs to perform compression, tensile and modulus of elasticity tests, with three specimens for each characterization. This research showed that geopolymer concrete with a steel fiber content of 1.5% has a lower hydraulic abrasion rate compared to geopolymer and conventional concrete without fiber addition, with the fiber offering resistance to the impacts of abrasive loads, acting as a protective mesh on the concrete surface and repelling these loads.

Key words: Hydraulic abrasion, geopolymer concrete, steel fiber, polypropylene fiber, ASTM C1138.

LISTA DE TABELAS

| Tabela | Página |
|---|--------|
| Tabela 1 – Produção anual de cimento Portland..... | 6 |
| Tabela 2 – Cargas abrasivas. | 18 |
| Tabela 3 – Desgaste abrasivado em massa do concreto sem resíduo da bauxita. | 25 |
| Tabela 4 – Desgaste abrasivado em massa do concreto com resíduo da bauxita. | 25 |
| Tabela 5 – Mistura para produção do concreto geopolimérico e do concreto convencional. | 26 |
| Tabela 6 – Resultado do ensaio de abrasão hidráulica. | 26 |
| Tabela 7 – Mistura utilizada para produção de cada amostra de concreto. | 28 |
| Tabela 8 – Mistura do CGP e CC..... | 45 |
| Tabela 9 – Resultado do ensaio de resistência à compressão e tração do CGP e CC.... | 46 |
| Tabela 10 – Dosagem do CGP utilizada..... | 48 |
| Tabela 11 – Resistência do concreto geopolimérico com e sem fibra de aço. | 50 |
| Tabela 12 – Nomenclatura dos discos de concreto. | 58 |
| Tabela 12 – Nomenclatura dos discos de concreto (continuação)..... | 59 |
| Tabela 13 – Características dos discos de concreto. | 60 |
| Tabela 13 – Características dos discos de concreto (continuação). | 61 |
| Tabela 14 – Traço utilizado no concreto NC20, NC30 e NC40..... | 65 |
| Tabela 15 – Traço unitário do concreto geopolimérico. | 69 |
| Tabela 16 – Propriedades dos concretos. | 78 |
| Tabela 17: Abrasão hidráulica do concreto convencional | 79 |
| Tabela 18: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico sem fibra..... | 81 |
| Tabela 19: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibra de aço. | 83 |
| Tabela 20: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de aço | 85 |
| Tabela 21: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de aço | 87 |
| Tabela 22: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibra de polipropileno | 89 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 23: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de polipropileno | 91 |
| Tabela 24: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de polipropileno | 93 |
| Tabela 25: Profundidade abrasivada..... | 105 |

LISTA DE GRÁFICOS

| Gráfico | Página |
|--|--------|
| Gráfico 1: Relação abrasão x período do concreto convencional | 80 |
| Gráfico 2: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico sem adição de fibras. | 82 |
| Gráfico 3: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 20 Mpa reforçado com fibra de aço | 84 |
| Gráfico 4: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de aço | 86 |
| Gráfico 5: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de aço | 88 |
| Gráfico 6: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibra de polipropileno | 90 |
| Gráfico 7: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de polipropileno | 92 |
| Gráfico 8: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de polipropileno | 94 |
| Gráfico 9: Concreto convencional x concreto geopolimérico sem fibras | 95 |
| Gráfico 10: GC20sf x GC20pp | 97 |
| Gráfico 11: GC30sf x GC30pp | 98 |
| Gráfico 12: GC40sf x GC40pp | 100 |
| Gráfico 13: Abrasão hidráulica dos discos com 20 MPa | 101 |
| Gráfico 14: Abrasão dos discos com 30 MPa | 102 |
| Gráfico 15: Abrasão dos discos com 40 MPa | 102 |
| Gráfico 16: Abrasão dos discos com 0,5% de fibra | 103 |
| Gráfico 17: Abrasão dos discos com 1,0% de fibra | 104 |
| Gráfico 18: Abrasão nos discos com 1,5% de fibra | 104 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Página |
|--|---------------|
| Figura 1 – Ponte de Moju (Pará). | 1 |
| Figura 2 – Atrito da partícula abrasiva com a fibra de aço..... | 2 |
| Figura 3 – Efeito da abrasão na superfície do pilar. | 2 |
| Figura 4 – Efeitos da cavitação no vertedouro da Itaipú binacional. | 3 |
| Figura 5 – Evolução da erosão na superfície do concreto. | 4 |
| Figura 6 – Fluxo de produção do concreto geopolimérico..... | 5 |
| Figura 7 – Comparativo entre a produção e o consumo de cimento Portland no Brasil. . | 6 |
| Figura 8 – Máquina Los Angeles. | 10 |
| Figura 9 – Aparelho de Jateamento. | 12 |
| Figura 10 – Abrasímetro Hidráulico..... | 14 |
| Figura 11 – Abrasímetro Hidráulico com dispositivo rotativo acoplado e velocidade ajustável no maquinário..... | 15 |
| Figura 12 – Recipiente de ensaio com as bases impermeáveis. | 16 |
| Figura 13 – Detalhamento da palheta de agitação..... | 17 |
| Figura 14 – Palheta de agitação..... | 17 |
| Figura 15 – Cargas Abrasivas (esferas)..... | 18 |
| Figura 16 – Disco de concreto com seixo ou agregado sintético. | 19 |
| Figura 17 – Agregado sintético do resíduo da bauxita moldados manualmente antes e pós queima a 1200°C..... | 22 |
| Figura 18 – Discos de concreto. | 22 |
| Figura 19 – Ensaio de abrasão hidráulica..... | 23 |
| Figura 20 – Profundidade Abrasivada..... | 24 |
| Figura 21 – Aparência dos discos após a sétima medição..... | 24 |
| Figura 22 – Discos de concreto geopolimérico e concreto convencional respectivamente após o ensaio de abrasão hidráulica..... | 27 |
| Figura 23 – Carbonatação do testemunho. | 29 |
| Figura 24 – Reparo, reforço ou construção de estruturas submersas. | 30 |
| Figura 25 – Erosão por Cavitação e Erosão por Abrasão Respectivamente | 31 |
| Figura 26 – Velocidade de transporte das partículas..... | 32 |
| Figura 27 – Túnel de contração. | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 – Escoamento de um fluido..... | 34 |
| Figura 29 – Cavitação em uma eclusa de navegação. | 35 |
| Figura 30 – Emissão de CO ₂ na produção do concreto convencional e do concreto geopolimérico. | 38 |
| Figura 31 – Fluxograma do Concreto Geopolimérico..... | 39 |
| Figura 32 – Ativador alcalino com silicato de sódio neutro misturado com hidróxido de sódio. | 39 |
| Figura 33 – Hidróxido de Sódio (NaOH) | 40 |
| Figura 34 – Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃) | 41 |
| Figura 35 – Produção do metacaulim..... | 43 |
| Figura 36 – Adição dos materiais no misturador..... | 46 |
| Figura 37 – Resistência à compressão em comparação a porcentagem de agregado graúdo substituído. | 49 |
| Figura 38 – Comparação entre o concreto geopolimérico e concreto convencional com e sem fibra de aço..... | 51 |
| Figura 39 – Ensaio de abatimento do tronco de cone do concreto convencional e geopolimérico respectivamente. | 52 |
| Figura 40 – Tipos de fibras..... | 53 |
| Figura 41 – Formação de ouriço na fibra de aço. | 54 |
| Figura 42 – Microfibras e macrofibras sintéticas de polipropileno..... | 55 |
| Figura 43 – Características dos discos de concreto. | 59 |
| Figura 44 – Abrasímetro Hidráulico..... | 62 |
| Figura 45 – Base de atracação | 62 |
| Figura 46 – Esferas metálicas..... | 63 |
| Figura 47 – Bases cilíndrica (Ø25 x 50) mm..... | 64 |
| Figura 48 – Configuração do disco e equipamentos..... | 64 |
| Figura 49 – Materiais dos discos de concreto convencional. | 65 |
| Figura 50 – Abatimento do concreto convencional..... | 66 |
| Figura 51 – Ensaio de compressão diametral e módulo de elasticidade, respectivamente. | 67 |
| Figura 52 – Materiais utilizados no concreto geopolimérico | 68 |
| Figura 53 – Eflorescência no concreto geopolimérico. | 69 |
| Figura 54 – Abatimento do concreto geopolimérico sem adição de fibras, com fibra de aço, e com fibra de polipropileno respectivamente. | 70 |

| | |
|---|-----|
| Figura 55 – Soda cáustica e hidróxido de sódio. | 71 |
| Figura 56 – Silicato de sódio e solução ativadora, respectivamente. | 71 |
| Figura 57 – Fibras de aço <i>Hooked</i> | 73 |
| Figura 58 – Fibras de Polipropileno. | 73 |
| Figura 59: Fluxograma de preparo da mistura geopolimérica..... | 75 |
| Figura 60 – Formas dos discos de concreto..... | 75 |
| Figura 61 – Molde dos discos..... | 77 |
| Figura 62: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica do concreto convencional... 80 | |
| Figura 63: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de concreto geopolimérico sem adição de fibras. | 82 |
| Figura 64: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibras de aço | 84 |
| Figura 65: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibras de aço | 86 |
| Figura 66: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibras de aço | 88 |
| Figura 67: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibras de polipropileno | 90 |
| Figura 68: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibras de polipropileno | 92 |
| Figura 69: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibras de polipropileno | 94 |
| Figura 70: Pós ensaio de abrasão hidráulica do NC x GC..... | 96 |
| Figura 71: Pós ensaio de abrasão hidráulica do GC20sf x GC20pp..... | 97 |
| Figura 72: Pós ensaio de abrasão hidráulica do GC30sf x GC30pp..... | 99 |
| Figura 73: Pós ensaio de abrasão hidráulica do GC40sf x GC40pp..... | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| Abreviatura/Sigla | Significado |
|--------------------------|---|
| ABCP | Associação Brasileira de Cimento Portland |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACI | <i>American Concrete Institute</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| AGLV | Agregado Graúdo de Lama Vermelha |
| AGS | Agregado Sintético |
| CAA | Concreto Alto Adensável |
| CAD | Concreto de Alto Desempenho |
| CC | Concreto Comum |
| CCA | Cinza da Casca De Arroz |
| CAR | Concreto de Agregado Reciclado |
| CGP | Concreto Geopolímero |
| CN | Concreto Normal |
| CP | Cimento Portland |
| CP_s | Corpo de Prova |
| CR | Concreto Rico |
| CRF | Concreto Reforçado com Fibras |
| CUAD | Concreto de Ultra-Alto Desempenho |
| DRS | Depósito de Resíduo Sólidos |
| GAR | Geopolímero Com Agregado Reciclado |
| LV | Lama Vermelha |
| LVM | Lama Vermelha Modificada |
| LVAF | Lama Vermelha e Areia Fina |

| | |
|-------------|--|
| NBR | Norma Brasileira |
| NM | Norma Mercosul |
| PTP | Padrão Técnico de Procedimento |
| RC | Resíduo Caulínítico |
| RPM | Rotação por Minuto |
| SNIC | Sindicato Nacional da Indústria do Cimento |
| SR | Seixo Rolado |

LISTA DE SÍMBOLOS

| SÍMBOLO | Significado |
|-------------------|--|
| A | Área da Superfície Desgastada |
| A' | Área da Sessão da Tubulação |
| A_n | Perda Percentual |
| A_c | Coeficiente de Abrasão |
| ADA_T | Desgaste Sofrido pela Superfície do Concreto |
| Abs | Absorção de Água Expressa em Porcentagem |
| Acp | Abatimento do Corpo de Prova em mm |
| B | Massa de Argila no Ar |
| Bc | Bacia de Controle |
| b | Largura do Corpo de Prova |
| Bfs | Escória de Alto Forno |
| C | Massa de Argila na Água |
| d | Diâmetro das Partículas |
| D | Diâmetro do Corpo de Prova |
| D' | Gravidade Específica da Argila |
| d_l | Densidade do Agregado Seco |
| E_c | Módulo de Elasticidade do Concreto |
| E_v | Índice de Vazios no Agregado Expresso em Porcentagem |
| F | Força Máxima Alcançada até a Ruptura |
| F_t | Resistência à Flexão |
| $F_{ck} = f_{ck}$ | Resistência à Compressão |
| f_{ct} | Resistência à Tração |
| G_w | Peso Unitário da Água |

| | |
|-----------|---|
| h | Altura do Corpo de Prova |
| H_m | Altura do Molde Metálico |
| H_{ecp} | Altura do Eixo do Corpo de Prova |
| L | Vão Entre os Suportes |
| M | Área Abrasiva Consumida |
| M_o | Molaridade |
| M_a | Massa da Amostra Seca em Estufa |
| M_b | Massa da Amostra na Condição Saturada |
| M_{ar} | Massa do Recipiente Com o Agregado |
| M_n | Massa Total de Amostra Seca |
| M'_n | Massa Total de Amostra Lavada |
| M_r | Massa do Recipiente Vazio |
| M_c | Massa da Amostra na Condição Saturada |
| M_d | Massa da Amostra na Condição Saturada |
| n | Graduação Escolhida para o Ensaio de Abrasão |
| P_o | Pressão em um Ponto Específico |
| P_c | Pressão Estática Absoluta |
| P_{ap} | Massa Unitária do Agregado |
| Q | Vazão |
| R_a | Taxa de Abrasão por Erosão |
| V | Volume do Recipiente |
| V' | Volume de Argila |
| V | Velocidade do Fluido |
| V_b | Velocidade no Fundo do Fluido |
| V_a | Volume de Água Adicionada ao Recipiente de Ensaio |
| V_i | Volume Inicial do Disco Antes do Teste |

| | |
|----------|---|
| V_{lt} | Volume de Material Perdido |
| V_m | Velocidade Média |
| V_t | Volume da Amostra no Intervalo Desejado |
| V_{tt} | Volume Final do Disco no Final do Teste |
| W | Carga Final |
| W' | Massa de Argila na Gravidade |
| W_a | Massa do Disco Saturado no Ar |
| W_o | Massa Inicial do Concreto Antes do Jateamento |
| W_l | Massa Final do Concreto Após o Jateamento |
| W_i | Massa Inicial de Argila |
| W_f | Massa Final de Argila |
| W_w | Massa Aparente do Disco |
| Z_c | Elevação no Ponto (C) |
| Z_o | Elevação no Ponto (O) |
| % | Porcentagem |

Letras gregas

| Símbolo | Significado |
|-------------|---|
| ρ_w | Densidade da Água |
| ρ_{ap} | Densidade Média do Agregado |
| ρ_s | Densidade do Agregado na Condição Seca |
| ρ_a | Densidade da Água na Temperatura do Banho |
| γ | Peso Específico do Fluido |

SUMÁRIO

| CAPÍTULO | PÁGINA |
|--|---------------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 1 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 7 |
| 1.3 OBJETIVO..... | 8 |
| 1.3.1 Objetivo Geral..... | 8 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 8 |
| 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... | 9 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 10 |
| 2.1 ENSAIOS DE ABRASÃO..... | 10 |
| 2.1.1 Abrasão Los Angeles..... | 10 |
| 2.1.2 Abrasão por Jato de Areia..... | 11 |
| 2.1.3 Abrasão Hidráulica <i>ASTM C1138</i> | 14 |
| 2.2 PESQUISA SOBRE ABRASÃO HIDRÁULICA..... | 21 |
| 2.2.1 Rossi <i>et al.</i> (2008) | 21 |
| 2.2.2 Ramujee <i>et al.</i> (2014) | 25 |
| 2.2.3 Horszczaruk <i>et al.</i> (2017) | 27 |
| 2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS..... | 28 |
| 2.3.1 Considerações Gerais..... | 28 |
| 2.3.2 Erosão por Abrasão..... | 30 |
| 2.3.3 Erosão por Cavitação..... | 33 |
| 2.4 CONCRETO CONVENCIONAL..... | 36 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.5 | CONCRETO GEOPOLIMÉRICO..... | 37 |
| 2.5.1 | Considerações Gerais..... | 37 |
| 2.5.2 | Ativador Alcalino..... | 39 |
| 2.5.2.1 | Hidróxido de Sódio (NaOH)..... | 40 |
| 2.5.2.2 | Silicato de Sódio (Na ₂ SiO ₃) | 41 |
| 2.5.3 | Metacaulim..... | 42 |
| 2.5.4 | Pesquisas Sobre Concreto Geopolimérico..... | 44 |
| 2.5.4.1 | Ramujee <i>et al.</i> , (2017) | 44 |
| 2.5.4.2 | Akbarnezhad <i>et al.</i> , (2015) | 47 |
| 2.5.4.3 | Azevedo (2023) | 49 |
| 2.6 | FIBRAS DE AÇO (<i>Hooked</i>)..... | 52 |
| 2.7 | FIBRAS DE POLIPROPILENO..... | 55 |
| 3. | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 57 |
| 3.1 | CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 57 |
| 3.2 | CARACTERÍSTICAS DOS DISCOS..... | 57 |
| 3.3 | SISTEMA DE ENSAIO..... | 61 |
| 3.4 | MATERIAIS..... | 64 |
| 3.4.1 | Concreto Convencional..... | 64 |
| 3.4.2 | Concreto Geopolimérico..... | 67 |
| 3.4.3 | Fibra de Aço..... | 72 |
| 3.4.4 | Fibra de Polipropileno..... | 73 |
| 3.4.5 | Preparo da Mistura Geopolimérica..... | 74 |
| 3.4.6 | Formas dos Discos..... | 75 |
| 3.4.7 | Propriedades dos Materiais..... | 76 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.7.1 Concreto..... | 76 |
| 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 79 |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 79 |
| 4.2 DISCOS DE CONCRETO CONVENCIONAL..... | 79 |
| 4.3 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO SEM FIBRAS..... | 81 |
| 4.4 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 20 MPa REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO..... | 83 |
| 4.5 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 30 MPa REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO..... | 85 |
| 4.6 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 40 MPa REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO..... | 87 |
| 4.7 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 20 MPa REFORÇADO COM FIBRA DE POLIPROPILENO..... | 89 |
| 4.8 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 30 MPa REFORÇADO COM FIBRA DE POLIPROPILENO..... | 91 |
| 4.9 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 40 MPa REFORÇADO COM FIBRA DE POLIPROPILENO..... | 93 |
| 4.10 COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISCOS NC x GC..... | 95 |
| 4.11 COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISCOS GC20sf x GC20pp..... | 96 |
| 4.12 COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISCOS GC30sf x GC30pp..... | 98 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.13 | COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISOCSGC40sf x GC40pp..... | 99 |
| 4.14 | COMPARATIVO ENTRE AS CLASSES DE RESISTÊNCIA..... | 101 |
| 4.15 | COMPARATIVO PELO TEOR DE FIBRA..... | 103 |
| 4.16 | PROFUNDIDADE ABRASIVADA..... | 105 |
| 5. | CONCLUSÃO..... | 107 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 109 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nas estruturas hidráulicas, grandes quantidades de concreto podem ser destruídas em contato constante com a água. Devido ao impacto prolongado dos sólidos transportados, é possível que ocorra o desgaste da estrutura por erosão ou abrasão, que conforme Cheyad *et al.* (2021), é causada pelo movimento de partículas arrastadas pelo fluxo de água, como cascalho, areia, gelo e quaisquer outro detrito, contra a superfície do concreto. Esta patologia é caracterizada por três fatores principais que devem ser considerados: a superfície do concreto em contato com o fluxo de água, as partículas sólidas que impactam nas camadas superficiais do concreto e a corrente de água que transporta essas partículas sólidas. A Figura 1 mostra uma ponte com a fundação parcialmente submersa.

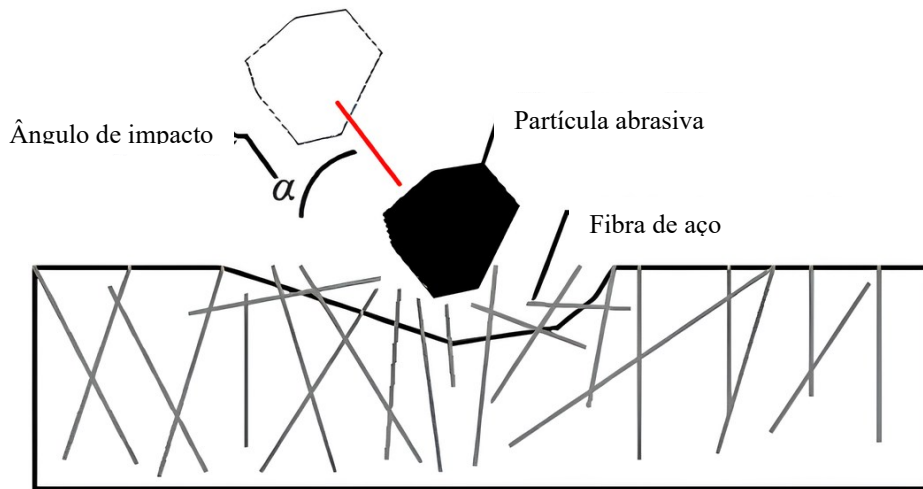
Figura 1 – Ponte de Moju (Pará).



Fonte: Antônio Salame (2010).

Segundo estudos como os de Holland *et al.* (2014) e Liu *et al.* (2024), a taxa do desgaste abrasivo está diretamente ligada a resistência à compressão do concreto, onde concretos de altas resistência sofrem menos perdas pelos impactos de abrasão, ocasionando assim a diminuição da profundidade desgastada. Além da resistência, a fibra de aço também influencia para diminuir o desgaste da estrutura, agindo de forma a impedir que a partícula abrasiva atrite diretamente na superfície do concreto (Figura 2).

Figura 2 – Atrito da partícula abrasiva com a fibra de aço



Fonte: Liu *et al.* (2024).

As patologias neste tipo de estrutura geralmente são causadas por abrasão, erosão e cavitação ocasionadas pelo atrito de materiais sólidos transportados pela correnteza, onde a velocidade tem influência direta, e pela rigidez do material, quanto maior e mais rígido este material for maior será o dano à estrutura. A Figura 3 mostra o pilar de uma ponte, cujo apresenta redução de seção ocasionada pela abrasão, logo, pode facilitar a deterioração da estrutura por ataques de sulfatos, corrosão da armadura exposta, carbonatação, lixiviação e até mesmo pode reduzir as resistências físicas e mecânicas do pilar onde poderá ocasionar a ruína parcial ou total da estrutura.

Figura 3 – Efeito da abrasão na superfície do pilar.



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

Conforme o ACI 210 (ACI, 1993) em casos de ambientes mais agressivos os ataques químicos podem se tornar um problema em potencial para a estrutura e acelerar a deterioração e a erosão da edificação. O ambiente ácido pode variar de baixas concentrações encontradas na água livre de minerais a altas concentrações de ácido encontradas em muitas plantas de processamento. Os ambientes alcalinos também podem causar a deterioração do concreto. Na presença de umidade, os solos alcalinos que contêm sulfatos de magnésio, sódio e cálcio atacam o concreto, formando compostos químicos que absorvem água e incham, podendo danificar o concreto

Segundo Pinho *et al.*, (2007), a cavitação é um fenômeno que consiste na formação de bolhas de vapor em zonas onde a pressão cai abaixo da pressão de vapor da água, seguido pela explosão destas bolhas em zonas de altas pressões, esta explosão cria ondas de choque as quais impactam na superfície do concreto, acarretando a formação de vazios na estrutura, a Figura 4 mostra a cavitação sofrida pelo vertedouro de Itaipú.

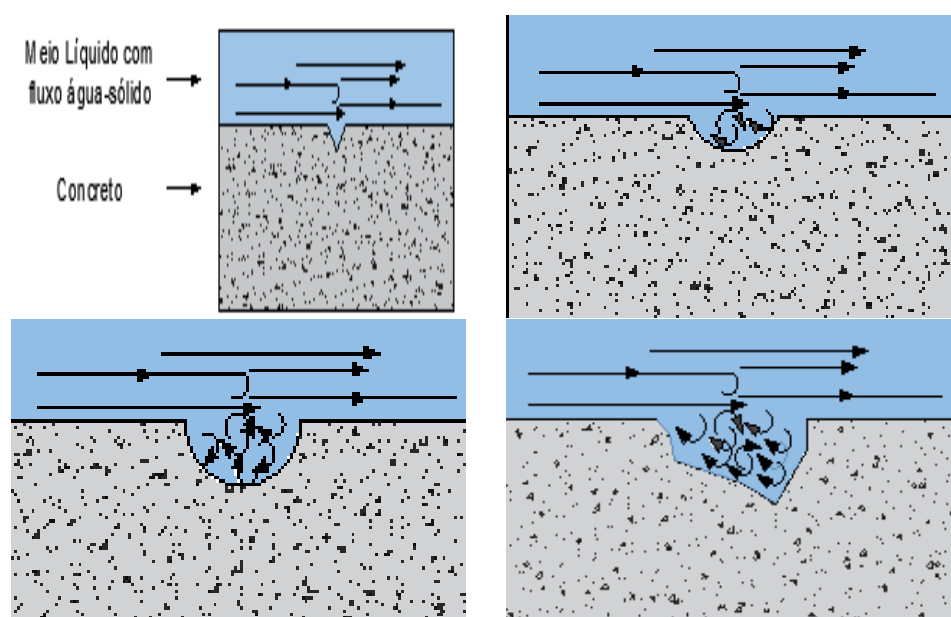
Figura 4 – Efeitos da cavitação no vertedouro da Itaipú binacional.



Fonte: Latorre (2002).

A erosão pode ser definida como o desgaste superficial do concreto ocasionado pelo atrito consecutivo de partículas pontiagudas que são transportadas na água. Conforme apresentado por Messa *et al.* (2018), os casos mais recorrentes de erosões em estruturas de concreto são em usinas hidrelétricas as quais dispõem de estruturas chamadas de extravasores, vertedores ou bacias de dissipação as quais são suscetíveis de erosão devido ao alto fluxo de água-sólido, a Figura 5 apresenta como ocorre esta erosão ao decorrer do tempo bem como sua evolução.

Figura 5 – Evolução da erosão na superfície do concreto.



Fonte: Autor (2024).

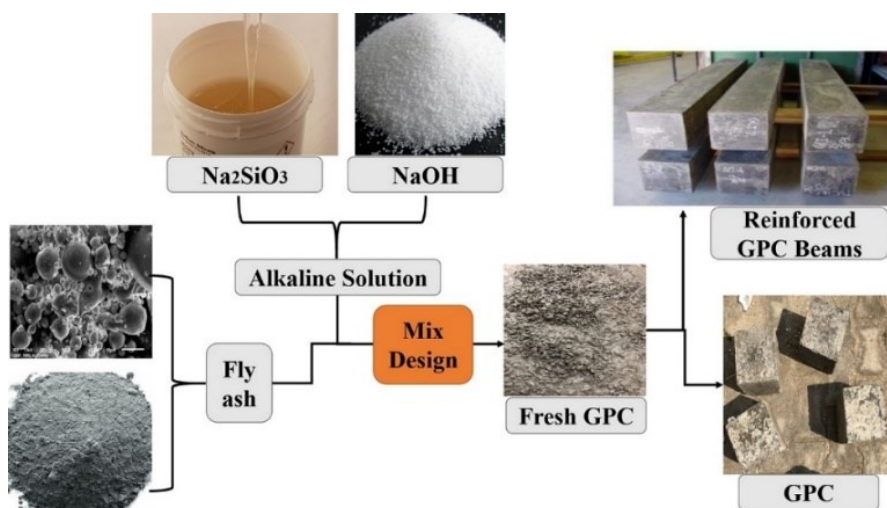
Em outro cenário, visto que o concreto convencional é um dos compósitos mais utilizados na sociedade e este apresenta valores expressivos de emissão de CO_2 , a busca por materiais menos poluentes e que tenham características semelhantes a ele tem sido constante. Segundo Singh *et al.* (2015) a necessidade da utilização de um concreto alternativo surgiu com os desafios das indústrias do concreto em atender a demanda crescente pelo cimento Portland, reduzir os impactos ambientais ligados à produção do clínquer, e melhorar as características do concreto utilizado na construção civil em obras de médio a grande porte bem como em obras especiais como pontes, túneis, barragens, viadutos.

Nesse sentido, em meados da década de 70, o pesquisador francês Davidovits propôs o uso de materiais de origem geológica ou industrial, como cinzas volantes, que, ao reagirem com álcalis, formam ligantes semelhantes ao cimento, mas com características químicas e estruturais distintas, criando os geopolímeros. O concreto geopolimérico (CGP), formado por um material precursor - rico em aluminossilicato - e um ativador, componente altamente alcalino como o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), silicato de sódio (Na_2SiO_3) e silicato de potássio (K_2SiO_3)), pode ser utilizado como alternativa ao concreto convencional (CC) uma vez que substitui de forma total ou parcial o cimento Portland (CP). Este apresenta

propriedades atrativas como a alta resistência inicial à compressão, baixa porosidade, resistência à ataques químicos e alta resistência ao fogo.

Para Singh *et al.* (2015), os materiais considerados aluminossilicatos, como caulinita, feldspato e resíduos industriais, como cinzas volantes, escórias metalúrgicas, resíduos de mineração entre outros só são aplicados como aglomerantes pois apresentam características química, mineralógica, morfológica e finura aos quais atendem os critérios para o desenvolvimento de geopolímeros estáveis, considerando que estes materiais sejam amorfos, apresente baixa demanda de água e seja capaz de liberar alumínio com facilidade. A Figura 6 apresenta o processo de produção desse concreto.

Figura 6 – Fluxo de produção do concreto geopolimérico.



Fonte: Hassan; Arif *et al.* (2020).

Atualmente o setor da construção é responsável por uma porcentagem significativa, de 5 a 7%, do total das emissões antropogênicas de gases do efeito estufa. Esses valores se devem à alta produção de cimento, só no Brasil nos últimos oito anos foram produzidos 474.446.006 t frente a um consumo de 468.942.368 t. A Tabela 1 apresenta os dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), com a produção mensal-anual do cimento Portland. As instituições de ensino conduzem pesquisas e unem esforços para reduzir a quantidade de materiais utilizados pela indústria da construção civil seja pela substituição parcial ou total de aglomerantes, agregados, aços e ou madeira por materiais que com características semelhantes e/ou superiores aos atualmente utilizados, como é o caso do metacaulim, empregado como aglomerante na produção do CGP.

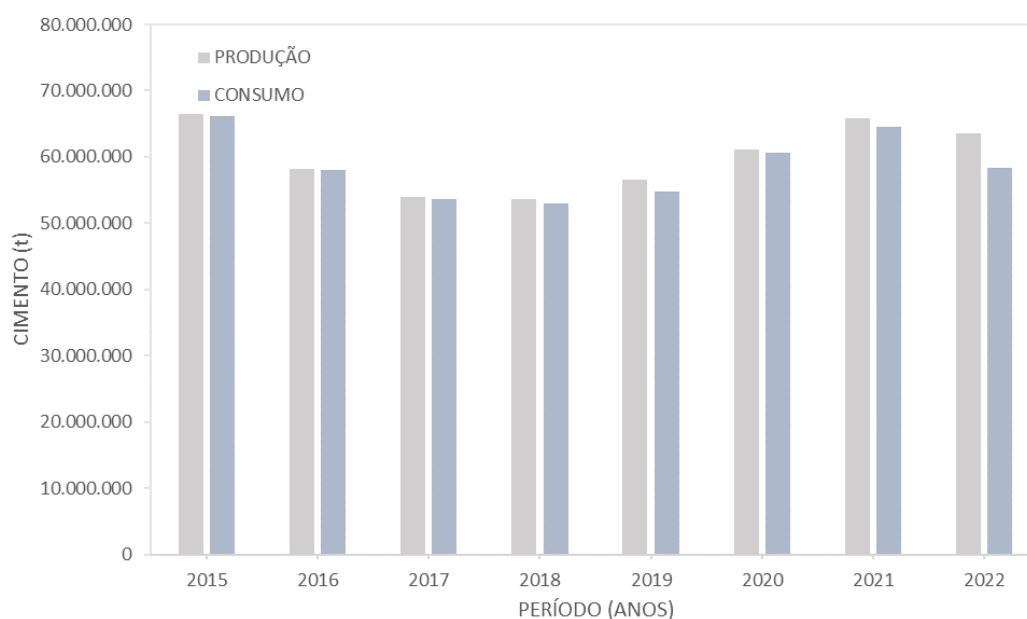
Tabela 1 – Produção anual de cimento Portland.

| PRODUÇÃO ANUAL (t) | | | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| 66.488.569 | 58.160.313 | 54.003.893 | 53.602.491 | 56.611.225 | 61.064.683 | 65.883.514 | 63.545.862 |

Fonte: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022).

Segundo dados obtidos com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) a produção de cimento junto ao período de 2019 a 2021 aumentou exponencialmente, a Figura 7 apresenta esses dados bem como o aumento da produção nacional e o consumo nacional de cimento Portland. Pode ser observado uma variação na produção e no consumo deste aglomerante utilizado na construção civil entre os anos de 2015 a 2018, esta redução pode estar correlacionada a reutilização, e emprego de novos materiais na construção civil, porém há necessidade de estudos para esses dados.

Figura 7 – Comparativo entre a produção e o consumo de cimento Portland no Brasil.



Fonte: Adaptado de Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2022).

1.2 JUSTIFICATIVA

Estruturas de concreto submerso como pontes, dutos ou locais onde o fluxo e impacto da água é maior como extravasores, vertedouros, barragens, hidrelétricas, entre outros, com o tempo, apresentam patologias seja por meio da abrasão, por erosão ou cavitação ocasionadas pelo fluxo de água-sólido como pedras, seixo, areia, brita e galhos. O concreto geopolimérico apesar de apresentar algumas propriedades físicas e mecânicas superiores ao concreto convencional, até o presente momento há poucos estudos sobre a abrasão hidráulica deste compósito, bem como com adição de fibras de aço ou macrofibras sintéticas de polipropileno.

