



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

ENGENHARIA DE PROCESSOS



TESE DE DOUTORADO

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DE DURABILIDADE EM
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS**

LARISSA SANTANA BATISTA

Campina Grande
Novembro de 2022

LARISSA SANTANA BATISTA

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DE DURABILIDADE EM
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Processos.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos.

Orientadores:

Prof. Dr. Osvaldo Soares da Silva

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza

Campina Grande
Novembro de 2022

B333e

Batista, Larissa Santana.

Efeitos da incorporação de resíduos da mineração nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade em pavimentos intertravados / Larissa Santana Batista. - Campina Grande, 2022.

151 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Osvaldo Soares da Silva, Prof. Dr. Leovegildo Douglas de Souza."

Referências.

1. Resíduos. 2. *Pavers*. 3. Concreto. 4. Durabilidade. I. Silva, Osvaldo Soares da. II. Souza, Leovegildo Douglas de. III. Título.

CDU 622.17(043)

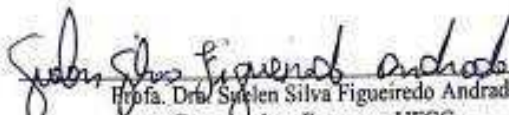
LARISSA SANTANA BATISTA

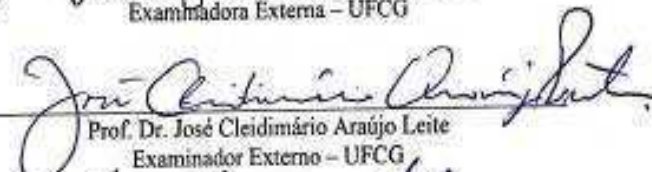
**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E DE DURABILIDADE EM
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de processos.

Aprovado em 25 de novembro de 2022.

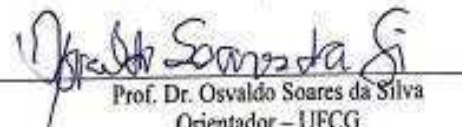
Banca Examinadora:


Prof. Dra. Suelen Silva Figueiredo Andrade
Examinadora Externa – UFCG


Prof. Dr. José Cleidimário Araújo Leite
Examinador Externo – UFCG


Prof. Dr. Jorge José Alves Martins
Examinador Externo – UFCG


Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Examinador Interno – UFCG


Prof. Dr. Osvaldo Soares da Silva
Orientador – UFCG


Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza
Orientador – UFCG

A Deus, Criador de tudo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda força, fé e coragem. Por sempre me dá a certeza de que no final tudo vai dar certo. Por conduzir meus passos aonde quer que eu vá, sempre me protegendo e cuidando de mim com tanto zelo.

À minha querida mãe, por todo apoio, torcida e amor de sempre. Mãe, te amo infinitamente, obrigada por sempre fazer além do que estava ao seu alcance por mim. A minha irmã, Chris, que me ajudou em vários momentos, auxiliando-me, incentivando-me, apoiando-me. Vocês são as mulheres da minha vida.

Ao meu esposo, companheiro de vida, de concretos e ensaios. Que, mesmo sem ser da área, sempre esteve disposto a me ajudar, que participou de todos os ensaios, que se fez presente.

Ao meu pai e irmãos, por mesmo distantes me apoiarem, serem incentivo e torcerem por mim. Amo muito vocês.

Aos meus filhos amados, por entenderem as muitas ausências e renúncias. Mamãe ama vocês incondicionalmente.

Ao meu paciente orientador, professor Osvaldo Soares, sempre com sorriso no rosto, otimista de que tudo daria certo, obrigada por me conceder total autonomia na pesquisa. Obrigada por tanto, meu amigo e orientador professor Leovegildo, por toda disponibilidade, apoio e irmandade. Sei que você sempre torce por mim.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), pelo auxílio nos ensaios, na pessoa do professor Kennedy, Jadilson, Artur, Daniel. Obrigada também ao professor Milton, por me ceder o Laboratório de Estruturas para composição dos *pavers*.

Ao Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Pernambuco – Caruaru, pela disponibilidade. Ao Laboratório de Hidráulica da UFCG, especialmente aos professores Carlos Galvão e Ismael. Ao Laboratório de Tecnologia dos Materiais (LTM) da UAEMA da UFCG, em especial ao professor Gelmires.

Aos meus alunos Adriano, Willy, Jonatas, Danylo, Adla, Thayse e Jennifer, por todo apoio em todo esse processo. A minha amiga Andreia de Melo, pela revisão textual e pelo apoio de sempre.

BATISTA, Larissa Santana. **Efeitos da Incorporação de Resíduos da Mineração nas Propriedades Físicas, Mecânicas e de Durabilidade em Pavimentos Intertravados.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande: Brasil, 2022.

RESUMO

O setor da mineração no Brasil é de suma importância para o país, possuindo grande valor econômico e social, por outro lado, é um dos setores que mais geram resíduos, causando impactos ambientais no ar, na água, poluindo os recursos hídricos superficiais, subterrâneos e o solo. A gestão adequada desses resíduos por meio de sua utilização na construção civil, mais especificamente em materiais alternativos, é uma das formas de minimizar esses impactos no meio ambiente. Neste trabalho, tem-se por objetivo avaliar os comportamentos físico, mecânico e de durabilidade de *pavers* com adição de resíduos da mineração, reutilizando-os em concretos como substituição do agregado miúdo utilizados em pavimentos intertravados. Inicialmente, foi realizada a caracterização física, química e mineralógica dos resíduos e dos materiais convencionais (areia e pó de pedra), bem como a caracterização do agregado graúdo e do aglomerante, conforme as normativas da ABNT. Em seguida foi realizado o estudo do traço convencional, pelo método de dosagem experimental, que serviu de base comparativa quando da substituição parcial dos resíduos a partir dos resultados dos ensaios de RCS e absorção. As proporções escolhidas para incorporação do resíduo foram determinadas com base no planejamento experimental e análise de superfícies de resposta, levando ao estudo do comportamento dos *pavers* quanto à durabilidade. Verificou-se que os resíduos da scheelita, pó de quartzo e o ROB tiveram comportamentos semelhantes na caracterização física, sendo substituídos em sua totalidade pelos agregados miúdos convencionais com os resultados satisfatórios de resistência, durabilidade e viabilidade técnica e econômica do concreto estudado para fins da pavimentação intertravada.

Palavras-chave: *Pavers*. Resíduos. Concreto. Durabilidade.

BATISTA, Larissa Santana. **Effects of the Incorporation of Mining Residues on Physical, Mechanical and Durability Properties in Interlocking Pavements.** Doctoral Thesis, Postgraduate Program in Process Engineering, Federal University of Campina Grande: Brazil, 2022.

ABSTRACT

The mining sector in Brazil is of paramount importance to the country, having great economic and social value, as it is responsible for generating direct and indirect jobs, thus contributing to its development. On the other hand, it is one of the sectors that most generate tailings, causing environmental impacts, in the air, in the water, polluting surface and underground water resources, and in the soil, in addition to proliferating its erosion and contamination processes. The proper management of these residues through their use in civil construction, more specifically in alternative materials, is one of the ways to minimize these impacts on the environment. In this sense, this work aims to propose an appropriate destination for mining waste, reusing them in concrete as a partial replacement of fine aggregate used in interlocking. First, the physical, chemical and mineralogical characterization of the residues and conventional materials will be carried out, as well as the characterization of the coarse aggregate and the binder according to ABNT regulations. Then, the study of the conventional trace will be carried out, using the experimental dosage method, which will serve as a comparative basis when the partial replacement of residues from the results of the RCS and absorption tests. The proportions chosen for incorporating the waste surfaces will be based on experimental planning and analysis of response. Having defined the appropriate proportions of waste based on the RCS and absorption, the behavior of *pavers* will be analyzed for durability. With the results, the performance, resistance and technical and economic viability of the studied concrete will be analyzed for the purposes of interlocking paving.

Keywords: *Pavers*. Waste. Concrete. Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Foto da scheelita.	20
Figura 2 - Pavimento intertravado de pedras talhadas em forma de prisma regular.	30
Figura 3 - Formatos de peças de concreto.	31
Figura 4 - Seção transversal pavimento intertravado.	32
Figura 5 - Distribuição das tensões nas camadas do pavimento intertravado.	33
Figura 6 - Formatos das peças de concreto	35
Figura 7 - Tipos de movimento impedidos no travamento: a. Vertical; b. Rotação; c. Horizontal.	35
Figura 8 - Superfície de resposta para três componentes	52
Figura 9 - Variação da resposta para três componentes	52
Figura 10 - Fluxograma da Metodologia.	60
Figura 11 - Fatores para determinação do traço convencional.	63
Figura 12 - Fôrmas retangulares em PVC utilizada nas moldagens.	64
Figura 13 - Peças com acabamento da face superior.	65
Figura 14 - Peças após capeamento.	65
Figura 15 - Peças em cura submersa.	66
Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão.	67
Figura 17 - Determinação da absorção de água dos <i>pavers</i>	68
Figura 18 - Fluxograma do planejamento experimental.	69
Figura 19 - Pontos de estudo na superfície.	70
Figura 20 - Ensaio de resistência à tração na flexão.	75
Figura 21 - Esquema de medição dos blocos para o ensaio de resistência à tração na flexão.	75
Figura 22 - Ensaio de desgaste por abrasão.	77
Figura 23 - Equipamento <i>Basic Hydrology System</i> (BHS)	80
Figura 24 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos.	84
Figura 25 - DRX dos agregados miúdos convencionais.	88
Figura 26 - DRX do resíduo da scheelita.	88
Figura 27 - Curva granulométrica do agregado graúdo.	92
Figura 28 - Resistência a compressão dos traços estudados.	94

Figura 29 - Resistência à compressão dos traços estudados sob análise do desvio padrão.....	95
Figura 30 - Absorção do Traço 1:3.....	97
Figura 31 - Absorção do Traço 1:4.....	98
Figura 32 - Absorção do Traço 1:5.....	98
Figura 33 - Absorção média dos traços estudados.	99
Figura 34 - Superfície de resposta da scheelita.	102
Figura 35 - Curva de dispersão entre os valores observados e os valores estimados da scheelita.	103
Figura 36 - Superfície de resposta do quartzo.	106
Figura 37 - Moldagem do concreto com utilização do ROL.....	109
Figura 38 - Superfície de resposta do ROL.	110
Figura 39 - Superfície de resposta do ROB.....	113
Figura 40 - RCS dos <i>pavers</i> convencionais e dos blocos com resíduos.....	115
Figura 41 - Índice de Vazios e Massa Específica para os <i>pavers</i> sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.....	117
Figura 42 - Capilaridade dos <i>pavers</i> sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.	119
Figura 43 - Altura da ascensão capilar dos <i>pavers</i> sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.	120
Figura 44 - Altura da ascensão capilar do CONV.....	121
Figura 45 - Desgaste por abrasão para os <i>pavers</i> sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.	121
Figura 46 - Leituras do ensaio e as devidas marcações para cada <i>paver</i>	123
Figura 47 – RCS dos <i>pavers</i> no envelhecimento natural.....	124
Figura 48 - Resistência à Tração dos traços estudados.	126
Figura 49 - Análise das variações de massa para o CONV	127
Figura 50 - Análise das variações de massa para a SH	128
Figura 51 - Análise das variações de massa para o ROB	128
Figura 52 - Análise das variações de RCS.	130
Figura 53 - Análise das variações de RCS para o ensaio de ataque de sulfato	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de pontos em um planejamento de rede simplex	53
Tabela 2 - Traços estudados no traço convencional.	63
Tabela 3 - Fator multiplicativo p.	66
Tabela 4 - Coeficiente de Student.	67
Tabela 5 - Índice de finura e massa específica do cimento CP V ARI.....	82
Tabela 6 - Parâmetros físicos dos agregados miúdos.	86
Tabela 7 - Parâmetros físicos do agregado graúdo.	93
Tabela 8 - Resistência à compressão dos traços estudados sob análise consumo de cimento.	96
Tabela 9 - Valores do traço de referência.	100
Tabela 10 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto.	101
Tabela 11 - Análise da Variância.	103
Tabela 12 - Absorção para o percentual de 100% do resíduo da scheelita.	104
Tabela 13 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto com o resíduo de quartzo.	105
Tabela 14 - Absorção para o percentual de 100% do resíduo de quartzo.	107
Tabela 15 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto com o ROL.	108
Tabela 16 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto com o ROB.	112
Tabela 17 - Absorção para o percentual de 100% do resíduo de ROB.	114
Tabela 18 - Variações estatísticas das RCS para atividade pozolânica.	116
Tabela 19 - Variações estatísticas das leituras das cavidades.	122
Tabela 20 - Variações da RCS nos períodos avaliados.	125
Tabela 21 - Variações estatísticas das leituras das cavidades.	131
Tabela 22 - Variação das massas no período inicial e aos 42 dias.	133
Tabela 23 - Preço do concreto para 1m ³	136
Tabela 24 - Comparativo do custo/benefício do concreto com resíduo	137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tolerância de dimensões em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.	38
Quadro 2 - Tolerância de absorção de água em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.	39
Quadro 3 - Comparativo de resistência à compressão em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.	40
Quadro 4 - Resistência a abrasão em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.	42
Quadro 5 - Parâmetros em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.	43
Quadro 6 - Ensaio do aglomerante e suas respectivas normas para a realização de cada etapa.	61
Quadro 7 - Ensaio dos agregados miúdos e suas respectivas normas.	61
Quadro 8 - Ensaio do agregado graúdo e suas respectivas normas.	62
Quadro 9 - Distribuição do experimento.	71
Quadro 10 - Ensaio e suas respectivas normas para a realização de cada etapa.	71
Quadro 11 - Moldagens de CP para cada ensaio de durabilidade.	72
Quadro 12 - Distribuição dos Cp.	78
Quadro 13 - Ensaio dos agregados miúdos.	85
Quadro 14 - EDX dos agregados miúdos.	89
Quadro 15 - Análise Pozolânica dos agregados miúdos.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba
ARC	Agregados de Resíduo de Concreto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BHS	<i>Basic Hydrology System</i>
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CONV	Convencional
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios-X
EDX	Espectroscopia de Raios-X
FRX	Fluorescência por Raio-X
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICPI	<i>Installer Technician Certificate Course</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Tereftalato de Polietileno
PVC	Policloreto De Vinila
RBRO	Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais
RCS	Resistência a Compressão Simples
RGM	Resíduo de Corte de Granitos e Mármore
ROB	Rochas Ornamentais Britado
ROL	Rochas Ornamentais Lama
RSRO	Resíduo de Serragem de Rochas Ornamentais
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Resíduos da Mineração	18
2.1.1 Scheelita	19
2.1.2 Quartzo	23
2.1.3 Rochas Ornamentais	26
2.2 Pavimentos Intertravados	29
2.2.1 Breve Histórico dos Pavimentos Intertravados	30
2.2.2 Conceitos básicos	32
2.2.3 Normatização Técnica para Pavers.....	36
2.2.3.1 Regularidades das dimensões.....	37
2.2.3.2 Absorção da água.....	39
2.2.3.3 Resistência à compressão.....	39
2.2.3.4 Resistência à Abrasão.....	41
2.2.3.5 Outros parâmetros.....	42
2.3 Concreto Sustentável	44
2.4 Durabilidade do Concreto	45
2.5 Planejamento de Experimentos	50
2.6 Estado da Arte – Pavimento intertravado com adição de Resíduos	53
3 METODOLOGIA	57
3.1 Material	57
3.1.1 Cimento	57
3.1.2 Água	57
3.1.3 Agregado Graúdo	58
3.1.4 Agregado Miúdo.....	58
3.1.4.1 Areia	58
3.1.4.2 Pó de Pedra	58
3.1.4.3 Resíduo de scheelita	58
3.1.4.4 Resíduo de pó de quartzo	59
3.1.4.5 Resíduo de rochas ornamentais da lama abrasiva (ROL)	59

3.1.4.6 Resíduo de rochas ornamentais de material britado (ROB).....	59
3.2 Métodos	59
3.2.1 Seleção e Caracterização dos Materiais.....	61
3.2.1.1 Caracterização do Aglomerante.....	61
3.2.1.2 Caracterização dos Agregados	61
3.2.2 Cálculo do traço convencional	62
3.2.2.1 Moldagens dos corpos de prova.....	64
3.2.2.2 Ensaio de resistência à compressão.....	66
3.2.2.3 Ensaio de absorção de água.....	67
3.2.3 Planejamento Experimental e Análises de Superfícies de Resposta	69
3.2.4 Durabilidade com traços de melhor desempenho.....	71
3.2.4.1 Avaliação de Atividade Pozolânica.....	72
3.2.4.2 Índice de vazios e Massa específica	73
3.2.4.3 Absorção por capilaridade.....	73
3.2.4.4 Ensaio de Resistência à tração na flexão.....	74
3.2.4.5 Ensaio de Desgaste por Abrasão	76
3.2.4.6 Ensaio de Suscetibilidade ao Ataque por Sulfatos	77
3.2.4.7 Ensaio de Chuva Dirigida	79
3.2.4.8 Ensaio de Envelhecimento Natural	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1 Caracterização dos Materiais	82
4.1.1 Aglomerante	82
4.1.2 Agregado Miúdo.....	83
4.1.2.1 Caracterização Física	83
4.1.2.2 Caracterização Química e Mineralógica.....	87
4.1.3 Agregado Graúdo	92
4.2 Cálculo do Traço Convencional	93
4.2.1 Resistência à Compressão	94
4.2.2 Absorção.....	97
4.3 Planejamento Experimental	100
4.3.1 Scheelita	101
4.3.2 Pó de Quartzito	104

4.3.3 ROL	108
4.3.4 ROB	111
4.4 Durabilidade dos <i>Pavers</i>	114
4.4.1 Atividade Pozolânica	115
4.4.2 Índice de Vazios, Massa específica e Capilaridade	117
4.4.3 Desgaste à Abrasão	121
4.4.4 Envelhecimento Natural	124
4.4.5 Resistência à Tração	125
4.4.6 Chuva Dirigida.....	127
4.4.7 Ataque à Sulfato	131
4.5 Análise de Viabilidade Econômica	135
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
REFERÊNCIAS	142

|

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), a extração de recursos naturais mais que triplicou entre 1970 e 2017 e continua em ascensão. O uso de minerais não metálicos como a areia e a argila foi de 9 bilhões de toneladas para 44 bilhões de toneladas no mesmo período, enquanto o uso de metálicos cresceu na faixa de 2,7% ao ano. A projeção de aumento é de 110% na extração de recursos naturais para o período de 2015-2060, caso mantenha o uso e gerenciamento dos recursos atuais e sem qualquer aplicação de ações rumo ao desenvolvimento sustentável (ORBLE, 2019).

Paralelo a esta problemática, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2022), no primeiro semestre de 2022, o setor mineral foi decisivo para manter positivo o saldo da balança comercial brasileira. O saldo do setor é responsável por US\$ 49,8 bilhões, o equivalente à 80,0% do saldo da balança comercial brasileira, mesmo em meio à crise provocada pela pandemia do novo coronavírus.

Nesse sentido, é perceptível que mesmo estando dentro dos parâmetros legais, as atividades de mineração ainda geram grandes impactos negativos. Os resíduos que surgem a partir das atividades acabam ocupando grandes espaços, causando poluição visual, poluição sonora, emissão de particulados e danos à saúde. Assim, se faz necessária a realização de uma gestão adequada para esses resíduos, que os destinem para setores em que possam ser utilizados e aproveitados, como forma alternativa de diminuir os efeitos provocados pela mineração (ANDRADE *et. al.*, 2019).

Assim, a partir de uma gestão adequada, surge possibilidade de se ofertar materiais alternativos com o objetivo de alcançar o equilíbrio entre as questões econômicas, ambientais e tecnológicas. Dessa forma, pode haver o avanço de um sistema adequado e seguro, além de uma redução significativa de resíduos que seriam descartados no meio ambiente.

É nesse sentido que o aproveitamento de resíduos de mineração apresenta-se como solução viável perante às necessidades de alguns processos produtivos dos setores industriais, pois pode viabilizar a conservação da qualidade, gerando produtos novos com características semelhantes ou produtos distintos e adequados do ponto de vista ambiental.

Dentre as aplicações para os resíduos da mineração está o seu uso para a fabricação de concretos, seja como adição e/ou substituição, colaborando com a sustentabilidade, uma vez que os rejeitos, em sua grande parte, são armazenados em locais não indicados para este fim.

Contudo, é indispensável que esse composto se torne uma nova matéria-prima sustentável e satisfatória no âmbito técnico, sendo necessária uma análise rigorosa de desempenho, como também prolongada e repetitiva, de modo a demarcar os limiares desses materiais e não propiciar respostas insatisfatórias no decorrer de sua vida útil (PETRY *et. al.*, 2017).

Por outro lado, a infraestrutura de transportes é fator de extrema relevância para promover o desenvolvimento socioeconômico, pois permite a movimentação de cargas e pessoas, facilitando o acesso a mercados, a serviços de educação, lazer e saúde. Ou seja, a qualidade desse sistema é também um indicador de desenvolvimento e qualidade de vida de um país (ANDRADE *et. al.*, 2019).

Nos dias atuais, os pisos intertravados de concreto são utilizados em grandes proporções para pavimentações, podendo-se citar os parques e jardins, passeios públicos, pontos de ônibus, ruas e avenidas, terminais de portos e aeroportos, estradas, estacionamentos, entre outros. Desde os anos 70 eles vêm sendo amplamente utilizados no Brasil devido às suas vantagens relacionadas às características de resistência, durabilidade, absorção, além de vantagens tecnológicas com sua fácil aplicação e manuseio (ALMEIDA, 2016).

Logo, analisar a viabilidade do resíduo da mineração como agregado na produção de concreto, reduzindo o descarte desse material no meio ambiente e, conseqüentemente, diminuindo a necessidade de exploração do agregado miúdo natural utilizado na produção de concreto para a fabricação de blocos intertravados utilizados na pavimentação, se torna uma possível solução para o cenário exposto.

Assim, parte-se da hipótese que os resíduos da mineração podem ser incorporados, como agregados ou adições, ao concreto para fins de blocos intertravados, mantendo ou melhorando suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, surgindo como possibilidade de material alternativo na pavimentação. Em caso de confirmação da hipótese, tem-se a potencial diminuição de resíduos da mineração expostos na natureza, o desenvolvimento de um processo para seu aproveitamento e a redução do consumo dos agregados naturais retirados do meio ambiente.

Partindo desse pressuposto, o estudo tem valor científico e socioambiental por buscar desenvolver uma técnica que viabilize a adição e/ou substituição de resíduos da mineração ao concreto. Espera-se que com isso haja o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas,

tendo como resultado a possibilidade seu emprego em pavimentações, além de proporcionar uma forma de reutilização desse resíduo, diminuindo os danos ambientais e contribuindo para o país desenvolver sustentavelmente, uma bandeira importantíssima para a manutenção da vida.

Nessa perspectiva, constitui-se como objetivo geral da pesquisa: avaliar os comportamentos físico, mecânico e de durabilidade de *pavers* com adição de resíduos da mineração, reutilizando-os em concretos como substituição do agregado miúdo utilizados em pavimentos intertravados. Na sequência, como forma de alcançar o objetivo geral estabelecido, tem-se como objetivos específicos: 1) Estabelecer critérios de dosagem em função dos resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos agregados; 2) Estudar a durabilidade dos blocos de *pavers* a partir da incorporação dos resíduos da mineração; 3) Verificar diferentes proporções de incorporação de resíduos da mineração em substituição ao agregado natural na produção de *pavers* ; 4) Analisar quais as possíveis aplicações para os *pavers* com resíduos da mineração, levando em consideração seu desempenho técnico; Avaliar a viabilidade do ponto de vista econômico da utilização dos resíduos da mineração nos blocos intertravados.

No que se relaciona à estrutura do texto, os capítulos foram dispostos da seguinte forma: **Capítulo 1** – Apresentação inicial da pesquisa, com definição de problema, exposição da hipótese, justificativa e definição dos objetivos; **Capítulo 2** – Exposição dos conceitos e fundamentos necessários para compreensão do estudo, bem como a exposição dos problemas causados pelo acúmulo de resíduos da mineração, além de tópicos sobre blocos intertravados, resíduos da mineração e concreto de um modo geral; **Capítulo 3** – Identificação dos materiais e métodos envolvidos no programa experimental, com a descrição dos procedimentos desenvolvidos, ensaios realizados e normas técnicas consultadas; **Capítulo 4** – São apresentados os resultados e discussão da pesquisa, quanto à caracterização física e mecânica, além das propriedades de durabilidade analisadas nas peças de *pavers* produzidas; **Capítulo 5** – Explanação das considerações finais e sugestões para futuras pesquisas a serem desenvolvidas sobre o tema estudado.

Capítulo 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo é focalizado na apresentação da revisão bibliográfica, visando uma melhor compreensão dos conceitos e fundamentos relativos ao estudo. Além disso, há uma apreciação de pesquisas já existentes relacionados ao assunto.

2.1 Resíduos da Mineração

A mineração é uma atividade de grande impacto na economia brasileira, tornando-se indispensável para o desenvolvimento do país, pois é a responsável pela extração e beneficiamento de diversas matérias-primas que abastecem vários setores da economia, como por exemplo, a construção civil (COSTA FILHO, 2017).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR, 2022) no ano de 2019 foram geradas 897.979 toneladas de resíduos da mineração não perigosos, representando um aumento de 59% com relação ao ano de 2018. Esses dados podem ser interpretados de maneira positiva para a economia brasileira e para o setor da mineração, mas considerando as questões ambientais, reflete em maior extração de recursos naturais e uma maior geração de resíduos.

Leite *et al.* (2018) afirmam que os processos que envolvem a extração e o beneficiamento de minerais são danosos ao meio ambiente, impactando toda a extensão da atividade industrial. Nesse sentido, depreende-se que a capacidade de geração de impacto ambiental das atividades mineradoras industriais está intrinsecamente associada à grande quantidade de resíduos gerados, principalmente provenientes da própria extração e beneficiamento.

Segundo Carvalho (2018), o rejeito é definido como a fração desprezada do mineral bruto no beneficiamento de minérios para a obtenção do concentrado, por meio de processos mecânicos e/ou químicos. O rejeito é um material que não será aproveitado economicamente, pelo menos sob as condições vigentes no momento de sua geração. Em que pese o valor

econômico proporcionado pelo aproveitamento futuro dos rejeitos, esse material deve ser devidamente armazenado por questões ambientais.

Assim, a mineração altera de forma substancial o meio físico, provocando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem, do solo, além de comprometer a fauna e a flora. Ela afeta também o modo de viver e a qualidade de vida das populações estabelecidas na área minerada e em seu entorno (ARAÚJO *et al.*, 2015). Logo, é importante que haja um posicionamento de pesquisas voltadas para a implementação de sistemas que visem a minimização desses danos.

Desta forma, o aproveitamento dos resíduos através do desenvolvimento de pesquisas tem o objetivo de detectar as potencialidades e viabilidade. Vista como uma atividade complementar esse aproveitamento pode contribuir para a diversificação do produto, diminuição de custos e danos ambientais, resultando também em uma nova matéria-prima para ser utilizada em diversos setores industriais (CARLOS, 2018).

A utilização de resíduos de mineração vem se tornando uma prática bastante incentivada pelo setor da mineração. Do ponto de vista de gestão desses resíduos, seu armazenamento, normalmente feito em grandes pilhas ou barragens de material, representa um desafio ambiental para as empresas mineradoras. (GONDIM, *et al.*, 2022).

Na construção civil, os resíduos provenientes da mineração podem ser utilizados geralmente como agregados, almejando um resultado aproximado ao resultado do material substituído. Um dos componentes que podem ser substituídos por resíduos da mineração é a areia natural, utilizada frequentemente na composição do concreto, por exemplo.

Diante do exposto, a utilização de resíduos gerados no processo de mineração apresenta-se como uma alternativa viável, trazendo benefícios associados à diminuição da extração da areia como agregado miúdo e à disposição dos resíduos, além de maior lucratividade para as empresas mineradoras, que poderão comercializar um produto proveniente de rejeito que não agrega valor ao processo. Logo, são abordados neste trabalho os resíduos da mineração provenientes da exploração da scheelita, pó de quartzo e rochas ornamentais, descritos de forma mais detalhada nas próximas três subseções.

2.1.1 Scheelita

Dentre os mais variados resíduos produzidos a partir do beneficiamento de minérios, encontra-se a scheelita, que é um mineral do grupo dos Wolframatos (Tungstos) de fórmula

CaWO_4 , (Ca – 19,4% e WO_3 – 80,6%), uma das várias fases em que o tungstênio se apresenta. Normalmente, o mineral forma agregados granulares e maciços com estrutura cristalina tetragonal de características físicas: cor branca, amarela, verde ou castanho, sendo translúcida ou transparente com brilho vítreo de clivagem extraordinariamente alta para um mineral. Possui densidade de 5,9 g/cm^3 a 6,3 g/cm^3 e dureza de 4,5 a 5,0 na escala de Mohs, conforme pode ser visto na Figura 1 (KLEIN E DUTROW, 2012).

Figura 1 - Foto da scheelita.



Fonte: Mina Brejuí (2022)

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (2018), os principais depósitos/ocorrências de scheelita do Brasil encontram-se localizados nos estados do Rio Grande do Norte/RN e da Paraíba/PB, sendo conhecidas cerca de 700 localidades, distribuídas numa área de aproximadamente 20.000 km^2 , constituindo a Província Scheelitífera do Seridó. Ainda conforme o órgão, o estado do Rio Grande do Norte foi responsável por toda produção brasileira de tungstênio do ano de 2017, o equivalente à 593 toneladas de minério, acumulando R\$ 21,1 milhões.

A maior parte da produção do resíduo da scheelita concentra-se na mina Brejuí, situada no município de Currais Novos – RN, considerada a maior mineradora de exploração de scheelita da América do Sul. Durante o processo de beneficiamento da scheelita para obtenção do minério de tungstênio são geradas quantidades expressivas de subprodutos, que por sua vez exercem forte impacto ambiental sobre as regiões produtoras (SOUZA *et al.*, 2021).

Estima-se que na mina Brejuí existam cerca de 6,5 milhões de toneladas de resíduos acumulados, sendo 4,0 milhões de toneladas da fração grossa e 2,5 milhões da fração fina (RAMOS FILHO, 2021). Vale salientar que a produção da mineradora cresce a cada ano, significando que a geração de resíduos tende a aumentar. Desse modo, a inserção desse resíduo em aplicações diversas se torna indispensável para a preservação da natureza.

A partir da extração são gerados resíduos e rejeitos sólidos que são depositados em pilhas sem cobertura, acarretando crescentes entulhos, além da remoção da cobertura vegetal do solo e modificação da paisagem e topografia do terreno. Estima-se que apenas 0,8% de todo o material extraído é constituído pelo minério almejado e 99,2% retornam ao meio ambiente como resíduo (GERAB, 2014).

Segundo Nascimento (2015), os principais fatores ambientais afetados na extração de scheelita estão relacionadas às erosões do solo e danos à flora e à fauna da região, à danificação de lençóis freáticos ou aquíferos com metais pesados e sais, além da poluição do ar, devido ao pó gerado em todo o processo de beneficiamento.

Carlos (2018) afirma que uma das soluções que vêm se apresentando no cenário mundial é a utilização dos resíduos minerais em setores industriais que possam incorporar os mesmos no processo produtivo, conservando a qualidade e/ou produzindo novos produtos com propriedades equivalentes ou produtos diferenciados e ambientalmente corretos.

Desta forma, pesquisas têm sido desenvolvidas em diversas áreas em virtude da reinserção do resíduo da scheelita, seja na composição de materiais alternativos, como por exemplo nos concretos e argamassas, seja como material geotécnico para substituição do agregado miúdo.

Machado (2012) estudou a incorporação do resíduo da scheelita em matriz cerâmica caulinitica, em percentuais de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% e avaliou sua microestrutura, propriedades físicas e formulação. Os resultados tecnológicos demonstraram que o acréscimo do resíduo de scheelita tende a melhorar as propriedades do produto. Os melhores números obtidos ocorreram com no máximo 20% de adição. A incorporação do resíduo proporcionou aumento na perda ao fogo e redução na retração linear das peças. Ocorreu aumento em torno de 10% na absorção de água e porosidade aparente e redução na resistência à flexão das peças.

Paiva (2013) utilizou resíduo da scheelita incorporando-o na produção de concreto de cimento *Portland* em substituição ao agregado miúdo (areia natural) nas proporções de 0% a 100%, variando a cada 10%. Foram avaliadas características tais como: trabalhabilidade, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Conforme o autor, a inserção do resíduo no concreto tornou a consistência mais fluida, com absorção e índice de vazios compatíveis com o concreto sem resíduo. O traço com substituição de 60% foi o que obteve resultado mais satisfatório.

Almeida *et al.* (2016) observaram a caracterização química por Fluorescência por Raio X – FRX de rejeito do beneficiamento da scheelita. O resultado da análise indicou que a amostra pesquisada apresenta uma maior concentração de SiO₂, representando o elemento estruturante.

Além da caracterização, foram realizados testes de absorção de água e o ensaio de flexão, obtendo respostas que indicam uma baixa absorção de água, porém baixa força e tensão de ruptura.