Deste modo, essa pesquisa visou analisar, através de ensaios de abrasão hidráulica conforme a ASTM C1138, as características do concreto geopolimérico frente as cargas abrasivas em comparação ao concreto convencional, bem como verificar a parcela de contribuição das fibras variando o teor e o tipo. Além disso, foram avaliados a influência da resistência à compressão na resistência à abrasão hidráulica e, consequentemente, a interação entre os materiais convencionais e os alternativos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Geral

Esta pesquisa tem como objetivo contribuir com os estudos sobre o concreto geopolimérico bem como sua utilização em estruturas submersas, comparando sua resistência à abrasão hidráulica com e sem adição de fibras frente ao concreto convencional. Além da variação na classe de resistência à compressão (f_{ck}) dos concretos, foi analisado a influência da fibra de aço e da fibra de polipropileno com teores de 0,5%; 1,0% e 1,5% no CGP, apresentando o comportamento resistente aos ataques abrasivos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Nesse contexto, foi desenvolvido um programa experimental composto por 3 discos de CC e 21 de CGP, tendo como variáveis o tipo e a resistência a compressão dos concretos, bem como o tipo e o teor de fibras. Para embasar o estudo e desenvolver uma pesquisa sólida bem como o controle tecnológico dos materiais será feito:

- Controle tecnológico do concreto geopolimérico e os ensaios de propriedades físicas como compressão axial, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral.
- Realizar ensaios de abrasão hidráulica de acordo com normativas da ASTM C1138 em 3 discos de cada família;
- Analisar a contribuição do tipo de concreto, resistência a compressão, teor e tipo de fibras.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 5 *capítulos*, mais as referências bibliográficas utilizadas para embasar a pesquisa. No *capítulo 1* é apresentado a introdução da pesquisa, justificativa e objetivos.

No *capítulo 2* é apresentado os tipos de ensaio de abrasão, entre eles o de Los Angeles para atestar os agregados; e a própria *ASTM C1138* onde faz-se a diretrizes de teste da abrasão hidráulica do concreto. Ainda neste *capítulo* é abordado os tipos de patologias ocasionadas pela abrasão em estruturas de concreto submersas; as pesquisas a respeito do concreto geopolimérico, principalmente citando as desenvolvidas pelo Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais da Universidade Federal do Pará (GAEMA/UFPA); e pesquisas sobre a abrasão hidráulica.

O *capítulo 3* trata dos materiais utilizados e métodos empregados para produção do concreto geopolimérico e do concreto convencional, e os procedimentos adotados para o ensaio de abrasão hidráulica.

No *capítulo 4* é apresentado os resultados obtidos com o teste de abrasão hidráulica do concreto geopolimérico com adição da fibra e aço fibra de polipropileno frente ao concreto convencional, medindo a relação de material abrasivado por período de ensaio.

Já o *capítulo 5* apresenta as conclusões obtidas com esta pesquisa e respostas aos objetivos estabelecidos.

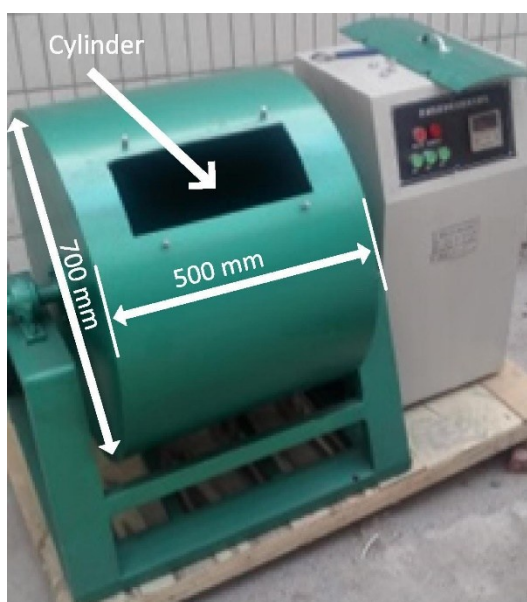
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSAIOS DE ABRASÃO

2.1.1 Abrasão Los Angeles

Este método de teste será introduzido tomando como base a norma brasileira NM 51 (ABNT, 2000) e a ASTM C131 (ASTM, 2020) onde apresentam o padrão de ensaio do agregado utilizado na mistura de concreto, com tamanho máximo inferior a 37,50 mm, utilizando para tal método a máquina de testes de Los Angeles, como mostra a Figura 8. Vale observar que para testes de materiais com tamanhos superiores a 19,00 mm devem ser utilizado as diretrizes da ASTM C535 (ASTM, 2016), assim materiais com dimensões entre 19,00 mm e 37,50 mm podem ser testados tanto pela ASTM C131 quanto pela C535.

Figura 8 – Máquina Los Angeles.



Fonte: Guo *et al.*, 2018

A princípio este teste consiste em medir a perda de material do agregado por uma combinação de ações que incluem abrasão ou atrito, impacto ou trituração em um tambor cilíndrico de aço que rotaciona contendo, em seu interior, um número específico de esferas de aço (cargas abrasivas), tendo em vista que a quantidade de esferas depende do tipo de amostra que será testada. À medida que a máquina gira, uma das placas

internas transportam as esferas de aço, carregando-as até que sejam roladas em sentido oposto a rotação do tambor, desta forma criando um efeito de esmagamento por impacto. Segundo a ASTM C131 (ASTM, 2020), a amostra então rola dentro do tambor imputando uma ação abrasiva até que a placa das prateleiras pegue esta amostra e as esferas de aço, em seguida este ciclo é repetido. Após o número de rotações ser atingido, este número é descrito por norma, o material é removido do cilindro, e peneirado para em seguida ser medida a degradação do material como perda percentual.

Esse método de ensaio onde é utilizado para classificar o agregado e auxiliar na escolha do mais adequado a ser empregado. Entretanto, este método não pode ser utilizado como comparação automática entre dois materiais distintos, é preciso levar em consideração a origem, composição ou estrutura do agregado. O teste de Abrasão *Los Angeles* é principalmente utilizado, não se restringindo apenas a estes, em obras de infraestrutura como revitalização de rodovias ou testes em novos agregados.

2.1.2 Abrasão por Jato de Areia

A ASTM C418 (ASTM, 2020) determina as características de resistência à abrasão do concreto através deste método, submetendo-o ao impacto de areia movida a uma certa velocidade a ar com uma ação cortante que tende a desgastar os materiais menos resistentes que estão presentes no concreto. Xinhua *et al.* (2016) explicam o teste de jateamento como sendo o método de medir a resistência à erosão por abrasão do concreto sob um fluxo de alta velocidade (> 40 m/s). Além disso este método de jateamento de areia é capaz de simular a resistência do concreto por diferentes ângulos e velocidades de impacto em comparação com outros métodos de teste de abrasão.

O aparelho de jateamento é constituído por uma pistola do tipo injetora, esta pistola deve ter um jato de ar de alta velocidade alimentado por uma taxa de fluxo condizente com o material abrasivo. O bocal mostrado na Figura 9 deve ser feito de material metálico (aço laminado a frio). Todas as providências devem ser tomadas para serem coletados o abrasivo e a areia usados no teste ASTM C418.

Figura 9 – Aparelho de Jateamento.



Fonte: Xinhua *et al.* (2016).

Os corpos de prova a serem testados devem ser mergulhados em água por um tempo mínimo de 24h, em seguida a superfície do corpo de prova deve ser secada por um pano úmido, o intuito é obter uma condição saturada e seca na superfície do concreto no momento do teste. Posteriormente, o aparelho é ajustado para o teste, a pressão do ar na pistola deve manter-se a 410 KPa, a taxa de fluxo de abrasivo (areia) é de 600 g/min devendo ser graduado a cada 60 minutos de teste. Vale ressaltar os cuidados que se deve ter com o bocal de jateamento, pois se for de aço laminado a frio este deve ser substituído a cada 60 minutos, entretanto se este bocal for de aço temperado a ferramenta deve ser trocada conforme necessário para manter o fluxo uniforme.

Ao iniciar o teste o corpo de prova é fixado firmemente na bancada a uma distância de 75 mm do bocal, a superfície do concreto deve ser exposta ao jateamento por 1 minuto, passado o tempo, o local é redirecionado para mais 8 pontos diferentes da superfície. O volume desgastado é medido preenchendo os vazios deixado pelo jato com argila a base de óleo, a argila é pressionada manualmente contra os pontos desgastados do corpo de prova, por último é feita a diferença da argila antes e depois de ser preenchido o material, esta equação é apresentada na equação 1.

$$W_c = W_i - W_f \quad \text{Eq. 01}$$

Onde:

W_i massa inicial de argila

W_f massa final de argila

Cálculo da gravidade específica da argila:

$$D = \frac{B}{(B - C)} \quad \text{Eq. 02}$$

Onde:

B massa de argila no ar (g)

C massa de argila na água (g)

Cálculo do volume de argila, V, por cavidade em centímetros cúbicos:

$$V = \frac{W}{D} \quad \text{Eq. 03}$$

Onde:

W massa de argila na gravidade

D gravidade específica da argila

A Equação 4 calcula a perda de abrasão volumétrica, expressa em centímetros cúbicos por centímetro quadrado, para compensar as densidades variáveis das amostras.

$$A_c = \frac{V}{A} \quad \text{Eq. 04}$$

Onde:

A_c coeficiente de abrasão

A área da superfície desgastada

No estudo de Xinhua & Zhen (2016) foi moldado três corpos de prova para cada ensaio de jateamento, neste caso foram três velocidades de impacto (47,8 m/s; 57,3 m/s e 66,8 m/s) e cinco ângulos diferentes (15°, 30°, 45°, 60° e 90°). As amostras foram pesadas antes de depois do ensaio, assim como a taxa do abrasivo. Para o cálculo de erosão por abrasão, Xinhua utilizou a Equação 05, onde mediu a perda em grama (g) do corpo de prova.

$$R_a = \frac{W_0 - W_1}{M} \quad \text{Eq. 05}$$

Onde:

R_a taxa de erosão por abrasão em estado estacionário do concreto (g/Kg)

M área abrasiva correspondente à perda de massa em estado estacionário (Kg)

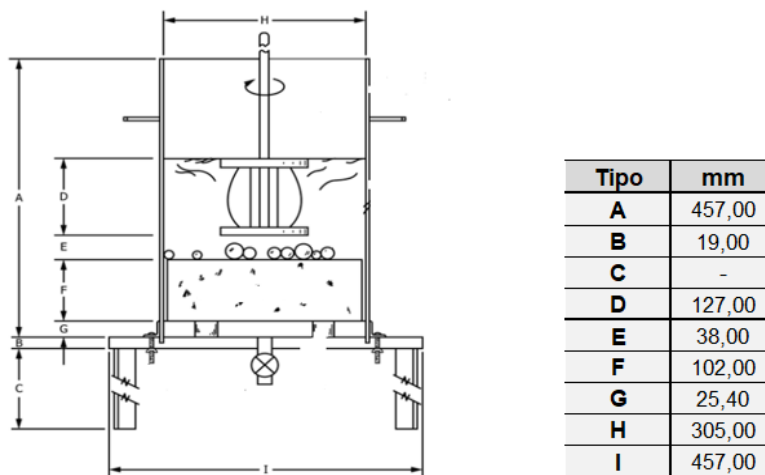
W_0 massa inicial do concreto antes do ensaio de jateamento (g)

W_1 massa final do concreto após o ensaio de jateamento (g)

2.1.3 Abrasão Hidráulica ASMT C1138

O ensaio para aferir a perda por abrasão hidráulica do concreto é padronizada e/ou regulamentada pela norma americana da ASTM C1138 (Sociedade Americana de Testes e Materiais), o ensaio é executado pelo abrasímetro hidráulico com suas respectivas dimensões onde está representado pela Figura 10, o abrasímetro é o nome atrelado ao equipamento completo, porém mais adiante será detalhado cada parte do equipamento e seus componentes fundamentais para a execução do teste de abrasão hidráulica.

Figura 10 – Abrasímetro Hidráulico.



Fonte: ASTM C1138 (2020).

A norma da ASTM C1138 abrange os métodos e procedimentos a serem adotados para medir a abrasão de baixo da água, simulando as forças abrasivas imputadas pelas partículas de silte, areia, cascalho e outros sólidos que venham a causar desgastes a superfície do concreto entre outros efeitos relacionados. Segundo a própria

norma, este método de teste pode ser usado para fornecer a resistência relativa do concreto. Sallal *et al.* (2021), em seu estudo para reduzir o tempo do ensaio, mostrou o desgaste abrasivo em concretos de resistência diferentes onde o de maior resistência sofre menor desgaste comparado ao de menor resistência. Entretanto, de acordo com a norma regulamentadora deste ensaio, o objetivo principal é auxiliar, através dos resultados obtidos, na seleção de materiais, misturas e práticas de construção para uso em estruturas submersas em água.

Os equipamentos que compõe o abrasímetro hidráulico para a realização do ensaio são:

a) Dispositivo rotativo;

Para este dispositivo pode ser usado uma furadeira, bomba ou motor o qual, quando ativo, irá girar a pá de agitação que por conseguinte vai rotacionar a água com as esferas e com isso causando os efeitos abrasivos na superfície do concreto. Este aparato deve rotacionar a uma velocidade de 1200 ± 100 rpm, a Figura 11 representa o aparelho rotativo utilizado em alguns testes.

Figura 11 – Abrasímetro Hidráulico com dispositivo rotativo acoplado e velocidade ajustável no maquinário.



Fonte: Sallal *et al.* (2021).

b) Recipiente de Ensaio;

O recipiente de ensaio é onde a amostra de concreto fica submersa, e para este componente do abrasímetro deve ser utilizado um tudo de aço com dimensões de 305 ± 6 mm de diâmetro interno por 450 ± 25 mm de altura e equipado com uma base de aço impermeável. A Figura 12 apresenta o recipiente metálico e impermeável do ensaio.

Figura 12 – Recipiente de ensaio com as bases impermeáveis.

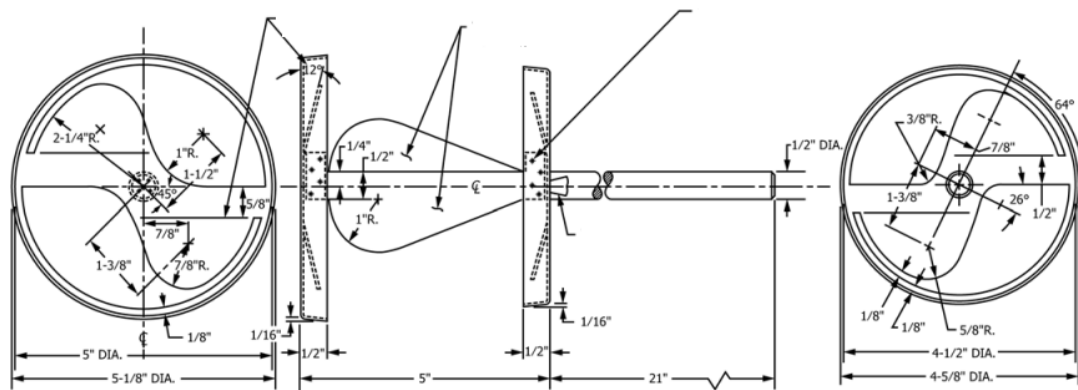


Fonte: Ramujee *et al.* (2014).

c) Palheta de Agitação;

A pá ou palheta de agitação possui dimensões padronizadas de acordo com a Figura 13 a qual foi retirada da norma, a qual detalha as dimensões da palheta que deve ser utilizada no ensaio. Há estudos que variam as características deste equipamento, porém sempre respeitando as dimensões do abrasímetro, levando em consideração a distância da extremidade final da palheta para a amostra de concreto em teste. A Figura 14 apresenta a palheta de agitação do ensaio.

Figura 13 – Detalhamento da palheta de agitação.



Fonte: ASTM C1138 (2020).

Figura 14 – Palheta de agitação.



Fonte: Rossi *et al.* (2008).

d) Esferas Abrasivas;

Serão utilizadas 70 esferas de aço com dimensões especificadas na Tabela 2. As esferas devem apresentar uma estrutura lisa e livre de rugosidades como marcas de moldes aparente. É importante ressaltar que cada esfera apresenta massa de aproximadamente 1530 a 1900 g. Quando a massa da carga abrasiva (esfera) atingir o limite inferior as mesmas devem ser substituídas por cargas dentro destes limites de massa.

Tabela 2 – Cargas abrasivas.

| Número de Bolas | Tamanho Padrão (mm) | Diâmetro Mínimo (mm) |
|-----------------|---------------------|----------------------|
| 10 | 25,40 | 25,30 |
| 35 | 19,05 | 19,00 |
| 25 | 12,70 | 12,60 |

Fonte: *ASTM C1138* (2020).

Por conseguinte, é apresentado as cargas abrasivas em um ensaio de abrasão hidráulica no estudo de Lie *et al.* (2023) onde trazem uma proposta de encurtar o tempo de ensaio proposto pela norma, através do modelo denominado de método subaquático de alta velocidade. Mais adiante será abordado com mais detalhes este modelo proposto. Na figura 15 é possível ver com mais clareza a diferença de tamanho das esferas.

Figura 15 – Cargas Abrasivas (esferas).



Fonte: Lie *et al.* (2023).

Após todos os equipamentos do abrasímetro hidráulico estarem aferidos e prontos para uso é necessário moldar a amostra de concreto de acordo com as especificações normativas para deixá-lo apto ao ensaio. De acordo com a norma ASTM C1138 o disco de concreto deve apresentar formato cilíndrico e diâmetro de 6 mm inferior ao do recipiente de ensaio, ou seja, se o tanque de ensaio estiver medindo diâmetro de 300 mm o disco deve ser moldado entre 293 mm a 295 mm, a Figura 16 mostra alguns modelos de discos para este teste abrasivo. Vale ressaltar que a menor esfera abrasiva apresenta diâmetro de 12,6 mm, estas esferas não podem percolar pelas

laterais do recipiente com o disco de concreto e saírem do ensaio, todas 70 esferas devem permanecer do início ao fim do período de teste.

Figura 16 – Disco de concreto com seixo ou agregado sintético.



Fonte: Rossi *et al.* (2012).

Após moldados os discos de concreto a serem ensaiados no abrasímetro não há uma data específica para iniciar os testes, sendo o período de 28 dias o mais comum entre os pesquisadores, esta data varia de acordo com a data que o disco será posto em serviço. A norma pede atenção a dois detalhes sendo a limpeza da superfície do disco antes de sua imersão, caso o concreto apresente compostos de cura estes devem ser removidos com uma escova de aço para preparo do material, já no segundo o concreto deve ficar submerso em água saturada com cal ou no mesmo tipo de água que será mergulhado para execução do ensaio, por um período mínimo de 48 horas antes do teste.

Para apoiar o disco de concreto na base estanque deve ser utilizado três blocos de assentos, onde apresentam dimensões de 25 por 25 por 25 mm, os discos não podem ficar em contato direto com a base pois neste caso iriam impedir a vazão da água pela válvula de vazão que é aberta ao final de cada período de teste para emergir o disco de concreto para aferição de quanto foi seu desgaste abrasivo (perda de peso).

Ao realizar todos os passos anteriores será possível iniciar o teste de abrasão hidráulica, dito isto, o disco é posto no recipiente de ensaio com a superfície a ser testada voltada para cima com os blocos de assentamento posicionados abaixo do disco. O concreto deve ser posicionado de modo que sua superfície fique normal ao eixo da palheta de agitação e o centro do disco coincida com o eixo da palheta, lembrando que a pá de agitação deve ficar a uma distância de 38 ± 5 mm acima da superfície do concreto. Feito isto é adicionado as esferas abrasivas e conseguinte a água em uma altura de 165 ± 5 mm acima do disco de concreto. Em seguida é iniciado o teste, caso

necessário deve-se repor a água do recipiente de ensaio, porém, seguindo sempre os limites normativos, e sempre que possível verificar se a palheta está rotacionando na velocidade necessária com esta imersa em água.

No final de cada ciclo de 4 horas o disco é removido do recipiente onde a superfície do concreto de ver secada, e limpa para retirada de restos de materiais. Após pesagem do disco o ensaio é reiniciado formando ciclos de 4 horas até completar um total de 24 horas. A norma indica que o período de teste de 24 horas já é suficiente para o concreto apresentar desgaste abrasivo significativo em sua superfície, contudo, caso queira simular uma abrasão mais severa o teste poderá ser continuado em ciclos de 12 horas até completar um total de 72 horas, ou caso o concreto seja altamente resistente a abrasão o ensaio poderá ser estendido para além das 72 horas.

Por fim, após cada ciclo, seja a cada 4, 6 ou 12 horas, é calculado a perda do material por abrasão, a Equação 6 traz o cálculo do volume atual da amostra de concreto ensaiada para qualquer momento do teste.

$$V_t = \frac{W_a - W_w}{G_w} \quad \text{Eq. 06}$$

Onde:

V_t volume da amostra no intervalo desejado (L)

W_a massa do disco saturado no ar (kg)

W_w massa aparente do disco (kg)

G_w Peso unitário da água (kg/L)

Em sequência na Equação 7 é calculado a perda por abrasão total sofrida pelo disco.

$$VL_t = V_i - V_{tt} \quad \text{Eq. 07}$$

Onde:

VL_t volume de material perdido (L)

V_i volume inicial do disco antes do teste (L)

V_{tt} volume final do disco ao fim do teste (L)

Para mensurar o desgaste sofrido pela superfície do disco (ADA_t), ou seja, a profundidade sofrida devido a abrasão hidráulica será utilizada a Equação 8 para tal

efeito, onde é feita a proporção entre o volume de material perdido (VL_t) e a área do topo do disco A, onde pode ser medido ao final das 72 horas de teste ou a cada intervalo de 12 horas, dependendo do estudo ou do desgaste sofrido pelo disco.

$$ADA_t = \frac{VL_t}{A} \quad \text{Eq. 08}$$

2.2 PESQUISAS SOBRE ABRASÃO HIDRÁULICA

2.2.1 Rossi *et al.* (2008)

O Autor visou analisar a taxa de deterioração de superfícies de concreto submersos, onde estão expostos à abrasão hidráulica, utilizando o agregado sintético da lama vermelha como agregado graúdo. Foi feito a proporção de 80% de lama vermelha para 20% de areia fina, além da utilização do seixo rolado como referência. A pesquisa analisou as propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido, tanto da abrasão hidráulica quanto para à compressão axial e módulo de elasticidade onde os resultados obtidos do concreto com agregado da lama vermelha foram satisfatórios quanto comparados ao de referência. Rossi padronizou toda sua pesquisa de acordo com a norma *ASTM C1138* (2020).

Para produção do agregado sintético, foram arredondadas manualmente para tornarem-se similar à do seixo com utilização de formas metálicas cúbicas, em seguida foram colocados no forno para queima a 1200°C, a Figura 17 apresenta o agregado antes e após a queima, Rossi constatou uma pequena retração dos agregados variando de 4,8 a 15%. Contudo, o diâmetro máximo atingido pelos agregados foi de 19 mm.

Figura 17 – Agregado sintético do resíduo da bauxita moldados manualmente antes e pós queima a 1200°C.



Fonte: Rossi *et al.* (2008).

A resistência para o traço de 1:1,5:3,0 em massa utilizado na pesquisa foi baseada nas recomendações de Mehta & Monteiro (1994), onde atingiram 40 MPa, o qual comenta sobre a pasta cimentícia não possuir alta resistência a ataques abrasivos onde podem ser reduzidas a vida útil do concreto devido situações de desgaste repetitivo. Neste caso, quando se trata de desgastes erosivos, abrasivos, cavitação a baixa resistência e/ou alta porosidade contribuem para este desgaste. A Figura 18 mostra os discos de concreto moldados por Rossi para o ensaio a abrasão.

Figura 18 – Discos de concreto.



Fonte: Rossi *et al.* (2008).

A metodologia utilizada segundo a ASTM C1138 (ASTM, 1997) avaliando a resistência relativa do concreto à abrasão. Para este desgaste, como já foi supramencionado nesta dissertação, são empregadas 70 bolas de aço como cargas abrasivas com diâmetros variados de 12,6 a 25,4 mm, a Figura 19 mostra o ensaio de

abrasão hidráulica feita por Rossi, antes de adicionar a água, com a disposição das esferas abrasivas sob o disco de concreto e após adição da água com o ensaio em andamento.

Figura 19 – Ensaio de abrasão hidráulica.



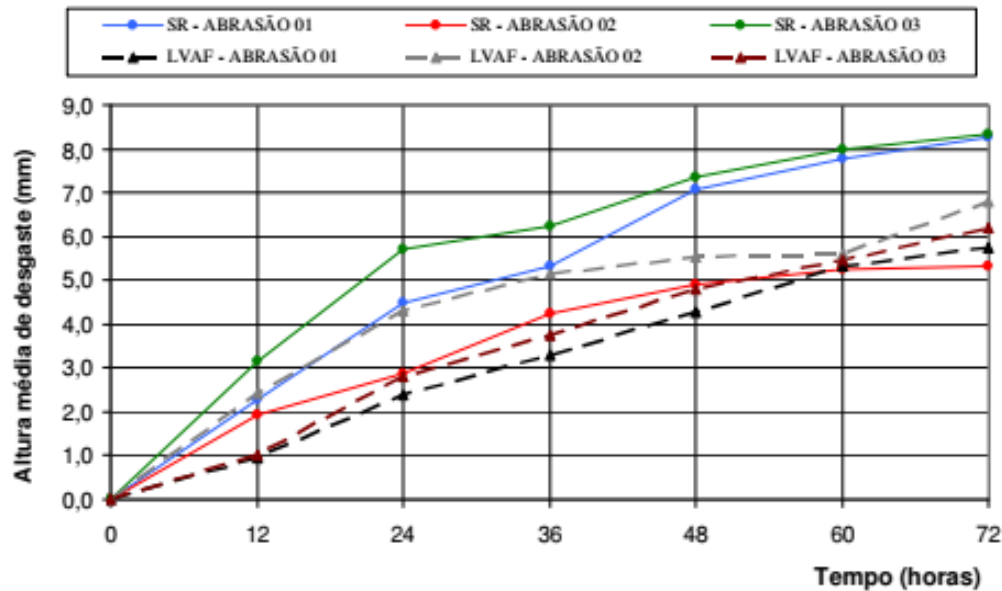
Fonte: Rossi *et al.* (2008).

As medições são feitas a cada ciclo de 12 horas e as equações são as mesmas do subtópico 2.1.3 Abrasão Hidráulica ASTM C1138, o desgaste dos discos foram medidos em relação ao volume de material perdido, contudo, também pode ser pelo peso como já foi feito em outros artigos. Rossi mediu o módulo de elasticidade das amostras da lama vermelha (LV) e do seixo rolado (SR) quando os corpos-de-prova alcançaram as idades de 28 dias baseado nas recomendações da norma NBR 8522 (ABNT, 2017). Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade do concreto dosado de LVAF (lama vermelha e areia fina) foi superior ao de referência. O módulo de elasticidade apresentado foi de 22 GPa para concreto do grupo SR e de 40 GPa para os do grupo LVAF, e a resistência a compressão variou de 24 a 27 MPa para o concreto convencional e de 38 a 42 MPa para o LVAF.

Os resultados obtidos na compressão axial obtidos de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 1994) mostraram o concreto de referência com 28 dias uma resistência de 26,0 MPa já o concreto LVAF19 atingiu uma resistência de 40,3 MPa sendo em torno de 55,0% acima ao do SR19 e para a resistência a compressão foi de 26 MPa e 40 MPa, respectivamente. Para o ensaio de abrasão hidráulica foram feitos em 3 disco de concreto de 300 mm de diâmetro por 100 mm de profundidade em cada uma das amostras, A Figura 20 mostra a evolução do desgaste pela altura média de todos os

discos ensaiados. A amostra de seixo rolado foram as que apresentaram maior desgaste médio na altura.

Figura 20 – Profundidade Abrasivada.



Fonte: Rossi *et al.* (2008).

A superfície desgastada do concreto com seixo rolado e lama vermelha ao final da sétima medição (72 horas) é mostrado na Figura 21. Rossi percebeu que a amostra LVA F desgastou menos, já a de SR começou a desgastar com 12 horas de ensaio frente a LV que só foi iniciar o desgaste superficial na terceira medição (24 horas). Após o ensaio Rossi retirou as amostras do abrasímetro e as secou em estufa a 100°C durante um período de 24 horas em seguida os pesou para verificar a massa desgastada seca.

Figura 21 – Aparência dos discos após a sétima medição.



Fonte: Rossi *et al.* (2008).

Portanto, Rossi constatou que o LVAF apresentou maior resistência em comparação ao de referência, o mesmo aconteceu com a resistência a tração em 3,5%, à compressão axial em 55,0% e o módulo de elasticidade com 89,0% foi verificado elevada resistência e baixo desgaste da LVAF onde o desgaste em massa da amostra de lama vermelha com areia fina LVAF é 92,4% do valor do de referência e que o LVAP-02 desgastaram 67,9% em relação às de seixo rolado SR-03. Nas tabelas 3 e 4, é possível observar o desgaste abrasivo em massa do concreto sem e com resíduo de bauxita, respectivamente.

Tabela 3 – Desgaste abrasivo em massa do concreto sem resíduo da bauxita.

| GRUPO | Nº do CP | Peso seco (Kg) | Peso após abrasão (Kg) | Desgaste (%) |
|-------|-------------------------|----------------|------------------------|--------------|
| SR | SR-01 | 16,241 | 14,86 | 8,5% |
| | SR-02 | 16,840 | 15,47 | 8,1% |
| | SR-03 | 16,523 | 14,72 | 10,9% |
| | Média Aritmética | | | 9,2% |
| | Desvio Padrão | | | 1,7% |
| | Coeficiente de Variação | | | 18,8% |

Fonte: Adaptado de Rossi *et al.* (2008).

Tabela 4 – Desgaste abrasivo em massa do concreto com resíduo da bauxita.

| GRUPO | Nº do CP | Peso seco (Kg) | Peso após abrasão (Kg) | Desgaste (%) |
|-------|-------------------------|----------------|------------------------|--------------|
| LVAF | LVAF-01 | 15,927 | 14,543 | 8,7% |
| | LVAF-02 | 16,194 | 14,992 | 7,4% |
| | LVAF-03 | 15,695 | 14,233 | 9,3% |
| | Média Aritmética | | | 8,5% |
| | Desvio Padrão | | | 1,1% |
| | Coeficiente de Variação | | | 12,5% |

Fonte: Adaptado de Rossi *et al.* (2008).

2.2.2 Ramujee *et al.* (2014)

Ramujee *et al.* (2014) fez o ensaio de resistência a abrasão do concreto geopolimérico para atestar suas capacidades mecânicas às cargas abrasivas. Para atestar este desempenho foram feitas 3 misturas de concreto geopolimérico que são G20, G40 e G60 e seus respectivos concretos de referência M20, M40 e M60. O concreto geopolimérico (CGP) foi produzido a base de cinza volante como aglomerante, tendo

como ativador alcalino a mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na_2SiO_3). O NaOH foi diluído em água para se obter a concentração molar necessária, já o silicato de sódio foi preparado com a proporção de Na_2O para 2SiO_2 . Foi utilizado superplastificantes a base de naftalina para melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco. Os agregados utilizados foram areia fina e para o agregado grão de granito triturado. A Tabela 5 apresenta a mistura utilizada para produção do concreto.

Tabela 5 – Mistura para produção do concreto geopolimérico e do concreto convencional.

| Materiais da Mistura | G20 | M20 |
|---|-------------|-------------|
| Cinza volante (Kg/m^3) | 327 | 327 |
| Agregado miúdo (Kg/m^3) | 672 | 672 |
| Agregado grão de granito (Kg/m^3) | 1248 | 1248 |
| NaOH (Kg/m^3) | 54,33 (8M) | - |
| (M) concentração | | - |
| Na_2SiO_3 (Kg/m^3) | 108,67 | - |
| Água extra (Kg/m^3) | 22 | 163 |
| Superplastificante (Kg/m^3) | - | 2 |
| Proporção de materiais | 1:2,05:3,81 | 1:2,05:3,81 |
| Água/cimento | 0,50 | 0,50 |
| Água/Geopolímero | 0,31 | - |
| Abatimento | 100 mm | 110 mm |

Fonte: Ramujee *et al.* (2014).

A metodologia do teste de abrasão foi de acordo com a ASTM C1138, método padrão para atestar a resistência à abrasão hidráulica, e é regido pelo comitê ASTM. Dito isto, a Tabela 6 mostra os resultados obtidos no teste, onde o comportamento do concreto geopolimérico foi semelhante ao do concreto convencional. Contudo, o M20 apresentou maior profundidade média (ADA_t) de abrasão ao final do teste.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de abrasão hidráulica.

| Tipo | Peso Inicial (Kg) | | Tempo (horas) | Peso final (Kg) | | ADA_t (mm) |
|------|-------------------|-------|---------------|-----------------|-------|--------------|
| | Ar | Água | | Ar | Água | |
| M20 | 15,754 | 9,452 | 12 | 15,650 | 8,868 | 4,5 |
| | | | 24 | 16,361 | 8,769 | 7,2 |
| G20 | 15,946 | 9,513 | 12 | 15,765 | 8,863 | 2,8 |
| | | | 24 | 15,372 | 8,583 | 4,4 |

Fonte: Ramujee *et al.* (2014).

Por fim, a resistência à abrasão determinada em intervalos de 0, 12 e 24 horas foram medidas em termos de profundidade de desgaste (ADA_t), onde foi possível

observar que a ADA_t do concreto geopolimérico e concreto comum (CC) diminuiu com o aumento da duração das cargas abrasivas, comparando o CGP com o CC ele nota diminuir 61 % para 12 horas e 64% para 24 horas. Isso mostra que a profundidade média de desgaste, nos discos de concreto, obtidos no teste foi menor no CGP do que no concreto de controle. Ramujee e colaboradores explicam essa diminuição devido ao fato de o CGP formar uma estrutura densa mais cedo do que o concreto comum. Na Figura 22 é exposto os discos de concreto pós ensaio de abrasão para melhor visualização da profundidade desgastada.

Figura 22 – Discos de concreto geopolimérico e concreto convencional respectivamente após o ensaio de abrasão hidráulica.



Fonte: Ramujee *et al.*, (2014).