Já Medeiros (2016) estudou a influência do resíduo da scheelita, em substituição total do agregado natural (areia), na formulação de argamassa de revestimento. Foram preparadas argamassas nos traços 1:1:6 (cimento:cal:areia) e 1:3 (cimento:areia), em volume, com 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição da areia pelo resíduo grosso da scheelita. A inserção do resíduo contribuiu no aumento da resistência mecânica, módulo de elasticidade dinâmico e retenção de água, sendo o melhor resultado com substituição de 100%. Além disto, apresentou maior densidade e menor teor de ar incorporado quando comparados às argamassas sem resíduo.

Costa Filho (2017) avaliou a utilização do resíduo da scheelita na composição de concreto asfáltico em substituição ao agregado miúdo natural (fração grossa) e ao filler (fração fina). Foram realizados ensaios de caracterização e estabilidade Marshall, os quais apresentaram bom desempenho com a utilização da fração grossa do resíduo com relação a parâmetros de volumetria e estabilidade. No entanto, para a fração fina seria necessário um beneficiamento do resíduo, pois ela não apresenta quantidade suficiente para a aplicação proposta.

Silva *et al.* (2018) investigaram a incorporação do resíduo de scheelita em massa cerâmica para produção de blocos estruturais. O resíduo foi incorporado nas proporções de 0%, 10%, 20% e 30%. Após preparação das amostras foram executados ensaios de retração linear, absorção de água, porosidade aparente e perda ao fogo. As melhores propriedades obtidas ocorrem com 10% do resíduo mineral, apresentando desempenho satisfatório para a produção de tijolos cerâmicos.

Souza (2019) analisou argamassas de assentamento a partir da substituição do agregado miúdo pelo resíduo da scheelita e da água de hidratação por manipueira. Foram estudados os traços 1:3 (cimento:agregado) e 1:1:6 (cimento:cal:agregado). Os resultados demonstraram que o ajuste granulométrico da scheelita permitiu aumento na densidade das argamassas e em conjunto com a água de manipueira, verificou-se o melhor desempenho quanto à absorção capilar e plasticidade.

Similarmente, Medeiros (2019) estudou a substituição parcial do cimento e areia do concreto por Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP) e por Resíduo de Scheelita (RS). Nesse estudo, um planejamento experimental foi feito na busca de teores máximos de substituições dos resíduos e comparação de propriedades com concreto de referência. Foram

analisados os concretos nas idades de 7, 28, 90 e 212 dias. Obtiveram-se, a partir do planejamento experimental, os teores de 15% para o RPP e 81% para o RS e, comparando com o concreto convencional, foram obtidos índices satisfatórios de trabalhabilidade, resistência semelhante e menores valores de absorção e porosidade.

De outro modo, Neta *et al.* (2021) verificaram argamassas confeccionadas com resíduos da mineração de scheelita em substituição total ao agregado convencional quanto a suscetibilidade ao ataque por sulfato de sódio. Os resultados do traço 1:3 indicaram que os agregados oriundos dos resíduos da mineração de scheelita apresentaram comportamento reativo ao ataque por sulfato de sódio (expansão maior que 0,06%), bem como aumento da resistência à compressão simples em 4,74%. Logo, embora tenha sido constatado que os corpos de prova incorporados com resíduos de scheelita tenham sido reativos ao sulfato, observou-se que eles não foram capazes de deteriorar mecanicamente os corpos de prova.

De maneira semelhante, é importante citar o estudo de Macedo (2021), que verificou o desempenho de argamassas de revestimento produzidas com substituição total do agregado natural por areias binárias residuais constituídas de pó de pedra e subproduto de scheelita. A argamassa produzida com metade de cada resíduo, no estado fresco, embora mais densa, obteve melhor consistência, maior retenção de água e teor de ar incorporado semelhante à argamassa referência. No estado endurecido, a formulação alcançou elevada resistência mecânica, maior densidade de massa, menor absorção, tanto por imersão quanto por capilaridade, de todas as argamassas avaliadas.

Por fim apresenta-se o estudo de Gondim (2022), que avaliou o resíduo da scheelita como revestimento compactado, visando atender à função de barreira hidráulica em sistemas de cobertura de aterros de resíduos. Como resultados dos testes, os valores da permeabilidade saturada obtidos foram de $2,18 \times 10^{-8}$ e $7,07 \times 10^{-8}$ m.s, atendendo às exigências de normativas internacionais e, assim, demonstram-se viáveis à aplicação como barreira hidráulica de cobertura de resíduos.

2.1.2 Quartzo

Segundo Chen (2020), o quartzito é uma rocha metamórfica cujo componente principal é o quartzo, com mais de 75 % como ordem de grandeza, sendo utilizada na produção de tijolos e refratários de sílica, usada na siderurgia e para o preparo do leito de fusão dos altos-fornos, utilizada de diferentes maneiras (rústica, talhada, polida, outras). Sua origem está relacionada

com ação de processos metamórficos desenvolvidos principalmente sobre rochas sedimentares ricas em quartzo. (MEDINA, 2018).

O quartzo é sua forma mais comum, composta quimicamente de SiO₂ (sílica) e em sua composição podem entrar também lítio, sódio, potássio e titânio, estando presente em grandes quantidades nas rochas ígneas do tipo ácidas (>65% de SiO₂), a exemplo os granitos e riolitos (METHA & MONTEIRO, 2014).

O Brasil detém grandes reservas de quartzo, sendo possuidor não só dos maiores depósitos como daqueles de melhor qualidade. É um minério extremamente resistente ao intemperismo e ao desgaste físico pelo fato de ser o último mineral a se formar no resfriamento do magma a uma temperatura menor que 600°C o que garante uma maior estabilidade. O quartzo é o mais comum dos polimorfos e, graças aos seus cristais grandes, transparentes e bem formados, é conhecido desde os tempos antigos. (LUZ; BRAZ, 2000).

O mineral apresenta importantes propriedades, fato esse que o coloca entre um dos mais utilizados por diferentes ramos industriais, entre eles o setor automobilístico, bélico, da computação, da construção civil, elétrica, eletrônica, eletrodoméstica, de equipamento médico, metalúrgica, óptica, química, relojoaria e de telecomunicações.

Porém, a exploração dessas reservas é feita de forma manual em minas a céu aberto ou minas subterrâneas de pequena profundidade. O pó de quartzo é obtido a partir do beneficiamento das lascas naturais provenientes do processamento do quartzo, causando grandes impactos ambientais e um gasto muito alto de energia para obtenção dos subprodutos. (ALYAMAC *et. al.*, (2017)

Durante o beneficiamento do quartzo, o material particulado fica em suspensão e as partículas mais finas são carregadas pelo vento, atingindo, na maior parte das vezes, áreas urbanas, causando conseqüente desconforto aos moradores da região. As partículas maiores são depositadas no solo ou em corpos de água próximos às indústrias de beneficiamento, dificultando o crescimento da vegetação e da utilização do solo para fins de plantio. Quando depositados na água, provocam a turbidez e a alteração da cor, tornando o recurso esteticamente indesejável.

Diante dos impactos ambientais e sociais provocados pela disposição inadequada do resíduo proveniente da extração do quartzo, têm-se buscado medidas que reduzam o lançamento deste no ambiente. Entre as alternativas, uma que têm se mostrado promissora é a incorporação do resíduo na indústria da construção civil para a produção de materiais.

Os resíduos de quartzo da produção de agregados têm uma quantidade de pó muito fino com características granulares muito semelhantes para cimentar (TOUBAL SEGHIR *et al.*,

2018). Além disso, sua composição química o torna um atrativo aditivo para ser usado em materiais à base de cimento (ALYAMAC *et al.*, 2017)).

Silva *et al.* (2015) estudaram a resistência à compressão simples do concreto colorido de alta resistência com adição de pó de quartzo. Verificou-se que aos 28 dias o concreto adquiriu 131,9 MPa de resistência, sendo que o concreto colorido sem adição do resíduo atingiu 74 MPa. Concluiu-se, então, que o uso dessa adição mineral resultou em provável incremento de densidade do material e redução da porosidade na zona de transição argamassa agregado.

Pacheco *et al.* (2016) analisaram o emprego de pó fino de quartzo no concreto convencional, sendo feitas 3 diferentes porcentagens de pó fino de quartzo (10, 20 e 30%), nas idades de rompimento de 7 e 28 dias. A partir do ensaio de consistência, foi possível perceber que a adição de pó fino de quartzo diminuiu a trabalhabilidade do concreto. Assim, dependendo da quantidade, para a sua utilização no concreto faz-se necessário o aumento da relação água/cimento da mistura ou mesmo a utilização de aditivos plastificantes. Por meio dos ensaios de compressão axial, é possível afirmar que a dosagem que apresentou melhor desempenho em relação aos outros traços foi aquela com adição de 10% de pó de quartzo. Mesmo assim, seu aumento de desempenho não foi significativo se comparado com o traço sem adição.

Junior *et al.* (2018) verificaram a utilização de resíduos de quartzito para aplicação no revestimento de pavimentos intertravados. Os resultados evidenciaram que os resíduos de quartzito apresentaram propriedades adequadas para uso nesses pavimentos. As respostas de resistência mecânica mostraram que os blocos possuem propriedades adequadas para serem utilizadas em calçadas de tráfego de pedestres.

Já Barros (2018) analisou a durabilidade de argamassas alternativas adicionadas com resíduos de quartzitos. Os resultados indicaram que os agregados oriundos dos resíduos de quartzito apresentaram comportamento ineficaz quanto à reação álcali-agregado, não sofrendo degradação quando imersos em solução de NaOH 1N, sendo reativos ao ataque por sulfatos, sofrendo expansões dimensionais quando imersos em solução de sulfato de sódio. Em relação ao envelhecimento natural e acelerado, os resultados evidenciaram que as argamassas adicionadas com resíduos de quartzito mostraram durabilidade no período avaliado, comprovada pelo comportamento mecânico e microestrutura semelhantes aos das respectivas argamassas convencionais durante o período avaliado.

Bezerra *et al.* (2020) estudaram a incorporação quartzo beneficiados na produção de argamassas de revestimento em substituição da cal, com teores de substituição de 50 e 100% em relação a cal, bem como foi produzida a argamassa de referência (sem substituição). Diante dos resultados, verificou-se que a substituição de 100% da cal pelo material apresentou maior

resistência mecânica e menor absorção, indicando que o material proveniente da mineração pode apresentar potencial para ser utilizado em argamassas de revestimento.

Mendonça *et al.* (2022) analisaram as propriedades físicas e mecânicas de concreto estrutural modificado por adição de resíduos cerâmicos micronizados de mármore e quartzito, com substituição parcial no teor de 20 % para ambos os resíduos, individualmente. A incorporação desses resíduos proporcionou aumento da absorção e ganho de resistência à tração. O concreto modificado com resíduo de mármore apresentou perda de resistência à compressão e o concreto modificado com resíduo de quartzito ganhou de resistência à compressão.

2.1.3 Rochas Ornamentais

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2018), o Brasil é um dos principais produtores e exportadores de rochas ornamentais do mundo apresentando uma grande variedade de rochas extraídas, ocupando o 4º lugar como produtor e o 6º como exportador mundial de rochas.

A indústria de rochas ornamentais produz grande quantidade de resíduos que estão presentes principalmente em duas formas: sólidos, gerados na etapa de extração nas pedreiras; e pó fino úmido ou lamas, produzidos durante os processos de fabricação (MASHALY *et al.*, 2018).

O resíduo de corte de granitos e mármore (RGM) é normalmente armazenado em forma de lama nas indústrias de rochas ornamentais. Durante o processo de corte e polimento das rochas utiliza-se água para o arrefecimento dos discos e diminuição do pó em suspensão. Essa mistura de água, pó e resíduos formam a lama de RGM. Calhas e dutos direcionam a lama até o local (tanque) de armazenamento na fábrica para posterior destinação do resíduo (SOUZA *et al.*, 2020).

À medida que a indústria de processamento de mármore continua a expandir, grandes quantidades de resíduos na forma de pasta de mármore são gerados e liberados no meio ambiente. Esta lama residual em algumas localidades da Índia é despejada ao longo de estradas e perto de unidades de processamento, causando degradação ambiental e agravando os problemas de saúde nas áreas circundantes, pois o material particulado é muito fino. Além disso, a lama residual obstrui as terras agrícolas, causando danos em longo prazo ao solo e às colheitas (SINGH *et al.*, 2017).

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os sólidos da lama abrasiva gerada durante a produção e processamento de rochas ornamentais foram classificados como classe II A – resíduo não inerte. No entanto, de acordo com Sato *et al.* (2018), a partir da caracterização do resíduo de rocha ornamental, foi possível concluir que o mesmo se apresenta como um material de finura e massa específica próxima ao cimento, tendo uma baixa atividade reativa, indicando que o resíduo pode ser usado como uma adição mineral inerte na matriz cimentícia.

Em 2014, foi relatado que aproximadamente 70 Mt de concreto estão sendo produzidos anualmente em escala global, gerando aproximadamente 65 Mt de CO₂ como a principal emissão contribuinte do aquecimento global que está sendo liberado para a atmosfera (~ 94%) (ASHISH, 2018). Assim, diante do alto volume de concreto consumido nas diversas áreas, a incorporação desses resíduos aos materiais de base cimentícia, como substituição ou adição de materiais convencionais pode agregar bastante valor ao produto.

Logo, o uso de resíduos finos da indústria de pedras ornamentais em produtos de concreto à base de cimento é particularmente exigente em termos das especificações que devem ser atendidas. A adição de grandes quantidades desses resíduos no concreto pode resultar em alta demanda de água, o que gera alta retração por secagem e afeta negativamente suas propriedades físicas e mecânicas. Porém, devido ao desenvolvimento de superplastificantes eficazes, que reduzem significativamente a quantidade de água necessária, bem como ao uso de técnicas sofisticadas de projeto de mistura, a incorporação de tais subprodutos finos em elementos de concreto é hoje possível (GALETAKIS; SOULTANA, 2016).

De acordo com Singh *et al.* (2016), partículas finas de resíduos de mármore podem afetar os concretos de três formas: preenchendo os vazios intergranulares, proporcionando uma maior compactação ao concreto; pode atuar como pontos de nucleação para a formação de produtos de hidratação, sendo, portanto, parte integrante da pasta de cimento; e / ou reagindo com componentes de cimento, muitas vezes sendo reações deletérias. Contudo, Ashish (2018) afirma que usar o resíduo como agregado em aplicações de substituição é mais eficiente no que diz respeito às propriedades mecânicas.

Mendonça (2022) relata que nos últimos anos o uso de materiais cerâmicos nas edificações tem crescido. Assim, com o aumento da produção nas marmorarias, a quantidade de resíduos não pode ser armazenada e ao utilizar esses subprodutos que não podem ser armazenados em outros setores, o ganho econômico pode ser alcançado e a poluição ambiental pode ser evitada.

Além disso, a utilização de resíduos de processamento de rochas ornamentais após tratamento térmico como aditivo para a produção de pasta cimentícia, contribui para a

diminuição do impacto ambiental devido à redução da área ocupada por aterro industrial, como também melhora as características finais da matriz cimentícia produzida (VAZZAOLER *et al.*, 2018).

Nesta perspectiva, Zulcão *et al.* (2020) demonstraram que os resíduos do processamento de rochas ornamentais pode ser uma alternativa ambientalmente viável para utilização em materiais de construção civil à base de cimento. O material é ambientalmente competitivo com enchimento de calcário, areia e pó de pedra. Desta forma, pesquisas vêm sendo desenvolvidas vislumbrando o aproveitamento desses resíduos na produção de novos produtos.

Ghannama *et al.* (2016) observaram que a substituição da areia por pó de granito aumentou as resistências à compressão e tração do concreto em relação ao concreto de referência, sendo a substituição com 10% de pó de granito a que obteve o maior aumento registrado.

Dietrich *et al.* (2017), avaliaram o desempenho mecânico e o processo de corrosão das armaduras induzido pela ação de íons cloreto em concretos produzidos com adição do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO). Para isso, produziu-se concretos com três níveis de relação água/cimento (0,45, 0,55 e 0,65) e quatro níveis de adição de RBRO (0, 5, 10 e 15%) em relação à massa de cimento. Os resultados mostraram que a adição de RBRO é vantajosa no teor de 5% de RBRO do ponto de vista da resistência mecânica e de durabilidade frente à ação de cloretos.

Vigneshpandian *et al.* (2017) indicam que a substituição de até 50% do agregado fino por pó de mármore foi capaz de provocar um aumento na resistência à compressão e à flexão das misturas de concreto produzidas.

Mashaly *et al.* (2018) demonstraram em seus experimentos que a inclusão de 10% e 20% de lodo de granito resultou em um declínio insignificante nas propriedades mecânicas das misturas de concreto para as resistências à compressão e flexão em comparação com a mistura de controle. Além disso, essas misturas apresentaram uma melhora na resistência ao congelamento e descongelamento, bem como ao ataque de sulfato em relação à mistura de controle em termos de perda de massa e resistência.

Araújo e Dourado (2019) avaliaram o desempenho de *pavers* intertravados produzidos com a substituição de parte do pó de pedra por lama abrasiva, que é um resíduo gerado pelo beneficiamento de rochas ornamentais nos processos de corte e polimento, em que o traço com a maior porcentagem de substituição (20% de lama abrasiva) alcançou aos 28 dias de idade uma resistência à compressão de 39,69MPa, valor superior ao mínimo exigido pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

Singh e Bhunia (2019) observaram em seu estudo que com o uso de pó de mármore na proporção de 10 a 15% no concreto, a resistência à tração e à compressão aumentou em torno de 15 a 20% do concreto no estado endurecido.

Ghorbani *et al.* (2019) investigaram o efeito do pó residual de granito como substituição parcial do cimento (até 20%) no comportamento mecânico e de durabilidade de traços de concreto sob condições adversas de exposição. Os resultados de resistência à compressão e tração mostraram que o uso de até 20% de pó residual de granito como substituto do cimento não afeta significativamente as propriedades mecânicas das misturas de concreto. No entanto, a mistura de concreto com 10% do resíduo apresentou a maior resistência de todas.

Bosso *et al.* (2021) incorporaram Resíduos de Serragem de Rochas Ornamentais (RSRO) nas proporções 0, 4, 8 e 12% na produção concreto de pavimento intertravado, analisando qual o comportamento das propriedades físicas e mecânicas em sua composição. Foi possível constatar que numa visão geral o uso do RSRO não houve impacto considerável para a absorção de água, sendo assim, todos os traços elaborados estão dentro dos critérios exigidos pela norma. Analisando o conjunto percebeu-se também que os traços foram todos dentro da norma, atendendo aos 35 MPa.

Por fim, citando o estudo de Nascimento (2022), apresenta-se nesta pesquisa o aproveitamento dos resíduos cerâmicos e de rochas ornamentais, em pó, e os seus efeitos, ao serem incorporados no concreto. Logo, foram estudados concretos com relações $a/c = 0,45$ e $0,55$, com adições de 10 e 20% dos resíduos em relação à massa de cimento, comparados com um traço referência, sem adições. Verificou-se que, no estado fresco, houve uma queda da consistência à medida que o teor de adições aumentava. No estado endurecido, foi observado que os concretos com adições de resíduo apresentaram perda de resistência à compressão na idade avaliada, porém, com uma redução na absorção de água por capilaridade.

É importante ressaltar que não foram encontradas pesquisas semelhantes com uso de resíduos minerais para produção de blocos intertravados, tornando este trabalho pioneiro na incorporação dos resíduos de scheelita, quartzo e rochas ornamentais na produção de *pavers*.

2.2 Pavimentos Intertravados

Neste tópico são apresentadas informações relacionadas aos pavimentos intertravados, estruturados em tópicos para melhor entendimento do assunto.

2.2.1 Breve Histórico dos Pavimentos Intertravados

Desde os primórdios, o ser humano tem evoluído. Com isto, seus costumes também sofreram mudanças e uma das principais necessidades que o homem sentiu foi a de locomoção. Desta forma, ao longo dos séculos os povos buscaram práticas na descoberta de novos caminhos e acessos, alcançando maiores distâncias. Logo, ao longo da história, têm-se buscado técnicas para o aprimoramento dos pavimentos no intuito de melhorar sua capacidade de velocidade, conforto e segurança.

Os pavimentos intertravados são utilizados há milhares de anos pelo mundo. Têm sua origem nos pavimentos revestidos com pedras, produzidos na Mesopotâmia há quase 5.000 anos a.C. e muito utilizados pelos romanos desde 2.000 a.C. Este tipo de pavimento evoluiu primeiro para o uso de pedras talhadas, resultando em pavimentos conhecidos como paralelepípedos. Entretanto, as dificuldades da produção artesanal dessas pedras e a falta de conforto de rolamento impulsionaram o desenvolvimento das peças de concreto pré-fabricadas. (ABCP, 2010, p. 9). Na figura 2 mostra-se um pavimento intertravado de pedras talhadas em forma de prisma regular.

Figura 2 - Pavimento intertravado de pedras talhadas em forma de prisma regular.



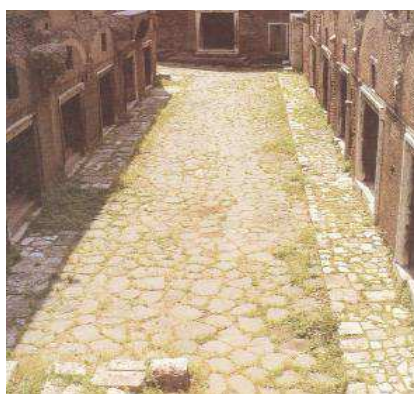
Fonte: ABCP (2010)

No período entre 800 e 350 a.C., os povos Etruscos dominaram o território que hoje compreende à Itália. Esses povos são considerados os precursores da construção de trajetos exclusivos objetivando o deslocamento de pessoas e cargas entre vilas ou colônias da época. Os procedimentos empregados pelos Etruscos intencionavam aproximar longas distâncias, com o intuito de assegurar conforto e resistência no decorrer de uma superfície mais plana possível, aproveitando os materiais conhecidos e disponíveis na época. Os caminhos das cidades Etruscas alcançavam 15 metros de largura e na sua cobertura era acrescentada pedra de mão junto com

um material mais fino, visando conceder às pessoas maior segurança quanto ao escorregamento, na presença de água na superfície (CRUZ, 2003).

Segundo Fioriti (2007), os conhecimentos gerados pelos Etruscos colaboraram para a expansão do império Romano. Os caminhos romanos foram desenvolvidos de acordo com a disponibilidade de clima, materiais e topografia e eram erguidos conforme sua importância. Os revestimentos geralmente eram produzidos com solos arenosos, misturado com pedras naturais, sendo nas ruas com maior tráfego empregadas pedras talhadas manualmente. Em 500 a.C., Roma havia desenvolvido pavimentos com bases granulares e camada de rolamento de pedra. A Figura 3 mostra como eram esses tipos de vias.

Figura 3 - Formatos de peças de concreto.



Fonte: ABCP (2001)

De acordo com Cruz (2003), o progresso das peças talhadas manualmente para as peças pré-moldadas de concreto aconteceria no decorrer dos anos, aparecendo no final do século XIX a primeira peça pré-moldada de concreto e antes da Primeira Guerra Mundial foram registradas algumas patentes. Em pouco tempo, foi verificado que as peças pré-moldadas de concreto concediam uniformidade superior às peças aparelhadas e desprezava o acondicionamento antes do assentamento que as pedras naturais exigiam.

Godinho (2009) relata que as vantagens para o assentamento das peças eram percebidas facilmente, permitindo a utilização correta da mão-de-obra pouco especializada. Com o avanço da pavimentação, foi possível relacionar a escolha da forma geométrica com o desempenho do pavimento, de acordo com o tipo de tráfego.

A partir da década de 1980, a pavimentação com blocos intertravados de concreto vem expandindo com ampla intensidade em todo o mundo. O que antes era apenas material empregado em áreas para se possibilitar melhores efeitos paisagísticos ou arquitetônicos,

começou a ser um material versátil que viabiliza a harmonização com qualquer tipo de ambiente, incluindo o industrial e o rodoviário. (FIORITI, 2007).

Após a Segunda Guerra Mundial, os blocos passaram a ser produzidos em fábricas maiores e com grande produção na Alemanha, tomando grande impulso na década de 70, quando chegaram ao Brasil. A estabilidade entre aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais são fatores que estabelecem o amplo desenvolvimento desse sistema confiável e prático.

No Brasil, o emprego de peças pré-moldadas de concreto para confecção de pavimentação intertravada é largamente utilizada, sendo elas apropriadas tanto para tráfego leve - no caso de praças, calçadas e vias públicas - como para tráfego pesado - pátio de cargas e estacionamentos de veículos pesados. Hoje em dia, sua aplicação está progressivamente mais abrangente, fortalecendo-se no setor da construção civil como opção prática ecológica, versátil e econômica, bem como de excelente desempenho, quando comparada a outros tipos de pavimentação. Como resultado, tornou-se tendência na construção de vários tipos, seja em espaços privados ou públicos, substituindo, muitas vezes, o piso asfáltico e o paralelepípedo (MACHADO, 2015).

2.2.2 Conceitos básicos

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2010), o pavimento intertravado é composto por peças de concreto assentadas sobre camada de areia e travadas entre si por contenção lateral. Em outras palavras, o pavimento intertravado constitui-se de uma estrutura que consiste em uma camada de base, podendo ou não ter sub-base, e uma camada de revestimento, que é formada por peças de concreto pré-moldado travado entre si por uma restrição lateral, tal como um meio-fio, posicionado sobre uma camada de assentamento. Na Figura 4 é possível observar uma seção transversal típica de um pavimento intertravado.

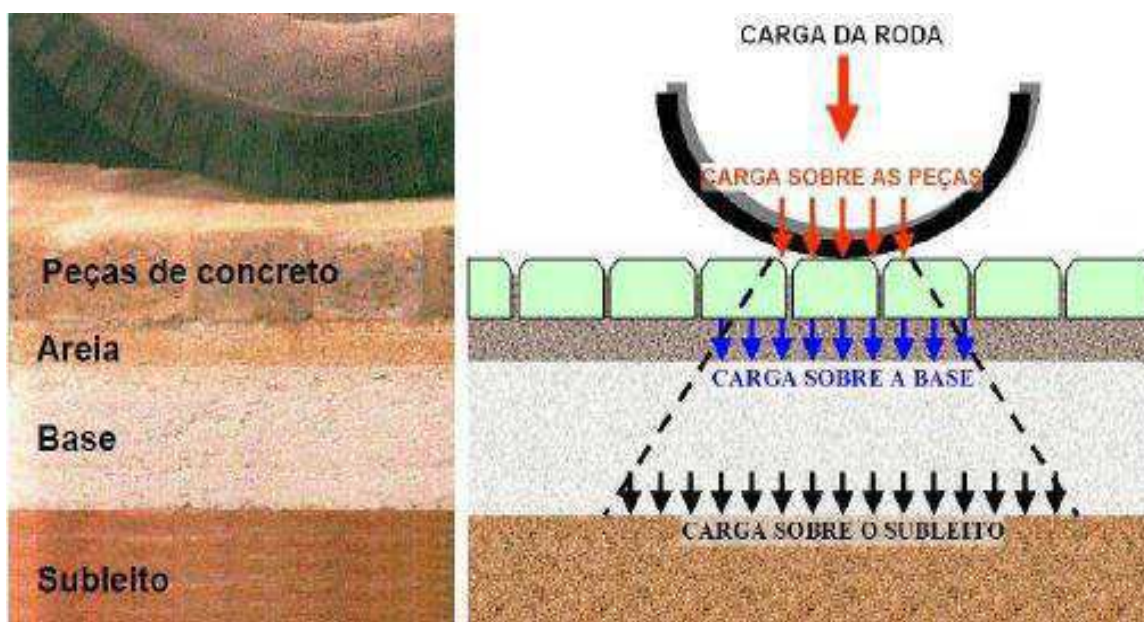
Figura 4 - Seção transversal pavimento intertravado.



Fonte: ABCP (2001)

A função das camadas formadoras da estrutura de um pavimento intertravado é dividir a tensão normal vertical aplicada na superfície de forma que o subleito receba uma tensão inferior, caracterizando um pavimento flexível. Desse modo, a distribuição de carga advinda do veículo é distribuída para o pavimento através das rodas, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Distribuição das tensões nas camadas do pavimento intertravado.



Fonte: ABCP (2010)

A angulação do bulbo de tensões na ordem de 45° é uma situação tida como trivial na literatura técnica, relacionando-se às propagações de esforços de carregamentos solicitantes em estruturas de pavimentos. Contudo, cabe elucidar que cada tipo de solução possui características particulares e que precisam ser estudadas em cada caso. No caso específico dos pavimentos intertravados, a pequena dimensão dos blocos de concreto, ao estruturar um conjunto numeroso de pequenas juntas, necessitando estudar de maneira mais específica as condições em que se difundem as tensões nas camadas subjacentes. (MACHADO, 2015).

Conforme J.Fussl (2016), a força máxima de cisalhamento transmitida horizontalmente depende da resistência do concreto utilizado nos blocos intertravados. Além disso, a deformação vertical sujeita-se principalmente ao comportamento não linear do material constituinte dos *pavers* e da acumulação de deformações permanentes das camadas de base subjacentes.

Outrossim, de acordo com o *Installer Technician Certificate Course – ICPI* (2015), os blocos de concreto intertravados, quando bem compactados, transferem as cargas verticais dos veículos aos blocos seguintes através de forças de cisalhamento que são transmitidas por meio

das juntas preenchidas com areia, permitindo que as cargas aplicadas sejam espalhadas de maneira semelhante ao asfalto, podendo assim, ser classificado mais uma vez como um pavimento flexível.

No entanto, Jamshidi (2019) afirma que se deve notar que o comportamento do pavimento asfáltico e do pavimento intertravado é fundamentalmente diferente. Isso se deve devido ao fato de que os materiais asfálticos possuem características viscoelásticas, que dependem significativamente da temperatura no momento de aplicação da carga, enquanto o comportamento dos blocos intertravados não possui significativa dependência com a temperatura.

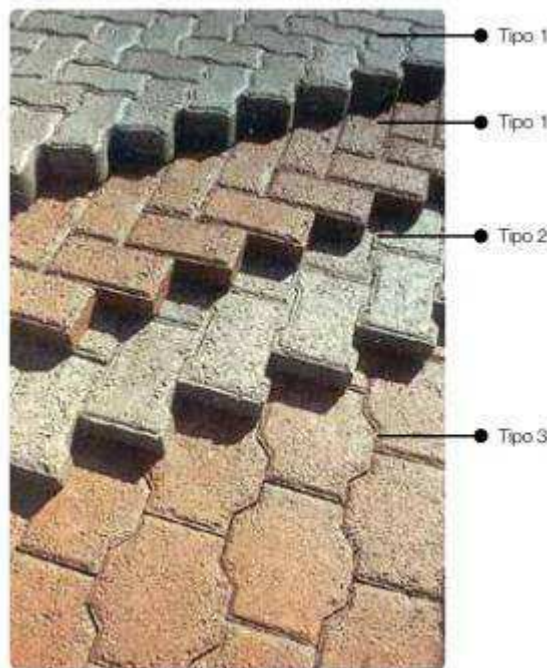
Além disso, segundo Mahapatra (2018), a transferência de carga no pavimento intertravado não é similar às tecnologias convencionais de pavimentação devido aos vários motivos como interações bloco a bloco, descontinuidade frequente na natureza, interações camada a camada, entre outros fatores.

Conforme Guan (1998), a temperatura média na região próxima à superfície do pavimento intertravado é inferior aos valores para o asfalto e pavimentos de concreto. Nessa sequência, o comportamento térmico dos blocos de concreto é regido por irradiação solar, coeficiente de calor da convecção, condutividade térmica e outras propriedades térmicas do pavimento intertravado.

Hengl (2018) concluiu que a transferência de carga nos blocos intertravados depende do padrão de arranjo dos blocos, tipo do bloco e características das juntas. Além disso, deve-se garantir que as juntas sejam completamente preenchidas, bem compactadas e sua largura e quantidade minimizadas, pois a deformação horizontal nessas estruturas é altamente afetada pela rigidez de sua superfície.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9781/2013 divide as formas possíveis para as peças de pavimento de concreto em quatro grupos: **Tipo I**, peças de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se assentadas em fileiras ou em espinha de peixe; **Tipo II**, peças de concreto com formato único, diferente do retangular e que só podem ser assentadas em fileiras; **Tipo III**, peças de concreto com formatos geométricos hexágonos, triédros, etc. com peso superior a 4 kg; e **Tipo IV**, conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento. Para melhor visualização, observe-se os formatos das peças de concreto, apresentados na figura 6.

Figura 6 - Formatos das peças de concreto

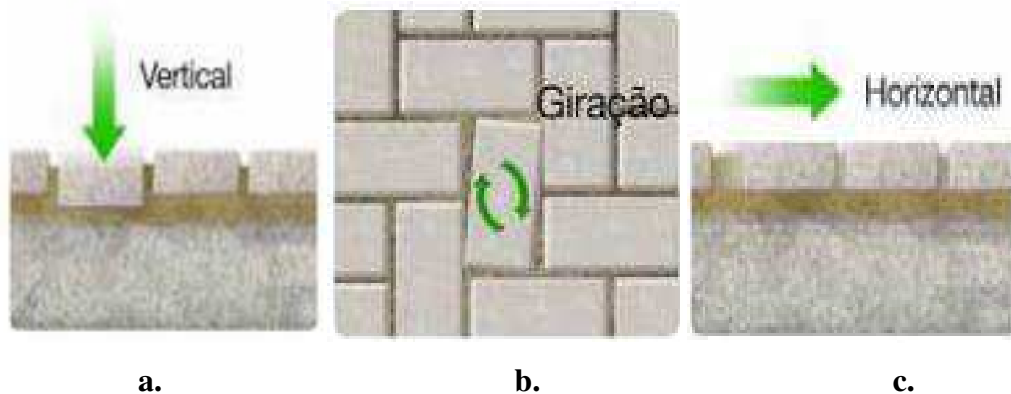


Fonte: ABCP (2010)

Segundo Di Mascio (2019), uma melhor distribuição da tensão-deformação é obtida quando a área de carga da roda dos veículos afeta um número maior de *pavers*, sendo a ligação do tipo espinha de peixe uma forma de assentamento que contribui significativamente para esse parâmetro.