2.2.3 Horszczaruk *et al.* (2017)

Neste artigo de Horszczaruk *et al.* (2017), foi apresentado os resultados do teste de abrasão hidráulica do concreto à base de cinza volante com teores de 20%, 30%, 40% e 50%. Os autores utilizaram duas metodologias, uma regida pelo teste de abrasão de Boehme, que é usado nos países da União Europeia, o outro é o método subaquático da norma americana ASTM C1138. Contudo, devido à natureza e objetivo da pesquisa principal, será focado apenas nos padrões, resultados e análises dos testes via C1138. A Tabela 7 apresentada a seguir mostra a profundidade abrasivada dos tipos de discos. Na nomenclatura das amostras o C significa concreto e o numeral ao lado representa o teor de cinza volante empregado na mistura, o concreto C0 é tido como de referência/controle.

Tabela 7 – Mistura utilizada para produção de cada amostra de concreto.

| Profundidade Desgastada (mm) | | | | | | |
|------------------------------|------------|---------|-------------|---------|--------------------|---------|
| Concreto | Disco seco | | Disco úmido | | Método Subaquático | |
| | 28 dias | 56 dias | 28 dias | 56 dias | 28 dias | 56 dias |
| C0 | 2,53 | 2,20 | 4,72 | 4,18 | 7,39 | 5,79 |
| C20 | 2,86 | 2,44 | 4,56 | 4,21 | 6,75 | 5,23 |
| C30 | 2,89 | 2,51 | 4,40 | 4,39 | 5,94 | 3,24 |
| C40 | 2,97 | 2,67 | 4,83 | 4,36 | 7,91 | 4,06 |
| C50 | 3,06 | 2,78 | 5,09 | 4,64 | 8,43 | 5,99 |

Fonte: Horszczaruk *et al.* (2017).

A maior resistência à abrasão foi observada no concreto com 30% de cinzas volantes (CV). Devido às fortes propriedades pozolânicas das cinzas volantes, a substituição de 30% do cimento Portland pela cinza permite a obtenção de concreto com maior resistência à compressão e à abrasão, bem como a trabalhabilidade, o que possibilita a condução adequada dos trabalhos de reparo debaixo d'água.

Portanto, foi constatado por Horszczaruk *et al.* (2017) que as cinzas volantes causam retardo no desenvolvimento da resistência do concreto, e por isso foi sugerido para ensaios laborais, que o concreto a base de CV seja feito a partir de 56 dias ou até 90 de moldados. Tomando como base os números obtidos, quando o concreto atuará em situações submersas não é recomendado adição de cinza com teor maior que 30%.

2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

2.3.1 Considerações Gerais

O lançamento do concreto deve seguir as recomendações normativas de preparo, posicionamento da armadura, controle dos materiais entre outras orientações de segurança e qualidade, contudo práticas de construção deficientes devido à difíceis condições de trabalho e/ou incapacidade de inspeção adequada durante a construção que acarretam erros que individualmente não oferecem grandes riscos aos elementos estruturais, mas quando somados podem gerar sinistros. O *American Concrete Institute* (ACI 546.2R, 2020) apresenta as práticas deficientes no momento da construção, sendo:

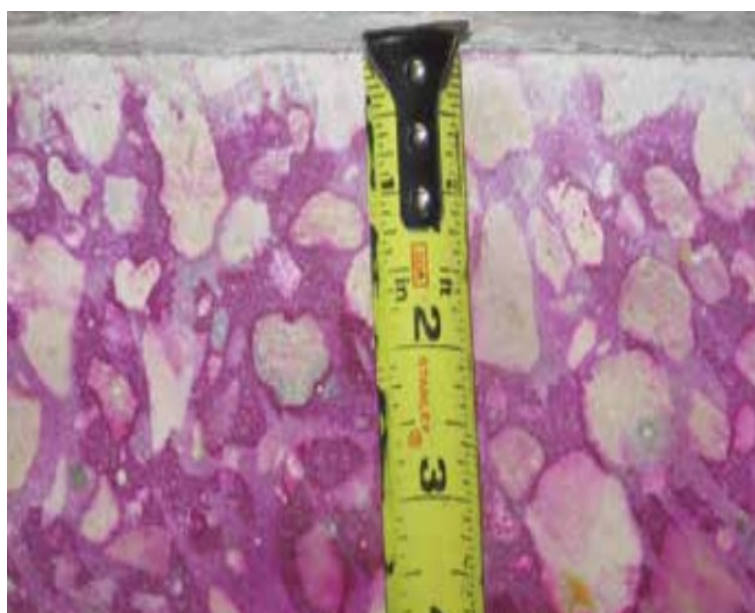
- a) Exceder a proporção água-cimento;
- b) Preparação inadequada da superfície;
- c) Alinhamento incorreto da fôrma;

- d) Colocação e consolidação inadequada de concreto;
- e) Localização inadequada do aço;
- f) Movimento da fôrma durante o lançamento do concreto;
- g) Remoção prematura de formas ou margens.

Holland *et al.* (2014) observou que o cloreto é a fonte primária de danos nas armaduras em estruturas de concreto submersas. Em seu estudo, apontou que o ataque por sulfatos danifica a estrutura através da reação do sulfato com produtos de hidratação presentes no concreto como o gesso, brucita ou etringita, neste último sendo um dos reagentes que influenciam na fissuração do concreto no momento do endurecimento, quando essa reação ocorre contribui para a fissuração, expansão, perda de resistência e rigidez do pilar que está submerso.

O ataque de sulfatos torna a estrutura suscetível a cloretos, na Figura 23, Holland *et al.* (2014) apresenta a extração de testemunho do pilar de uma ponte submersa onde o concreto está totalmente com carbonatação. Neste caso, como o concreto perde resistência e rigidez, o torna vulnerável ao movimento água-sólido acarretando a abrasão submersa da estrutura, acelerando o desgaste com a diminuição da seção transversal, o que torna urgente a necessidade de reparos.

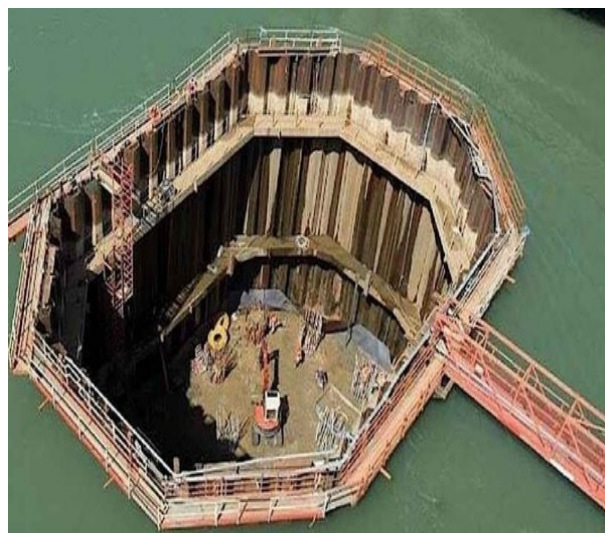
Figura 23 – Carbonatação do testemunho.



Fonte: Holland *et al.* (2014).

O *ACI 546.2R* (ACI, 2020) apresenta a orientação, seleção, aplicação e métodos para reparo e reforço de estruturas de concreto submersas. A reparação de elementos estruturais debaixo de água é considerada o mais complexo de executar, exigindo alto controle dos materiais, e gerando grande mobilização de profissionais experientes e qualificados. Um dos métodos de reparo orientado por aquela norma é cercando o elemento de reparo com sacas ou estacas de madeira para impedir o acesso da água, em seguida é retirada a água que está dentro do perímetro, a Figura 24 mostra com mais clareza esta aplicação. O método descrito é chamado de reparo a seco da estrutura de concreto submersa.

Figura 24 – Reparo, reforço ou construção de estruturas submersas.



Fonte: <https://neoipsum.com.br/principais-caracteristicas-da-concretagem-submersa/>

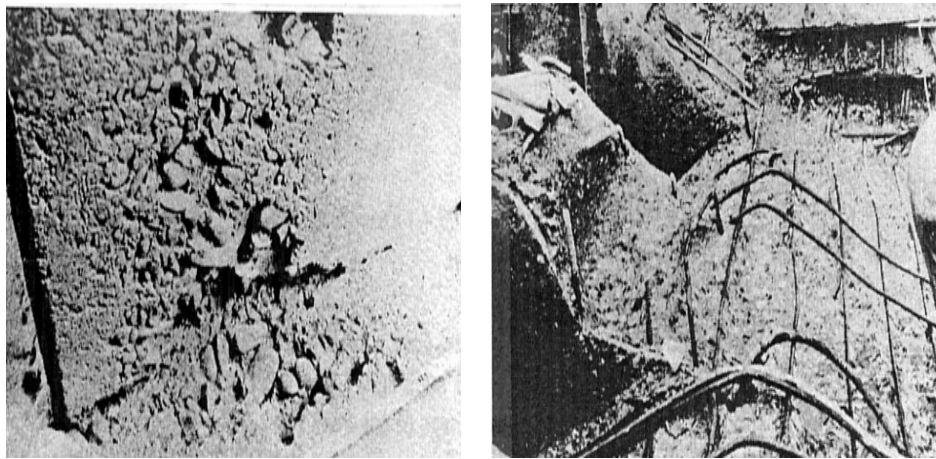
2.3.2 Erosão por Abrasão

O *ACI 210R* (1998) considera que os danos causados em uma estrutura pela erosão por abrasão são resultados dos efeitos abrasivos de materiais sólidos que são transportados pela água (areia, pedras, entre outros detritos) os quais colidem com a estrutura de concreto durante operação de uma estrutura hidráulica. Este tipo de dano a estrutura pode ser facilmente identificado na superfície do concreto a qual terá aparência desgastada, que são diferentes da erosão por cavitação, a Figura 25 apresenta estes dois tipos de desgaste.

Estruturas como aventais de vertedouros, bacias de retenção, comportas, condutos ou bueiros de drenagem e túneis são especialmente suscetíveis a erosão por

abrasão. Alexander (1983) resume a abrasão como sendo desgaste por fricção repetida, e erosão como desgaste por ação abrasiva de fluidos contendo sólidos, dito isto, a classificação de erosão por abrasão, além da presença de água, deve-se ao fato de o fluxo do rio ser constante a qual torna o atrito com a estrutura constante. Para o *ACI 210R*, (ACI, 1998), a taxa de erosão depende de diversos fatores entre estes está a velocidade da água e qualidade do concreto. Embora a resistência do concreto possa resistir ao impacto da água por anos com poucos ou quase nenhum dano a sua composição, o concreto vai perdendo suas capacidades físicas e mecânicas pela abrasão de detritos que trituram ou impactam repetidamente sua superfície.

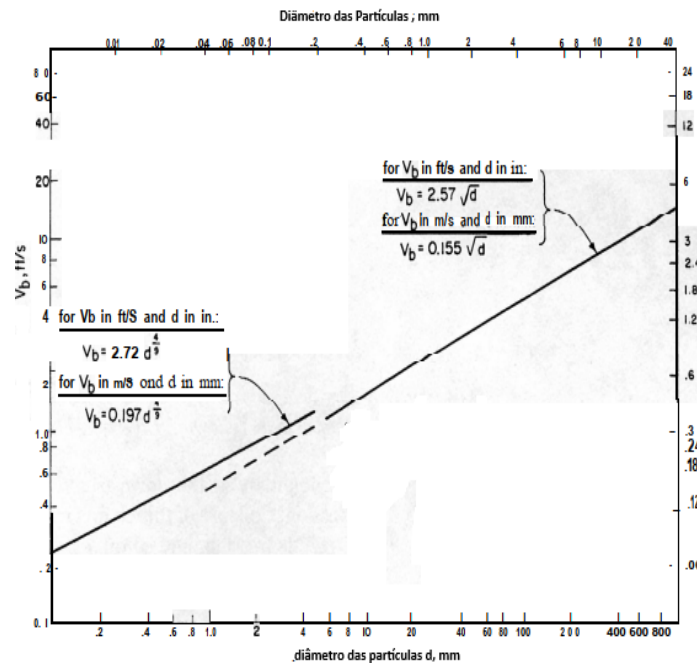
Figura 25 – Erosão por Cavitação e Erosão por Abrasão Respectivamente



Fonte: *ACI 210* (1998).

Nesses casos suscetíveis a erosão por abrasão a profundidade desgastada pode variar de poucos centímetros a alguns metros, dependendo do fluxo do rio, a Figura 26 mostra o gráfico feito pelo *American Concrete Institute* onde tem-se a comparação da velocidade do fluido e o tamanho das partículas que essa velocidade pode transportar. O cálculo da velocidade é feito pela equação $V_b = 0,155 \cdot \sqrt{d}$, onde V_b é a velocidade no fundo do fluido em metro por segundo (m/s), e d é o diâmetro das partículas em milímetro (mm).

Figura 26 – Velocidade de transporte das partículas.



Fonte: American Concrete Institute (2010).

Atualmente, todo material utilizado em estruturas hidráulicas é suscetível a abrasão sob condições de fluxo de sólidos no fluido. Para o *ACI 210R (2020)*, embora existam novos compósitos mais resistentes às cargas abrasivas devido possuírem propriedades mecânicas mais elevadas, como é o caso do concreto de alto desempenho, graute, e o próprio concreto de geopolimérico, ocorre a diminuição da taxa de abrasão na estrutura, porém, não resolve este problema de maneira definitiva. Outros materiais utilizados no revestimento de superfícies hidráulicas apresentaram alta resistência a abrasão e erosão nos testes laborais. Entre estes estão o poliuretano, argamassa de resina epóxi, argamassa de resina furânica e argamassa acrílica.

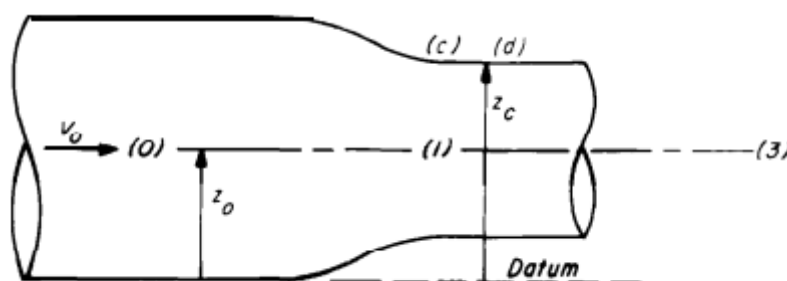
Antes da construção, reparo ou reforço da estrutura é importante a classificação do material mais adequado para aquele ambiente o qual será construído, como estamos falando de estruturas hidráulicas, o teste, como já foi supramencionado, *ASTM C1138* pode auxiliar na escolha deste material. Klieger & Greening, (1969) e o *ACI 223 (ACI, 2010)* indicam que outros fatores influenciam no rendimento da estrutura, pois quando é feita a mistura de concreto adotando compensador de retração, controle tecnológico rígido dos materiais componentes, e curado adequadamente, este concreto apresenta uma resistência a abrasão de 30 a 40% maior do que o concreto convencional.

2.3.3 Erosão por Cavitação

O *ACI 210R* (1998) define cavitação como a formação de cavidades em um líquido. Na erosão por cavitação na estrutura hidráulica as fendas (cavidades) abertas no fluido são devido à queda na pressão da água, e são preenchidas com vapor de água e ar que irá se vaporizar na temperatura do fluido. Para Alexander (1983), essa queda de pressão repentina da água é causada por altas velocidades concentradas e linhas de fluxo curvas que acarretam a erosão por cavitação, ou por um impacto direto e constante da água na superfície do concreto.

Para fluidos em vazão de sistemas onde a geometria do sistema vai diminuindo em direção a saída a pressão cai na direção das linhas de fluxo convergentes, ou seja, ocorre uma queda brusca de pressão em um local de alta velocidade concentrada formando as características de uma erosão por cavitação nessa saída de fluido. Na *ACI 210R* (1998) é apresentado um exemplo (visto na Figura 27) dessa diminuição de pressão onde um túnel se contrai ao longo de sua saída formando nuvens de cavidades iniciando no ponto c e colapsando no ponto d.

Figura 27 – Túnel de contração.



Fonte: *ACI 210R* (1998).

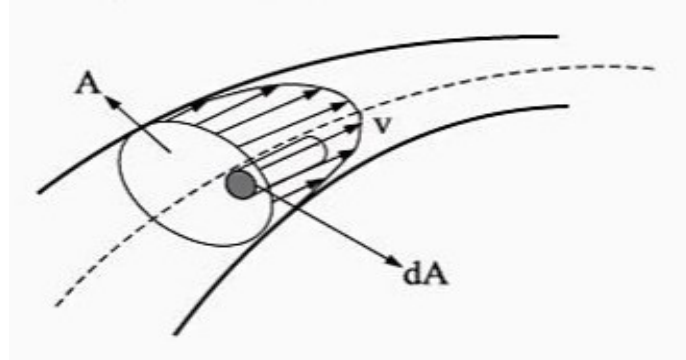
A velocidade no ponto c é maior do que a velocidade ao decorrer do túnel inteiro, a Equação 09 é utilizada para calcular a vazão (Q) de um fluido onde a área (A) e a velocidade (V) são inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor a área maior será a velocidade e com isso maior será a vazão.

$$Q = v \cdot A$$

Eq. 09

Franco Brunetti (2008) ressalta a utilização da Equação 09 apenas em casos de a velocidade manter-se uniforme por toda a seção, algo improvável, pois na maioria dos casos práticos o escoamento do fluido não é unidimensional, contudo, o autor apresenta uma alternativa através de uma expressão partindo da Equação 09 e tomando a Figura 28 como exemplo, definindo assim a velocidade média ao longo da tubulação.

Figura 28 – Escoamento de um fluido.



Fonte: Franco Brunetti (2008).

Então, na Equação 10 Brunetti (2008) adotou um dA qualquer em um ponto em que a velocidade é v , então:

$$dQ = v \cdot dA \quad \text{Eq. 10}$$

Por conseguinte, a vazão na seção de área A será:

$$Q = \int_A^0 v \cdot dA \quad \text{Eq. 11}$$

A velocidade média é então definida como sendo a velocidade uniforme ao longo de toda seção, sendo tratada como a velocidade real.

Logo:

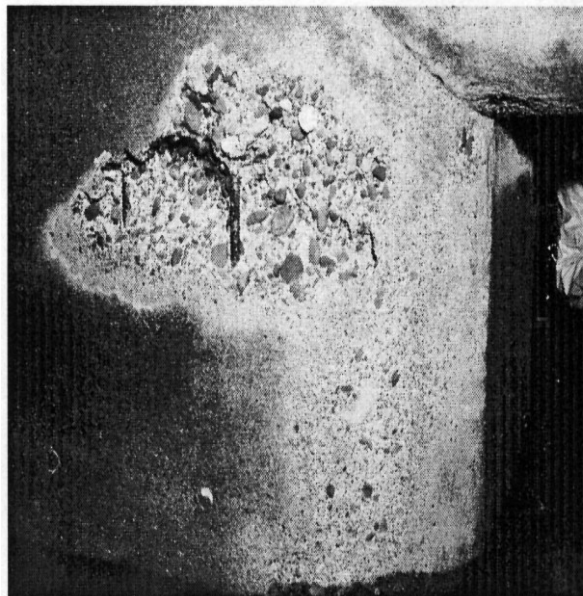
$$Q = \int_A^0 v dA = v_m * A \quad \text{Eq. 12}$$

Partindo desta mesma Equação 12 encontra-se a expressão para calcular a velocidade média na seção de escoamento pela Equação 13.

$$v_m = \frac{1}{A} \cdot \int_A v \, dA \quad \text{Eq. 13}$$

Conforme o (*ACI 210R, 1998*), o dano causado pela cavitação no momento da vazão é produzido quando as cavidades de vapor, originadas no ponto c da Figura 27, entram em colapso. Estes colapsos que ocorrem próximos ao ponto d, que produzem instantaneamente pressões muito altas as quais atiram com a superfície da estrutura e causam corrosões, ruídos e vibrações. A Figura 29 mostra o efeito da cavitação em uma estrutura.

Figura 29 – Cavitação em uma eclusa de navegação.



Fonte: *ACI 210R (1998)*.

A seguir, o cálculo será tomado como referência a Figura 28 e os cálculos da *ACI 210R (ACI, 1998)*. É possível medir o índice de cavitação de um sistema, ou seja, calcular a suscetibilidade de um sistema sofrer com a cavitação. Neste caso, a Equação 15 retrata a pressão estática do líquido em um local qualquer.

$$P_c = \gamma (Z_c - Z_0) \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

P_c pressão estática absoluta no ponto (c)

γ peso específico do fluido

Z_c elevação no ponto (c)

Z_0 elevação no ponto (O)

A queda de pressão no fluido à medida que ele se desloca do ponto (0) para o ponto (1), em que P_0 é o ponto de pressão no ponto (0), será:

$$P_0 = [P_c + \gamma \cdot (Z_c - Z_0)] \quad \text{Eq. 15}$$

Desta forma, pode-se concluir que uma boa alternativa para se evitar a erosão por cavitação na seção do sistema é projetar a estrutura com alargamento, mantendo a pressão P_0 alta e a velocidade baixa. Na *ACI 210R (1998)* é indicado outra medida a ser adotada pelo projetista para evitar a cavitação, que é utilizar materiais resistentes a danos sendo eles: aço inoxidável, concreto reforçado com fibras ou sistema de concreto polimérico. Ressalta-se que o uso de materiais mais resistente a erosão por cavitação não vai eliminar os danos, mas poderá estender a vida útil da estrutura. Sendo assim, é notório que essa alternativa se torna atraente para construção ou manutenção de obras em que o concreto fique em contato com a água.

2.4 CONCRETO CONVENCIONAL

Segundo a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) o cimento Portland pode ser definido como um pó fino com características aglomerantes na presença de umidade. Quando concreto torna-se uma pedra artificial com formas e volumes de acordo com a necessidade de cada construção. Essas características, somadas as propriedades físicas e mecânicas, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água.

Cimento Portland é o produto obtido pela pulverização de clínquer constituído essencialmente de silicato hidráulico de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, eventualmente contendo algumas adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego. O clínquer é um produto de natureza granulosa, resultante da calcinação de uma mistura daqueles materiais, conduzida até a temperatura de sua fusão (Bauer, 2000).

A sustentabilidade na construção é atualmente uma grande preocupação, dados os importantes impactos ambientais, sociais e econômicos dessa indústria, e o consumo de cimento deve ser uma das principais considerações na fabricação de materiais, com

isso, a indústria de cimento determina a redução no consumo de clínquer para minimizar os impactos ambientais das emissões de dióxido de carbono (Sousa, 2020).

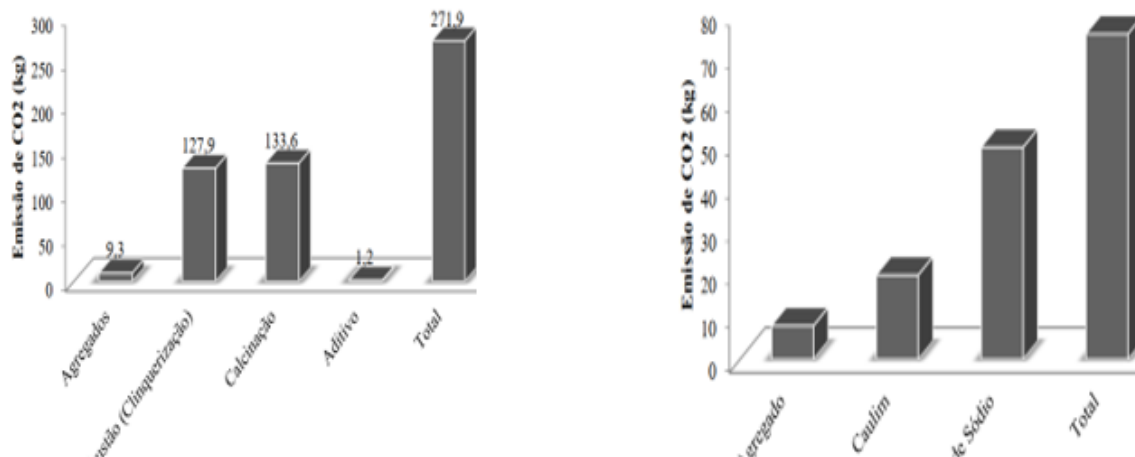
2.5 CONCRETO GEOPOLIMÉRICO

2.5.1 Considerações Gerais

Na literatura há estudos desde a década de 1940 onde pesquisadores ucranianos como Glukhovsky e Krivenko deram início a estudos que substituem parcial ou total o cimento Portland por materiais obtidos a partir da ativação alcalina de seus aluminossilicatos. Na década de 1990 o pesquisador Joseph Davidovits já havia publicado alguns estudos e seus resultados sobre a geopolimerização de diferentes tipos de materiais aluminossilicatos. Na verdade, o concreto geopolimérico é aluminossilicatos álcalis-ativados, ou seja, são materiais compostos por SiO_2 e Al_2O_3 em proporções suficientes e em forma reativa como cinzas volantes, argilas ativas, pozolana e escórias, esta ativação ocorre através de uma solução alcalina podendo ser hidróxido de sódio, hidróxido de potássio ou silicato de sódio ou potássio (Buchwald & Zellmann *et al.*, 2011).

A pesquisa de Borges *et al.* (2014) fez a comparação da emissão de dióxido de carbono (CO_2) na produção do concreto geopolimérico com o concreto convencional de cimento Portland. Foi constatado uma redução na emissão de CO_2 em 72,4% (271,9 contra 75,1 $\text{Kg}/\text{CO}_2/\text{m}^3$) frente ao concreto tradicional. A Figura 30 mostra o gráfico apresentado por Borges e colaboradores desenvolvido a partir do software Umberto o qual permitiu a análise da emissão de CO_2 em ambos os processos produtivos. Embora apresente emissão gases nocivos ao meio ambiente, no processo de produção da solução ativadora do concreto geopolimérico foi constatado que esta etapa é o maior contribuinte para emissões de CO_2 , contudo, podem ser utilizados outros materiais que permitiriam reduzir a quantidade de silicato de sódio empregada na mistura.

Figura 30 – Emissão de CO₂ na produção do concreto convencional e do concreto geopolimérico.

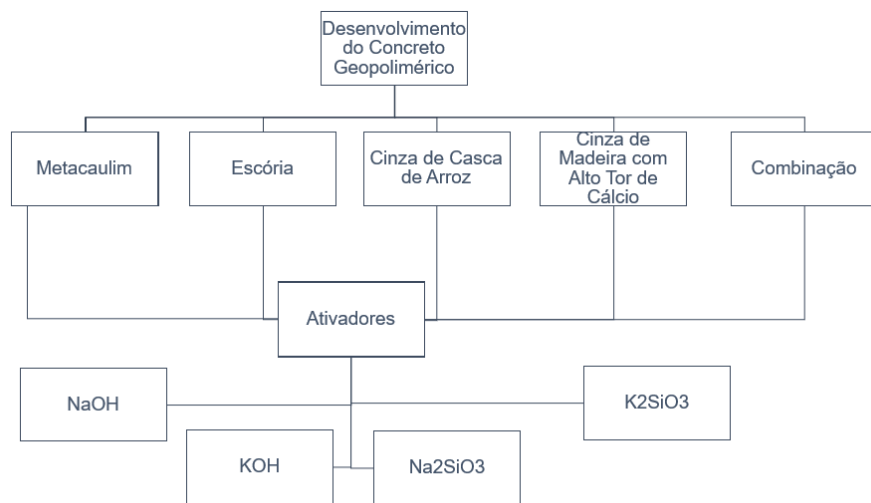


Fonte: Borges *et al.* (2014).

Seguindo essa linha, o concreto geopolimérico ganha cada vez mais espaço entre os pesquisadores e profissionais da construção, devido sua capacidade de substituir o cimento Portland e reduzir a emissão de gases do efeito estufa durante seu processo de produção. É importante lembrar que o CGP apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas e até mesmo de durabilidade superiores aos do concreto convencional.

Chau-khun Ma *et al.* (2018), apresenta o concreto geopolimérico como sendo um material inorgânico e amorfo em comparação com outros materiais zeolíticos naturais. A polimerização do geopolímero requer uma reação rápida da sílica (Si) e Alumina (Al) sob condições alcalinas que posteriormente irão desenvolver cadeias poliméricas tridimensionais de ligações Si--O--Al--O. Desta forma, diferente do concreto convencional, o geopolímero utilizada policondensação da sílica e alumina em um alto teor alcalino para atingir a resistência à compressão. O geopolímero com aglomerante metacaulim apresenta propriedades mais resistentes, contudo, demanda maior consumo de água na mistura o que resulta em graves problemas reológicos, já a mistura com cinza volante tem maior durabilidade. Para Duxson *et al.* (2006), os polímeros à base de escória de alto forno, em contrapartida, apresentam maior resistência inicial e possui maior resistência a ataques de ácidos. A Figura 31 apresenta um fluxograma das possíveis misturas para o concreto geopolimérico, para esta pesquisa serão utilizados o metacaulim como aglomerante e Na₂SiO₃ como ativador alcalino.

Figura 31 – Fluxograma do Concreto Geopolimérico.



Fonte: Adaptado de Chau-khun Ma *et al.* (2018).

2.5.2 Ativador Alcalino

A geopolimerização do concreto ocorre através do ativador alcalino em contato com o silicoaluminatos, que nesta pesquisa, ocorreu através do hidróxido de sódio e silicato de sódio. Souza (2020) retrata a mistura mais utilizada, sendo o composto de silicato de potássio e sódio, contudo pode também ser utilizado como ativador simples sendo silicato de potássio ou silicato de sódio, tendo maior destaque o ativador composto por apresentar maior eficácia. A Figura 32 mostra a solução alcalina utilizada nesta pesquisa.

Figura 32 – Ativador alcalino com silicato de sódio neutro misturado com hidróxido de sódio.



Fonte: Santos (2023).

2.5.2.1 Hidróxido de Sódio (NaOH)

O hidróxido de sódio está entre os mais utilizados se tratando de ativador na produção de geopolímeros, por apresentar dentre todos o melhor custo/benefício, melhor desempenho e ser o mais acessível e disponível no mercado para obtenção (Sousa, 2020). O emprego de NaOH como ativador na síntese de geopolímeros, de soluções de silicoaluminatos, pode ser produzido com a mistura de soda em escama com água de acordo com a molaridade e resistência (MPa) desejado.

Para Olivia *et al.* (2014). O hidróxido de sódio aumenta a concentração de Na_2O , o que corresponde a um crescimento na resistência mecânica, isso porque a razão entre o $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ é um parâmetro importante para que ocorra a reação satisfatória, a baixa do Na_2O diminui o pH e afeta a cinética da reação. No entanto, uma elevada concentração de hidróxido de sódio (Figura 33), faz com que ocorra uma reação exotérmica o que acarreta o aumento elevado da temperatura da mistura, necessitando aguardar a temperatura diminuir para dar continuidade com a mistura, até mesmo por questões de segurança, além de influenciar no consumo de água do concreto geopolimérico.

Figura 33 – Hidróxido de Sódio (NaOH)



Fonte: Santos (2023).

2.5.2.2 Silicato de Sódio (Na_2SiO_3)

É formado através da reação entre carbonato de sódio e dióxido de silício quando fundidos, sendo um sólido branco que é solúvel em água, produzindo uma solução alcalina. Conforme Sousa (2020), os ativadores a base de silicato demandam uma velocidade na reação do geopolímero, por conta de a sílica existente originar a reação com a alumina livre na solução. O silicato contribui o processo de polimerização, induzindo a um produto de reação que contenha mais Si, elevando assim a resistência mecânica.

Segundo Duxson *et al.* (2007) e Longhi (2015), baixos teores de sílica dissolvidos no silicato favorecem a formação de estruturas com alto grau de ordenação em curto tempo. Os próprios autores afirmaram que a relação Si/Na modifica de forma importante o grau de geopolimerização de materiais dissolvidos em silicato de sódio alcalino. A Figura 34 mostra o silicato de sódio neutro usado na presente pesquisa.

Figura 34 – Silicato de Sódio (Na_2SiO_3)



Fonte: Santos (2023).

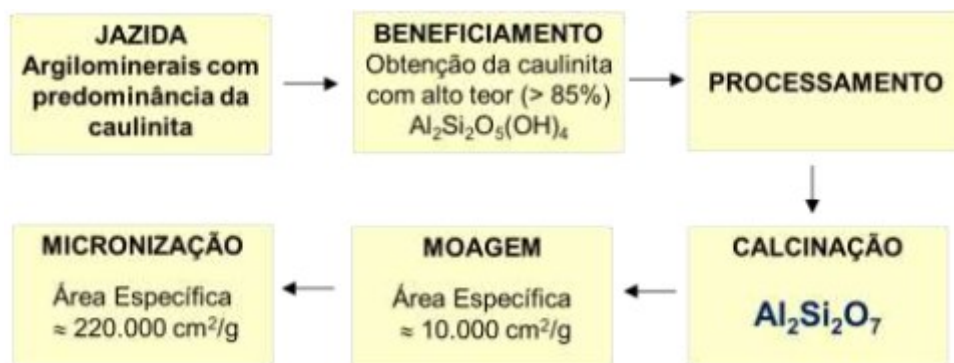
2.5.3 Metacaulim

O metacaulim pode ser classificado como uma pozolana de alta reatividade, em fase amorfa. A NBR 12653 (ABNT, 2014) define os materiais pozolânico como sendo material capaz de reagir com o hidróxido de cálcio em ambientes molhados, sendo assim formando compostos e propriedades cimentícias, é um material silicoso ou silicoaluminoso que sozinho não apresenta características ligantes ou ditas cimentícias porém quando é moído e posto na presença de água a temperatura ambiente, reagem entre si formando propriedades físicas, químicas e mecânicas de um material ligante que pode ser tido como aglomerante em uma mistura de concreto.