Segundo a ABNT NBR 15953/2011, o termo “Intertravamento” refere-se à capacidade das peças de concreto de suportarem os deslocamentos individuais, sejam eles horizontais ou verticais, de giração ou rotação, em relação às peças adjacentes. Na figura 7 tem-se os tipos de travamento presente neste tipo de pavimento.

Figura 7 - Tipos de movimento impedidos no travamento: a. Vertical; b. Rotação; c. Horizontal.



Fonte: ABCP (2010)

A norma ABNT NBR 15953/2011 classifica o intertravamento, de acordo com o tipo de movimento que ele impede:

- **Intertravamento horizontal:** trata-se da aptidão do pavimento intertravado em resistir a esforços provocados por forças de aceleração e frenagem das cargas sobre as peças (Ex.: sollicitação pelo tráfego de veículos).
- **Intertravamento vertical:** refere-se à habilidade das peças de concreto em suportarem os esforços de cisalhamento entre as peças, uma vez que se o conjunto de blocos do pavimento recebe uma carga bem no centro de uma das peças, a tendência desta é afundar, configurando um deslocamento vertical;
- **Intertravamento rotacional:** capacidade do pavimento intertravado em resistir a esforços perpendiculares excêntricos aos eixos das peças. Se a carga for empregada na extremidade do bloco, a tendência é que ele gire em torno do próprio eixo, configurando o movimento de rotação.
- **Intertravamento contra o giro:** consiste na capacidade do pavimento intertravado em resistir a esforços pontuais no eixo das peças.

Segundo a norma ABNT NBR 15953/2011, o rejuntamento dos *pavers* deve ser executado com materiais pétreos granulares, assim os blocos são ligados por fricção às unidades adjacentes por meio desta folga existente, em que normalmente é preenchida com areia. Por outro lado, Hengl (2018) afirma que as juntas dos blocos de concreto preenchidas com argamassa de cimento têm um maior desempenho estrutural devido à sua maior rigidez em comparação com os que contêm areia, mas existe uma preocupação com as fissuras formadas nas juntas no que se refere à rigidez extra da superfície e ao gradiente térmico.

Sendo assim, baseando-se na literatura exposta, além do conforto térmico, a utilização do pavimento intertravado pode poupar energia elétrica, gerando uma economia na iluminação pública. Isto ocorre devido a sua capacidade de aumentar a reflexão da luz por meio da coloração clara dos blocos de assentamento, sendo esse ganho é em torno de 30%, quando comparado ao pavimento de concreto asfáltico. (MARCHIONI; SILVA, 2011).

2.2.3 Normatização Técnica para *Pavers*

Os europeus foram pioneiros na utilização do *pavers* e em seguida o Canadá e Estados Unidos. Logo, as normas técnicas para *pavers* existentes no mundo tiveram sua origem a partir

das experiências desenvolvidas por estes países. Atualmente, a demanda por normatização de pavimentos intertravados é observada na Austrália, África do Sul, Brasil, Colômbia e em alguns países da América do Norte.

No Brasil, a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para uso em pisos intertravados e a sua aplicação estão fundamentadas em duas normas editadas pela ABNT, são elas: NBR 9781/2013 - Peças de Concreto para Pavimentação - Especificação e Métodos de Ensaio (ABNT, 2013); e NBR 15953/2011 - Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução (ABNT, 2011b).

A norma brasileira NBR 9781/2013 trata das especificações e métodos de ensaio das peças de concreto para pavimentação, estabelecendo requisitos para certificação e aceitação das peças. Logo, sua função é delimitar parâmetros e orientar os procedimentos de ensaios.

Avaliando a norma brasileira NBR 9781/2013 e outras normas internacionais no que dizem respeito às propriedades que envolvem as peças de concreto para pavimentação, os principais quesitos que devem ser consideradas na avaliação de aceitação são: regularidade das dimensões, absorção de água, resistência à compressão e resistência à abrasão. No entanto, outras propriedades também podem ser incluídas devido a fatores externos que influenciem a integridade do concreto, como no caso de países com invernos rigorosos que avaliam a reação de gelo e degelo e outros levam em consideração a resistência à tração.

Observando as normas Americana (ASTM C936: 2016), Canadense (CSA A231.2: 1995), Sul-africana (SANS 1058: 2009), Britânica (BS NA-1388: 2003), Colombiana (NTC 2017:2004) e Australiana (AS/NZS 4456.4: 2003) sobre os requisitos de tolerância para esse tipo de pavimento e fazendo uma breve análise comparativa é possível notar diferenças nos limites adotados por cada país.

Por se tratar de um produto com alta relevância no mercado atual, a observância das normas técnicas competentes favorece a aceitação e inserção de *pavers* com utilização de materiais alternativos. A seguir, será realizado um comparativo das normas em diversos países com os limites estabelecidos no Brasil.

2.2.3.1 Regularidades das Dimensões

Para Cruz (2003), a variação das dimensões das peças prejudica o correto funcionamento do pavimento, ocasionando o desencontro das juntas. Visto que o correto posicionamento e preenchimento das juntas com areia promovem o pleno funcionamento e

integridade do pavimento e qualquer fator que venha interferir ou prejudicar sua aplicação traz consequências negativas como a perda na durabilidade com um maior desgaste das peças.

As normas apresentam uma tolerância rigorosa em relação às dimensões dos *pavers*, conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Tolerância de dimensões em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.

Países	Norma	Dimensões das peças		Tolerância dimensional (mm)		
		Área	Relação de medidas	Comprimento	Largura	Altura
Brasil	NBR 9781/2013	Largura mínima na área de aplicação de carga $\geq 97 \pm 3$	-	Máximo de 250mm $\pm 3,0$	$\pm 3,0$	Mínima de 60mm $\pm 3,0$
Estados Unidos	ASTM C936: 2016	$<0,065 \text{ m}^2$	Comprimento/espessura ≤ 4	$\pm 1,6$	$\pm 1,6$	$\pm 3,2$
Canadá	CSA A231.2: 1995	$<0,065 \text{ m}^2$	Comprimento/espessura ≤ 4	menos 1,0/ mais 2,0	menos 1,0/ mais 2,0	$\pm 3,0$
Inglaterra/Europa	BS EN-1388: 2003	-	-	Para peças com altura $< 100 \rightarrow \pm 2$ / Para peças com altura $> 100 \rightarrow \pm 3$	Para peças com altura $< 100 \rightarrow \pm 2$ / Para peças com altura $> 100 \rightarrow \pm 3$	Para peças com altura $< 100 \rightarrow \pm 3$ / Para peças com altura $> 100 \rightarrow \pm 3$
África do Sul	SANS 1058: 2009	-	-	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$
Austrália e Nova Zelândia	AS/NZS 4456.4: 2003	-	-			
Colômbia	NTC 2017:2004	-	Comprimento/largura ≤ 4	-	Mínimo de 50mm $\pm 1,5$	Mínimo de 60mm $\pm 1,5$

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Pode-se perceber que a norma brasileira tem tolerância de 3,0 mm para mais ou para menos quanto à tolerância dimensional, sendo um valor maior do que a maioria das outras normas, principalmente se levado em consideração que é um tipo de pavimento que as peças devem se conectar para manter o travamento da estrutura do pavimento.

Comparadas às normas internacionais de países como Austrália e África do Sul, os quais se encontram em regiões de condições climáticas semelhantes ao Brasil, seria exequível aceitar recomendações semelhantes às deles, ou seja, uma aceitação dimensional com menores variações (BITTENCOURT, 2012).

2.2.3.2 Absorção de Água

A absorção de água é um fator que influencia na análise para aceitação das peças para pavimentação, sendo expressa em porcentagem e representando a porosidade do concreto, relacionando a penetração de água nos poros permeáveis e a massa em estado seco (SILVA, 2014). O estudo comparativo dos valores de absorção adotado por cada país consta no Quadro 2.

Quadro 2 - Tolerância de absorção de água em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.

Países	Norma	Requisitos específicos
		Absorção
Brasil	NBR 9781/2013	Valor médio $\leq 6,0\%$; valor individual $\leq 7,0\%$
Estados Unidos	ASTM C936: 2016	$\leq 5\%$
Canadá	CSA A231.2: 1995	-
Inglaterra/Europa	BS NA-1388: 2003	$< 6\%$
África do Sul	SANS 1058: 2009	Valor médio $\leq 6,5\%$; valor individual $\leq 8,0\%$
Austrália e Nova Zelândia	AS/NZS 4456.4: 2003	
Colômbia	NTC 2017:2004	$< 7\%$

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir do quadro, observa-se que a tolerância na absorção varia entre 5% e 7% para valores médios dos ensaios. Isso mostra que é pequena a variação entre elas, apontando para uma concordância entre as normas e visando um baixo teor de absorção, tendo em vista a conservação das peças de concreto utilizadas. Segundo Tafarel *et al.* (2016), o aumento da absorção pelo concreto é um dos fatores que causam a redução na resistência do mesmo.

2.2.3.3 Resistência à compressão

Apesar de ser considerado um tipo de pavimentação flexível por se tratar de blocos de concreto, os intertravados devem fornecer uma resistência à compressão suficiente para suportar as passagens de pedestres e veículos a que estão submetidos, sendo este um dos ensaios mais requeridos pelas normas (CRUZ, 2003).

Numa comparação entre as resistências requeridas na NBR 9781/2013 e as demais normas citadas anteriormente, tem-se o comparativo exposto no Quadro 3.

Quadro 3 - Comparativo de resistência à compressão em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.

Países	Norma	Requisitos específicos	
		Resistência a compressão	
		Resistência	Ensaio
Brasil	NBR 9781/2013	Para veículos leves ≥ 35 Mpa; para veículos especiais ≥ 50 Mpa	Amostragem 6 peças, resistência à compressão (f _{pk}) - NBR 9780:1987
Estados Unidos	ASTM C936: 2016	Média ≥ 55 Mpa ; Valores individuais ≥ 50 MPa	Corpo de prova sujeito a compressão na peça inteira
Canadá	CSA A231.2: 1995	Média ≥ 50 Mpa ; Valores individuais ≥ 45 MPa	Corpo de prova cubo ou cilindro extraído da peça - diâmetro/altura= 1/1
Inglaterra/Europa	BS EN-1388: 2003		Ensaio de tração por compressão diametral
África do Sul	SANS 1058: 2009	Para veículos leves > 25 Mpa; Para veículos pesados ≥ 35 Mpa	Resistência característica a compressão
Austrália e Nova Zelândia	AS/NZS 4456.4: 2003	Para pedestres e ciclovias ≥ 15 Mpa; Para veículos leves ≥ 25 Mpa; Para veículos especiais ≥ 60 Mpa	
Colômbia	NTC 2017:2004	-	Ensaio de tração na flexão

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Comparando com os demais países, a resistência requerida pela norma brasileira segue com valores próximos. No entanto, em alguns lugares como África do Sul, Austrália e Nova Zelândia, os valores para tráfego de pedestres e veículos leves são menores.

Na norma Australiana AS/NZS 4456.4:2003, define-se pra o ensaio uma categoria diferente, englobando ciclovias, vias de pedestres e estacionamento, com os valores mínimos de 15 MPa, ambientes estes que requerem menor esforço, o que pode dar uso para peças menos resistentes que utilizam materiais alternativos (BITTENCOURT, 2012). A norma brasileira, bem como as demais, não prevê resistência para tráfego de pedestres.

Desta forma, a partir da diferenciação entre as normas, é fulcral fomentar discussões acerca da possível criação de novas classes de resistência com relação à norma brasileira, classes essas que permitissem valores menores e compatíveis com a aplicação em calçadas, ciclovias, praças e demais locais de trânsito leve. Com isso, poderia se tornar possível a redução dos custos de produção, atendendo ao mesmo passo o aspecto ambiental, uma vez que peças com resistências menores demandariam um menor consumo de cimento e permitiram a aplicação de materiais alternativos (LEAL, 2018).

Segundo Fioriti (2007), o valor da resistência à compressão estabelecida pela norma brasileira é bastante elevado, se comparado a alguns países como a Austrália e África do Sul, uma vez que já utilizam o piso intertravado há mais tempo que o Brasil, as normas especificam resistência à compressão mínima de 25 MPa dependendo da finalidade do uso.

Ainda com base no quadro comparativo, pode-se notar que a norma colombiana não apresenta valores de referência a esse parâmetro, visto que no ano de 2017 houve uma atualização da regulamentação, substituindo por ensaio de tração na flexão.

Além disso, deve-se observar a diferença quanto aos procedimentos dos ensaios. Conforme as normas brasileiras, no procedimento de ensaio constam duas placas auxiliares circulares, com diâmetro de $(85 \pm 0,5)$ mm e espessura mínima de 20 mm, confeccionadas em aço, com dureza superficial maior que 60 RC. As placas auxiliares devem ser acopladas à máquina de ensaio de compressão, uma no prato inferior e a outra no superior, de maneira que seus eixos verticais centrais fiquem perfeitamente alinhados. Ou seja, a carga não é aplicada em todo o corpo de prova. É sabido que, se assim fosse, os valores de resistência obtidos seriam maiores.

2.2.3.4 Resistência à Abrasão

Algumas normas tratam o desgaste do pavimento como decorrente de condições climáticas, podendo envolver ou não resistência aos ciclos de gelo/degelo, o que pode ser controlada pela especificação de resistência à compressão ou flexão e pela relação água/cimento (CRUZ, 2003).

Esse desgaste é entendido como a resistência à abrasão e quanto a essa propriedade algumas das normas relacionadas abrangem este quesito, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Resistência à abrasão em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.

Países	Norma	Requisitos específicos
		Resistência à abrasão
Brasil	NBR 9781/2013	Largura da cavidade para: Tráfego leve $\leq 23\text{mm}$; Tráfego de veículos especiais $\leq 20\text{mm}$
Estados Unidos	ASTM C936: 2016	Perda de volume $\leq 15\text{cm}^3/50\text{cm}^2$
Canadá	CSA A231.2: 1995	-
Inglaterra/Europa	BS NA-1388: 2003	Largura da cavidade $< 23\text{mm}$
África do Sul	SANS 1058: 2009	Valor médio de perda de massa $\leq 12\text{g}$; Valor individual de perda de massa $\leq 15\text{g}$
Austrália e Nova Zelândia	AS/NZS 4456.4: 2003	
Colômbia	NTC 2017:2004	Largura da cavidade $< 23\text{mm}$

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Assim como no teste de resistência à compressão ou flexão, não existe ainda consenso sobre a metodologia mais apropriada para realizar o ensaio de abrasão. Como pode se perceber pelo Quadro 4, algumas normas verificam a largura da cavidade na peça e outra considera o volume (CRUZ, 2003). Não existe na literatura uma equivalência entre esses dois parâmetros, no entanto, sugere-se que quanto maior for o desgaste superficial da peça, maior será sua perda de massa. No ensaio brasileiro, por ser um desgaste apenas na superfície, não há perda de volume, tal situação existe nos ensaios onde toda a peça é submetida a desgastes, como no caso dos EUA, por exemplo.

2.2.3.5 Outros Parâmetros

Alguns parâmetros não são contemplados pela norma brasileira, tais como a resistência aos ciclos gelo-degelo, resistência à tração e resistência à frenagem/escorregamento, conforme segue no Quadro 5. São fatores importantes a serem analisados tendo em vista sua solicitação direta nas peças de *pavers*.

Quadro 5 - Parâmetros em peças de concreto para pavimentação intertravada de diferentes normas.

Países	Norma	Requisitos específicos		
		Resistência a ciclos gelo-degelo (perda de massa)	Resistência a tração	Resistência a frenagem/escorregamento
Brasil	NBR 9781/2013	-	-	-
Estados Unidos	ASTM C936: 2016	< 1% (após 50 ciclos)	-	-
Canadá	CSA A231.2: 1995	após 25 ciclos \leq 200g/m ² ; após 50 ciclos \leq 500g/m ²	-	-
Inglaterra/Europa	BS EN-1388: 2003	média de 3 resultados < 1,0 Kg/m ² e nenhum resultado individual > 1,5 Kg/m ²	Resultados individuais > 3,6 Mpa; Carga/comprimento da seção de ruptura (N/mm) > 250	< 45
África do Sul	SANS 1058: 2009		Tráfego leve \geq 2,2 MPa; Tráfego pesado \geq 2,8 MPa	-
Austrália e Nova Zelândia	AS/NZS 4456.4: 2003		-	-
Colômbia	NTC 2017:2004	-	Valor individual deve ser > 4,2 MPa e o valor médio pra 5 amostras > 5,0 Mpa	-

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

É importante considerar a resistência à tração, pois é pelo esforço de flexão submetido normalmente nas peças intertravadas durante o tráfego de veículos e pessoas que são geradas fissuras em sua face inferior, o que pode causar a penetração de agentes agressivos no pavimento e reduzir a durabilidades das peças (TAFAREL *et al*, 2016).