Rocha (2017) afirma que quando o metacaulim reage com o hidróxido de cálcio em misturas de cimentícias, formam compostos quimicamente estáveis e mecanicamente mais resistentes. É o caso desta pesquisa de dissertação, onde o aglomerante utilizado é o metacaulim, que terá suas propriedades silicoaluminoso ativada pela solução de silicato de cálcio formando o concreto geopolimérico.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) ainda apresenta a divisão dos materiais pozolânico como sendo naturais de origem vulcânica, artificiais aonde geralmente vem de tratamento térmico ou subproduto industrial, argila calcinada que vem da calcinação de determinadas argilas submetidas a altas temperaturas variando entre 500 °C e 900°C, e podem ser as cinzas volantes que são resultantes da queima do carvão de origem mineral. Conforme Souza (2017), o metacaulim pode ser considerado como um material pozolânico produzido pela calcinação de argilas caulíníticas que são submetidas as mesmas temperaturas supramencionadas. Vale ressaltar que o uso daquele material na mistura do concreto pode impactar na sua reatividade, pureza e tempo de cura, sendo assim necessitando de estudos a respeito desta adição seja total ou parcial. Na Figura 35 mostra o processo de produção do metacaulim apresentado no trabalho de Rocha (2017).

Figura 35 – Produção do metacaulim.



Fonte: Rocha (2017).

Diegles (2006) apresenta a caulinita como um argilomineral com fórmula química $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, é constituído por centenas de frações de materiais inertes a temperatura ambiente como quartzo, feldspato e mica que influenciam diretamente o nível de pureza deste mineral, ele pode ser encontrado facilmente na natureza, é uma fonte de silício e alumínio para cimentos geopoliméricos quando transformado em metacaulinita. A adição de matérias pozolânicos na mistura de concreto como o metacaulim apresentam vantagens, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), que são bastante requisitadas em um concreto que será aplicado em construções submersas com constante movimento do fluxo de água, são elas:

- Aumento da resistência à compressão e flexão em idades avançadas apenas de apresentar queda no início;
- Redução da porosidade e permeabilidade;
- Aumento da resistência a sulfatos;
- Mitigação da reação álcali-agregado.

As propriedades do concreto fresco ou endurecido à base de metacaulim, seja este concreto, argamassa ou pasta, quando comparadas às propriedades físicas, químicas e mecânicas de amostras à base de cimento Portland, o tipo, desempenho, teor adicionado à mistura, proporção dos agregados (traço), aditivos, preparo, lançamento, adensamento, condições de cura entre outros fatores devem ser levados em consideração para que esta mistura atinja seu rendimento máximo esperado e atue dentro das recomendações previstas. É importante ressaltar à atenção ao lento desenvolvimento da resistência inicial desse material à base de metacaulim/pozolana pois alguns materiais

pozolânicos apresentam quantidades suficientes de materiais carbonoso o qual afeta o concreto interferindo na eficiência do aditivo adicionado (NBR 12653, ABNT 2014).

O metacaulim também acelera o tempo de pega do cimento Portland (CP) e atua como filer e reage com o Ca(OH)_2 que é proveniente da hidratação do cimento Portland, este é um cenário onde a pasta de cimento, concreto ou argamassa substitui parte do CP em teores pré-definidos, A NBR 15894-1 (ABNT, 2010) e NM 65 (ABNT, 2002). correlacionam o tempo de início de pega ao tempo que decorre desde o momento da adição de água ao cimento até o início das reações com seus compostos, assim como o tempo final é quando a pasta de cimento deixa de deformar-se formando assim um bloco rígido.

2.5.4 Pesquisas sobre Concreto Geopolimérico

A crescente procura por construções verdes, ou seja, mais sustentáveis tem sido o Norte para as pesquisas e desenvolvimento de materiais de construção mais econômicos e modernos. Os pontos críticos que influenciam o desenvolvimento e aperfeiçoamento desse concreto são o desempenho do material sob condições de utilização diferentes e especiais, aspectos econômicos, sociais, bem como de impacto ambiental. A produção do cimento com a queima do clínquer consome muita energia e emite grandes quantidades de CO_2 em comparação ao geopolimério. Repette (2011) para cada tonelada de clínquer produzido pela indústria de cimento, produz-se igual quantidade de CO_2 . Seguindo esta linha, de acordo com o sindicato nacional da indústria do cimento (SNIC) nos últimos 08 anos foram produzidos 469 milhões de toneladas de cimento Portland, ou seja, só aí foram a mesma quantidade de dióxido de carbono para a atmosfera.

2.5.4.1 Ramujee *et al.* (2017)

A pesquisa de Ramujee *et al.* (2017) trouxe as propriedades mecânicas dos compostos de concreto geopolimérico feito a partir da substituição do cimento Portland por cinza volante, onde foi analisada as propriedades de compressão e tração do CGP em relação ao concreto convencional. Para este teste foram utilizados traços de concreto pobre, médio e rico e para cada um foram feitos três corpos de prova totalizando 09 amostras de ensaio mais a mistura de referência.

O ativador utilizado na pesquisa de Ramujee *et al.* (2017) foi o hidróxido de sódio (NaOH), é recomendado que a solução seja preparada no mínimo 24 horas antes do uso na mistura. A concentração do líquido de hidróxido de sódio é calculada de acordo com a molaridade (M), variando entre 8 e 16 M. O concreto geopolimérico apresenta um endurecimento muito rápido em comparação ao concreto convencional, dito isto, para melhorar a trabalhabilidade Ramujee adicionou superplastificantes de base policarboxílica de alto desempenho a mistura. A Tabela 8 apresenta o traço utilizado para a mistura de concreto geopolimérico e concreto convencional, onde o G represente geopolímero seguido do numeral que é o f_{ck} (resistência à compressão axial), e o M é a mistura de referência.

Tabela 8 – Mistura do CGP e CC.

| Grau do CGP/CC | G20 | G40 | G60 | M20 | M40 | M60 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Traço | 1:2.05:3.81 | 1:1.64:3.04 | 1:1.35:3.16 | 1:2.05:3.81 | 1:1.64:3.04 | 1:1.35:3.16 |
| NaOH | 54.33 (8M) | 45.06 (16M) | 40.89 (16M) | - | - | - |
| Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³) | 108.67 | 112.64 | 102.22 | - | - | - |
| a/g | 0.50 | 0.40 | 0.35 | - | - | - |
| a/c | - | - | - | 0.50 | 0.40 | 0.35 |
| SP (kg/m ³) | - | 6 | 6 | 2 | 4 | 6 |
| Slump (mm) | 100 | 50 | 50 | - | - | - |

Fonte: Adaptado de Ramujee *et al.* (2017).

Na mistura de concreto foi adotado os métodos convencionais de mistura, a cinza volante e os agregados foram os primeiros a serem misturados em um misturador com capacidade de 80 litros, mostrado na Figura 36, por exatos 3 minutos. As soluções de hidróxido de sódio e silicato de sódio foram postas no misturador. Após abatimento do concreto fresco e adição do superplastificantes, para as amostras que apresentaram essa necessidade, o concreto foi lançado no molde. Os corpos de prova foram compactados e vibrados por 10 segundos por uma mesa vibratória em cada uma das 3 camadas. Os resultados dos testes de compressão e tração no CGP apresentaram capacidades superiores em comparação a suas contrapartes, ou seja, amostras de referência, conforme apresenta a Tabela 9.

Figura 36 – Adição dos materiais no misturador



Fonte: Ramujee *et al.* (2017).

Tabela 9 – Resultado do ensaio de resistência à compressão e tração do CGP e CC.

| Nº | Traço | Resistência à Compressão (MPa) | Resistência à tração |
|----|--------|--------------------------------|----------------------|
| 1 | MH2G20 | 30,4 | 1,97 |
| | | 31,2 | 2,34 |
| | | 32,4 | 2,68 |
| 2 | MH2G40 | 50,00 | 3,02 |
| | | 49,69 | 2,98 |
| | | 52,28 | 3,45 |
| 3 | MH2G60 | 71,2 | 4,20 |
| | | 70,6 | 4,20 |
| | | 71,4 | 4,60 |
| 4 | M1M20 | 27,50 | 2,21 |
| 5 | M1M40 | 48,80 | 3,54 |
| 6 | M1M60 | 68,60 | 4,52 |

Fonte: Adaptado de Ramujee *et al.* (2017).

Com base nos dados experimentais das propriedades mecânicas do concreto geopolimérico, os autores concluíram que o CGP atinge a cura muito mais rápido sob condições de cura por calor em comparação com condições de cura à temperatura ambiente; o concreto geopolimérico e o concreto convencional apresentam quase que o mesmo comportamento mecânico à tração; o CGP apresenta características de compressão e tração aceitas pela ACI-318 para serem empregados como material de engenharia na construção civil.

2.5.4.2 Akbarnezhad *et al.* (2015)

Nesta pesquisa foram analisadas as propriedades básicas de geopolímeros com agregados reciclados (GAR) e do concreto com agregado reciclado (CAR), incluindo absorção de água, densidade e perda por abrasão de Los Angeles, bem como os efeitos do tamanho do GAR e CAR nessas propriedades. Além disso, foram investigados estes efeitos na resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade do CGP. Este artigo relata os resultados de um estudo experimental abrangente realizado para investigar a reciclabilidade do CGP à base de cinzas volantes com baixo teor de cálcio como um potencial alternativo sustentável ao concreto de cimento Portland. Incluindo as propriedades básicas do GAR e CAR, como absorção de água em 24 horas, densidade aparente e abrasão de Los Angeles.

Para comparar o potencial de reciclabilidade do concreto geopolimérico com o do CC, as propriedades do agregado de geopolímero reciclado foram comparadas com as propriedades mecânicas correspondentes do concreto convencional. Para garantir uma comparação justa os autores fizeram o controle dos materiais empregados na mistura como: classes de resistência do concreto de origem, os mesmos agregados naturais e procedimentos de britagem foram aplicados para produzir o concreto geopolimérico com agregado reciclado e o concreto com agregado reciclado.

O concreto geopolimérico foi moldado de acordo com a proporção de mistura apresentada na Tabela 10. Akbarnezhad empregou agregados graúdos naturais de basalto com tamanho máximo de 13 mm e areia natural. A classificação de agregados graúdos com base nos resultados da análise de peneira também é apresentada por Akbarnezhad no artigo. A densidade aparente dos agregados graúdo e miúdo na condição de estufa seca foram 2.580 kg/m e 2.605 kg/m, respectivamente. Além disso, as respectivas capacidades de absorção de água em 24 horas do agregado graúdo e miúdo foram de respectivamente 1,82% e 1,52%.

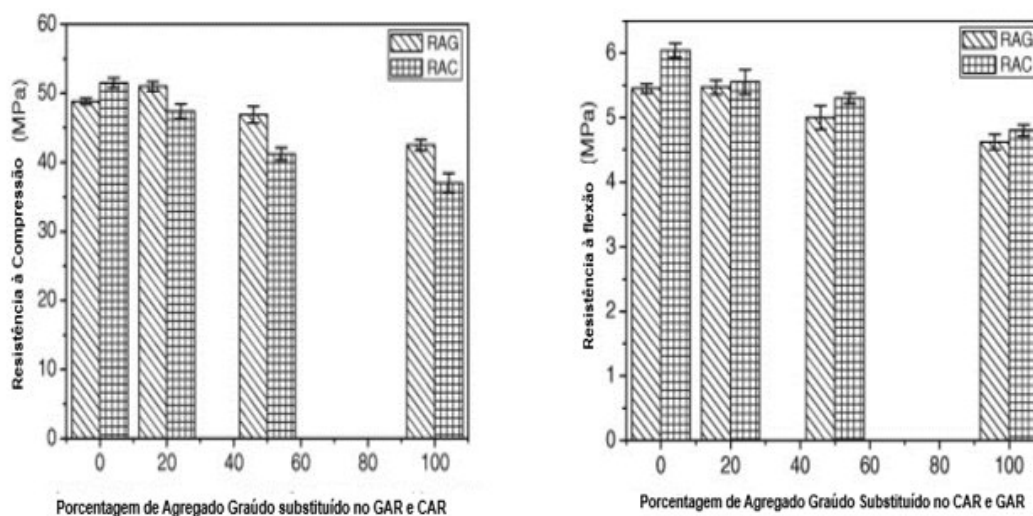
Tabela 10 – Dosagem do CGP utilizada.

| Material | kg/m ³ |
|--|-------------------|
| Kaolite HPA | 51,9 |
| GGBFS | 42,5 |
| NaOH | 45,2 |
| Na ₂ SiO ₃ | 112,9 |
| Água | 59 |
| Agregado graúdo/miúdo | 1,56 |
| Aglutinante | 292,2 |
| Água/Ligante | 0,35 |
| Ativador | 0,55 |
| Na ₂ SiO ₃ /NaOH | 2,5 |
| Molaridade do NaOH | 12 M |

Fonte: Adaptado de Akbarnezhad *et al.* (2015).

O ativador alcalino foi feito a partir de uma mistura de solução de hidróxido de sódio (NaOH) 12 M (Molaridade) e solução de silicato de sódio com Na₂O = %, SiO₂ = 29,4% e H₂O = 55,9% em massa. Foi utilizada uma razão de massa constante de solução de silicato de sódio para solução de hidróxido de sódio de 2,5 e a razão de massa de solução alcalina para o material de aluminossilicato foi de 0,55. Todos os corpos de prova depois de moldados foram colocados em um ambiente com temperatura controlada a 40°C por 24 horas. Passado esse tempo os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em um tanque com temperatura controlada de 80°C por mais 24 horas. Além disso, foi feito um grupo de CC com uma resistência à compressão relativamente semelhante ao concreto geopolimérico. A resistência à compressão do cilindro aos 28 dias do concreto geopolimérico e do concreto convencional foi de 48,8 MPa e 51,5 MPa respectivamente. A Figura 37 apresenta o gráfico dessa comparação.

Figura 37 – Resistência à compressão em comparação a porcentagem de agregado graúdo substituído.



Fonte: Akbarnezhad *et al.* (2015).

Por fim, a absorção de água das amostras de concreto em 24 horas e a densidade aparente em estufa de agregados geopolimérico reciclados foram respectivamente menores e maiores do que os do concreto de agregado reciclado (CAR). A substituição completa de agregados naturais graúdos por agregados de concreto geopolimérico reciclado resultou em apenas 12,9%, 10,7% e 15,2% de redução na resistência à compressão, módulo de elasticidade e módulo de ruptura do concreto geopolimérico de agregado reciclado, respectivamente. Isso é consideravelmente inferior às respectivas reduções de 28,1%, 21,1% e 20,5% na resistência à compressão, módulo de elasticidade e módulo de ruptura do concreto de agregado reciclado. Embora esses resultados promissores destaquem o concreto geopolimérico como um material de construção potencialmente reciclável os autores apontam à necessidade de mais estudos para investigar os processos de reciclagem ideais, as implicações econômicas e ambientais da reciclagem e os efeitos das propriedades do concreto original e dos parâmetros de produção na qualidade do concreto geopolimérico com agregado reciclado e concreto de agregado reciclado.

2.5.4.3 Azevedo (2023)

A pesquisa desenvolvida por Azevedo (2023) em síntese apresenta o funcionamento de lajes lisas na relação *laje x pilar*. A Tabela 11 apresenta o total de 8 lajes que foram feitas, onde duas são de concreto convencional e brita zero, denominada

SC e outra também de concreto convencional, porém com adição de 1,0% de fibra de aço do tipo *hooked*, denominada de SCF. Também foram concretadas outras duas lajes com as mesmas características das primeiras, porém, invés de brita foi utilizado agregado sintético do resíduo da bauxita denominados de SCRM e SCRMF. Foram feitas 2 lajes de concreto geopolimérico, seguindo as mesmas características das anteriores, contudo, invés de cimento Portland foi utilizado metacaulim, denominados de SG e SGF. As duas últimas lajes de concreto geopolimérico foram feitas com a substituição do agregado natural (brita) pelo agregado sintético do resíduo da bauxita.

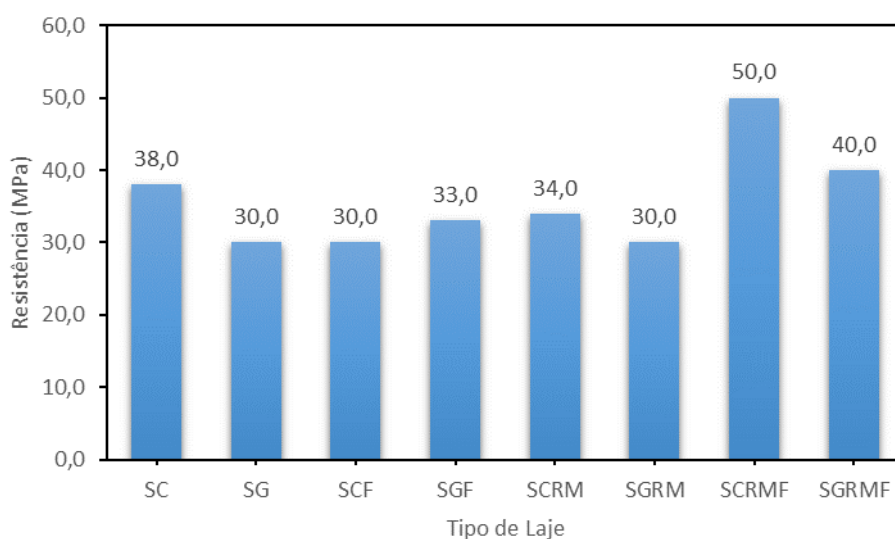
Tabela 11 – Resistência do concreto geopolimérico com e sem fibra de aço.

| Grupo | Laje | f_c (MPa) | V_f (%) |
|-------|-------|----------------|--------------|
| 1 | SC | 38,0 | - |
| | SCF | 30,0 | 1,0 |
| 2 | SCRM | 34,0 | - |
| | SCRMF | 50,0 | 1,0 |
| 3 | SG | 30,0 | - |
| | SGF | 33,0 | 1,0 |
| 4 | SGRM | 30,0 | - |
| | SGRMF | 40,0 | 1,0 |

Fonte: Adaptado de Azevedo (2023).

Neste caso, a autora manteve a resistência do concreto geopolimérico abaixo ou igual ao do concreto com cimento Portland para deixar as lajes produzidas o mais semelhante possível, e assim analisar o comportamento das lajes com maior precisão quando for comparar os resultados entre os grupos. A Figura 38 mostra a comparação entre as resistências do concreto com cimento Portland e o concreto geopolimérico.

Figura 38 – Comparação entre o concreto geopolimérico e concreto convencional com e sem fibra de aço.



Fonte: Adaptado de Azevedo (2023).

O concreto geopolimérico com o mnemônico SGF apresentou resistência semelhantes às que estão sendo utilizadas nesta pesquisa que é 20, 30 e 40 MPa. Fazendo um breve comentário deste concreto geopolimérico desenvolvido por Azevedo (2023) e o concreto geopolimérico GC30SF1.0GG feito para esta pesquisa de abrasão hidráulica onde foi utilizado o mesmo traço unitário de 1:2:2,5, as mesmas instalações do laboratório de estruturas (LABEST) e os tipos de materiais, tanto a fibra do tipo *hooked* com teor de 1,0%, quanto o ativador alcalino, e agregado graúdo natural com diâmetro máximo de 9,5 mm onde para fins comerciais é tido como brita zero.

Para atingir a resistência de 33 MPa a autora precisou reduzir a molaridade do traço original, de 16 para 12 mols, fixou o teor de água em 10% do aglomerante que neste caso do geopolímero é o metacaulim, e apresentou um abatimento do concreto em 180 mm. A Figuras 39 ilustra o comparativo do abatimento do concreto geopolimérico com adição de 1,0% de fibra de aço desenvolvido por Azevedo (2023) e o desenvolvido para esta pesquisa. Mais à frente será feita a análise do concreto geopolimérico utilizado para este estudo e aqueles utilizados em outras pesquisas.

Figura 39 – Ensaio de abatimento do tronco de cone do concreto convencional e geopolimérico respectivamente.



Fonte: Azevedo (2023).

2.6 FIBRAS DE AÇO (*Hooked*)

Segundo Satorti *et al.*, (2020) O concreto é um material compósito, formado pela mistura de materiais como cimento, areia ou brita, onde destaca-se pelas suas características resistente à compressão e fluidez. Contudo, apresenta características negativas como sua fragilidade e baixa resistência a tração. Desta forma, para melhorar a ductilidade da matriz do concreto, pode-se acrescentar alguns materiais fibrosos a dosagem que venham a resistir as cargas de tração e mitigar as desvantagens de sua utilização.

A ideia fundamental na produção de um compósito é a combinação de materiais que apresente propriedades mecânicas, físicas e químicas superiores às encontradas comumente nestes materiais individualmente. O concreto, compensado e as fibras são exemplos de materiais compósitos (Askeland & Wright, 2015). Segundo a NBR 15530 (ABNT, 2019) as fibras de aço são filamentos descontínuos sintetizados com finalidade específica de serem aplicados no concreto.

Para Carvalho & Filho (2021) o concreto com fibras é obtido com a adição de fibras metálicas, vidro ou poliméricas durante o processo de dosagem e controle tecnológico do concreto, permitindo que depois de enrijecido o concreto esteja ligado

pelas fibras através das pontes de tensões que atravessam as fibras quando solicitadas por alguma carga, em todas as direções. As fibras podem ser usadas em elementos que não venham a sofrer grandes esforços, podendo citar os pisos de concreto sobre o solo; algumas das vantagens do concreto reforçado com fibras (CRF) é o combate a fissuração, diminuição ou substituição da taxa de armadura longitudinal ou transversal que compõem o concreto (matriz).

No que tange aos materiais constituintes das fibras, podem ser utilizados vários tipos de materiais no traço do concreto para formação do compósito, a Figura 40 mostra as fibras naturais, minerais e sintéticas. Na literatura há diversos trabalhos que procuram estudar a utilização ou comportamento destes compósitos acrescidos das fibras (Maués, 2019).

Figura 40 – Tipos de fibras.



Fonte: <https://www.cimentoitambe.com.br/fibras-para-concreto/>

As fibras de aço podem variar de tamanho e forma podendo ser lisas, dentadas ou com ancoragem variando suas dimensões em 25 mm, chamadas de fibras curtas, a 60mm, chamadas de fibras longas. As fibras de aço podem ser encontradas soltas ou juntas em formato de pente, recomenda-se que as fibras sejam acrescidas a mistura do concreto no formato de pente para evitar a formação de ouriços pois assim o processo de mistura é facilitado assim como a homogeneização do compósito (Figueiredo, 2011). Ouriço é como se chama a aglomeração das fibras caso não seja seguido os cuidados

especificados nas normatizações podendo ser estas nacionais ou internacionais (Maués, 2019). A Figura 41 ilustra a formação de ouriços no concreto.

Figura 41 – Formação de ouriço na fibra de aço.



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

Bastos (1999), Figueiredo (2011) e Maués (2019) convergem no potencial dos materiais reforçados com fibras de aço, no estágio durante e pós-fissuração, onde as fibras contribuem de forma mais efetiva para a resistência do concreto. Neste momento a capacidade de tenacidade da fibra é solicitada. Isso ocorre porque as fibras resistem as deformações de fissuração que causam a ruptura do concreto. Com o aumento da carga solicitada sob a estrutura ocorre a ruptura por aderência entre a fibra e a matriz.

De acordo Askeland & Wright (2015) a quantidade de fibras que devem ser adicionadas ao concreto no momento da dosagem depende do tipo de fibra que será utilizada e do desempenho desejado. Contudo, há limitações para adição de fibras ao volume de concreto, as quais estas devem ser limitadas a 1,5% em volume.

A adição de fibras ao concreto em dosagens baixas a moderadas (1,5% volume) não afeta muito a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Melhorias no comportamento pós-pico, no entanto, foram observadas, caracterizadas por uma maior capacidade de deformação de compressão e tenacidade (Wight, 2011).

Figueiredo (2000) ressalta a viabilidade econômica que o CRFA pode trazer, porém, para que esta viabilidade seja possível é necessário romper com otimizações/normatizações que pré-definem o consumo das fibras, ou seja, valores mínimos pré-estabelecidos para garantir as exigências de qualidade e desempenho, vale ressaltar que o CRFA pode tornar-se econômico não apenas com o custo unitário, mas também com a economia global que o concreto possa proporcionar para os elementos estruturais. A metodologia a ser utilizada na dosagem do CRFA deve levar

em conta o tipo de fibra utilizada, as propriedades do concreto utilizado, o qual deve atender os requisitos mínimos de trabalhabilidade, resistência à compressão, tração e flexão.

Na tração, a resistência da fibra de aço, tenacidade e aderência da fibra a matriz de concreto influenciam diretamente no comportamento pós-fissuração do concreto. Em contrapartida das barras de aço utilizadas as quais são dimensionadas para serem ancoradas ao concreto para serem escoadas quando o elemento estiver sobre carga, já os elementos de CRFA são dimensionados e detalhados para que as fibras sejam arrancadas da matriz de concreto antes de atingir sua resistência. Desta forma, a qualidade do CRFA de atingir as características desejadas dependem diretamente de a capacidade das fibras manterem uma boa aderência com a matriz de concreto durante os ensaios a medidas que são arrancadas (Askeland & Wright, 2015).

2.7 FIBRAS DE POLIPIPILENO

As fibras da Figura 42 são de polipropileno que podem ser divididas em microfibras e macrofibras sintéticas, com diferença no comprimento e da função que se deseja melhorar no concreto. A influência da fibra de polipropileno no concreto se dá nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, como trabalhabilidade; módulo de elasticidade; resistência à compressão; flexão e tração; tenacidade; impacto; lascamento; resistência à abrasão; absorção de água; porosidade; permeabilidade e propriedades ecológicas e econômicas na produção do concreto (Blazy, J. & Blazy, R, 2021).

Figura 42 – Microfibras e macrofibras sintéticas de polipropileno.



Fonte: Júlia Blazy & Rafael Brazy (2021).

O concreto é um material com alta resistência à compressão, porém apresenta entre oito a 11 vezes menor à tração. Além disso, é caracterizado por um comportamento frágil e não apresenta transferência de tensões após a fissuração. Para evitar o comportamento frágil durante o carregamento e melhorar as propriedades mecânicas, é possível adicionar fibras à mistura de concreto. Com isso é formado o concreto reforçado com fibras (CRF), que é um material composto cimentício com reforço disperso em forma de fibras de aço, naturais ou sintéticas que é o caso da fibra de polipropileno. (Blazy, J. & Blazy, R, 2021)

O concreto reforçado com fibra de polipropileno (CRFPP) geralmente apresenta características mecânicas melhoradas em capacidade de deformação, tenacidade e controle de fissuras (Cifuentes *et al.*, 2013). O comportamento da estrutura ao cisalhamento é significativamente melhorado pela adição da macrofibra sintética de polipropileno, aumentando a carga final e melhorando a ductilidade (Navas *et al.*, 2018).

Navas *et al.*, (2018) apresenta o ensaio de quatro vigas de concreto armado com e sem estribo ou fibra de polipropileno. a disposição das vigas de Navas (2018) estão divididas em A1 apenas armaduras longitudinais e estribos; 0A1 armaduras longitudinais; AP1 armaduras longitudinais, estribos e fibras de polipropileno; 0AP1 concreto com armaduras longitudinais e fibra de polipropileno. Os resultados obtidos constataram que o CRFPP na presença de armadura transversal apresentou maior resistência e tenacidade em comparação ao concreto com armaduras longitudinais, transversais e sem fibras.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Esta seção descreve as particularidades do programa experimental realizado no Laboratório da Pós-Graduação de Engenharia Civil (LABEST) da Universidade Federal do Pará (UFPA) com o objetivo de desenvolver o ensaio de abrasão hidráulica segundo a norma ASTM C1138 do concreto geopolimérico a base de metacaulim e a aplicabilidade da fibra de aço e fibra de polipropileno. Serão apresentados aqui as características dos discos de concreto convencional e geopolimérico utilizados no ensaio de abrasão, o sistema de ensaio utilizado e as propriedades mecânicas dos materiais que compuseram o ensaio.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS DISCOS

Um total de 24 (vinte e quatro) discos de concreto foram produzidos, variando materiais como a presença e tipo de fibras, aglomerante, e depois submetidos ao teste de abrasão hidráulica. Nove discos de concreto geopolimérico com adição de fibra de aço do tipo *hooked* foram produzidos, este traço com adição da fibra pode ser identificado pela abreviação SF de *steel fiber* (fibras de aço), o teor de fibra foi de 0,5; 1,0 e 1,5%.

Nove discos de concreto geopolimérico com adição da macrofibra sintética de polipropileno, com abreviação PP de *Polypropylene*, com teor de 0,5; 1,0 e 1,5%. Três discos de concreto geopolimérico e três de concreto convencional, ambas as famílias sem adição de fibras. A Tabela 12 apresenta as nomenclaturas adotadas para cada família.

A escolha da fibra de aço tipo *hooked* se deu devidos aos estudos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa GAEMA/UFPA, onde este tipo de fibra é o mais utilizado devidos apresentar os melhores desempenhos de aderência ao concreto e no aumento da tenacidade. A literatura vem retratando alguns estudos com a fibra de polipropileno para evitar fissuras de retração e em proteger a superfície do concreto à fricção de materiais sólidos e líquidos podendo até substituir a malha de ferro, evitando assim a perda de seção, dito isto, a aplicação desta fibra de polipropileno foi para verificar se esta

também resiste aos esforços de abrasão hidráulica segundo as diretrizes da norma ASTM C1138.

Os teores de fibra foram fixados de forma a manterem uma proporção que pudesse relacionar a taxa de abrasão com o volume de fibra, ou seja, multiplicando ou triplicando o teor de fibra, a taxa de abração apresentará um desgaste que pode ser correlacionado entre si, desta forma é possível apresentar o rendimento das fibras de acordo com o teor. Este mesmo princípio se aplica a classe de resistência.

Tabela 12 – Nomenclatura dos discos de concreto.

| Sigla | Disco de Concreto | Material |
|--------------|--|---|
| NC20 | <i>Normal Concrete with 20 MPa</i> | Concreto Convencional de 20 MPa |
| NC30 | <i>Normal Concrete with 30 MPa</i> | Concreto Convencional de 30 MPa |
| NC40 | <i>Normal Concrete with 40 MPa</i> | Concreto Convencional de 40 MPa |
| GC20 | <i>Geopolymer Concrete with 20 MPa</i> | Concreto Geopolimérico de 20 MPa |
| GC30 | <i>Geopolymer Concrete with 30 MPa</i> | Concreto Geopolimérico de 30 MPa |
| GC40 | <i>Geopolymer Concrete with 40 MPa</i> | Concreto Geopolimérico de 40 MPa |
| GC20SF0.5 | <i>Geopolymer Concrete with 20 MPa and 0,5% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 20 MPa e 0,5% de Fibra de Aço |
| GC20SF1.0 | <i>Geopolymer Concrete with 20 MPa and 1,0% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 20 MPa e 1,0% de Fibra de Aço |
| GC20SF1.5 | <i>Geopolymer Concrete with 20 MPa and 1,5% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 20 MPa e 1,5% de Fibra de Aço |
| GC30SF0.5 | <i>Geopolymer Concrete with 30 MPa and 0,5% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 30 MPa e 0,5% de Fibra de Aço |
| GC30SF1.0 | <i>Geopolymer Concrete with 30 MPa and 1,0% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 30 MPa e 1,0% de Fibra de Aço |
| GC30SF1.5 | <i>Geopolymer Concrete with 30 MPa and 1,5% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 30 MPa e 1,5% de Fibra de Aço |
| GC40SF0.5 | <i>Geopolymer Concrete with 40 MPa and 0,5% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 40 MPa e 0,5% de Fibra de Aço |
| GC40SF1.0 | <i>Geopolymer Concrete with 40 MPa and 1,0% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 40 MPa e 1,0% de Fibra de Aço |
| GC40SF1.5 | <i>Geopolymer Concrete with 40 MPa and 1,5% of Steel Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 40 MPa e 1,5% de Fibra de Aço |
| GC20PP0.5 | <i>Geopolymer Concrete with 20 MPa and 0,5% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 20 MPa e 0,5% de Fibra de Polipropileno |

Tabela 13 – Nomenclatura dos discos de concreto (continuação).

| Sigla | Disco de Concreto | Material |
|-----------|--|--|
| GC20PP1.0 | <i>Geopolymer Concrete with 20 MPa and 1,0% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 20 MPa e 1,0% de Fibras de Polipropileno |
| GC20PP1.5 | <i>Geopolymer Concrete with 20 MPa and 1,5% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 20 MPa e 1,5% de Fibras de Polipropileno |
| GC30PP0.5 | <i>Geopolymer Concrete with 30 MPa and 0,5% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 30 MPa e 0,5% de Fibras de Polipropileno |
| GC30PP1.0 | <i>Geopolymer Concrete with 30 MPa and 1,0% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 30 MPa e 1,0% de Fibras de Polipropileno |
| GC30PP1.5 | <i>Geopolymer Concrete with 30 MPa and 1,5% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 30 MPa e 1,5% de Fibras de Polipropileno |
| GC40PP0.5 | <i>Geopolymer Concrete with 40 MPa and 0,5% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 40 MPa e 0,5% de Fibras de Polipropileno |
| GC40PP1.0 | <i>Geopolymer Concrete with 40 MPa and 1,0% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 40 MPa e 1,0% de Fibras de Polipropileno |
| GC40PP1.5 | <i>Geopolymer Concrete with 40 MPa and 1,5% of Polypropylene Fiber</i> | Concreto Geopolimérico de 40 MPa e 1,5% de Fibras de Polipropileno |

Fonte: Autor (2024).

Todos os discos tiveram diâmetro e profundidade média de 280 mm e 100 mm, respectivamente (Figura 43), havendo pouca variação devido ao processo de lançamento e cura do concreto. A resistência mecânica à compressão tanto do concreto geopolimérico quanto o convencional foram de 20, 30 e 40 MPa.

Figura 43 – Características dos discos de concreto.



Fonte: Autor (2024).

Os discos foram testados com quatro pontos de paradas, um ponto leva 6 horas, totalizando 24 horas de ensaio. Após 6 horas de teste, o disco é retirado da máquina e

colocado para secar, no dia seguinte, quando seco, o disco é pesado para medir o quanto foi abrasivado em massa. Como a norma especifica que 24 horas de ensaio é suficiente para o concreto apresentar desgastes significativos então foi adotado esta indicação da *nota 2* presente nas recomendações normativas. A Tabela 13 apresenta as características dos discos como diâmetro (d), profundidade (h), resistência à compressão média (f_{cm}), volume de fibra (V_f).