Vale destacar que os pavimentos intertravados podem ter uma maior resistência aos sais de degelo do que os materiais de pavimentação convencionais devido ao alto teor de cimento, resistência, densidade e baixa absorção (ICPI, 2015).

2.3 Concreto Sustentável

Na produção de *pavers*, o concreto é o elemento fundamental na fabricação deste tipo de pavimento, podendo variar a depender do processo de fabricação, consistência e propriedades do concreto. Assim, compreender o comportamento do concreto e seus elementos constituintes é de grande importância para o estudo dos pavimentos intertravados.

Sendo o material mais utilizado na construção civil, o concreto encontra-se nesta posição há mais de 50 anos, sendo seu consumo mundial em torno dos 11 bilhões de toneladas ao ano, sendo sua alta demanda consequência da sua superioridade em desempenho, resistência à ação da água quando comparado a outros materiais como madeira e aço. Esse material é constituído por uma mistura de cimento, agregados graúdos, agregados miúdos e água, e algumas vezes, torna-se possível também a adição de aditivos. (SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, 2017).

A ABNT NBR 7211/2009 relata que os agregados devem ser compostos por grãos minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, assim como não devem conter substâncias de natureza e quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. A referida norma também estabelece os parâmetros exigíveis para a recepção de agregados miúdos e graúdos utilizados na confecção dos concretos. Ela define o agregado miúdo ou mais especificamente a areia como sendo proveniente da ação do intemperismo sobre as rochas ou resultante dos processos de britagem e moagem de rochas estáveis, podendo também ser mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de 4,8mm e ficam retidos na peneira de 0,075mm.

Responsáveis em média por 75 % do volume de concreto, os agregados influenciam em inúmeras propriedades e possibilitam que alguns componentes da rocha artificial a ser formada apresentem melhor desempenho, tais como: redução da retração a pasta de cimento, aumento da resistência ao desgaste, melhor trabalhabilidade e aumento da resistência ao fogo (JUNIOR, 2015).

Uma das maiores preocupações em relação à qualidade do concreto está associada à qualidade dos agregados empregados, em especial do agregado miúdo, mais especificamente da areia natural, material mais comumente utilizado na fabricação de concretos. De acordo com Sbrigh Neto (2005), o esgotamento das jazidas de agregado miúdo natural nas proximidades dos grandes centros consumidores, o aumento dos custos de transporte, o acirramento da competição comercial entre os produtores de concreto e a conscientização da sociedade que

demanda leis de proteção ambiental, vieram a contribuir para um melhor entendimento sobre a importância dos agregados.

De acordo com Nascimento (2016), a amenização ou extinção dos recursos naturais viraram o foco de pesquisa de vários especialistas, o que resultou no surgimento dos chamados concretos especiais, os quais trouxeram alguns avanços em relação ao concreto convencional.

Segundo Bidone (2015), essa prática de reaproveitamento de materiais é ainda quase insignificante diante do montante gerado, onde a maioria das instalações opera com unidades de beneficiamento fixas.

Nesse sentido, a aplicação de resíduos em adição e/ou substituição parcial ou total de agregados favorece o setor construtivo no quesito socioeconômico e ambiental. Sendo assim, reduziria a extração de minerais nos leitos rios, pois seria uma alternativa em relação a areia, gerando benefícios para construção civil, trazendo economia e redução dos recursos naturais não renováveis.

Logo, atualmente se torna possível realizar estudos que visam à substituição parcial ou total deste material por resíduos da própria construção civil, resíduos da produção cerâmica e de outras atividades, como a mineração, o que torna possível a inserção de resíduos da mineração como componente do concreto para fins da pavimentação intertravada.

2.4 Durabilidade do Concreto

A sucessiva expansão das ruas com pavimentação em municípios exige uma melhor qualidade dos seus componentes, visto que os investimentos públicos para a sua manutenção são altos. Dessa maneira, busca-se cada vez mais proporcionar uma melhor performance e vida útil do concreto para que, conseqüentemente, eleve-se a durabilidade desses pavimentos (SCHVAICKARDT *et al.*, 2018).

O estudo de durabilidade de materiais tem se tornado imprescindível para a inserção e aceitação de materiais alternativos no mercado, principalmente devido à ausência de normativas técnicas embasando as propriedades do novo produto. Desta forma, vislumbra-se que as características do novo material sejam similares ou superiores aos convencionais (já existentes) e que sejam duráveis ao longo do tempo, exercendo a função ao qual foi designado em condições semelhantes aos materiais comumente utilizados.

Segundo Figueiredo (2015), para que os materiais alternativos sejam aceitos e inseridos no mercado é preciso que possuam características tecnológicas comprovadas. Isso compreende fundamentalmente apresentarem desempenho satisfatório, conservando suas plenas condições de uso ao longo de toda sua vida útil, ou seja, que se tenha uma durabilidade adequada à utilização requerida.

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de verificar a durabilidade dos materiais alternativos sob diferentes formas de avaliação e utilização. Como não há um modelo ou metodologia padrão para realização do estudo da durabilidade do concreto, os resultados dos trabalhos desenvolvidos até o momento tendem a apontar diretrizes a serem seguidas e metas a serem alcançadas, por isso justificam-se as diversas técnicas para avaliação da durabilidade adotada, bem como os resultados obtidos pelos pesquisadores (FARIAS FILHO, 2007).

Diante da ausência de normas técnicas no estudo da durabilidade do concreto e de pavimentos intertravados, a análise da pesquisa proposta torna-se inovadora, devendo ser adaptada e moldada às condições específicas de aplicação. No caso da pavimentação intertravada, devem ser observados os fatores que maior terão influência na aplicação dos *pavers*, relacionando o comportamento mecânico do pavimento às condições ambientais e de desgaste.

Segundo Oliveira *et al.* (2006), a presença de compostos agressivos misturados aos resíduos sólidos pode não afetar o comportamento mecânico do material à longo prazo, porém eventualmente poderá oferecer riscos à saúde dos usuários, como também prejuízos devido à baixa qualidade do produto alternativo proposto. Por esta razão, é fundamental a estimativa do comportamento do novo produto dentro dos princípios de avaliação de desempenho.

Farias Filho (2007) enfatiza que no estudo da durabilidade, a resistência à compressão é uma das propriedades que pode servir como parâmetro para quantificação e observação de possíveis variações quando se observa a vida útil de um material inserida em determinado meio ambiente.

Logo, em conformidade ao que preconiza a norma NBR 9781/2013, a resistência a compressão surge como principal fator de aceitação na avaliação da durabilidade de *pavers* a partir da inserção de materiais alternativos.

A durabilidade também pode ser avaliada analisando-se alguns parâmetros como perda de massa, variação de volume ou expansão, ao longo do tempo no qual se submete o material a ciclos de repetição periódica de determinado evento, molhagem/secagem, por exemplo. Para isso, pode-se recorrer a três metodologias: ensaios de envelhecimento acelerado, ensaios de envelhecimento natural e estudos de deterioração em uso (OLIVEIRA, 2004).

Os indicadores de degradação são as propriedades mensuráveis utilizadas para medir o avanço da queda de desempenho do produto em uso. A seleção desse indicador é etapa importante do estudo, pois deve ser de fácil mensuração e, preferencialmente, correlacionado com o desempenho. Após cada período de degradação deveriam ser repetidos todos os ensaios e avaliações de desempenho relativo às demais necessidades dos usuários, mas este procedimento é dispendioso e desnecessário, porque na maioria das vezes a degradação afeta apenas o desempenho relativo a algumas necessidades (OLIVEIRA, 2004).

O desenvolvimento de novas tecnologias pela comunidade científica é um esforço na busca por elevar a durabilidade do concreto em comunhão com o desenvolvimento econômico sem aumentar o consumo de materiais da natureza.

Oliveira *et al.* (2006) avaliaram o envelhecimento acelerado de amostras de concreto confeccionados com adição de entulho, com base em ensaios de molhagem e secagem, tendo a variação da resistência à compressão como indicador de degradação. Os ensaios foram realizados em amostras de concreto convencional (sem entulho) e de concreto alternativo, com incorporação de 30%, 60% e 100% de entulho em relação à massa total dos agregados naturais (areia e pedrisco). A proporção entre os dois agregados naturais (areia e pedrisco) sempre permaneceu na relação de 50%, determinada experimentalmente como a mistura mais compacta entre os agregados secos. A composição com 60% de entulho destacou-se por ter apresentado uma menor degradação.

Torgal e Jalali (2010) avaliaram o comportamento mecânico de concretos contendo resíduos da indústria cerâmica. Foram moldados corpos de prova em diferentes composições, utilizando-se o resíduo cerâmico em pó para substituição parcial do cimento e o resíduo cerâmico britado substituindo o agregado convencional. Após o período de cura úmida, os corpos de prova foram submetidos a doze ciclos de envelhecimento, cada um com 24 h de duração, sendo cada ciclo composto por uma fase principal constituída por quatro subfases que intercalaram períodos de calor e de temperaturas negativas e posteriormente uma fase secundária de acondicionamento. Relativamente à resistência antes e após o envelhecimento acelerado, constataram que a substituição de cimento por resíduo cerâmico aumentou o desempenho dos concretos, ocorrendo efeito inverso para a substituição dos agregados.

Almeida (2016) analisou o uso do PET como substituto parcial do agregado miúdo. As peças do traço 1:1,5:1,5, com fator a/c 0,45, foram submetidas aos ensaios de resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, microscopia eletrônica de varredura, desgaste por abrasão, suscetibilidade ao ataque por sulfatos e suscetibilidade à ação do calor e da chuva. Os resultados obtidos indicaram que a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a

resistência à tração na flexão diminuíram à medida que o teor de PET aumentou; os ensaios de desgaste por abrasão indicaram que as peças, com qualquer um dos teores utilizados, podem ser usadas em situações com efeitos de abrasão acentuados; as peças apresentaram-se resistentes ao ataque por sulfatos, independentemente da presença de PET; quando suscetíveis à ação do calor e da chuva, a peça analisada teve variação de massa e perda de resistência na ordem de 21%, todavia, a água lixiviada não apresentou risco de contaminação para o solo.

Altoe *et al.* (2017) examinaram a durabilidade em blocos de concreto para *pavers* fabricados com resíduos da queima do bagaço da cana-de-açúcar e de pneu em substituição parcial do agregado miúdo. O teor de substituição do agregado miúdo por resíduos foi de 27%, sendo de 25% para a CBC (Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar) e 2% de resíduos de pneu moído. Foram avaliadas as seguintes características: a resistência à abrasão e absorção de água, uma vez que as duas influenciam de forma determinante a vida útil de todos os tipos de concreto. Foram ensaiadas peças ainda não utilizadas e peças retiradas de uma calçada protótipo construída com *pavers* com e sem resíduos. Os resultados mostraram que a substituição de agregados miúdos pelos resíduos propostos não alterou ou influenciou as características analisadas de forma negativa.

Santos e Ferrari (2018) estudaram a influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. Eles observaram estatisticamente, que ocorreu a redução da resistência à compressão e da massa específica das peças concretadas devido à inserção do resíduo de PVC. Em relação ao ensaio de durabilidade por secagem e molhagem, os pesquisadores constataram que o bloco perde massa ao mesmo tempo em que aumenta a quantidade de PVC no traço.

Della Flora (2018) estudou a substituição em volume de diferentes porcentagens de agregado miúdo natural por areia de PET na produção de concretos não estruturais, analisando assim a durabilidade através do ensaio de absorção de água por capilaridade. Através da análise de variância foi possível comprovar a influência das variáveis independente estudada (teor de pet e tempo de ensaio). O resultado apontou que a substituição do agregado miúdo natural, proveniente de uma fonte não renovável, por agregado miúdo de PET pode ser utilizado em concretos não estruturais.

De acordo com Passos *et al.* (2020), a utilização de resíduo cerâmico na produção do concreto pode ser considerado uma ação viável em prol da sustentabilidade na indústria da construção civil. O trabalho avaliou a durabilidade dos concretos produzidos com agregados provenientes de resíduos de cerâmica vermelha visando seu emprego na produção de elementos estruturais em concreto armado. Foram realizadas análises de carbonatação, absorção por

permeabilidade capilar, permeabilidade ao ar e penetração por cloretos para verificação da durabilidade, bem como a verificação de suas propriedades mecânicas, em especial RSC. Os resultados demonstraram menor permeabilidade para os concretos produzidos com resíduo cerâmico e, em seguida, menor ataque por cloretos e carbonatação para misturas com até 40% de resíduo cerâmico.

Silva *et al.* (2020) estudaram os Agregados de Resíduos de Concreto (ARC) na produção de novos concretos. Nessa pesquisa foi verificado o efeito da substituição de 20 % de agregado gráúdo natural por ARC e realização da modificação da superfície dos ARC através da abordagem de mistura dois estágios. Foram executados ensaios para avaliar o comportamento dos concretos em relação às propriedades mecânicas e parâmetros de durabilidade. Os resultados revelaram a abordagem de mistura dois estágios com 25 % de cimento Portland mostraram-se como uma alternativa viável para proporcionar melhorias nos ARC. Além de resultar em um concreto com boas características de propriedades mecânicas e durabilidade, também foi percebida a viabilidade da utilização de agregados reciclados, não gerando custo adicional no processo de produção do concreto.

No trabalho de Alves *et al.* (2020), o resíduo plástico foi incorporado em substituição à areia, nas proporções de 5% e 15% para posterior comparação com corpos de prova sem substituição na produção de *pavers*. Propriedades físicas como granulometria, RCS, absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca e saturada foram vistas para corroborar a viabilidade e aplicação deste novo material. Como resultado, foi observado que as adições dos resíduos aprimoram a resistência mecânica para ambas as substituições e possibilitou também, redução do índice de vazios das amostras de 5%, reduzindo a absorção de água e elevando a durabilidade do material. As amostras de 15% mostraram um pequeno aumento na absorção de água, contudo isso não provocou redução da sua resistência, se comparado aos *pavers* de referência.

Pimentel *et al.* (2020) avaliaram os parâmetros que afetam a durabilidade do concreto de classe C30, produzido com diferentes tipos de agregado reciclado. Foram utilizados quatro tipos de agregados gráudos: o natural (NA), o de concreto (ARCO), o cimentício (ARCI) e o cimentício tratado (ARCI Tratado) e foi fixado um teor de substituição do agregado natural pelos agregados reciclados de 30%. Foram realizados os ensaios de medição indireta da durabilidade, através da determinação da permeabilidade ao ar, penetração e migração de cloreto e carbonatação. Os resultados indicaram que o concreto utilizando o agregado tipo ARCO, produzido com 100% de concreto britado, apresentou características similares ao concreto referência, indicando a possibilidade de ser aplicado em estruturas de concreto

armado. Quanto ao ARCI, os resultados obtidos foram inferiores quando comparados ao concreto referência para os ensaios referentes à medição indireta da durabilidade, porém, o traço apresentou bom comportamento mecânico. O concreto produzido com o ARCI Tratado não apresentou melhor desempenho do que o concreto com ARCI para a maioria das características avaliadas, indicando que o tratamento proposto não foi adequado.

Logo, a observação da durabilidade é um dos elementos mais significativos no caminho para que se conheça novos materiais em desenvolvimento. Com o intuito de que se tenha confiança nas características tecnológicas de um novo material e indicando uma possibilidade técnica, a ser oferecido no mercado, é essencial o conhecimento de sua vida útil, bem como suas condições de uso.

2.5 Planejamento de Experimentos

Por ser um material heterogêneo, o estudo do concreto envolve muitas variáveis, que estão diretamente correlacionadas e que interferem nas propriedades finais do produto. O método tradicional de estudar simultaneamente as variáveis em diversos níveis apresenta a desvantagem de não obter com precisão o efeito de fatores entre os fatores, além do alto consumo de material, se tornando inviável economicamente, demandando elevado tempo de execução. Outro problema é que o estudo não explora completamente o espaço amostral, mostrando as melhores respostas de inter-relação entre as variáveis.

Logo, o planejamento experimental surge como uma importante ferramenta para aperfeiçoar os resultados obtidos a partir de experimentos, reduzindo o número de ensaios necessários para uma análise em um dado espaço amostral. No entanto, para que o uso dessa metodologia atinja os objetivos desejados, é necessário haver uma integração entre o processo, a estatística e o bom senso entre todos os envolvidos como forma de melhor avaliar o planejamento realizado (RODRIGUES E LEMMA, 2009).