Tabela 14 – Características dos discos de concreto.

| Grupo | Nome | Ø (mm) | h (mm) | f_{cm} (MPa) | V_f (%) |
|-------|-----------|-----------|-----------|-------------------|--------------|
| 1 | NC20 | 280 | 100 | 18,1 | - |
| | NC30 | 280 | 100 | 28,6 | - |
| | NC40 | 280 | 100 | 37,2 | - |
| 2 | GC20 | 280 | 100 | 24,7 | - |
| | GC30 | 280 | 98 | 27,7 | - |
| | GC40 | 280 | 102 | 42,9 | - |
| 3 | GC20SF0.5 | 280 | 100 | 19,2 | 0,5 |
| | GC20SF1.0 | 280 | 100 | 22,9 | 1,0 |
| | GC20SF1.5 | 280 | 100 | 22,7 | 1,5 |
| 4 | GC30SF0.5 | 283 | 100 | 35,1 | 0,5 |
| | GC30SF1.0 | 280 | 100 | 32,4 | 1,0 |
| | GC30SF1.5 | 280 | 102 | 33,8 | 1,5 |
| 5 | GC40SF0.5 | 280 | 102 | 42,8 | 0,5 |
| | GC40SF1.0 | 280 | 100 | 39,5 | 1,0 |
| | GC40SF1.5 | 285 | 100 | 46,0 | 1,5 |
| 6 | GC20PP0.5 | 283 | 100 | 18,7 | 0,5 |
| | GC20PP1.0 | 282 | 100 | 17,1 | 1,0 |
| | GC20PP1.5 | 280 | 100 | 21,2 | 1,5 |

Tabela 15 – Características dos discos de concreto (continuação).

| | | | | | |
|---|-----------|-----|-----|------|-----|
| 7 | GC30PP0.5 | 280 | 100 | 35,7 | 0,5 |
| | GC30PP1.0 | 280 | 100 | 33,0 | 1,0 |
| | GC30PP1.5 | 280 | 100 | 31,3 | 1,5 |
| 8 | GC40PP0.5 | 280 | 100 | 38,5 | 0,5 |
| | GC40PP1.0 | 280 | 100 | 37,9 | 1,0 |
| | GC40PP1.5 | 280 | 100 | 42,6 | 1,5 |

Fonte: Autor (2024).

3.3 SISTEMA DE ENSAIO

O sistema de ensaio simula o fluxo de água-sólido impactando na superfície do concreto causando o efeito abrasivo. Foi também utilizada uma hélice metálica e motor elétrico para que juntos simulem a correnteza, e as esferas de aço são os sólidos que atiram com a estrutura. A Figura 44 é o abrasímetro hidráulico utilizado, o equipamento atende as especificações da norma ASTM C1138. A máquina quando completa pode ser dividida em três partes, onde a primeira é o tanque metálico com características cilíndrica e vazado com 500 mm e 350 mm de altura e diâmetro respectivamente. A Figura 45 é a base de atracação que tem 1640 mm de altura, é a segunda parte do conjunto, essa base serve de suporte para o tanque metálico.

Figura 44 – Abrasímetro Hidráulico.



Fonte: Autor (2024).

Figura 45 – Base de atracação



Fonte: Autor (2024).

A terceira parte, que incluem a pá de agitação, que tem 1200 mm e 120 mm de altura e diâmetro respectivamente, motor elétrico com 1200 RPM e as esferas de aço. A Figura 46 são as esferas utilizadas no teste com um total de 70, sendo 10 esferas com 25,3 mm de diâmetro; 35 com 19,0 mm e 25 com 12,6 mm, e que simulam os detritos que entram em contato com a superfície da estrutura de concreto submersa, que geralmente são materiais sólidos transportados pela água e em alguns casos, onde o fluxo e intensidade da correnteza é maior, o impacto do sólido na superfície da estrutura se torna mais severo, ocasionando em maiores desgastes e danos que somados a outros fatores diminuem a durabilidade do concreto e colocam em risco a estabilidade da estrutura.

Figura 46 – Esferas metálicas.



Fonte: Autor (2024).

Antes do ensaio, o disco é pesado e depois submerso em água por 48 horas, após este período, o disco é posto no abrasímetro sob pequenos cilindros metálicos de 50 mm de altura por 25 mm de diâmetro apresentadas na Figura 47, as hélices são devidamente posicionadas e as esferas depositadas na superfície do concreto como mostra a Figura 48. Após verificar que a configuração da máquina e do concreto estão de acordo, a máquina é ligada.

Figura 47 – Bases cilíndrica (Ø25 x 50) mm.



Fonte: Autor (2024).

Figura 48 – Configuração do disco e equipamentos.



Fonte: Autor (2024).

3.4 MATERIAIS

3.4.1 Concreto Convencional

Foram moldados três discos de concreto para referência, NC20, NC30 e NC40. Para atingir a resistência à compressão desejada foram utilizados traços diferentes, e para a maior resistência foi empregado aditivo da marca MC-PowerFlow 1180 em

1,10% da massa do cimento. O abatimento de tronco de 100 ± 30 mm e trabalhabilidade normal. Na composição dos disco foi utilizado CII-F-32, areia fina, e brita zero como agregado graúdo com diâmetro máximo de 9,5 mm. A Tabela 14 representa o traço unitário para os concretos convencionais da presente pesquisa. A Figura 49 apresenta os materiais utilizados para elaboração do concreto convencional e a Figura 50 o ensaio de abatimento de cone.

Tabela 16 – Traço utilizado no concreto NC20, NC30 e NC40.

| CONCRETO CONVENCIONAL | | | | |
|-----------------------|---------|-------|-------|------|
| Grupo | Cimento | Areia | Brita | Água |
| NC20 | 1,0 | 2,5 | 3,5 | 0,60 |
| NC30 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 0,51 |
| NC40 | 1,0 | 2,3 | 2,7 | 0,45 |

Fonte: Autor (2024).

Figura 49 – Materiais dos discos de concreto convencional.



Fonte: Autor (2024).

Figura 50 – Abatimento do concreto convencional.



Fonte: Autor (2024).

As propriedades mecânicas foram definidas através de ensaios destrutivos de compressão axial, realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) e módulo de elasticidade, feito de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017). Para cada ensaio foram utilizados três corpos de prova cilíndrico de ($\varnothing 100 \times 200$) mm. A Figura 51 representa o ensaio de compressão diametral e o módulo de elasticidade, respectivamente.

Figura 51 – Ensaio de compressão diametral e módulo de elasticidade, respectivamente.



Fonte: Autor (2024).

3.4.2 Concreto Geopolimérico

Foram concretados 21 discos de concreto geopolimérico, para a confecção dos discos com e sem adição da fibra, foi desenvolvido no laboratório da Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFPA pelo Grupo de Análise Experimental em Estruturas e Materiais (GAEMA) um concreto geopolimérico a base de metacaulim. Na literatura, os trabalhos que apresentam resultados mais relevantes são os de metacaulim e cinza volante e como solução ativadora geralmente é utilizada uma combinação de Hidróxido de sódio e Silicato de sódio. Nesse contexto, esta pesquisa, optou por utilizar metacaulim e solução de Hidróxido de sódio e Silicato de sódio neutro para a produção do concreto. A Figura 52 representa os materiais utilizados para elaboração do concreto geopolimérico da presente pesquisa.

Figura 52 – Materiais utilizados no concreto geopolimérico



Fonte: Autor (2024).

Foi utilizado o traço desenvolvido pelo Grupo de Análise Experimental em Estruturas e Materiais (GAEMA), com molaridade de 10 M para o concreto de 20 MPa, 12 M para o concreto de 30 MPa e 16 M para o concreto de 40 MPa. Vale ressaltar dois pontos importantes observados em estudos desenvolvidos pela GAEMA no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, sendo estes, a presença exagerada de água compromete a resistência à compressão e o tempo de cura, em molaridades inferiores a 10 M o concreto apresentou eflorescência (Figura 53), isso é atribuído à proporção entre óxido de sódio e água.

Figura 53 – Eflorescência no concreto geopolimérico.



Fonte: Azevedo (2023).

Assim que a proporção entre os componentes da solução alcalina fora definida, foram testados traços de concreto, utilizando como agregado graúdo brita com diâmetro máximo de 9,5 mm. Verificou-se que seria preciso um controle tecnológico mais rigoroso quanto aos agregados, uma vez que a quantidade de material fino na brita estava interferindo na trabalhabilidade do concreto, bem como a umidade no agregado miúdo estava influenciando na resistência à compressão axial do concreto. Assim, para manter um padrão, foi controlado o agregado miúdo, de forma que foi feito a secagem de todo material utilizado e retirado o material fino do agregado graúdo. Na Tabela 15 tem-se o traço unitário do concreto geopolimérico da presente pesquisa. A Figura 54 apresenta o ensaio de abatimento de tronco do concreto geopolimérico com e sem fibra de aço ou polipropileno, na Figura 55 tem-se a soda cáustica e o hidróxido de sódio, e na Figura 56 tem-se o silicato de sódio e a formação da solução ativadora.

Tabela 17 – Traço unitário do concreto geopolimérico.

| CONCRETO GEOPOLIMÉRICO | | | | |
|------------------------|-------|-------|------|---------|
| Metacaulim | Areia | Brita | Água | Solução |
| 1,0 | 1,5 | 2,5 | 0,1 | 0,8 |

Fonte: Autor (2024).

Figura 54 – Abatimento do concreto geopolimérico sem adição de fibras, com fibra de aço, e com fibra de polipropileno respectivamente.



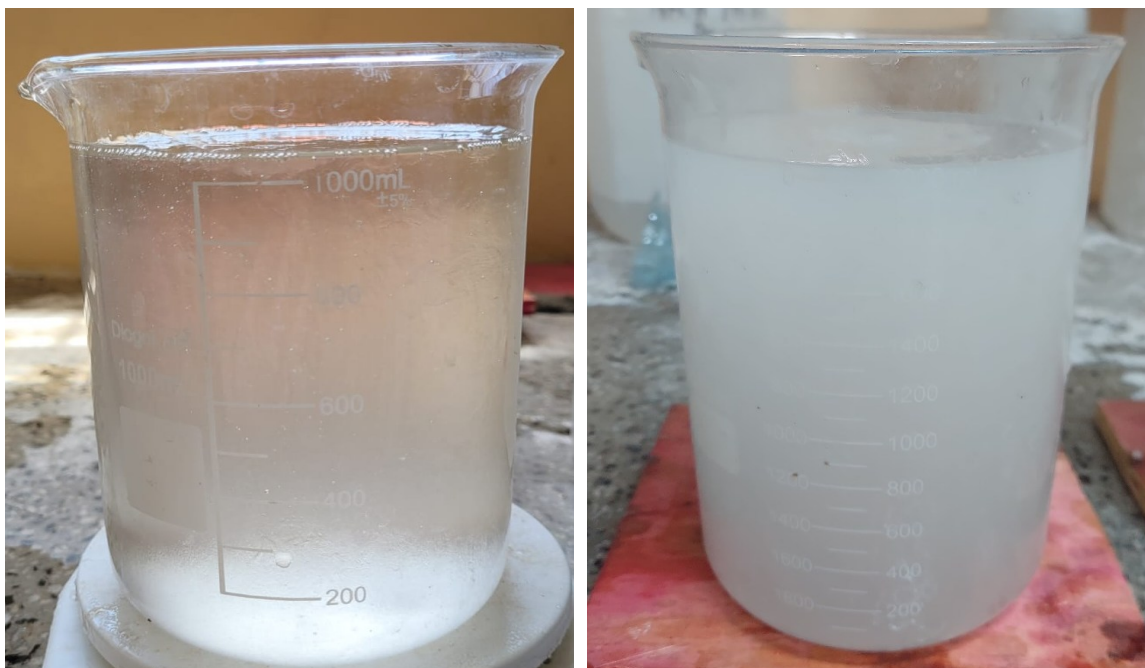
Fonte: Autor (2024).

Figura 55 – Soda cáustica e hidróxido de sódio.



Fonte: Autor (2024).

Figura 56 – Silicato de sódio e solução ativadora, respectivamente.



Fonte: Autor (2024).

O concreto produzido para essa pesquisa foi composto por metacaulim com massa específica de $2,56 \text{ kg/dm}^3$ fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil, areia fina como agregado miúdo, brita zero com diâmetro máximo de 9,5 mm. Para a elaboração da solução alcalina, como ativador utilizou-se hidróxido de sódio em

escamas, como mencionando anteriormente, da marca Carbocloro com 98% de pureza; silicato de sódio neutro da marca Bandeirante Brazmo, com densidade de 1,4 g/l e viscosidade a 25°C de 400 a 800 cP.

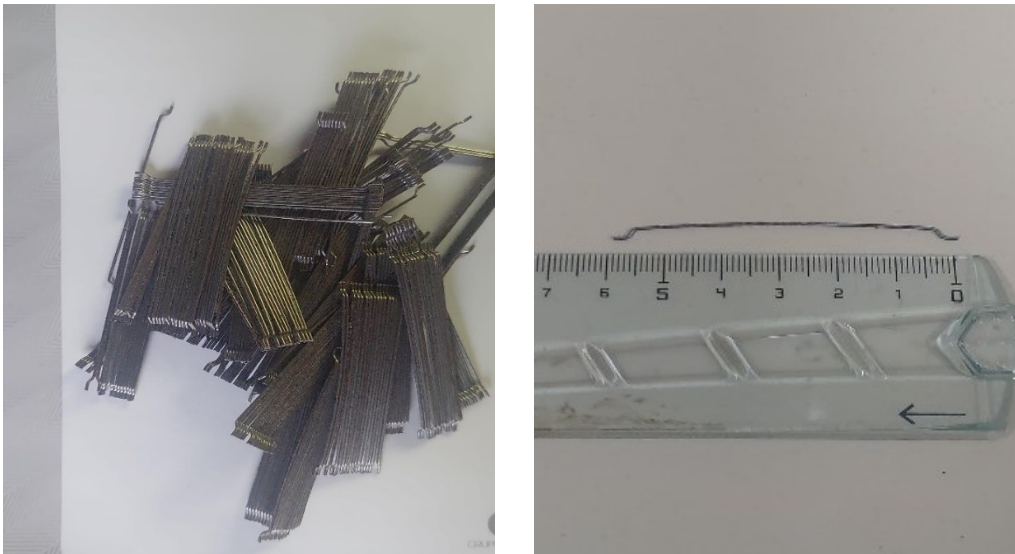
As etapas preliminares iniciavam no processo *two part mixing*, era feito a dissolução do hidróxido de sódio em meio aquoso, e após o material diminuir a temperatura, este era armazenado em recipientes de 20 litros. Posteriormente ao resfriamento o líquido de 16 mols era misturado ao silicato de sódio neutro na proporção de 1:2, formando a solução alcalina, que também apresentava reação exotérmica, logo, foi preciso aguardar o resfriamento total da solução alcalina para então iniciar o processo de concretagem.

As propriedades mecânicas adotadas foram às mesmas definidas para o concreto convencional: através de ensaios destrutivos de compressão axial, realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) e módulo de elasticidade, feito de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017). Para cada ensaio foram utilizados três corpos de prova cilíndrico de (Ø100 x 200) mm.

3.4.3 Fibra de Aço

Esta pesquisa utilizou fibras de aço da *Dramix* modelo 65/60/BG (Figura 57), com comprimento e diâmetro de 60 mm e 0,9 mm, além do fator de forma de 65, resistência à tração de 1.160 N/mm² e módulo de elasticidade de ± 210.000 N/mm². Em todos os discos de concreto geopolimérico e de convencional que foram reforçadas com esse material foi fixado os teores de 0,5%, 1,0% e 1,5% do volume, que foi lançado no momento da mistura dos materiais na betoneira, de forma que evitasse a formação de ouriços.

Figura 57 – Fibras de aço *Hooked*

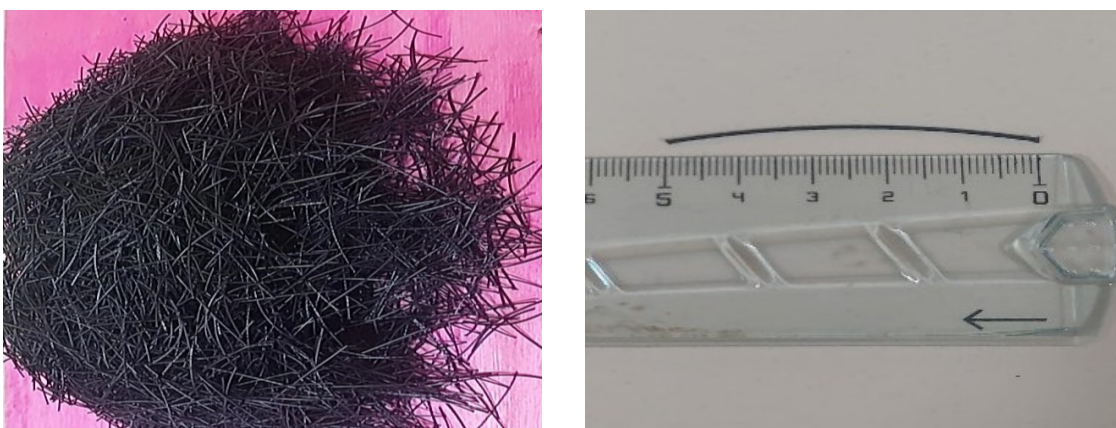


Fonte: Autor (2024).

3.4.4 Fibra de Polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas foram da DURISTEEL FF54 (Figura 58) com peso específico de $0,97 \text{ g/cm}^3$, 50 mm de comprimento, resistência à tração de 250 MPa e módulo de elasticidade de 7,5 GPa. Em todas as dosagens de concreto geopolimérico com adição da fibra de polipropileno foram fixados os teores de fibra em 0,5%, 1,0% e 1,5% do volume de concreto. Foram adotados os mesmos cuidados empregados para o lançamento da fibra de aço, para que não ocorresse nichos das fibras.

Figura 58 – Fibras de Polipropileno.



Fonte: Autor (2024).

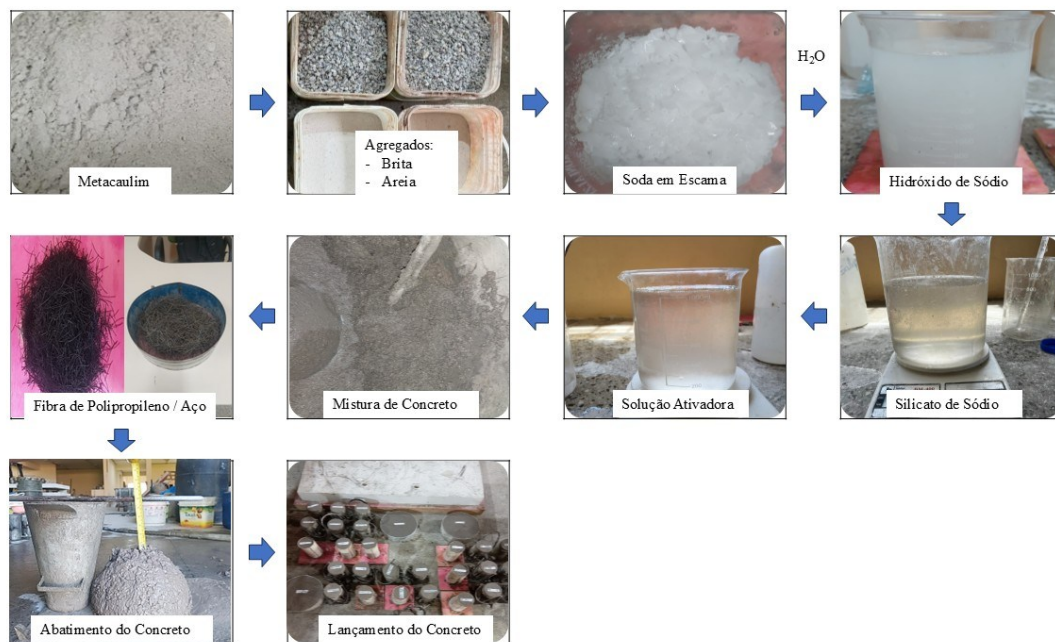
3.4.5 Preparo da mistura de concreto geopolimérico

Inicialmente, antes da mistura do concreto geopolimérico é preciso fazer a solução ativadora que é composta pelo hidróxido de sódio e silicato de sódio. Este primeiro é feito a partir da mistura de soda caustica em escama dissolvida em água, 1 mol é equivalente a 40g de soda, para atingir o teor de resistência de 20, 30 e 40 MPa foi variado a molaridade, onde foi diminuída para uma menor resistência e acrescida para aumentar. Durante a mistura de soda em escama com H_2O é liberada uma reação exotérmica, o que necessita aguardarmos a mistura esfriar para dar continuidade com o preparo da solução. Geralmente, para uma mistura de 25 a 30 litros de geopolímero, 4 horas é tempo suficiente para aguardar a mistura esfriar, para que possa ser manuseada com segurança.

Outro componente da solução ativadora é o silicato de sódio neutro. Com a mistura de hidróxido de sódio pronta e em condições de manuseio, é misturado com o silicato em proporções de 1:2 um de NaOH para dois de Na_2SiO_3 . Essa mistura também reage formando uma reação exotérmica. Com a solução pronta e armazenada em recipiente adequado, para acelerar o resfriamento o recipiente pode ser submerso em água. Foi feito o controle para que a solução ativadora, assim como o NaOH fossem produzidos em até 24 horas antes da mistura dos componentes do concreto geopolimérico.

O preparo dos agregados foi feito com o máximo cuidado e controle. O agregado gráúdo foi peneirado para eliminar o máximo de miúdos presente, assim como o agregado miúdo foi seco para eliminar qualquer teor de umidade. O metacaulim utilizado estava armazenado em sacas e devidamente preservado de qualquer agente externo como água ou materiais pulverulentos, a Figura 59 mostra o fluxograma de preparo da mistura geopolimérica.

Figura 59: Fluxograma de preparo da mistura geopolimérica



Fonte: Autor (2024)

3.4.6 Formas dos Discos

Para a concretagem dos discos foram usadas formas cilíndricas metálicas de (Ø280 e 100) mm. Para facilitar a saída dos discos pós endurecimento, as formas utilizadas tinham fundo removível. Na Figura 60 é possível observar as formas dos discos de concreto.

Figura 60 – Formas dos discos de concreto.



Fonte: Autor (2024).

3.4.7 Propriedades dos Materiais

3.4.7.1 Concreto

Para a moldagem dos 24 discos, a concretagem foi feita no próprio laboratório, os três tipos de resistência estimadas em 20, 30 e 40 MPa com abatimento do tronco de cone variando para as 8 famílias em 100 ± 30 mm. Fazendo a relação entre os valores de resistência a compressão e módulo de elasticidade obtidos dos resultados experimentais, o concreto geopolimérico apresenta propriedades superiores frente ao concreto convencional.

O concreto convencional, apresenta módulo de elasticidade superior ao concreto geopolimérico, e geralmente, em concreto com adição de fibra de aço, na pesquisa de Azevedo (2023) é possível perceber que o módulo (E_c) do concreto geopolimérico com fibra é levemente superior ao sem fibra. Santos (2024) apresenta o mesmo paralelo entre o concreto convencional e o geopolimérico, contudo, o módulo do CRF foi superior. Vale ressaltar que na pesquisa de Azevedo (2023) o CN está com resistência superior ao demais, trazendo a ideia de caso a resistência fosse de 30 MPa o CRF apresentaria E_c superior, semelhante ao resultado de Santos (2024).

Entre as deficiências do concreto, ressalta-se a baixa resistência aos esforços de tração quando comparado aos de compressão, aquele atinge cerca de 8 a 11% da resistência de compressão. Também é possível mencionar o comportamento frágil deste material, apresentando pouca ou nenhuma ductilidade após o início da fissuração, tornando a aplicabilidade do concreto relativamente restrita, pois não apresenta grandes deformações antes da ruptura. Para solucionar esta problemática é adicionado barras de aço para melhorar a ductilidade, tornando-o pouco mais tenaz. A fibra de aço também pode ser utilizada para melhorar a tenacidade do concreto, O ACI 544.1R-96 comenta que as fibras proporcionam acréscimos significativos na resistência à tração direta, sendo informados acréscimos de 30% a 40% para concretos com volumes de fibras superiores a 1,5%. A Figura 61 representa o molde do disco de concreto. A Tabela 16 apresenta as propriedades obtidas experimentalmente, como resistência à compressão média (f_{cm}), módulo de elasticidade (E_c), e resistência à tração (f_{ct}).

Figura 61 – Molde dos discos.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 18 – Propriedades dos concretos.

| Sigla | Idade (dias) | f_{cm} | f_{st} | E_c |
|-----------|--------------|----------|----------|-------|
| NC20 | 28 | 18,1 | 2,3 | 22,3 |
| NC30 | | 28,6 | 3,0 | 31,4 |
| NC40 | | 37,2 | 3,6 | 33,2 |
| GC20 | | 24,7 | 2,2 | 21,8 |
| GC30 | | 27,7 | 2,8 | 23,5 |
| GC40 | | 42,9 | 3,9 | 31,4 |
| GC20SF0.5 | | 19,2 | 2,2 | 18,8 |
| GC20SF1.0 | | 22,9 | 2,8 | 17,1 |
| GC20SF1.5 | | 22,7 | 3,0 | 16,0 |
| GC30SF0.5 | | 35,1 | 3,6 | 20,1 |
| GC30SF1.0 | | 32,4 | 4,0 | 20,9 |
| GC30SF1.5 | | 33,8 | 5,1 | 22,2 |
| GC40SF0.5 | | 42,8 | 4,1 | 32,4 |
| GC40SF1.0 | | 39,5 | 5,3 | 30,9 |
| GC40SF1.5 | | 46,0 | 7,5 | 31,7 |
| GC20PP0.5 | | 18,7 | 2,8 | 18,0 |
| GC20PP1.0 | | 17,1 | 2,9 | 16,9 |
| GC20PP1.5 | | 21,2 | 3,1 | 19,5 |
| GC30PP0.5 | | 35,7 | 3,4 | 19,9 |
| GC30PP1.0 | | 33,0 | 3,5 | 20,5 |
| GC30PP1.5 | | 31,3 | 3,5 | 21,3 |
| GC40PP0.5 | | 38,5 | 4,4 | 29,1 |
| GC40PP1.0 | | 37,9 | 4,5 | 29,8 |
| GC40PP1.5 | | 42,6 | 4,8 | 29,9 |

Fonte: Autor (2024).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os ensaios foram feitos aos 28 dias de cada disco, e tiveram 4 pontos ou períodos de análise, sendo os pontos 0h, 6h, 12h, 18h e 24h. Os gráficos apresentam a relação da abrasão total acumulada x período. No eixo y é contabilizada a abrasão acumulada em cada período, até totalizar a perda do material em porcentagem.

4.2 DISCOS DE CONCRETO CONVENCIONAL

A abrasão no concreto convencional apresentou os resultados esperados, com a menor resistência atingindo maiores índices de abrasão, em contrapartida a maior resistência atingindo menores índices. Nesse caso, e em outros que serão apresentados com o concreto geopolimérico com e sem adição de fibras, a classe de resistência foi inversamente proporcional a abrasão, ou seja, quanto maior a resistência, menor será a abrasão hidráulica. A Tabela 17 apresenta os resultados da abrasão hidráulica no concreto convencional, e a Figura 62 mostra o concreto antes e depois do ensaio.

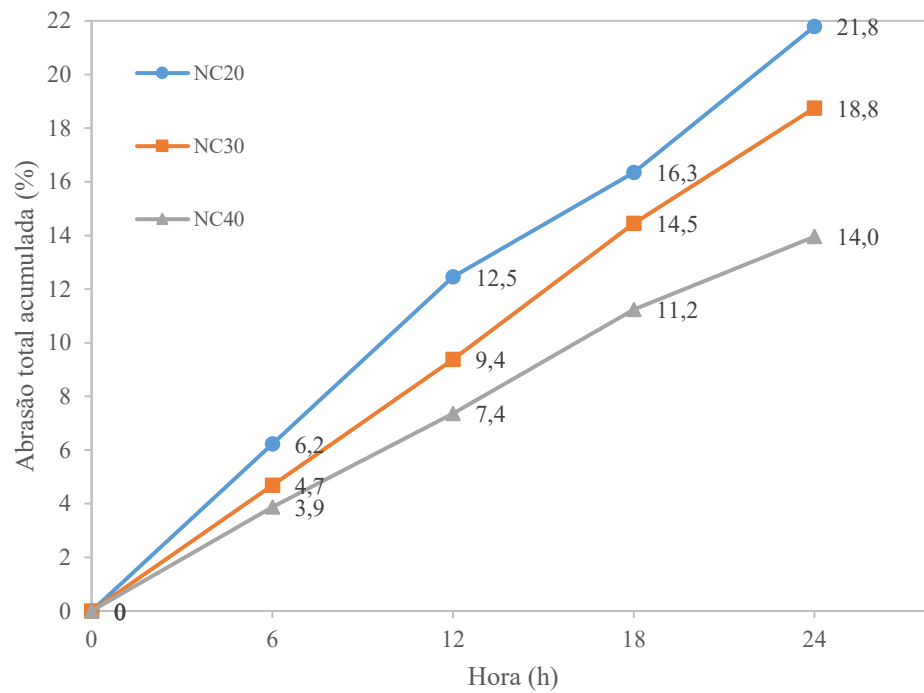
O NC20 apresentou maior abrasão, chegando a perder 2,80 kg de material, isso apenas em 24 horas de ensaio, este resultado mostra a importância da utilização de concretos mais resistentes em construções de estruturas submersas. O disco NC40 foi abrasivado em 1,80 kg, comparando as classes de 30 MPa e 30 MPa é um bom resultado. O disco NC30 teve um rendimento de 14,30% em comparação ao NC20, ou seja, aumentando a classe de resistência em 50% foi possível reduzir a taxa de abrasão em quase 15%. Em comparação, duplicando a resistência, NC40, foi possível atingir um rendimento de 35,71%, agora, comparando o NC40 com o NC30, o rendimento percentual foi de 25%.

Tabela 19: Abrasão hidráulica do concreto convencional

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| NC20 | 12,85 | 0,80 | 0,80 | 0,50 | 0,70 | 2,80 | 21,8 |
| NC30 | 12,8 | 0,60 | 0,60 | 0,65 | 0,55 | 2,40 | 18,8 |
| NC40 | 12,9 | 0,50 | 0,45 | 0,50 | 0,35 | 1,80 | 14,0 |

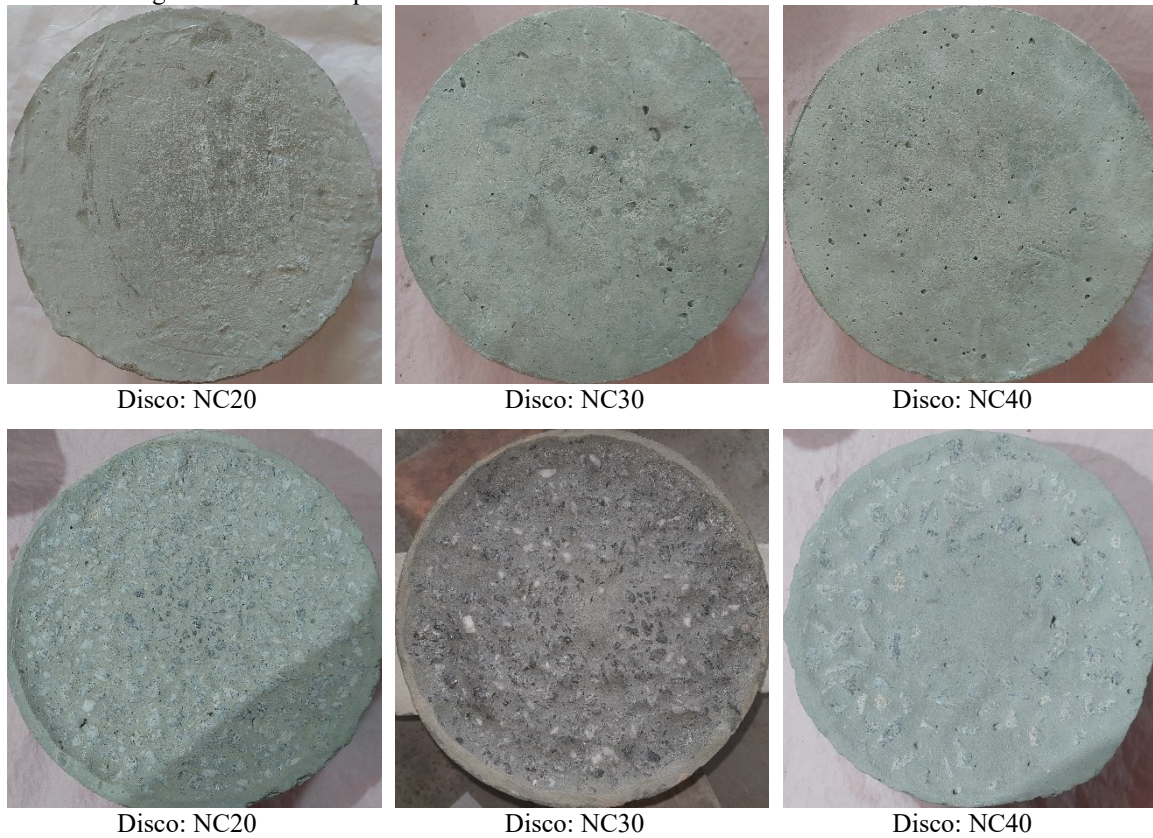
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 1: Relação abrasão x período do concreto convencional



Fonte: Autor (2024)

Figura 62: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica do concreto convencional



Fonte: Autor (2024)

4.3 DISCOS DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO SEM ADIÇÃO DE FIBRAS

A Tabela 18 mostram os resultados dos discos geopoliméricos sem adição de fibras, que junto com o concreto convencional será utilizado como referência frente aos discos com adição de fibra de aço ou polipropileno. Estes resultados também seguiram o padrão esperado de desgaste, com a proporcionalidade de resistência x abrasão supracitada.

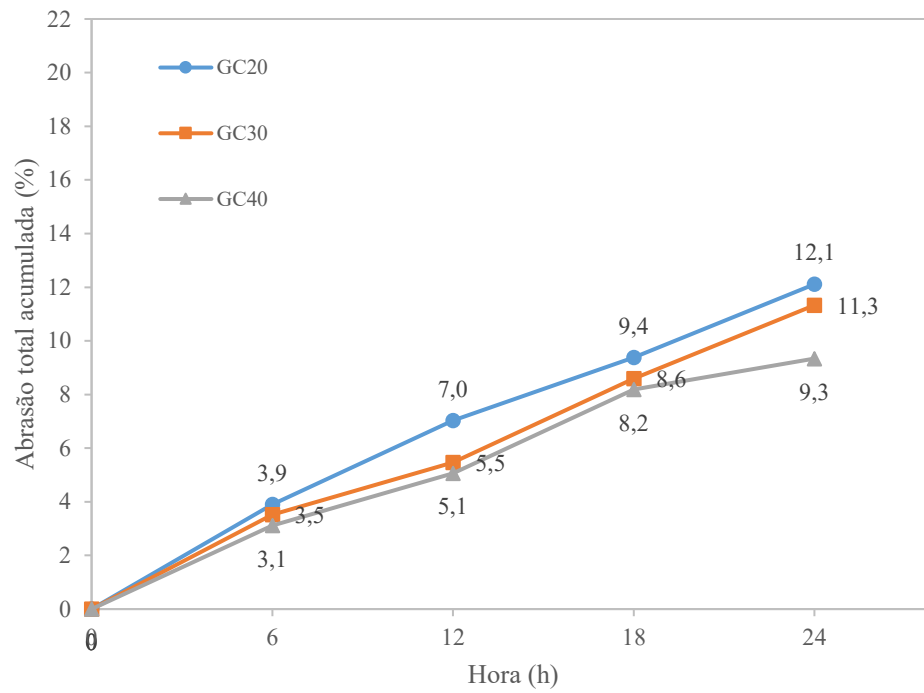
A família do concreto geopolimérico sem adição de fibras portou-se da mesma forma que o concreto convencional, não teve um crescimento linear, com o GC40 tendo um total abrasivado de 1,20 kg, frente aos 1,45 kg do GC30. O disco GC20 por outro lado manteve-se o ensaio todo com o maior índice de abrasão hidráulica, totalizando 1,55 kg. O GC30 e GC40 tiveram rendimento de 6,45% e 22,58% respectivamente em comparação ao GC20, ou seja, duplicando a classe de resistência de 20 MPa foi possível reduzir a taxa de abrasão hidráulica em 22,58%, em termos de massa, essa redução foi de 0,35 kg. Já a comparação do rendimento percentual do GC40 com o GC30 foi de 17,24%.

Tabela 20: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico sem fibra

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| GC20 | 12,80 | 0,50 | 0,40 | 0,30 | 0,35 | 1,55 | 12,1 |
| GC30 | 12,80 | 0,45 | 0,25 | 0,40 | 0,35 | 1,45 | 11,3 |
| GC40 | 12,85 | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 0,30 | 1,20 | 9,3 |

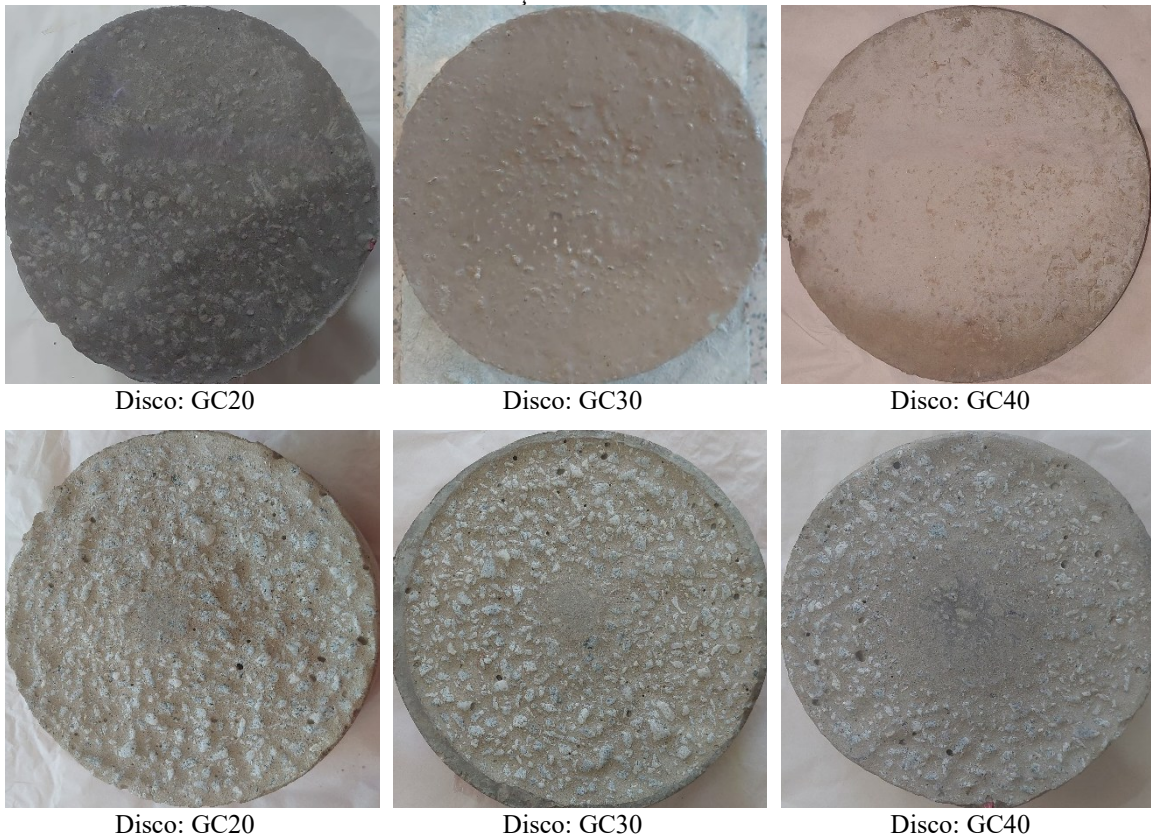
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 2: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico sem adição de fibras.



Fonte: Autor (2024)

Figura 63: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de concreto geopolimérico sem adição de fibras.



Fonte: Autor (2024)

4.4 DISCOS GEOPOLIMÉRICO COM 20 MPa REFORÇADOS COM FIBRAS DE AÇO

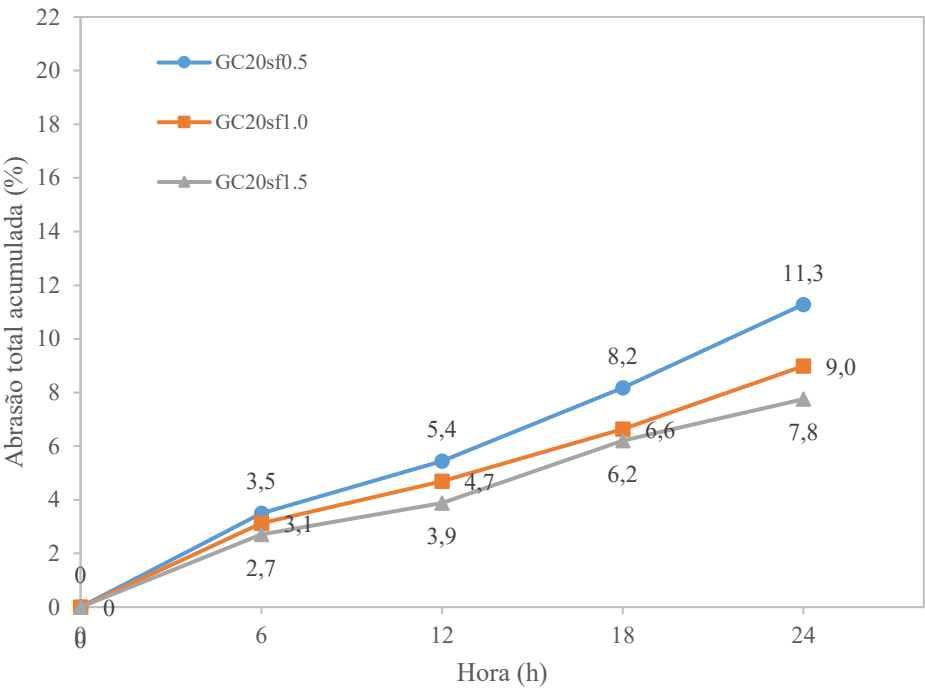
O concreto geopolimérico com classe de resistência em 20 MPa e reforçado com fibras de aço tiveram abrasão crescente, porém não-linear, durante o primeiro período o GC20sf1.0 teve a maior abrasão, no segundo período manteve-se com o maior desgaste assim como o disco GC20sf0.5. O GC20sf1.5 por todo ensaio teve o menor desgaste de material, resultado este condizente com o que era esperado, em vista que a fibra de aço atua como proteção da superfície do concreto. Para esta família a classe de resistência é a mesma, 20 MPa, a única variável é o teor de fibra, o qual para os discos GC20sf1.0 e GC20sf1.5 tiveram rendimento de 20,69% e 31,03% respectivamente em comparação ao GC20sf0.5, ou seja, duplicando o teor de fibra foi possível reduzir a taxa de abrasão hidráulica em mais de 20% e triplicando o teor de fibra essa redução foi de aproximadamente 31%.

Tabela 21: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibra de aço.

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-----------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| GC20sf0.5 | 12,85 | 0,45 | 0,25 | 0,35 | 0,40 | 1,45 | 11,3 |
| GC20sf1.0 | 12,80 | 0,40 | 0,20 | 0,25 | 0,30 | 1,15 | 9,0 |
| GC20sf1.5 | 12,90 | 0,35 | 0,15 | 0,30 | 0,20 | 1,00 | 7,8 |

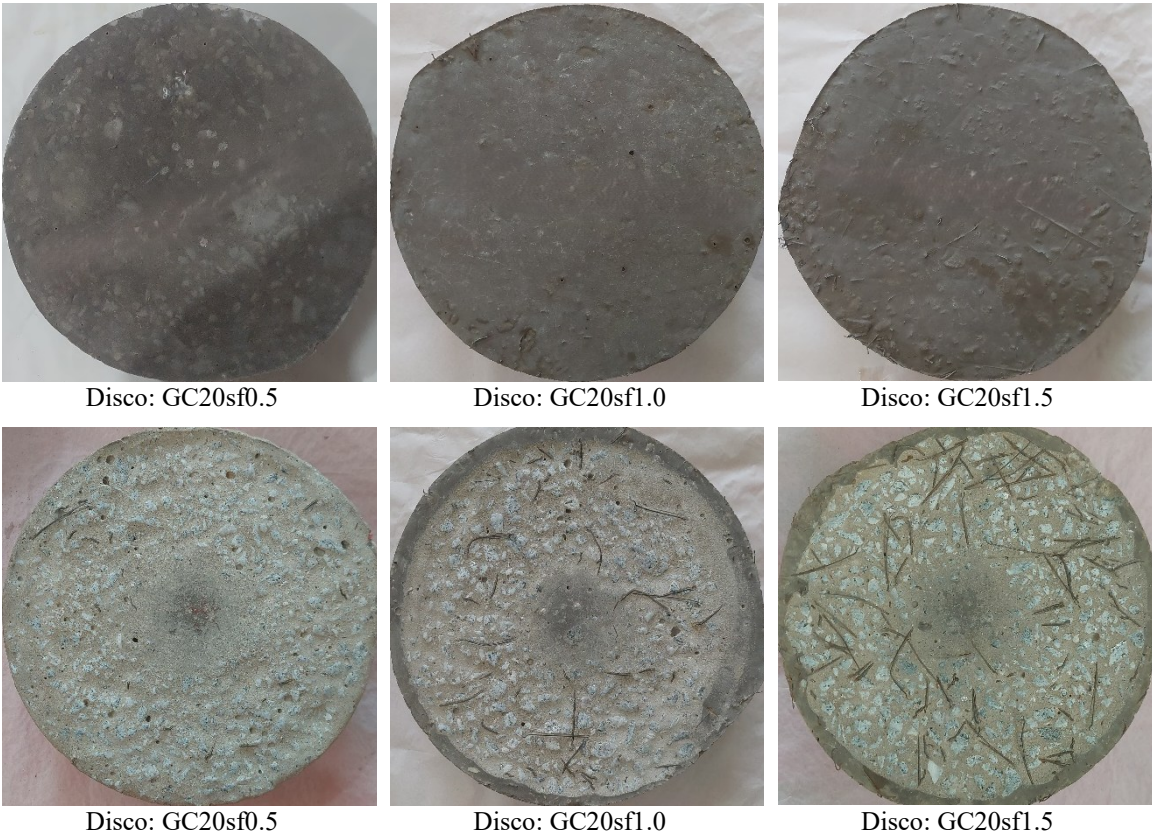
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 3: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 20 Mpa reforçado com fibra de aço



Fonte: Autor (2024)

Figura 64: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibras de aço



Fonte: Autor (2024)

4.5 DISCOS GEOPOLIMÉRICOS COM 30 MPa REFORÇADOS COM FIBRA DE AÇO

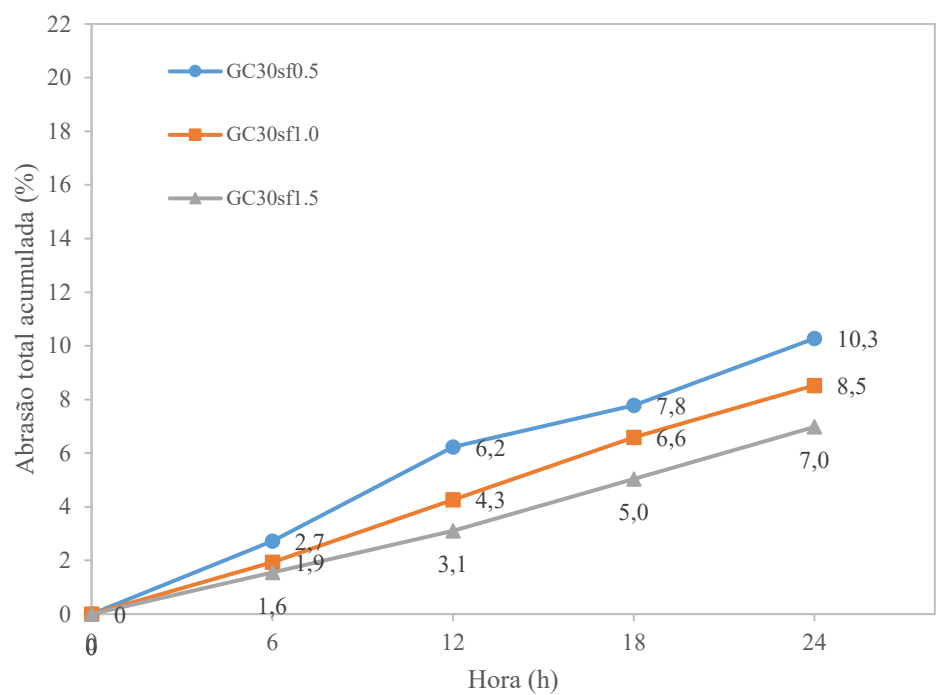
O concreto geopolimérico com classe de resistência 30 MPa reforçado com fibra de aço, após as 24h de ensaio, também apresentou bons resultados, com menor abrasão que o anterior de 20 MPa com fibra de aço, e devido a influência da fibra o disco com teor 1,5% teve a menor perda de material, mantendo-se com os menores índices de abrasão durante todo o ensaio. O teor de fibra em 0,5% mais a resistência não foi suficiente para impedir a abrasão superficial do GC30sf0.5, tornando-o o disco com maior abrasão hidráulica chegando a 1,32 kg de perda. O rendimento percentual dos discos GC30sf1.0 e GC30sf1.5 foram de 16,67% e 31,81% respectivamente em comparação ao GC30sf0.5, dessa forma duplicando o teor de fibra foi possível reduzir a taxa de abrasão hidráulica em quase 17%, e triplicando, em quase 32%.

Tabela 22: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de aço

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-----------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| GC30sf0.5 | 12,85 | 0,35 | 0,45 | 0,20 | 0,32 | 1,32 | 10,3 |
| GC30sf1.0 | 12,90 | 0,25 | 0,30 | 0,30 | 0,25 | 1,10 | 8,5 |
| GC30sf1.5 | 12,90 | 0,20 | 0,20 | 0,25 | 0,25 | 0,90 | 7,0 |

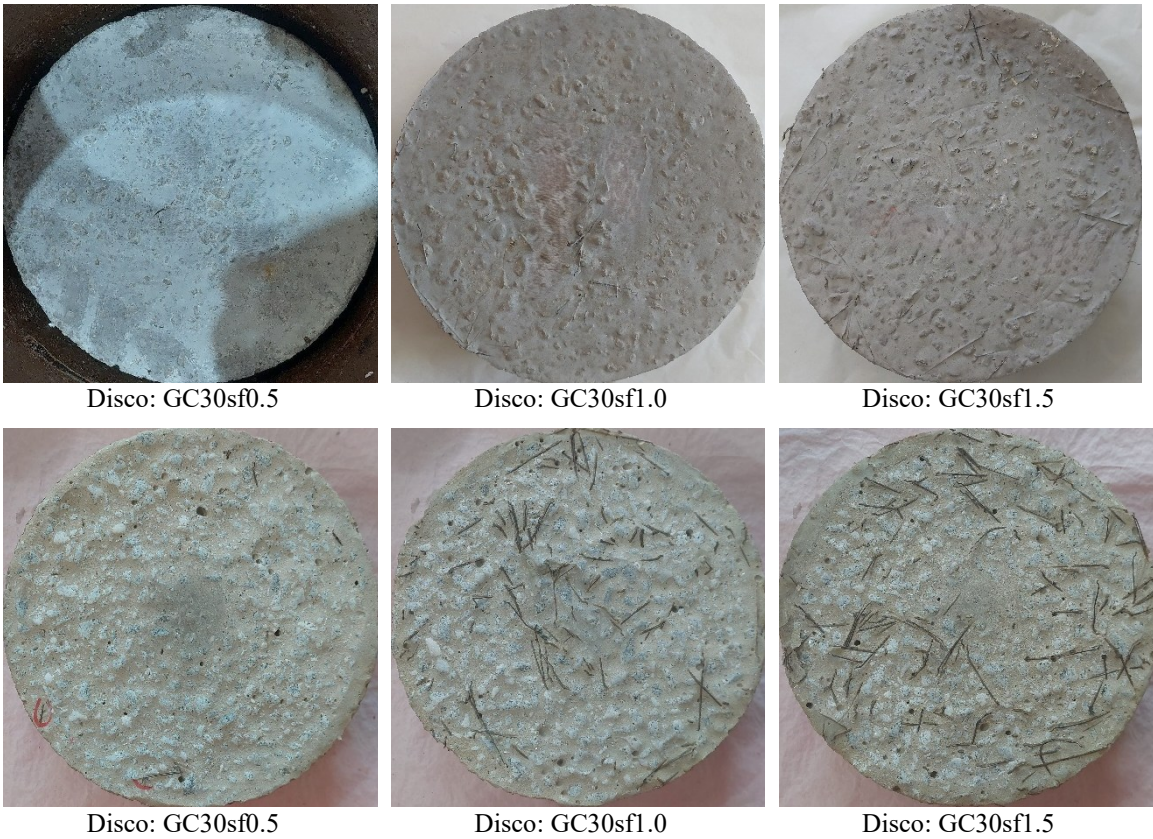
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 4: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de aço



Fonte: Autor (2024)

Figura 65: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibras de aço



Fonte: Autor (2024)

4.6 DISCOS DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 40 MPa REFORÇADO COM FIBRA DE AÇO.

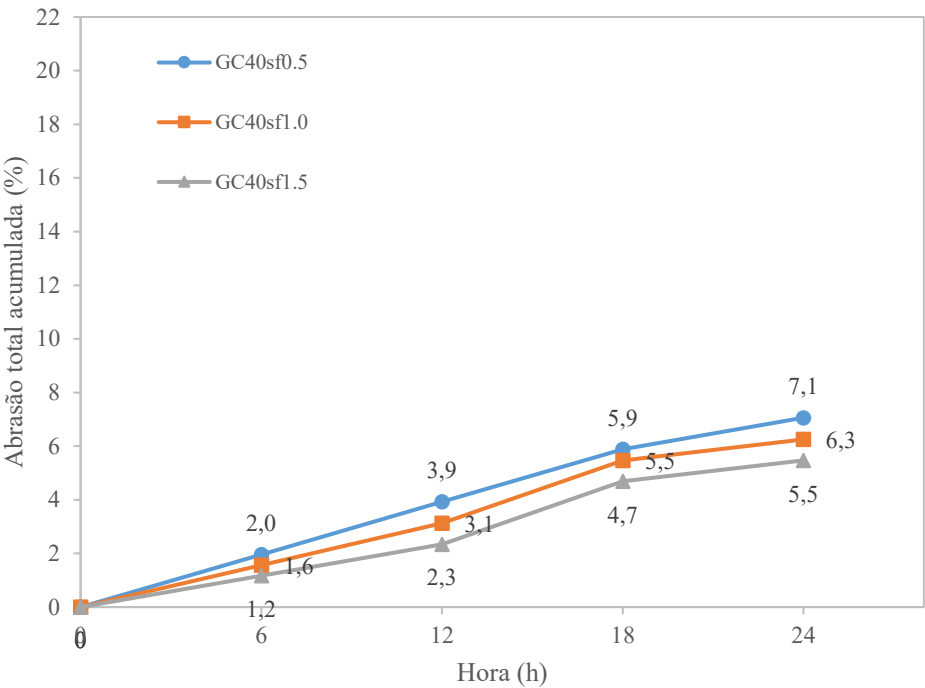
A Tabela 21 mostra os resultados do geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibras de aço, este grupo foi o que apresentou melhor desempenho, seja pela presença das fibras ou pela classe de resistência do concreto. As características do crescimento das curvas não foram exatamente lineares, contudo, sempre progressivo. O disco com volume de fibra em 1,5% em todos os 4 períodos de medição teve a menor perda de material, ficando abaixo das outras duas curvas, contudo, é importante frisar que o GC40sf1.0 esteve bem próximo ao GC40sf1.5 e GC40sf0.5, vide que a diferença total na abrasão hidráulica foi de 0,10 kg. O disco GC40sf0.5 manteve-se com a maior perda de material por todo o teste, mas chegou a aproximar-se das outras duas curvas no primeiro período e no terceiro, porém, nada que o fizesse assumir ou igualar com a curva intermediária. Esta família de concreto geopolimérico foi a que apresentou os melhores resultados, os discos GC40sf1.0 e GC40sf1.5 tiveram rendimento percentual de 11,11% e 22,22% respectivamente em comparação ao GC40sf0.5, ou seja, triplicando o teor de fibra de 0,5% para 1,5% foi possível reduzir a taxa de abrasão hidráulica em aproximadamente 22%.

Tabela 23: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de aço

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-----------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| GC40sf0.5 | 12,75 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,90 | 7,1 |
| GC40sf1.0 | 12,80 | 0,20 | 0,20 | 0,30 | 0,10 | 0,80 | 6,3 |
| GC40sf1.5 | 12,80 | 0,15 | 0,15 | 0,30 | 0,10 | 0,70 | 5,5 |

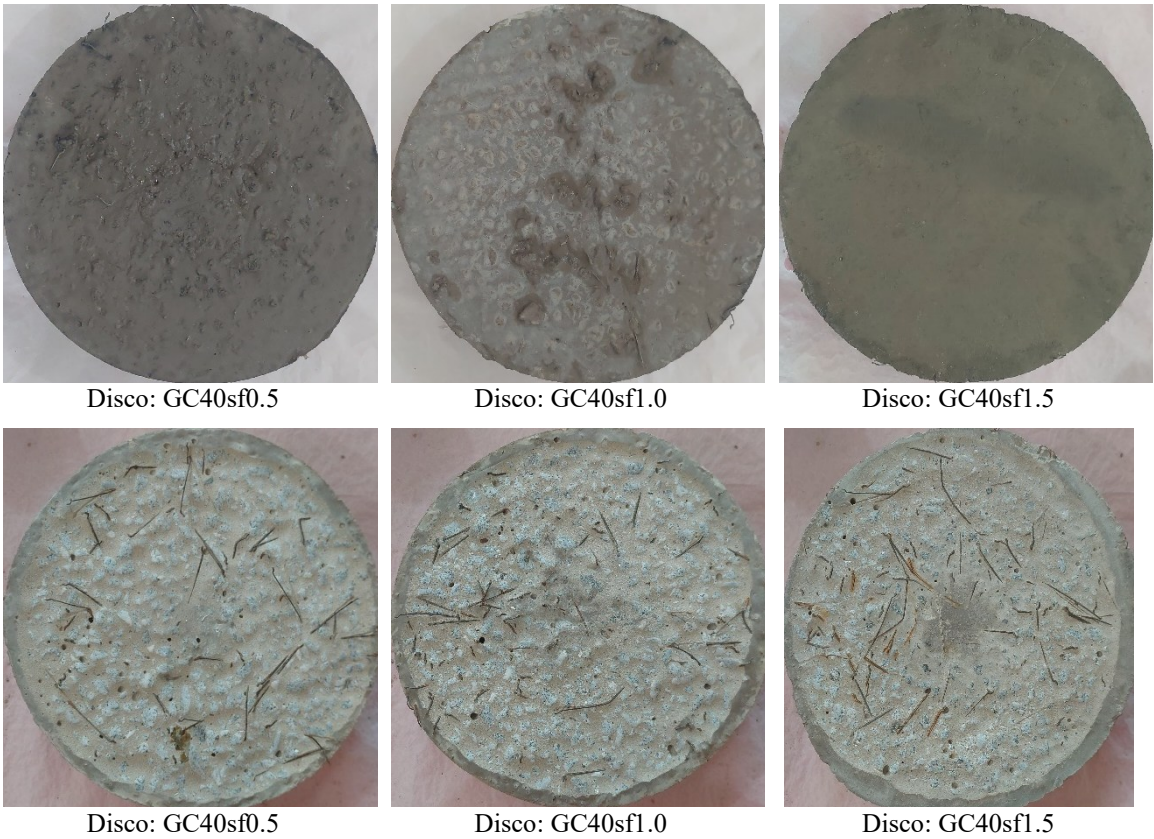
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 5: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de aço



Fonte: Autor (2024)

Figura 66: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibras de aço



Fonte: Autor (2024)

4.7 DISCO DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 20 MPa REFORÇADO COM FIBRA DE POLIPROPILENO

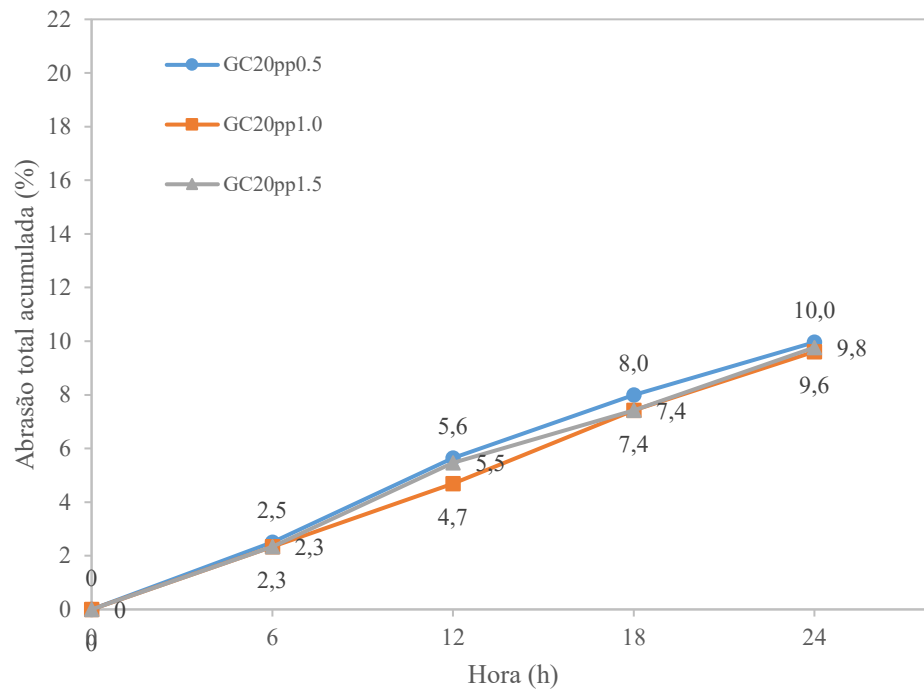
O concreto geopolimérico reforçado com fibras de polipropileno, não apresentaram resultados significativos para a classe de 20 MPa, ou seja, a fibra não se mostrou eficiente, a perda de material neste grupo foi quase a mesma, onde o GC20pp1.5 no segundo período teve o maior desgaste pela abrasão hidráulica, e o GC20pp0.5 no primeiro período teve o melhor desempenho dentre os três discos, e no segundo período assumiu a curva intermediária. A curva formada por GC20pp1.0 foi quase linear, sendo o primeiro disco até a apresentar essa característica, e teve com resultados semelhantes ao GC20pp1.5. Duplicando o teor de fibra de 0,5% para 1,0% a taxa de abrasão hidráulica diminuiu levemente, com rendimento percentual de 3,15%, contudo, triplicando este teor de fibra de 0,5% para 1,5% este rendimento diminuiu para 1,57%, ou seja, mesmo aumentando o teor de fibra de polipropileno a taxa de abrasão hidráulica foi maior que a do disco GC20pp1.0, ressaltando que o aumento do teor de fibra de polipropileno não necessariamente diminuirá a taxa de abrasão hidráulica, como foi observado nos discos geopoliméricos com adição de fibras de aço.

Tabela 24: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibra de polipropileno

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-----------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| GC20pp0.5 | 12,75 | 0,32 | 0,40 | 0,30 | 0,25 | 1,27 | 10,0 |
| GC20pp1.0 | 12,80 | 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,28 | 1,23 | 9,6 |
| GC20pp1.5 | 12,80 | 0,30 | 0,40 | 0,25 | 0,30 | 1,25 | 9,8 |

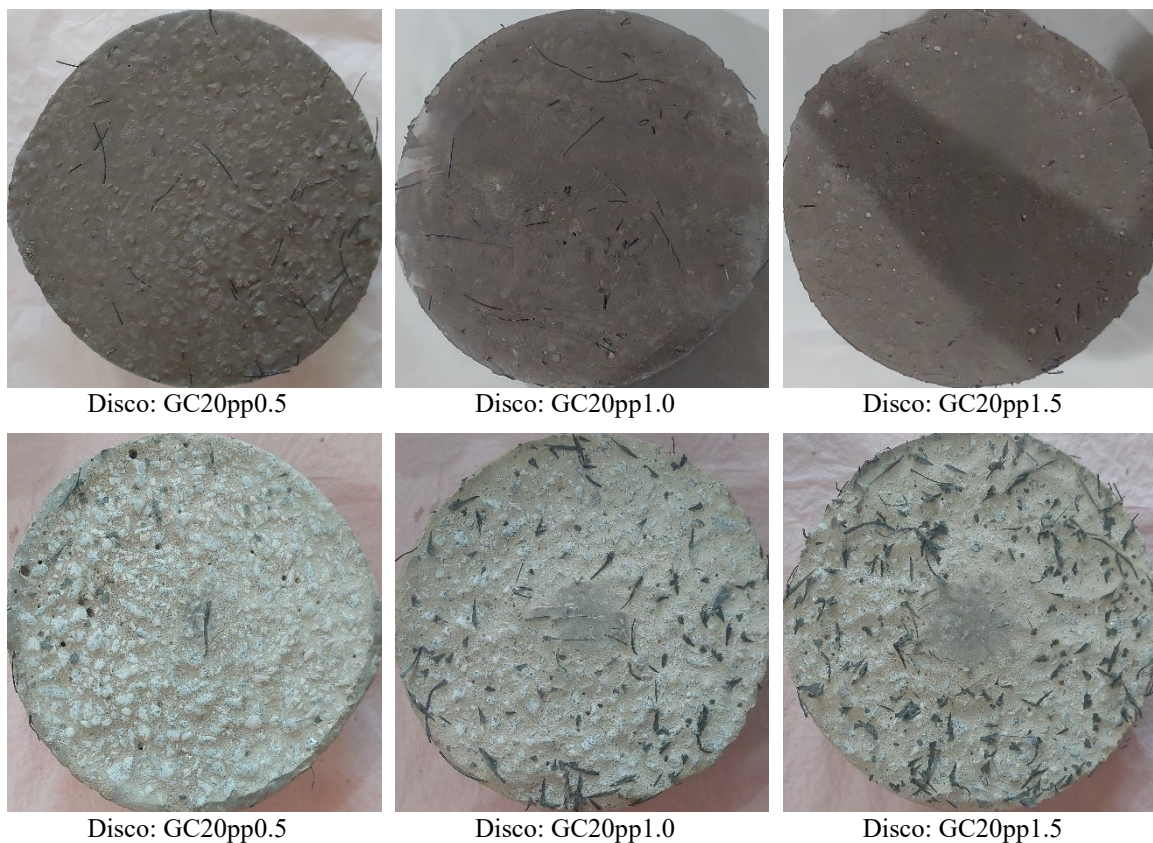
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 6: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibra de polipropileno



Fonte: Autor (2024)

Figura 67: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 20 MPa reforçado com fibras de polipropileno



Fonte: Autor (2024)

4.8 DISCOS DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 30 MPa REFORÇADO COM FIBRA DE POLIPROPILENO

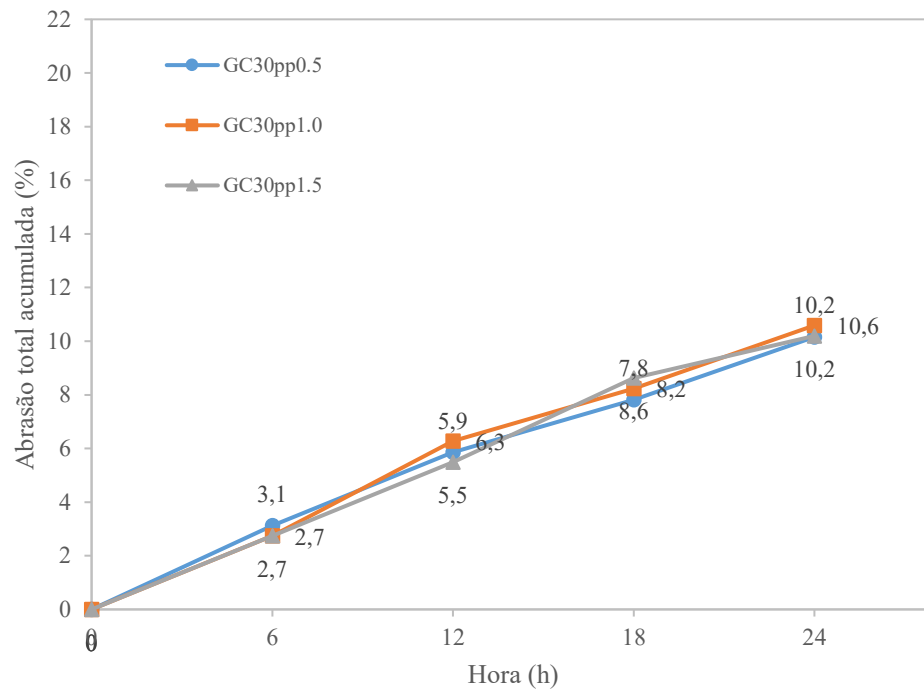
A Tabela 23 traz os resultados dos discos geopoliméricos de 30 MPa com fibra de polipropileno, assim como no grupo de 20 MPa os resultados não foram diferentes, a fibra não teve influência nenhuma em dificultar a abrasão hidráulica do concreto. Duplicando o teor de fibra de 0,5% para 1,0% a taxa de abrasão hidráulica aumentou em 3,85%, e triplicando o teor de fibra de polipropileno, com o disco GC30pp1.5, a taxa de abrasão foi a mesma em comparação ao GC30pp0.5. Este resultado mostra novamente que a apesar da fibra de polipropileno agir como uma proteção da superfície do concreto geopolimérico protegendo-o dos impactos das cargas abrasiva ela não apresenta um padrão nos resultados, ou seja, aumentando o teor de fibra é reduzida a taxa de abrasão hidráulica, com foi observado nos concretos com fibras de aço.