Segundo Montgomery e Runger (2013), os engenheiros devem resolver problemas científicos de modo a tornar os experimentos eficientes através de etapas básicas como: coletar dados, analisar, interpretar e entender como eles estão relacionados com o modelo que foi proposto para o problema em estudo.

Bispo (1999) relata que em um experimento deve-se inicialmente determinar os fatores e os resultados de interesse para o sistema em estudo e definir os objetivos que se deseja

alcançar. A partir de então, pode-se utilizar métodos de planejamentos experimentais para o auxílio da obtenção e análise dos resultados. Alguns dos métodos mais conhecidos são: Simplex, Planejamento fatorial e a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Através destes métodos, é possível verificar as iterações e os efeitos individuais de todas as variáveis no processo.

Segundo Gunawan *et al.* (2005), a MSR fundamentada na modelagem matemática de respostas, permite identificar a influência entre as variáveis independentes (fatores controlados) e as dependentes (respostas) do sistema analisado. Sua utilização é indicada quando se deseja aperfeiçoar as variáveis analisadas visando obter as condições ótimas que venham a maximizar uma reação, sendo um método estatístico eficaz para esse fim.

Segundo Nunes (1998), um planejamento com mistura é aquele que para formar um produto final tem-se a mistura de dois ou mais ingredientes, sendo a resposta final dada em função das proporções dos componentes envolvidos.

Em uma mistura, como no caso do concreto, a quantidade qualquer total se mantém constante, variando apenas seus componentes. Se a quantidade total é mantida constante, o valor da resposta varia quando mudanças são feitas nas proporções relativas dos componentes. Logo, no experimento de misturas, qualquer variação que ocorra nos componentes, espera-se um resultado proporcional na resposta.

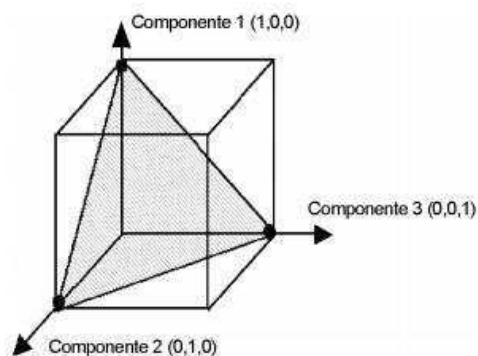
Segundo Barros Neto *et al.* (2010), em uma mistura com q componentes, onde x_i é a componente do i (com $0 \leq x_i \leq 1$ e $i = 1, 2, \dots, q$), e soma das proporções de todos os ingredientes deve dar um, ou seja, 100%. Percebe-se que as variáveis se tornam dependentes, logo, a alteração da proporção de um componente implicará na alteração dos demais ingredientes.

Cornell (2002) cita que ao estudar um planejamento de misturas, terá obtido a influência de cada componente, sozinho ou em combinação com outros, na resposta, além de identificar as composições que proporcionem a melhor condição e pode-se ainda, combinar os componentes para prever as melhores respostas. Afirma ainda que o espaço experimental assume a forma de uma região com $(q - 1)$ dimensões, denominada Simplex.

Segundo Barros Neto *et al.*, (2010), uma mistura com três componentes ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) define um triângulo equilátero englobando todas as combinações para esta mistura. A Figura 8 mostra uma rede simples para três componentes, bem como a superfície de resposta gerada. Observa-se que os vértices do triângulo representam os componentes puros ($x_1=1; x_2=0$ e $x_3=0$), sem adição ou proporção de outras variáveis. Já as arestas representam

a influência de dois componentes (misturas binárias) e no interior da superfície são representadas as misturas ternárias.

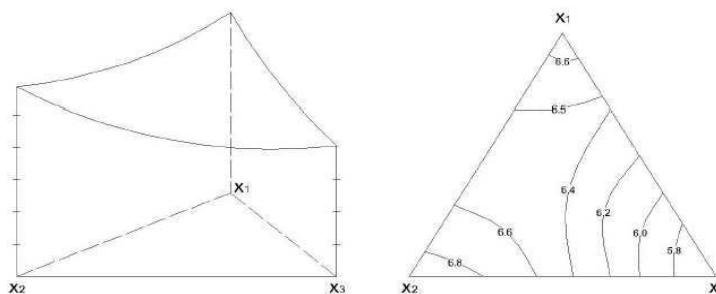
Figura 8 - Superfície de resposta para três componentes



Fonte: Barros *et al.* (2010)

Segundo Cornell (2002), a variação de uma resposta pode ser descrita por uma superfície de resposta desenhada acima do triângulo (Figura 9.a) ou por meio de curvas de nível (Figura 9.b).

Figura 9 - Variação da resposta para três componentes



a. Superfície de resposta

b. Curvas de nível

Fonte: Cornell (2012, adaptado)

Ainda segundo Cornell (2011.a), a premissa do planejamento experimental da rede simplex é a escolha dos pontos na coleta de dados que devem se distribuir homoganeamente por toda a região simplex, estabelecendo uma relação com o polinômio que descreverá a resposta, uma vez que a quantidade e a localização dos pontos dependerão do grau de polinômio. A Tabela 1 mostra a quantidade de pontos do planejamento rede simplex de acordo com o grau de polinômio do modelo (m) e com a quantidade de componentes (q) da mistura. Após estabelecido o número e quais serão os componentes, deverá ser escolhido o grau de

polinômio, determinando os pontos de estudo e obtendo-se as respostas. Em seguida, ajusta-se o modelo aos resultados.

Tabela 1 - Quantidade de pontos em um planejamento de rede simplex

Grau do modelo (m)	Número de componentes (q)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	4	5	6	7	8	9	10
2	6	10	15	21	28	36	45	55
3	10	20	35	56	84	120	165	220
4	15	35	70	126	210	330	495	715

Fonte: Cornell (2011.a, adaptado)

Logo, a partir da Tabela 1 é possível verificar que quanto maior for o grau de polinômio estabelecido, mais corretos serão os dados do planejamento estabelecido, uma vez que será adquirido um maior número de combinações possíveis, com respostas mais coerentes.

2.6 Estado da Arte – Pavimento intertravado com adição de Resíduos

Silva (2014) analisou a substituição do agregado miúdo por resíduo de borracha de pneu no concreto para a produção de pisos táteis intertravados. Com proporções de até 30% do resíduo foi possível obter resistências à compressão aos 28 dias maiores que 50MPa. Além do mais, houve melhora na absorção de água, índice de vazios e na massa específica nas substituições de 10%, 20%, 40% e 50% da borracha na areia.

De acordo com Guerra (2014), para a produção de *pavers*, com a adição de rejeito de minério de ferro *Pellet Feed* em proporções de 5% e 10% em relação à massa do cimento, foi possível um ganho de resistência característica com 29,06MPa e 28,01Mpa, respectivamente, já ao concreto de referência com 27,25MPa. Segundo o autor, isso se deu porque o rejeito proporcionou um efeito *filler* na mistura, promovendo um melhor empacotamento. Porém, a absorção de água das peças com adição do rejeito aumentou com alguns valores individuais maiores que o máximo exigido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

Nascimento (2016) avaliou a incorporação de 0%, 3%, 6%, 9% e 12% do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) como agregado, mantendo a mesma relação cimento:agregado

(1:5) na produção de blocos intertravados de concreto. Ao analisar a resistência à compressão dos blocos, foram verificadas reduções de até 77,5% em relação ao traço padrão. De acordo com a autora, como a granulometria do RPP está muito próxima a do cimento e a moldagem foi feita com concreto seco sob pressão, o contato entre as partículas de cimento foi prejudicado.

Almeida (2016) analisou o uso do PET como substituto parcial do agregado miúdo. Com um total de 45 composições, foi utilizado o Traço 1 (1:1,5:1,5), Traço 2 (1:2:2) e Traço 3 (1:2,5:2,5), sendo aplicada em cada traço a relação água:cimento de 0,45, 0,50 e 0,55 e as proporções de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de substituição da areia por PET. As peças feitas com as substituições apresentaram um aumento na absorção de água devido à elevação da porosidade causada pela ausência da interação química entre a matriz cimentícia e o polímero. Houve também redução na resistência à compressão de até 25% em relação ao concreto sem o uso do PET. Entretanto, apesar da diminuição foi possível encontrar traços com mais de 35MPa, sendo assim viável a incorporação desse polímero para o uso no concreto de pavimentos intertravados.

Com a substituição de 50% e 100% do agregado graúdo (calcário) por escória de aço, Abdelbary e Mohamed (2016) verificaram melhoras na resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão dos blocos intertravados. Neste último, o aumento da resistência foi de 119% e se deu, segundo os autores, porque a escória atribui uma maior dureza ao concreto. Além disso, o estudo constatou também que a melhoria da resistência à compressão se deu pela boa adesão do resíduo com a pasta, devido a sua superfície rugosa.

Para propor uma solução alternativa de utilização de resíduo na produção de concreto para pisos intertravados, Giovanella (2017) analisou a substituição de 0%, 17%, 33%, 50%, 67% e 100% da areia fina por lodo remanescente do beneficiamento de gemas. Com o aumento da porcentagem de substituição foi constatada uma redução da absorção de água nos blocos, consequência do aumento da densidade da mistura, causada pela redução do volume de vazios devido o menor diâmetro das partículas do resíduo. Além disso, o uso do lodo de gemas em diferentes proporções gerou resistência à compressão superior ao traço de referência. O autor ressalta que esse rejeito possui características pozolânicas, o que resulta num aumento da quantidade de pasta na mistura, ocasionando um acréscimo na resistência.

Em sua dissertação, Ferrari (2017) utilizou o PVC moído como substituto parcial da areia média para a fabricação de peças de pavimento intertravado, com substituições de 5%, 10% e 15% do agregado pelo resíduo. Com 10% do PVC moído na composição, o valor da resistência à compressão aos 28 dias foi de 19,27MPa, bem próximo do produzido sem

substituição, que foi 21,81MPa. Além disso, houve uma melhora nos valores de massa específica das peças, pois com o uso do resíduo, elas ficaram mais leves.

Por outro lado, Mokhtar *et. al.* (2018) substituíram o agregado grosseiro por PET nas proporções de 5%, 10% e 15%. Os valores de resistência à compressão variaram de 38,7MPa, com o traço de referência, para 21,5MPa, 12,7MPa e 5,2MPa, com 5%, 10% e 15% de PET, respectivamente.

Já Scheffer (2018) relatou a avaliação experimental de blocos de concreto para pavimento intertravados com adição de fibra de coco verde. Os resultados apresentaram que a adição dessa fibra causou a redução da resistência à compressão em relação ao bloco de composição normal. Como houve a redução da resistência com o uso da fibra de coco em comparação aos outros ensaios de blocos normais, foi constatado que com adição da fibra de coco os blocos resultantes podem ser utilizados como passagem somente para pedestres.

Dando sequência, destaca-se ainda o estudo de Marques (2019) que examinou a produção de concreto para piso intertravados com adição de resíduos de borracha de pneu inservível. Assim como os outros trabalhos anteriores, os resultados também apresentaram valores inferiores a 35 MPa estabelecido pela ABNT NBR 9781/2013. Durante o estudo, o valor que mais se aproximou da norma em relação à resistência foi de 25,98 MPa para corpo com 10% de resíduo de borracha de pneu inservível e o valor mais aproximado à resistência máxima adquirida para o corpo de prova sem borracha, que foi de 26,36 MPa.

Okumura *et al.* (2019) utilizaram em seus estudos lodo da estação de tratamento de água de Maringá, para produção de *paver* através da substituição parcial da areia pelo lodo na fabricação das peças com teores de 5%, 10% e 20%. De acordo com os resultados obtidos, foi constatado que a produção é possível quando aplicada em teores abaixo de 5%, pois nesta condição não foram verificadas alterações significativas na resistência da peça. Se aplicados teores superiores a 5%, o *paver* apresenta uma redução na resistência à compressão com aumento na absorção de água da peça.

No que concerne a Oliveira *et. al.* (2021), ressalta-se que seus estudos avaliaram aparas geradas na produção de canudos descartáveis em peças de concreto para pavimento intertravado. As aparas, após o processo de fragmentação, foram submetidas a um tratamento superficial com solução de hidróxido de sódio nas concentrações de 0,25 e 0,50 M (mol/L) e introduzidas no concreto em teores volumétricos de 0,25; 0,50 e 0,75%. Com isso, foi verificado que a resistência à compressão aos 28 dias das amostras com a adição das aparas de canudos foi inferior à da referência, mas respeitou o limite de 35 MPa determinado pela ABNT NBR

9781 (2013). Além disso, tratamento superficial alcalino das aparas permitiu uma melhor aderência entre o material de reforço e a matriz, reduzindo a absorção de água dos *pavers*.

De forma relacionada, Strieder (2021) estudou a incorporação de cinza produzido em uma unidade agroindustrial e suas potencialidades na reutilização e produção de *pavers* como agregado miúdo reciclado, nas proporções de 0, 5, 10, 20 e 40%. A partir disso, foi registrado que no ensaio de absorção de água os *pavers* confeccionados com os diferentes tratamentos apresentaram alta absorção, cujos teores foram superiores ao valor máximo de 6% exigido pela norma brasileira. Os resultados da resistência à compressão indicaram que o emprego da cinza é viável na confecção do *paver* quando há substituição do cimento estudado nas proporções de 5, 10 e 20%.

Leite e Lucena (2022), por sua vez, investigaram diferentes quantidades de agregados miúdos e graúdos, originados de RDC com aditivos de polietileno, para elaboração de concreto permeável aplicados aos *pavers*. Os resultados obtidos foram de resistência atingido cerca de 5,06 MPa, resistência essa insuficiente para a aplicação dos *pavers* em pavimentos. No que tange aos pavimentos permeáveis, o ensaio de permeabilidade demonstrou-se extremamente satisfatório com a permeabilidade aos 100%, garantindo, portanto, um escoamento de águas pluviais perfeito caso fosse aplicado às calçadas.

Já Feitosa *et al.* (2022) analisaram a influência da incorporação da cinza do bagaço da cana na resistência à compressão de misturas secas de concreto, visando sua utilização em pavimentos intertravados com substituições variando de 5 a 50% em massa, tanto no cimento como na areia. Nos resultados obtidos, os ensaios de resistência à compressão mostraram um aumento na resistência aos 7 dias, em substituições de até 20% no cimento. Aos 28 dias, entretanto, todas as misturas com cinza apresentaram resistência à compressão inferior ao traço de referência. Os autores concluíram que o efeito físico causado pela alta finura da cinza pode ter melhorado o empacotamento no início, mas sua baixa pozolanicidade resultou num menor crescimento da resistência à compressão aos 28 dias.

Por fim, destaca-se o estudo de Rigolin (2022), que analisou a viabilidade técnica da incorporação do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto Vila Pureza - localizada na cidade de São Carlos - em peças de concreto para pavimentação incorporado em matriz cimentícia, substituindo-o pela areia em concentrações de 3, 6 e 12% em massa. Nos resultados obtidos, foi verificado que a resistência à compressão das peças de concreto para pavimentação com 6% de substituição atingiu valores abaixo dos requeridos pela norma (NBR 9781: 2013) e por outro lado teve resultados compatíveis com os requeridos pela norma quando se trata de absorção à água e verificação dimensional das peças. |

Capítulo 3

3 METODOLOGIA

Neste capítulo estão dispostos os aspectos referentes aos materiais e procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa, bem como os métodos e especificações empregados para a realização dos ensaios.

3.1 Material

A seguir, estão descritos os materiais comumente utilizados na fabricação do concreto (cimento, água, agregado graúdo e agregado miúdo), bem como uma breve descrição dos resíduos inseridos para a produção dos blocos intertravados aplicados na pesquisa.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, que exerce a função de aglomerante do concreto produzido. É utilizado em fábricas de artefatos de cimento na produção de blocos para pavimentação e possui propriedades satisfatórias para confecção de peças pré-moldadas de concreto. Sua composição é formada por cerca de 90% de clínquer, 5% de material carbonático e 5% de gesso.

3.1.2 Água

A água utilizada para a fabricação do concreto não foi analisada, uma vez que a água de abastecimento público fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), destinada ao consumo humano, é considerada dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 15900 (ABNT, 2009) e pode ser utilizada na preparação do concreto.

3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo foi a brita granítica com dimensão nominal de 9,5mm, também conhecida comercialmente como Brita 0 (zero), pedrisco ou “cascalinho”, com granulometria dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2019). O material foi adquirido no comércio local da cidade de Campina Grande/PB.

3.1.4 Agregado Miúdo

Os agregados miúdos são compostos pelos convencionais: areia e o pó de pedra e os resíduos da mineração: resíduo da scheelita, do pó de quartzo, resíduo de rochas ornamentais de lama (ROL) e resíduo de rochas ornamentais de material britado (ROB).