Tabela 25: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de polipropileno

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-----------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| GC30pp0.5 | 12,80 | 0,40 | 0,35 | 0,25 | 0,30 | 1,30 | 10,2 |
| GC30pp1.0 | 12,75 | 0,35 | 0,45 | 0,25 | 0,30 | 1,35 | 10,6 |
| GC30pp1.5 | 12,75 | 0,35 | 0,35 | 0,40 | 0,20 | 1,30 | 10,2 |

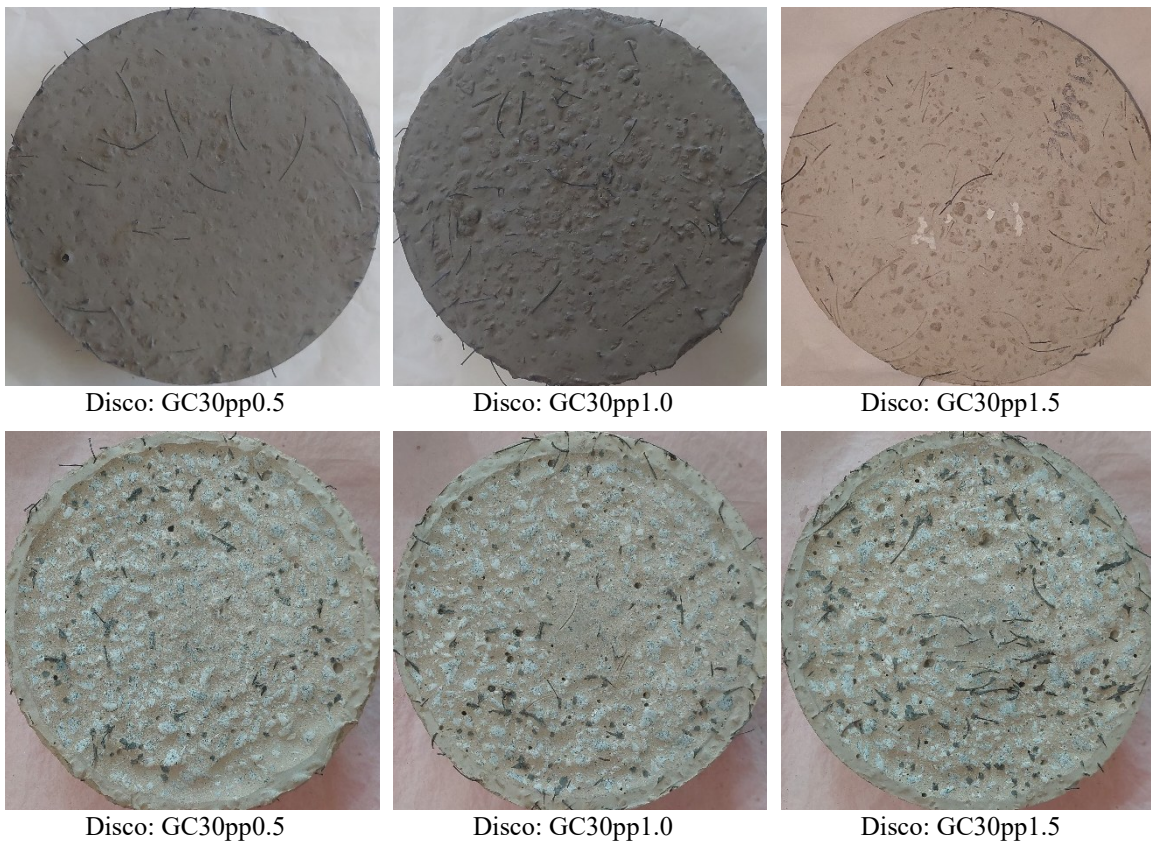
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 7: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibra de polipropileno



Fonte: Autor (2024)

Figura 68: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 30 MPa reforçado com fibras de polipropileno



Fonte: Autor (2024)

4.9 DISCOS DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO COM 40 MPa REFORÇADO COM FIBRA DE POLIPROPILENO

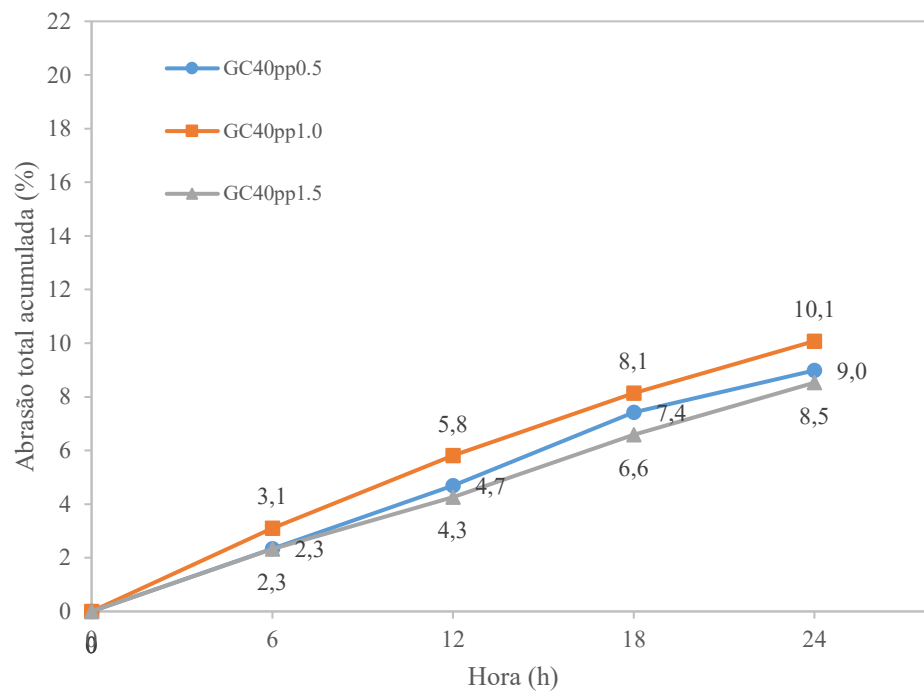
O grupo de 40 MPa reforçado com fibra de polipropileno também não sofreu alterações com a adição da fibra, o GC40pp1.5 no primeiro período teve o mesmo desgaste que o GC40pp0.5, onde este assumiu a curva intermediária, já o GC40pp1.0 teve a maior perda de material na abrasão hidráulica, com 1,30 kg, sendo o segundo disco em apresentar uma curva quase que linear. Para esta família de 40 MPa com adição da fibra de polipropileno, o teor de 1,5% foi o que apresentou o melhor desempenho com rendimento percentual de 4,35% em comparação do GC40pp0.5 e de 15,38% comparado ao GC40pp1.0. Triplicando o teor de fibra de 0,5% para 1,5% foi possível reduzir a taxa de abrasão hidráulica, contudo, ao duplicar o teor de fibra a taxa de abrasão aumentou invés de diminuir.

Tabela 26: Abrasão hidráulica do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de polipropileno

| Disco | Peso (kg) | Abrasão Hidráulica (kg) | | | | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) |
|-----------|-----------|-------------------------|------|------|------|--------------------|-------------------|
| | | 6 | 12 | 18 | 24 | | |
| GC40pp0.5 | 12,80 | 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,20 | 1,15 | 9,0 |
| GC40pp1.0 | 12,90 | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 1,30 | 10,1 |
| GC40pp1.5 | 12,90 | 0,30 | 0,25 | 0,30 | 0,25 | 1,10 | 8,5 |

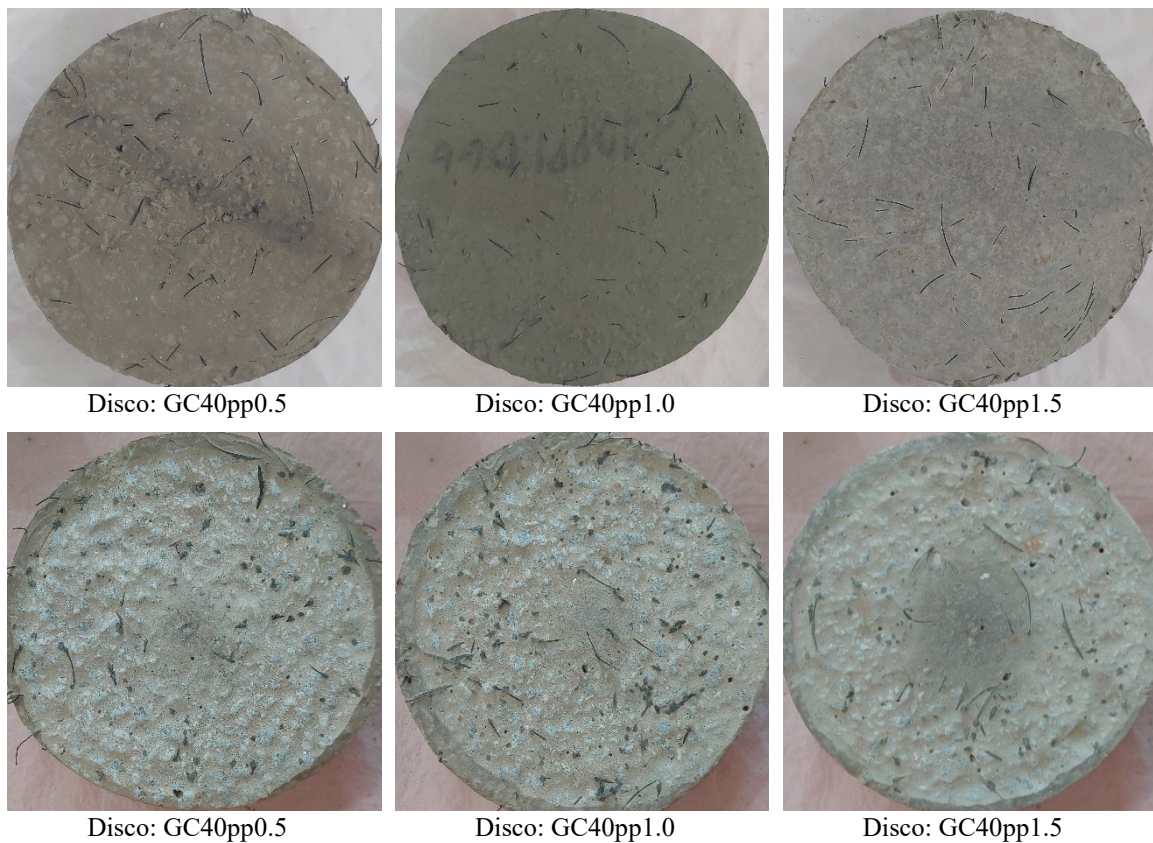
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 8: Relação abrasão x período do concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibra de polipropileno



Fonte: Autor (2024)

Figura 69: Antes e depois do ensaio de abrasão hidráulica dos discos de Concreto geopolimérico de 40 MPa reforçado com fibras de polipropileno

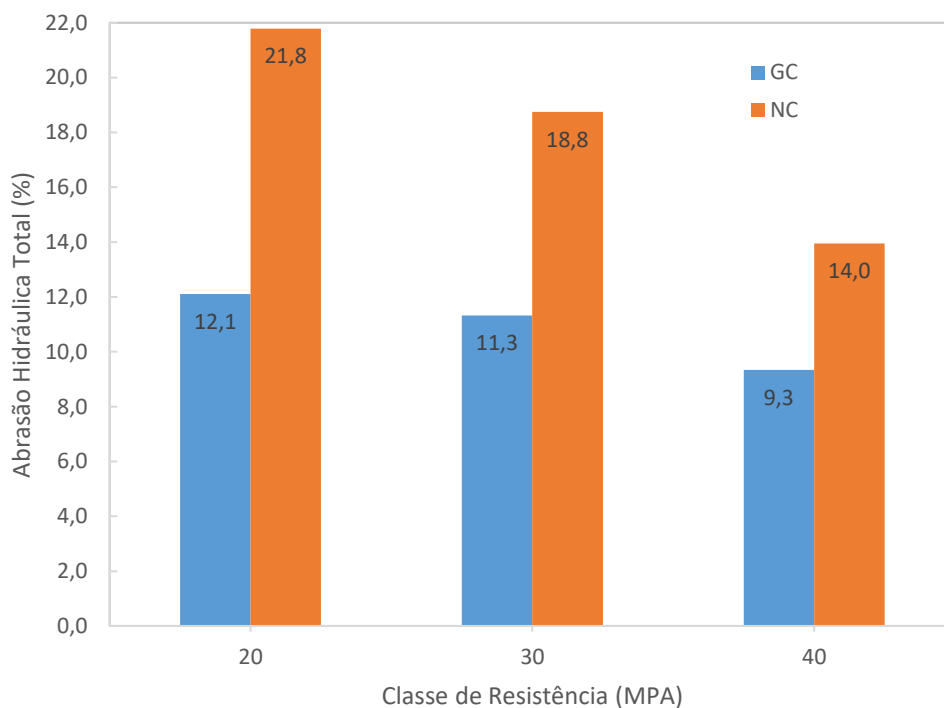


Fonte: Autor (2024)

4.10 COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISCOS NC x GC

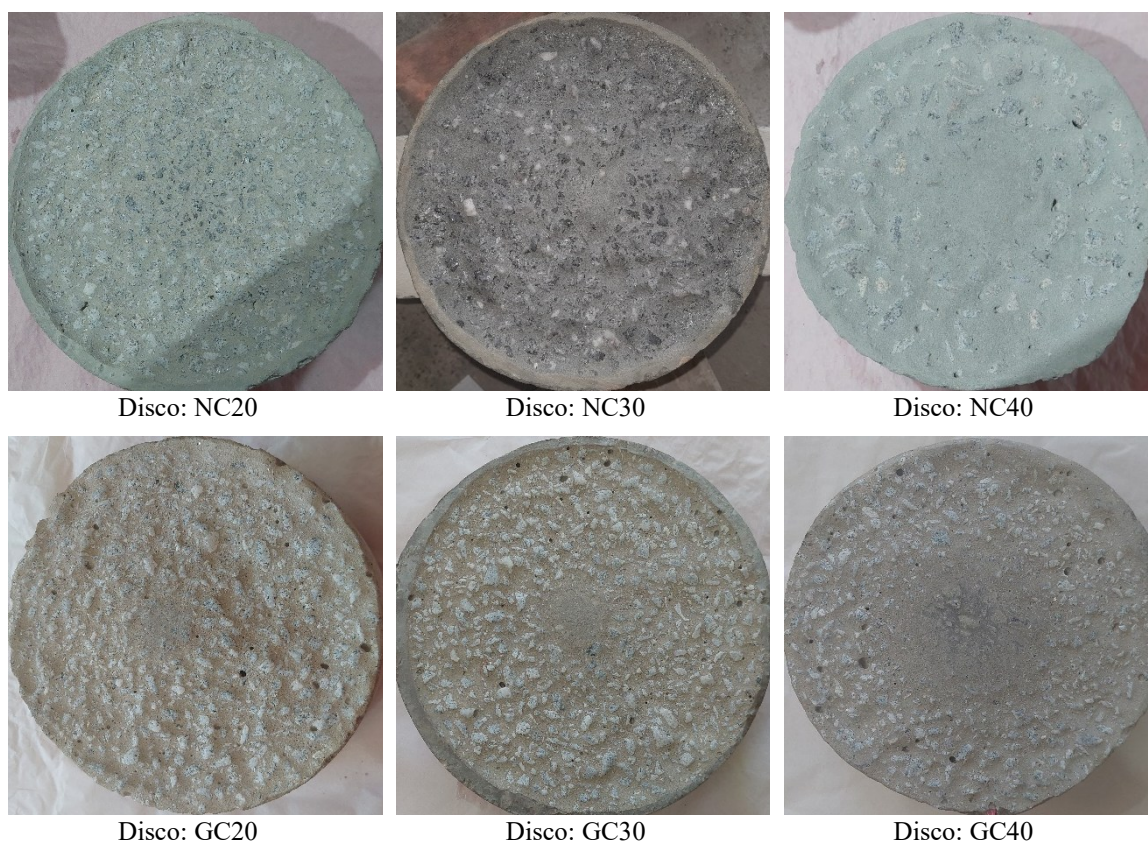
Como era esperado, o concreto geopolimérico teve melhor desempenho frente ao concreto convencional, ou seja, teve menores índices de abrasão hidráulica. A maior perda de material foi do NC20 com 2,80 kg, e a menor sendo do GC40 com 1,20 kg. O disco NC40 foi o que apresentou menor perda dentre o CC, e o GC20 com a maior perda do grupo geopolimérico sem fibras, a diferença entre ambos foi de 0,25 kg, pouco menor que a do GC20 e GC40 que foi de 0,35 kg. Este resultado ressalta a influência da classe de resistência a abrasão hidráulica do concreto.

Gráfico 9: Concreto convencional x concreto geopolimérico sem fibras



Fonte: Autor (2024)

Figura 70: Pós ensaio de abrasão hidráulica do NC x GC

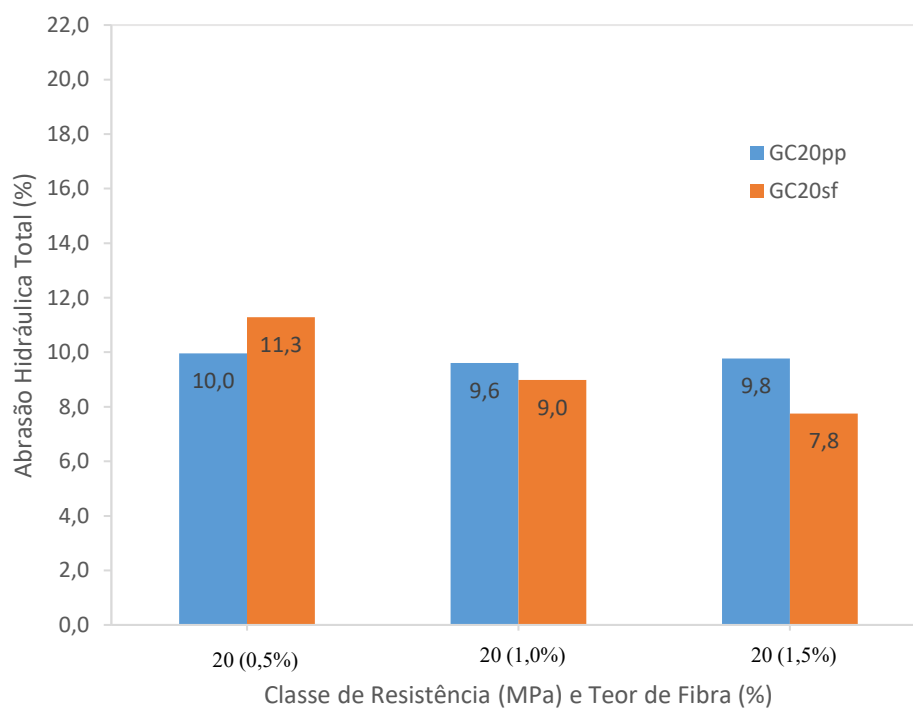


Fonte: Autor (2024)

4.11 COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISCOS GC20sf x GC20pp

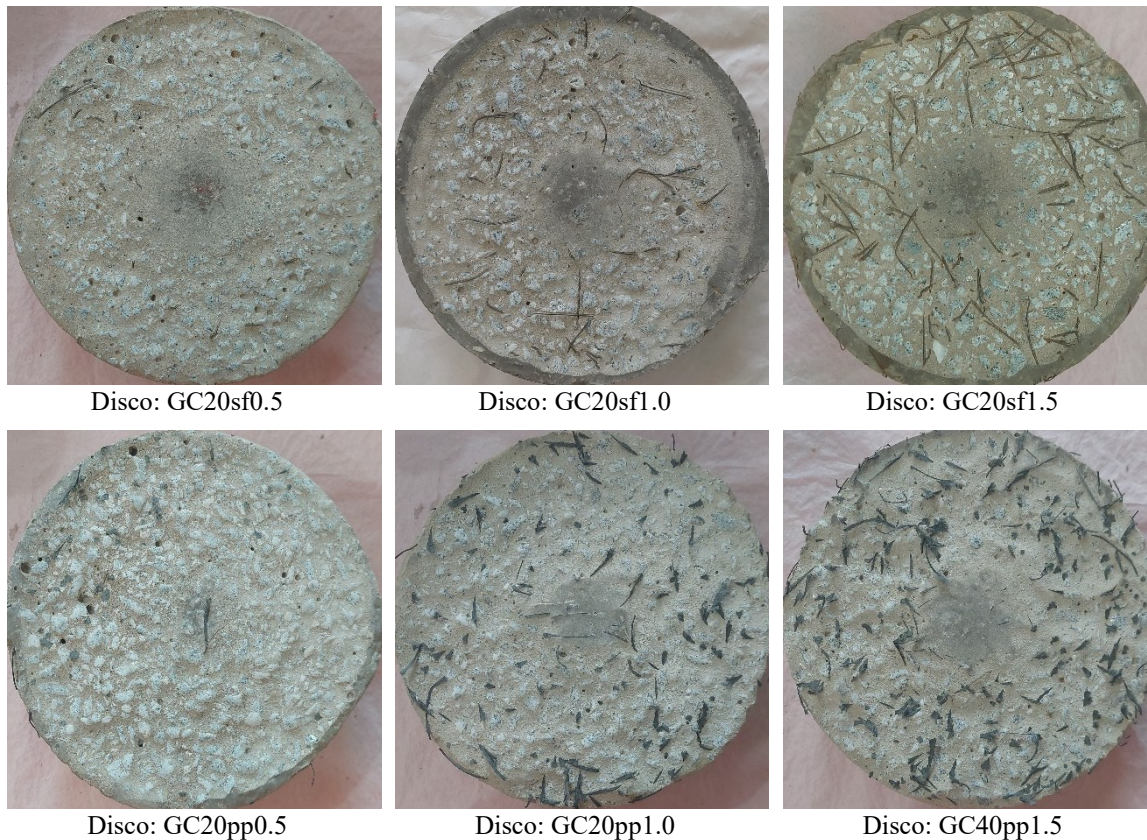
Fazendo esse comparativo, os resultados foram levemente semelhantes, o GC20sf1.0 teve a maior perda de material no primeiro período, seguido pelo GC20sf0.5 e GC20sf1.5, o geopolimérico com fibra, na primeira medição tiveram a maior perda de material, contudo a abrasão com o teor de 1,5% da fibra de aço a partir do segundo período foi o menor até o fim do ensaio. A curva do GC20sf0.5 foi semelhante à do GC20pp1.0, chegando a igualar no terceiro período de medição. O concreto com fibras de aço em 1,0 e 1,5% tiveram a menor perda total de material.

Gráfico 10: GC20sf x GC20pp



Fonte: Autor (2024)

Figura 71: Pós ensaio de abrasão hidráulica do GC20sf x GC20pp

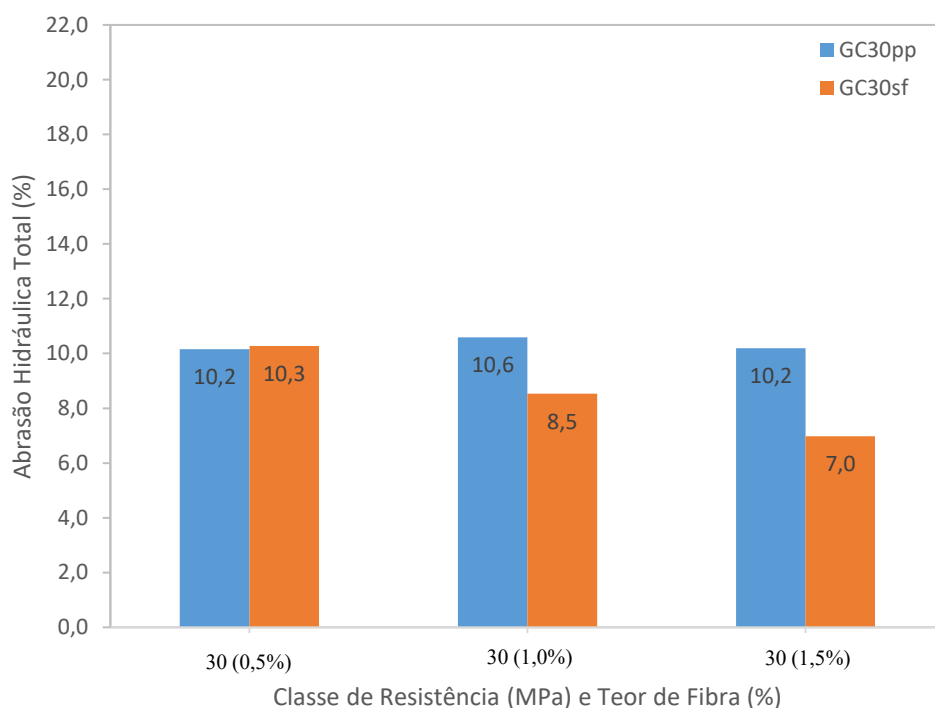


Fonte: Autor (2024)

4.12 COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISCOS GC30sf x GC30pp

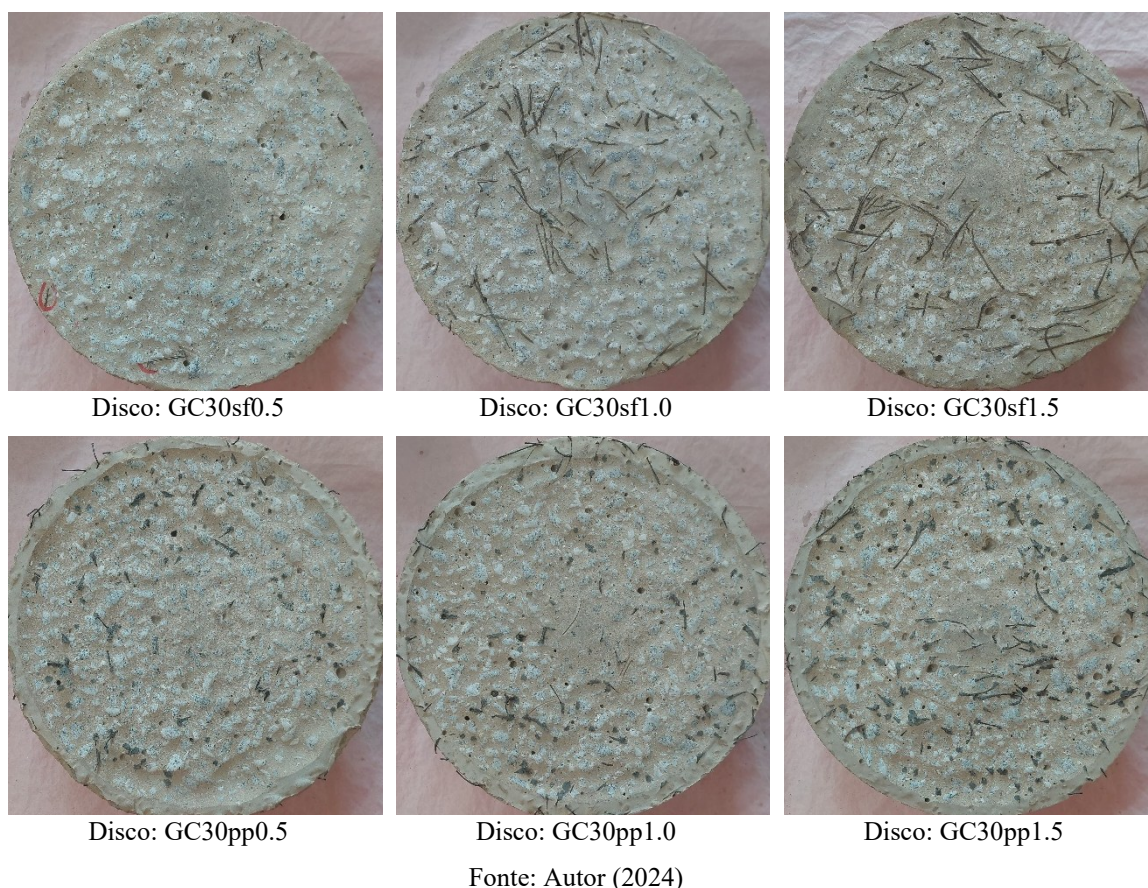
Neste comparativo, o concreto reforçado com fibra de aço teve a menor perda de material, com a fibra agindo para evitar a abrasão devido ao impacto das esferas abrasivas. O GC30sf0.5 teve desgaste semelhante ao GC30pp1.5 no primeiro período de medição, e assumindo a curva de maior desgaste abrasivo no segundo período. Os concretos GC30sf1.0 e GC30sf1.5 permaneceram como os mais resistentes às cargas abrasivas durante todo o ensaio. O grupo GC30pp tiveram as maiores perdas por abrasão quando comparado ao GC30sf.

Gráfico 11: GC30sf x GC30pp



Fonte: Autor (2024)

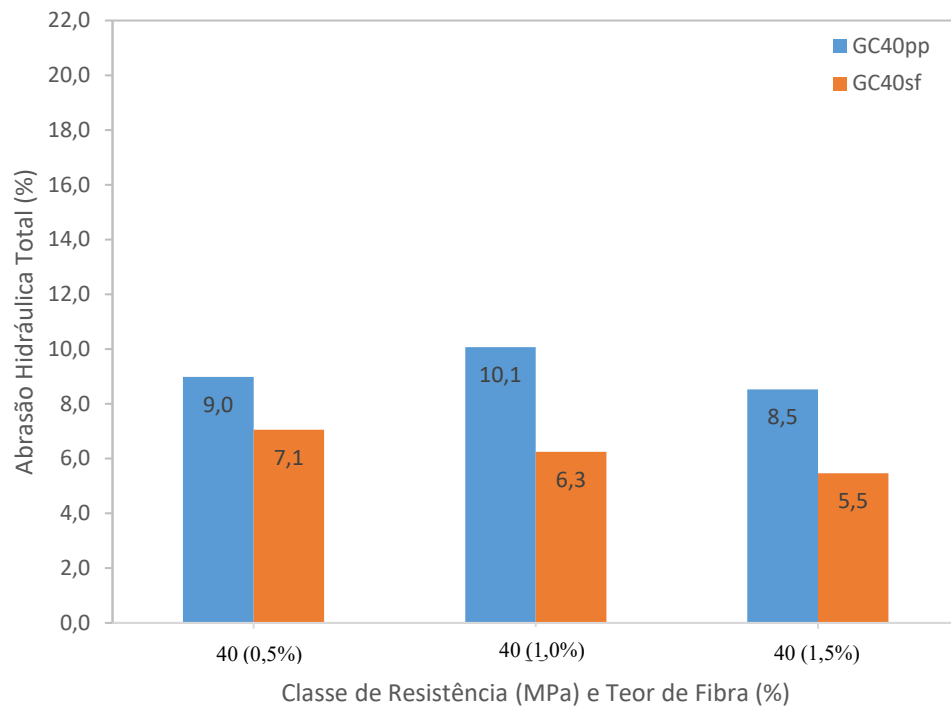
Figura 72: Pós ensaio de abrasão hidráulica do GC30sf x GC30pp



4.13 COMPARAÇÃO DA ABRASÃO HIDRÁULICA ENTRE OS DISCOS GC40sf x GC40pp

A abrasão hidráulica dos grupos de 40 MPa com adições de fibra de aço ou polipropileno tiveram resultados diferentes dos outros grupos comparados, onde o GC40sf teve a menor perda frente o GC40pp. A fibra de polipropileno não tem influência na resistência à abrasão hidráulica do concreto, contudo, a fibra de aço já age como uma tela protetiva, e ainda com a classe de resistência em 40 MPa o GC40sf1.5 foi o que menos abrasivou, com um total de 0,70 kg. No disco GCsf0.5 teve o maior índice do grupo, porém, distante em 0,20 kg do GC40pp1.5 que teve a menor abrasão do grupo com fibra de polipropileno.

Gráfico 12: GC40sf x GC40pp



Fonte: Autor (2024)

Figura 73: Pós ensaio de abrasão hidráulica do GC40sf x GC40pp

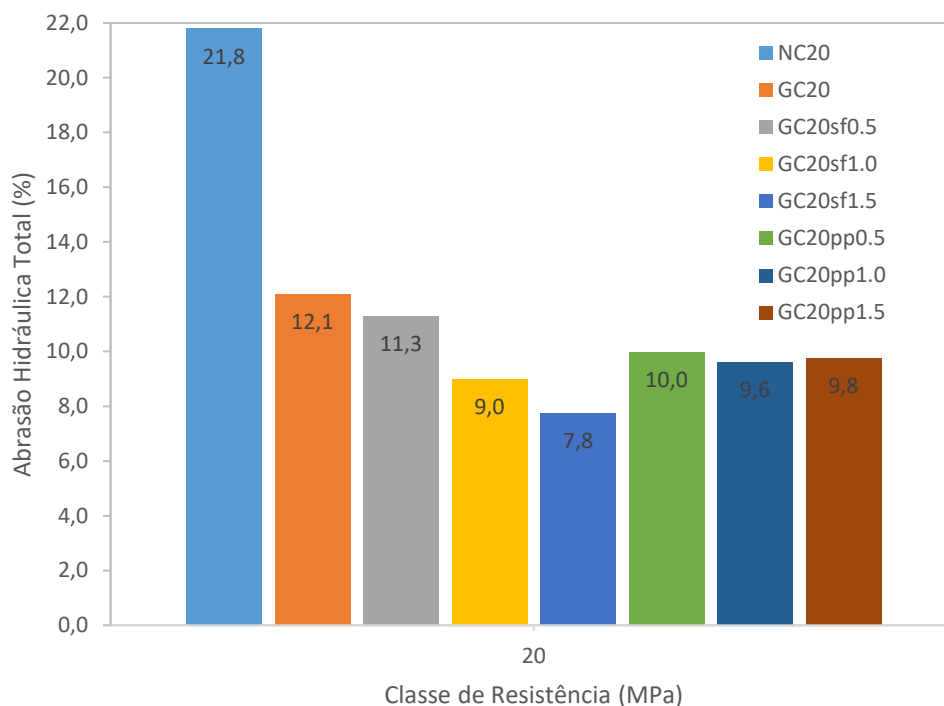


Fonte: Autor (2024)

4.14 COMPARATIVO ENTRE AS CLASSES DE RESISTÊNCIA

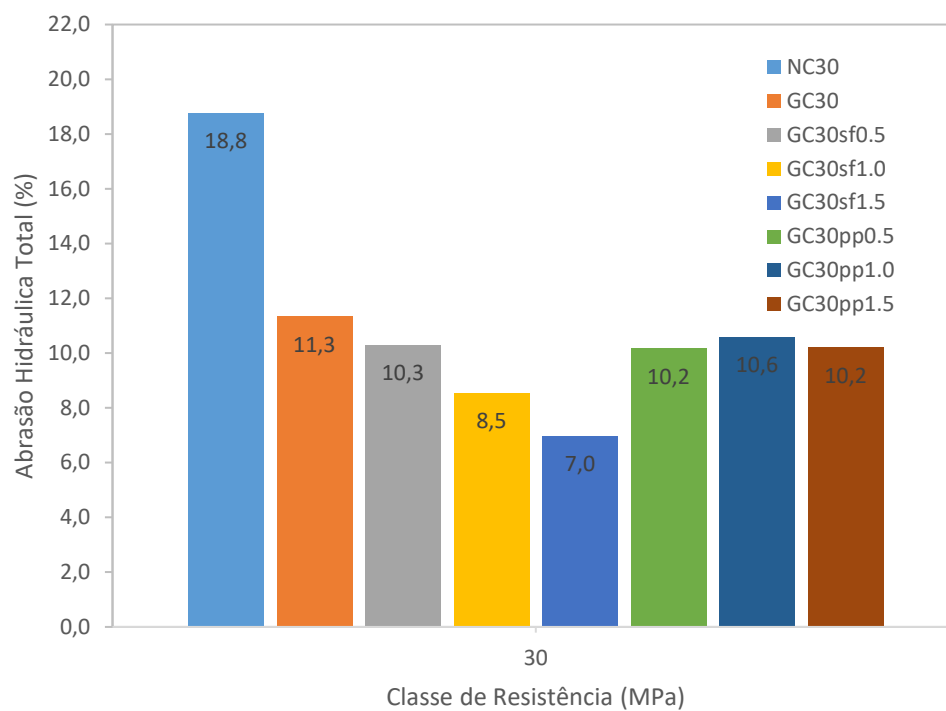
Comparando os resultados das classes de resistência dos concretos geopolimérico e convencional, foi corroborado a ideia de proporcionalidade entre a abrasão hidráulica e o f_c do concreto, onde são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a resistência menor a abrasão hidráulica. Os gráficos seguintes retratam, por meio do ensaio ASTM C1138, a abrasão hidráulica do concreto convencional e geopolimérico com classes de resistência de 20, 30 e 40 MPa. Os discos com f_c de 40 MPa foram os que menos sofreram com a abrasão hidráulica, em contrapartida os de 20 MPa foram os que mais abrasivaram.

Gráfico 13: Abrasão hidráulica dos discos com 20 MPa



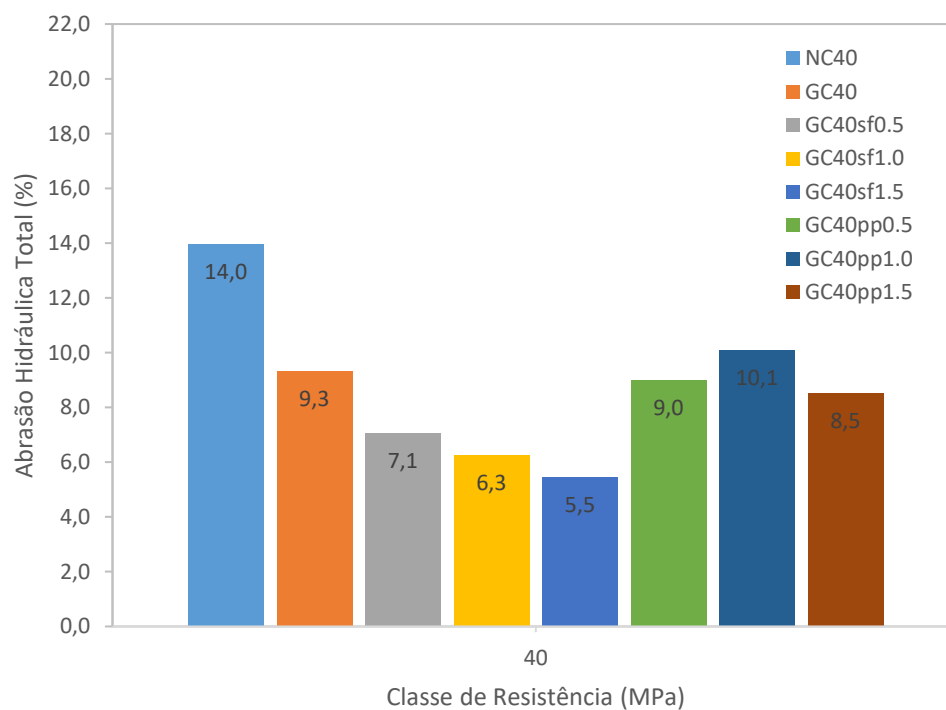
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 14: Abrasão dos discos com 30 MPa



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 15: Abrasão dos discos com 40 MPa

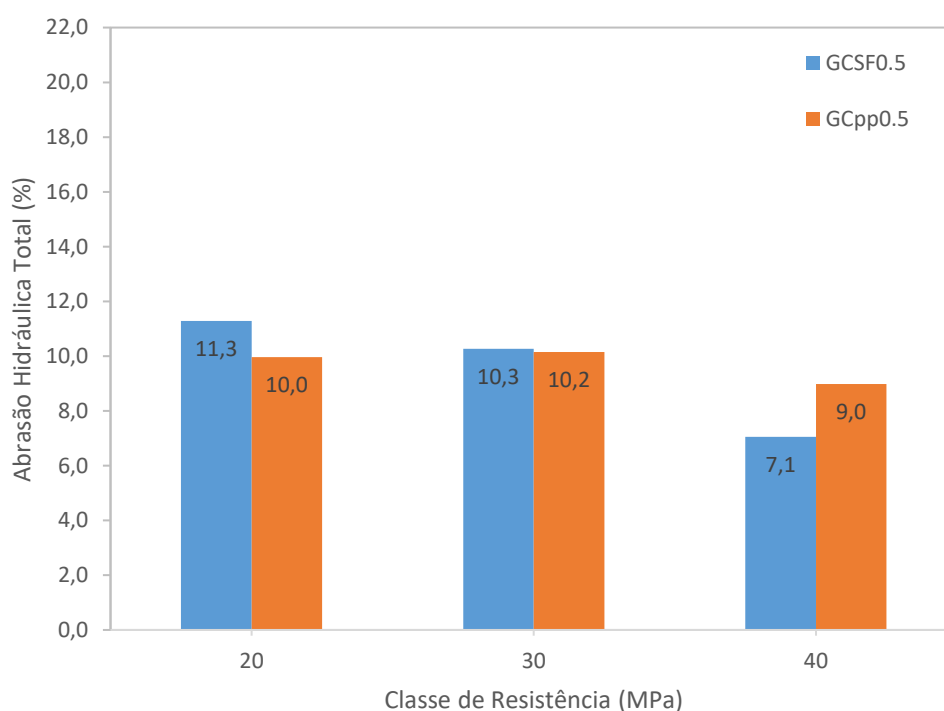


Fonte: Autor (2024)

4.15 COMPARATIVO PELO TEOR DE FIBRA

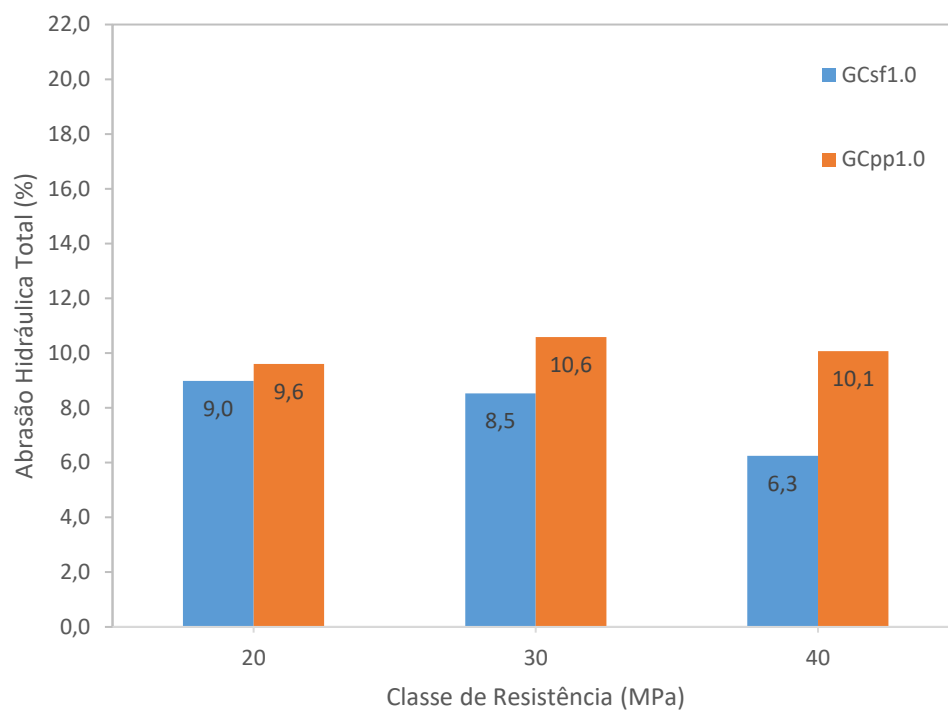
As fibras de aço desempenharam papel fundamental para evitar o desgaste da superfície do concreto pelas cargas abrasivas das esferas de aço que simularam o fluxo água-sólido. Agindo como uma malha protetora, contudo, essa diferença só foi notada, com adição de fibras de aço, a partir do teor de 1,0%, ou seja, o teor de 0,5% não foi suficiente para apresentar considerável reação contra o impacto das cargas abrasivas, com os resultados do concreto com teor de 0,5% próximos ao concreto sem adição da fibra. O mesmo se aplica as fibras de polipropileno, onde os diferentes teores de fibras com a mesma classe de resistência tiveram desgastes semelhantes onde as curvas se mantiveram próximas, desta forma não oferecendo resistência ao desgaste superficial do disco. É importante ressaltar o teor de 1,5% das fibras de aço que apresentaram os melhores desempenhos no ensaio de abrasão hidráulica.

Gráfico 16: Abrasão dos discos com 0,5% de fibra



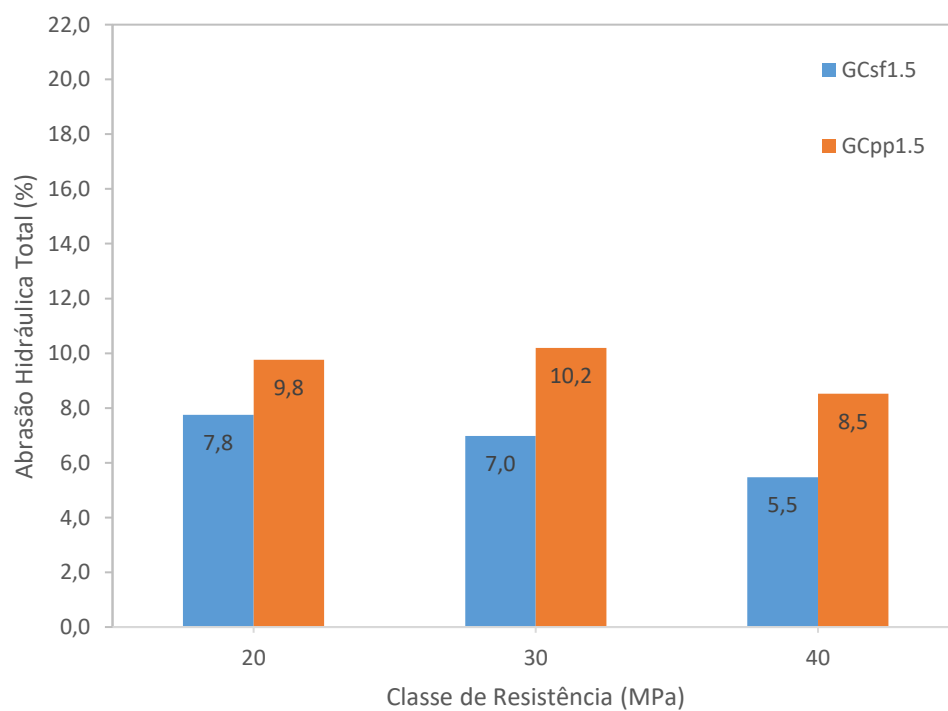
Fonte: Autor (2024)

Gráfico 17: Abrasão dos discos com 1,0% de fibra



Fonte: Autor (2024)

Gráfico 18: Abrasão nos discos com 1,5% de fibra



Fonte: Autor (2024)

4.16 PROFUNDIDADE ABRASIVADA

Para o cálculo da profundidade média abrasivada do concreto foi utilizado a Eq. 8 ($ADA_t = \frac{VL_t}{A}$) baseada na ASTM C1138. O concreto convencional foi o grupo que mais sofreu perda na profundidade chegando a quase 2,0 cm devido ao alto índice de abrasão, o concreto geopolimérico reforçado com fibras de polipropileno também sofreu considerável perda na profundidade devido a ineficiência da fibra em proteger a superfície do concreto ao ataque das cargas abrasivas. Em contrapartida, o concreto geopolimérico com fibra de aço com teores de 1,0 e 1,5% tiveram a menor perda na profundidade devido a proteção oferecida pelas fibras, a Tabela 25 mostra a profundidade abrasivada para cada disco.

Tabela 27: Profundidade abrasivada

| Disco | Peso (kg) | Abrasão total (kg) | Abrasão total (%) | ADAt (cm) |
|-----------|-----------|--------------------|-------------------|-----------|
| NC20 | 12,85 | 2,80 | 21,8 | 1,98 |
| NC30 | 12,8 | 2,40 | 18,8 | 1,69 |
| NC40 | 12,9 | 1,80 | 14,0 | 1,27 |
| GC20 | 12,80 | 1,55 | 12,1 | 1,09 |
| GC30 | 12,80 | 1,45 | 11,3 | 1,02 |
| GC40 | 12,85 | 1,20 | 9,3 | 0,85 |
| GC20sf0.5 | 12,85 | 1,45 | 11,3 | 1,02 |
| GC20sf1.0 | 12,80 | 1,15 | 9,0 | 0,81 |
| GC20sf1.5 | 12,90 | 1,00 | 7,8 | 0,71 |
| GC30sf0.5 | 12,85 | 1,32 | 10,3 | 0,93 |
| GC30sf1.0 | 12,90 | 1,10 | 8,5 | 0,78 |
| GC30sf1.5 | 12,90 | 0,90 | 7,0 | 0,64 |
| GC40sf0.5 | 12,75 | 0,90 | 7,1 | 0,64 |
| GC40sf1.0 | 12,80 | 0,80 | 6,3 | 0,56 |
| GC40sf1.5 | 12,80 | 0,70 | 5,5 | 0,49 |
| GC20pp0.5 | 12,75 | 1,27 | 10,0 | 0,90 |
| GC20pp1.0 | 12,80 | 1,23 | 9,6 | 0,87 |
| GC20pp1.5 | 12,80 | 1,25 | 9,8 | 0,88 |
| GC30pp0.5 | 12,80 | 1,30 | 10,2 | 0,92 |
| GC30pp1.0 | 12,75 | 1,35 | 10,6 | 0,95 |
| GC30pp1.5 | 12,75 | 1,30 | 10,2 | 0,92 |
| GC40pp0.5 | 12,80 | 1,15 | 9,0 | 0,81 |
| GC40pp1.0 | 12,90 | 1,30 | 10,1 | 0,92 |
| GC40pp1.5 | 12,90 | 1,10 | 8,5 | 0,78 |

Fonte: Autor (2024)

A NBR 6118 (ABNT, 2023), sugere um cobrimento nominal para estruturas de concreto em ambientes marinho entre 3,5 e 5,0 cm, considerando a perda entre 1,30 e 2,0 cm do concreto convencional fica provado que a utilização deste concreto em estruturas submersas pode oferecer riscos à segurança e durabilidade da estrutura. Contudo, o concreto geopolimérico oferece melhor resistência aos ataques de água-sólido, podendo ser melhorados reforçando o compósito com fibras de aço com teor a partir de 1,0%, neste caso o GC40sf1,5 teve perda na profundidade de 0,70 cm.

5 CONCLUSÃO

Para este estudo foi utilizado o método subaquático regido pela norma ASTM C1138, o método consiste em simular a erosão em condições naturais. Foram feitos testes no concreto convencional e geopolimérico com três classes de resistência que foram 20, 30 e 40 MPa, ao todo foram moldados 24 discos, sendo 21 de geopolimérico e 3 de concreto convencional, destes 21 discos apenas 18 tiveram adição de fibras com teores de 0,5, 1,0 e 1,5%. Com base nos ensaios efetuados, foi possível concluir que a classe de resistência do concreto influencia sobre a abrasão hidráulica da estrutura submersa, com os concretos de 20 MPa apresentando as maiores perdas de materiais durante o ensaio, e os de 40 MPa com a menor.

A fibra de aço desempenhou papel semelhante à de uma malha metálica na superfície do concreto, impedindo o impacto direto da carga abrasiva com o disco. Neste caso, a esfera atrita com a fibra e é repelida, em alguns discos é possível observar que ao final das 24h de ensaio a fibra está amassada ou curvada, o que corrobora esta afirmação. Em contrapartida, a macrofibra de polipropileno não teve o mesmo rendimento, pelo contrário, não apresentou nenhuma influência na resistência à abrasão hidráulica. Dito isto, não é indicado a utilização desta fibra em construção, reforço ou proteção de estruturas submersas.

Com este ensaio foi possível traçar um parâmetro com a classe de resistência e o índice de abrasão, ou seja, eles são inversamente proporcionais. Quanto maior a resistência mecânica do concreto, menor será a taxa de abrasão.

Neste caso, como o concreto geopolimérico apresenta propriedades mecânicas superior ao do convencional, é indicado sua utilização para construção, reforma ou reparos de estruturas submersas como pontes, vertedouros, barragens, entre outros. A melhoria na resistência do concreto de geopolimérico pode ser obtida com a diminuição do teor de água e o aumento da concentração de NaOH que favorecem a formação do geopolímero e o endurecimento do concreto, contudo, não pode ser inferior a 10 Mols, e em quantidades superiores a 16 M deve-se redobrar os cuidados, pois a reação química exotérmica que é liberada pela mistura do hidróxido de sódio e silicato de sódio aumenta junto com a molaridade.

Foi possível identificar que a fibra de aço com teor de 0,5% não apresenta resultados elevados, em alguns casos chegando a ser irrelevante sua presença na matriz do concreto para resistir à abrasão hidráulica, como foi possível perceber comparando o

GC30sf com GC30pp. Contudo, os volumes 1,0 e 1,5% alcançaram o rendimento esperado, sendo o GC40sf1.0 e GCsf1.5 os discos que melhor resistiram as cargas abrasivas.

O concreto geopolimérico (CGP) com melhor desempenho geral foi o GC40sf1.5 com abrasão total de 5,5% e o concreto convencional (CC) com melhor desempenho teve 14,0% de perda, em massa essa diferença foi de 1,10 kg. Dito isto o CGP é mais indicado que o CC. O pior desempenho entre os discos foram o GC20 e o GC20sf0.5. Desta forma, para todas as amostras testadas foi possível perceber que a taxa de abrasão depende principalmente do tipo de concreto, resistência, teor e tipo de fibra.

O objetivo principal desta pesquisa é atestar a resistência à abrasão hidráulica do concreto geopolimérico reforçado com fibra de aço ou polipropileno. A utilização do polipropileno já foi descartada, pois foi atestado por ensaio que não melhora a resistência à abrasão do concreto, e o geopolimérico com volume de fibras de aço em 1,0 e 1,5% foi o que melhor resistiu às cargas abrasivas, sendo a melhor opção para ser utilizada em estruturas de concreto submersas, seja para construção, reforma ou reparos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NM 51**: agregado graúdo – ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15530**: fibras de aço para concreto – requisitos e método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: edificações habitacionais – desempenho parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15864-1**: metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16935**. Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16940**. Concreto reforçado com fibra – Determinação da resistência à tração na flexão. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035**: agregado – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 035**: peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica dos solos. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

*AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 210R**: erosion of concrete in hydraulic structures. United States: ACI, 1998.*

*AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 223R**: shrinkage-compensating concrete. United States: ACI, 2010.*

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C131**: resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine. United States: ASTM, 2020.*

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C418**: abrasion resistance of concrete by sandblasting. United States: ASTM, 2020.*

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C944/C944M**: abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method. United States: ASTM, 2019.*

*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1138**: abrasion resistance of concrete (underwater method). United States: ASTM, 2019.*

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of making specimens for strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE

ABID, S. R., S. H. Ali, G. Murali, and T. S. Al-Gasham. 2021. “**A simple suggested approach to reduce the testing time of concrete surface abrasion using ASTM C1138.**” *Case Stud. Constr. Mater.* 15 (Dec).

ABID SR, Hilo AN, Ayoob NS, Daek YH. **Underwater abrasion of steel fiber-reinforced self-compacting concrete.** *Case Stud Constr Mater* 2019.

ABID, S. R. A; Hilo, Y.H. Daek, **Experimental tests on the underwater abrasion of engineered cementitious composites,** *Constr. Build. Mater.* 171 (2018) 779–792.

AKBARNEZHAD, A. Moussavi Nadoushani, Z.S. **A computational method for selection of optimal concrete recycling strategy,** *Mag. Concr. Res.* (2014).

AKBARNEZHAD, A. et al., **Effects of the parent concrete properties and crushing procedure on the properties of coarse recycled concrete aggregates,** *J. Mater. Civ. Eng.* 25 (12) (2013) 1795–1802.

ALEXANDER, M. (1985), **Towards standard test for abrasion resistance of concrete Report on a limited number of test studied with a critical evaluation,** *Materials and Structures*, 18, 106, pp. 297-307

ASKELAND, D; Wright, W.J. **Ciência e Engenharia dos materiais.** Cengage Learning, 2014.

AYOOB NS, Abid SR, Hilo A. **Water-impact abrasion of selfcompacting concrete.** *Mag Civil Eng* 2020.

BAKHAREV T. **Resistance of geopolymer materials to acid attack.** *Cem Concrete Res*2005;35:658–70

BAKHAREV T. **Durability of geopolymer materials in sodium and magnesiumsulfate solutions.** *Cem Concr Res* 2005;35:1233–46.

BORGES, Paulo Henrique Ribeiro et al. **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, p. 153-168, 2014.

CARVALHO, R.C; FILHO, J.R.F. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a ABNT NBR 6118:2014. 4º ed. São Paulo: EdUFSCAR, 2021.

CIFUENTES H; GARCIA F; MAESO O; MEDINA F. **Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC**, Construction and Building Materials.

DAVIDOVITS, J., Geopolymers and geopolymeric new materials. J Therm Anal 1989.

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

DAVIDOVITS, J., **Properties of geopolymer cements**. In: First international conference on alkaline cements and concretes. 1994. p. 131-149.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer cement. A review**. Geopolymer Institute, Technical papers, v. 21, p. 1-11, 2013.

DUXSON, P. *et al.*, **Geopolymer technology: the current state of the art**, J. Mater. Sci. 42 (9) (2007) 2917–2933.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto reforçado com fibras**. 2000. Boletim Técnico. Departamento de Engenharia de construção civil, São Paulo.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto Reforçado com Fibras**. 2011. Texto apresentado para obtenção do título de livre docência na escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Franco Brunetti. **Mecânica dos Fluidos**. 2º edição. São Paulo, Pearson, 2008.

FRAZÃO, E.B.; Paraguassú, A.B. (1998). **Materiais Rochosos para Construção. In: Geologia de Engenharia**, São Paulo: ABGE. p.331-342.

GUO, Yunlong, *et al.* "**Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles Abrasion test and image analysis.**" *Construction and Building Materials* 169 (2018): 414-424.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCOTT, S. C. **The surface chemistry of Bayer process solids: a review, Colloids and ‘surfaces A: physicochemical and engineering aspects**, n. 146, p.359-374, 1999.

HORSZCZARUK E, Brzozowski P. **Effects of fluidal fly ash on abrasion resistance of underwater repair concrete.** *Wear* 2017.

KÁTIA, A.R. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura.** 2013. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

KLIEGER, P., and Greening, N.R., “**Properties of Expansive Cement Concretes,**” **Proceedings, 5th International Symposium on the Chemistry of Cement** (Tokyo, 1968), Cement Association of Japan, Tokyo, 1969, pp. 439-456.

KRIVENKO, P. "**Why alkaline activation—60 years of the theory and practice of alkali-activated materials.**" *J. Ceram. Sci. Technol* 8.3 (2017): 323-334.

KRYZANOWSKI A, Mikos M, Susteric J, Ukrainczyk V, Planinc I. **Testing of concrete abrasion resistance in hydraulic structures on the Lower Sava River.** *Strojarski vestnik e J Mech Eng* 2012.

KRYZANOWSKI, A., Mikos, M., Susteric, J., Planinc, I., “**Abrasion Resistance of Concrete in Hydraulic Structures**”, *ACI Materials Journal*, Vol. 106, No. 4, pp. 349-356, 2009.

KUMAR, G. B., Sharma, U. K., “**Standard Test Methods for Determination of Abrasion Resistance of Concrete**”, International Journal of Civil Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 155-162, 2014.

LATORRE, PEDRO ELIZARDO VILLALBA. "**Estudo de argamassas para reparos de estruturas de concreto sujeitas à abrasão, em locais com umidade elevada.**" UFPR PPGECC. Dissertação de Mestrado (2002).

LI, J; Yin Bai; Yuebo Cai; Yeran Zhu. **Evaluation of concrete abrasion using traditional and high-speed Underwater methods.** J. Mater. Civ. Eng., 2023, 35(4): 04023030

LIMA, Fádia Simone Silva. **Utilização da lama vermelha e do resíduo caulínítico na produção de pigmento pozolânico para argamassas e concretos coloridos de cimento Portland.** Belém, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Pará, 2006. 180 p. Dissertação.

LIU, Jenny; MURPH, Diane. **Highly abrasion-resistant and long-lasting concrete.** 2019.

LIU, Y. W., Y. Y. Lin, and S. W. Cho. 2020. “**Abrasion behavior of steelfiber-reinforced concrete in hydraulic structures.**” Appl. Sci. 10 (16): 5562.

LIU, Y. W., Yen, T., Hsu, T. H., “**Abrasion Erosion of Concrete by Waterborne Sand**”, Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 1814–1820, 2006.

LIU, T. C. (1981), **Abrasion resistance of concrete**, *ACI Journal*, 78, 29, pp. 341-350.

LONGHI, Márlon Augusto. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo.** 2015.

MAUÉS, K.A.C. **Eficácia das fibras de aço no reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado sem estribos:** investigação experimental. 2019. Dissertação de Mestrado, pós-graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal do Pará.

MASCARECHAS, F.J. Cortezão, A.W. Júnior, A.P. **Patologias e inspeção de pontes de concreto armado: Estudo de caso da ponte Governador Magalhães Pinto.**

ENGEVISTA, V.21, n.2, p.288-302, maio 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª edição. São Paulo: Pini, 1994.

MESSA, Gianandrea Vittorio, et al. **"A combined CFD-experimental method for abrasive erosion testing of concrete."** Journal of hydrology and hydromechanics 66.1 (2018): 121-128.

MOHAMMED A. Al-Jaberi L., Shubber A. **Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Geopolymer Concrete Based Metakolin.** Journal of Engineering and Sustainable Development, 25 (2021), pp. 58-67.

NANDHINI KU, Jayakumar S, Kothandaraman S (2017) **Studies of the mechanical and structural properties of concrete with recycled concrete aggregates.** In: AEI 2017, pp 349–367.

NAVAS, J. Navarro-Gregori, G. Leiva Herdocia, P. Serna, E. Cuenca **An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres.** Constr. Build. Mater., 169 (2018), pp. 888-899.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto.** 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete.** Conference on Constitution and Building Technol International. p. 15. 2014.

OMRANIAN, Seyed Alireza & MOHAMMAD Reza Eftekhari. **A comprehensive study on the abrasion behavior of different types of fiber reinforced concrete in hydraulic structures.** Construction and Building Materials 426 (2024)

PINHO, J. R. **Avaliação de Sistemas de Reparo para o Problema de Abrasão do Concreto de Superfícies Úmidas em Usinas Hidrelétricas.** *Dissertação (mestrado)*. UFPA – Departamento de Engenharia Civil, 2006.

RAMUJEE K, Potharaju M. **Abrasion resistance of geopolymer composites.** *Procedia Mater Sci* 2014;6:1961e6.

RAMUJEE, Kolli, and M. PothaRaju. "**Mechanical properties of geopolymer concrete composites.**" *Materials today: proceedings* 4.2 (2017): 2937-2945.

RAMUJEE, K.; Potharaju.M, **Performance characteristics of Geopolymer concrete,** Indian concrete institute Journal (ICI), vol no 16, issue no 1, pp 30-36-.April-June,2015.

RANGAN, B.V. **Engineering properties of geopolymer concrete, Geopolym.:** Struct. Proc. Prop. Ind. Appl. (2009) 211–226.

REPETTE, Wellington L., et al. "**Uso de cinza pesada na produção de concreto autoadensável.**" *VI CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA (VI CITENEL), Fortaleza/CE.* 2011.

ROCHA, G.G.N. **Adições Minerais e suas Influências na Qualidade do Concreto.** Metacaulim do Brasil. II Congresso Nacional de Tecnologia do Concreto online, 2017.

ROSSI, C. R. C. **Concretos para reparo com agregados de lama vermelha sob abrasão hidráulica.** 2009. Trabalho de conclusão de curso. (Especialização em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

SAIDANI, Messaoud; Danah Saraireh; Michael Gerges. **Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture.** *Engineering Structures* 113 (2016): 328-334.

SANTOS, M. C. M. **Arrancamento de *studs* em concreto geopolimérico com fibras de aço**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2024.

SARTORTI, A.L; et al. **Torção em vigas de concreto reforçado com fibras**. Revista tecnológica – Universidade Estadual de Maringá, Paraná, v.29, 2020.

SAVINO, V. L; Lanzoni, A.M. Tarantino, M. Viviani, **An extended model to predict the compressive, tensile and flexural strengths of HPFRCs and UHPFRCs: Definition and experimental validation**, Composites Part B: Engineering,

SCRIBOT, C; Maherzi, W. M; Benzerzour. **A laboratory-scale experimental investigation on the reuse of a modified red mud in ceramic materials production** Constr. Build. Mater., 163 (2018), pp. 21-31.

SILVA FILHO, E. B. et al. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. Revista Matéria, v. 12, n. 2, 2007.

SOUSA, B. J. L. **Produção de Ligantes geopoliméricos a partir de misturas de resíduos ricos em silicoaluminatos: Resíduo da indústria de cerâmica vermelha, tijolos, telhas e metacaulim**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2020.

SOUZA, V. C; Ripper, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

SOUZA, J. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 2010. Tese. (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010

SINGH, B. Ishwarya, G. Gupta, M. Bhattacharyya, S.K. 2015 **“Geopolymer Concrete: A review of some recent developmenst”** Case Stud. Constr. Mater, 2015.

WIGHT, J.K. **Reinforced Concrete: mechanics and designe.** Pearson, 2016.