3.1.4.1 Areia

A areia utilizada em todo o trabalho foi a areia média, de origem natural, tida como areia do tipo quartzosa e classificada como agregado miúdo, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), adquirida no comércio local da cidade de Campina Grande-PB.

3.1.4.2 Pó de Pedra

O pó de pedra - resíduo do processo da brita granítica, ambos comumente utilizados nas construções da região - foi adquirido no comércio local da cidade de Campina Grande-PB.

3.1.4.3 Resíduo de scheelita

Foram utilizados resíduos provenientes do beneficiamento do tungstênio, originando os resíduos de scheelita, extraído na Mineradora Brejuí, localizada na cidade de Currais Novos-RN.

3.1.4.4 *Resíduo de pó de quartzo*

Foram utilizados resíduos provenientes do beneficiamento do quartzo, extraído da CGM Mineração, localizada na cidade de Parelhas-RN.

3.1.4.5 *Resíduo de rochas ornamentais da lama abrasiva (ROL)*

O resíduo de rochas ornamentais, utilizado em forma de lama abrasiva, foi proveniente da indústria de beneficiamento GRANFUJI, situada no distrito industrial da cidade de Campina Grande-PB.

3.1.4.6 *Resíduo de rochas ornamentais de material britado (ROB)*

O resíduo de rochas ornamentais utilizado foi decorrente da fragmentação das peças e das falhas de processamento de mármore e granitos, também provinda da GRANFUJI, situada no distrito industrial da cidade de Campina Grande-PB.

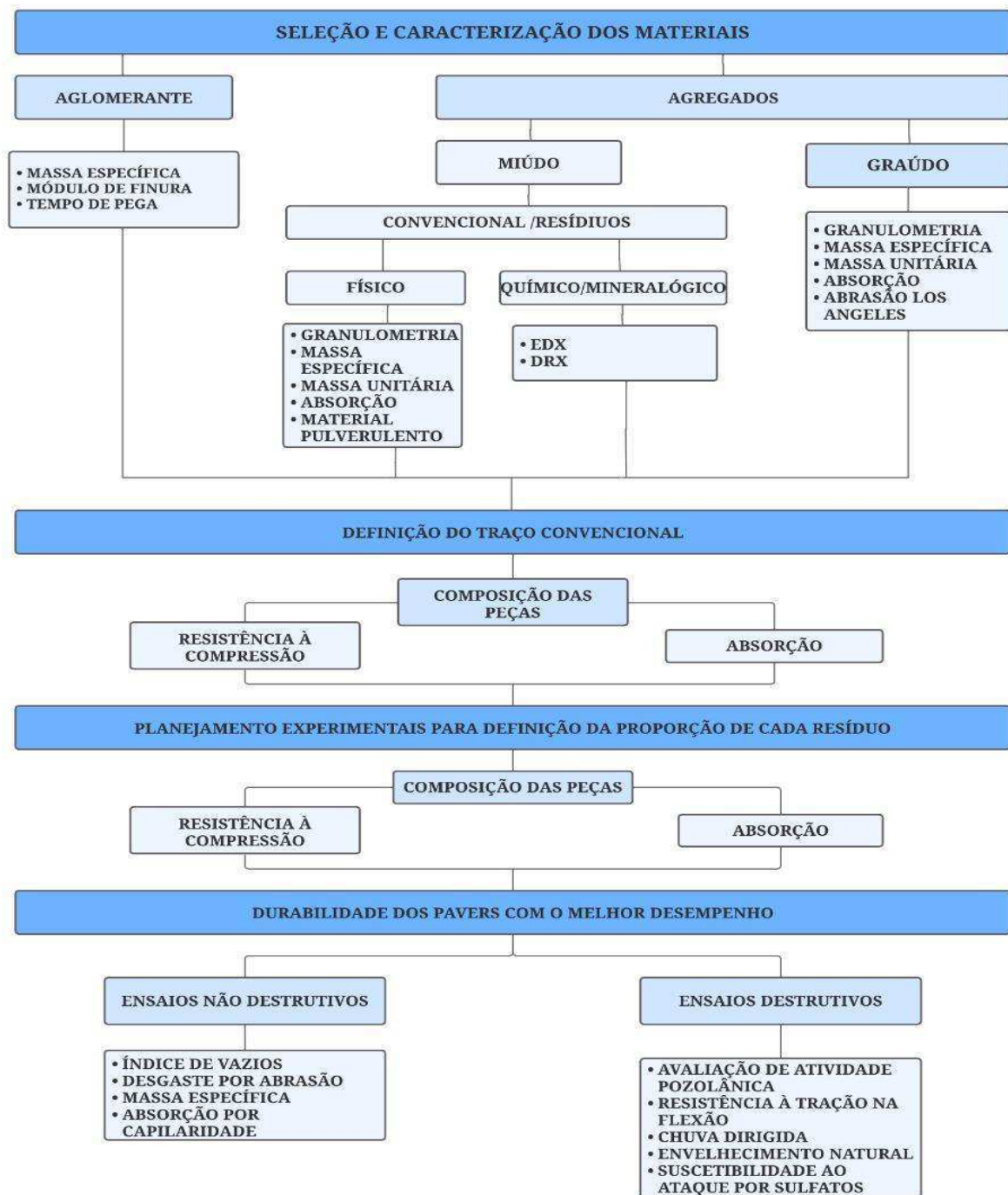
3.2 Métodos

No que se relaciona ao processo detalhado, tomado como base para a realização do experimento da pesquisa, considere-se a sequência das atividades realizadas no estudo: **1) Seleção e caracterização dos materiais:** obtenção, coleta e preparação das amostras para a caracterização física e química dos agregados miúdos (areia, pó de pedra, scheelita, quartzo, ROL e ROB) e a caracterização física do agregado graúdo (brita 0) e do aglomerante; **2) Definição do traço convencional:** concreto sem inserção de resíduos e moldagens dos blocos intertravados para verificar qual a melhor proporção de materiais que melhor se enquadra conforme algumas propriedades requeridas na produção de concreto e na norma NBR 9781 (ABNT, 2013); **3) Planejamento experimental e análise de superfícies de resposta para definição da proporção de cada resíduo:** planejamento experimental de misturas rede simplex para análise da melhor proporção de substituição do resíduo no traço convencional, obtendo como resposta a absorção e a resistência à compressão simples; e **4) Durabilidade dos pavers**

com o melhor desempenho: definida a melhor proporção de cada resíduo a ser substituído, as peças foram submetidas a ensaios de durabilidade verificando o comportamento do material ao longo do tempo.

Nessa sequência, apresenta-se a figura 10, que dispõe o fluxograma da metodologia do estudo.

Figura 10 - Fluxograma da Metodologia



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

3.2.1 Seleção e Caracterização dos Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram coletados, estocados e armazenados no laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Campina Grande-PB. Todos os materiais foram guardados para serem utilizados ao longo da pesquisa, conforme andamento de cada etapa. A amostragem de agregados e a redução de tamanho para ensaios de laboratório foram realizadas conforme as normas NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2001).

3.2.1.1 Caracterização do Aglomerante

Na caracterização do cimento, foram realizados os ensaios descritos no Quadro 6, acompanhados das respectivas normas consultadas.

Quadro 6 - Ensaios do aglomerante e suas respectivas normas para a realização de cada análise

Aglomerante	ENSAIOS	NORMA
	Massa específica	NBR 11513/2017
	Módulo de finura	NBR 11579/2012
	Tempo de pega da argamassa fresca	NBR NM 65/2003

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

3.2.1.2 Caracterização dos Agregados

A caracterização dos agregados foi dividida da seguinte forma: agregados miúdos utilizados na pesquisa, areia, pó de pedra, pó de quartzo, resíduo da scheelita e das rochas ornamentais (ROL e ROB); e agregado graúdo, a brita 0.

Na caracterização dos agregados miúdos, foram realizados os ensaios de caracterização física, descritos no Quadro 7, acompanhados das respectivas normas consultadas:

Quadro 7 - Ensaios dos agregados miúdos e suas respectivas normas.

Caracterização física dos agregados miúdos	ENSAIOS	NORMA
	Granulometria: finura e dimensão máxima	NBR NM 248/2003
	Massa unitária: estado solto e compactado	NBR NM 45/2006
	Absorção de água	NBR NM 30/2001
	Material pulverulento	NBR NM 46/2003
	Massa específica do agregado seco; Massa específica SSS; Massa Específica.	NBR NM 53/2009

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Além da caracterização física dos agregados miúdos, também foi realizada a caracterização química e mineralógica. Essa etapa compreendeu a apresentação da composição química dos agregados convencionais (areia e pó de pedra) e dos resíduos, realizada através dos seguintes métodos: análise química (EDX) e Difração de Raios-X (DRX), ambos feitos no Laboratório de Engenharia de Materiais (UFCG - *Campus CG*).

Já para a caracterização física do agregado graúdo, a brita 0, foram realizados os ensaios especificados no Quadro 8, bem como as normas consultadas.

Quadro 8 - Ensaio do agregado graúdo e suas respectivas normas.

	ENSAIOS	NORMA
Caracterização física dos agregados graúdos	Granulometria: módulo de finura e dimensão máxima	NBR NM 248/2003
	Massa unitária: estado solto e compactado	NBR NM 45/2006
	Absorção de água	NBR NM 30/2001
	Massa específica do agregado seco; Massa específica SSS; Massa Específica.	NBR NM 53/2009
	Abrasão Los Angeles	NBR NM 51/2001

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

3.2.2 Cálculo do traço convencional

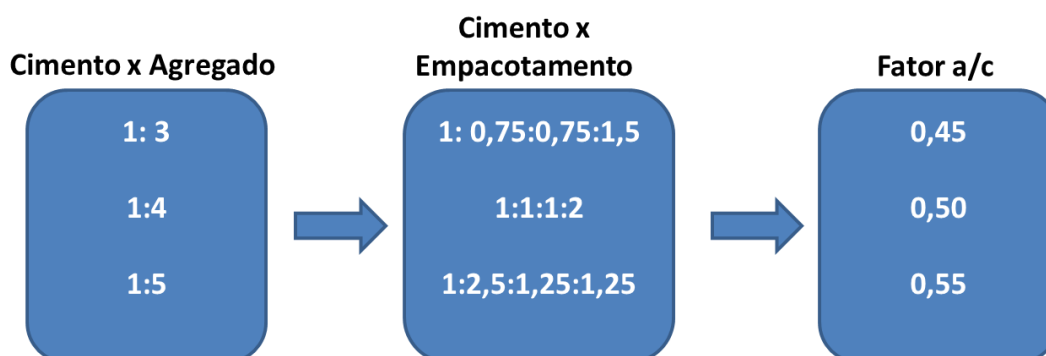
Após a etapa de caracterização dos agregados, foi realizado o procedimento de empacotamento dos grãos para análise da melhor proporção a ser inserida no traço do concreto convencional – CONV (sem inserção de resíduos da mineração) utilizados. A composição dos agregados foi baseada no menor índice de vazios, visando alcançar maiores massas unitárias, diretamente proporcionais à resistência à compressão simples. Os valores encontrados foram de 50% de brita, 25% de areia e 25% de pó de pedra, variando a quantidade de aglomerante e água.

Assim, foi avaliada durante a pesquisa a possibilidade do uso do concreto de consistência plástica, que possibilita a fabricação das peças em fôrmas de plástico, propiciando sua confecção sem a necessidade das vibroprensas, em geral utilizadas na produção das peças de pavimento intertravado. Compreende-se que o uso das fôrmas plásticas tem por finalidade viabilizar uma alternativa às pequenas empresas de artefatos de cimento que não dispõem de recursos para a aquisição de equipamentos de maior porte.

Na definição do traço CONV, foram avaliados alguns parâmetros, tais como consumo de cimento, trabalhabilidade, absorção e resistência à compressão. Esse traço serviu de referência e de comparação para parâmetros de resistência e durabilidade, além da análise estatística e viabilidade de utilização dos resíduos. Desse modo, foi utilizada a metodologia de dosagem empírica, analisando os traços variando a proporção de agregados, consumo de cimento e o teor água/cimento, verificando a trabalhabilidade do concreto e em seguida os parâmetros de RCS e absorção.

Assim, para a composição das peças e considerando o empacotamento obtido, utilizou-se o concreto plástico com os seguintes traços: Traço 1 (1:0,75:0,75:1,5), Traço 2 (1:1:1:2) e o Traço 3 (1:1,5:1,5:2). Para cada traço, variou-se o fator água/cimento em 0,45; 0,50 e 0,55, resultando em 09 traços finais. Na figura 11 ilustram-se os fatores levados em consideração em cada peça.

Figura 11 - Fatores para determinação do traço convencional.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Para fins de praticidade na análise dos resultados, a análise empírica resultou no estudo de 9 traços, conforme se mostra na Tabela 2:

Tabela 2 - Traços estudados no traço convencional.

Traços	Proporções	Traços	Proporções
Traço 1	1:3:0,45	Traço 5	1:4:0,50
Traço 2	1:3:0,50	Traço 6	1:4:0,55
Traço 3	1:3:0,55	Traço 7	1:5:0,45
Traço 4	1:4:0,45	Traço 8	1:5:0,50
		Traço 9	1:5:0,55

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Nesta pesquisa, optou-se por não utilizar aditivos no concreto, no intuito de tornar o estudo o mais aplicável e prático possível para a produção de *pavers*, principalmente quando aplicado às empresas de pequeno porte, que podem ser instaladas próximas às áreas das mineradoras como forma de viabilizar a utilização do resíduo no concreto para fins de produção de pavimentos intertravados.

3.2.2.1 Moldagens dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em fôrmas retangulares de PVC (Figura 12) com dimensões de 20 cm x 10 cm x 6 cm e foram produzidos para obtenção de parâmetros de RCS e absorção, na intenção de verificar qual o traço com melhor desempenho, sendo base para o planejamento experimental e, em seguida, referência na etapa de estudo de durabilidade do concreto. Segue o modelo das fôrmas utilizada na figura 12.

Figura 12 - Fôrmas retangulares em PVC utilizada nas moldagens.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

O processo utilizado para confecção do concreto utilizando a fôrma retangular em PVC foi semelhante ao indicado na norma NBR 5738 (ABNT, 2016). Os materiais foram misturados em betoneira, espalhados nos moldes (devidamente limpos e untados com desmoldante) e adensados em mesa vibratória. Em seguida, foi realizado todo acabamento da face superior, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 - Peças com acabamento da face superior.

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Para melhor regularização das faces, minimizando falhas na prensa ao romper o *paver*. Logo após 24 h da moldagem, foi executado o capeamento com pasta de cimento (proporção do a/c de 0,35 a 0,45), conforme apresenta-se na Figura 14.

Figura 14 - Peças após capeamento.

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Após 24 horas da realização do' capeamento, as peças foram submetidas à cura por imersão em água em tanque durante 28 dias para realização do ensaio de RCS e absorção, como mostra a figura 15.

Figura 15 - Peças em cura submersa.

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

3.2.2.2 Ensaio de resistência à compressão

Segundo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), a resistência à compressão da peça, expressa em Megapascals (MPa), é obtida dividindo-se a carga de ruptura, expressa em Newtons (N), pela área de carregamento, expressa em milímetros quadrados (mm²), multiplicando-se o resultado pelo fator p , em função da altura da peça, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Fator multiplicativo p .

Espessura nominal da peça (mm)	p
60	0,95
80	1
100	1,05

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

Dessa forma, a resistência característica estimada à compressão é dada pela Equação 1.

$$f_{pk,est} = f_p - t * s \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

f_p = resistência média das peças, em MPa;

f_{pi} = resistência individual das peças, em MPa;

n = número de peças da amostra;

s = desvio-padrão da amostra, em MPa;

t = coeficiente de Student, em função do tamanho da amostra, fornecido pela Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficiente de Student.

N	t
6	0,92
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883
12	0,876

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

Nesta pesquisa, utilizou-se $p = 0,95$ (altura das formas de concreto) e $t = 0,92$. Para realização do ensaio, foi usada uma prensa da marca Cyber-Tronic, modelo YIMC109, com capacidade de 150 toneladas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* de Campina Grande. Na Figura 16 mostra-se o esquema de rompimento dos corpos de prova.

Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

3.2.2.3 Ensaio de absorção de água

Segundo a norma NBR 9781 (ABNT,2013), a absorção de água, expressa em porcentagem, representa o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco.

Seguindo os procedimentos recomendados pela norma, inicialmente, os *pavers* foram imersos em água à temperatura de (23 ± 5) °C por 24 horas. Em seguida, retirou-se a água superficial do corpo de prova com um pano úmido e pesou-os individualmente. O processo foi repetido a cada 2 horas até que a diferença de massa não fosse maior do que 0,50% em relação ao valor anterior. Com isso, foi determinada a massa saturada m_2 .

As peças de concreto foram colocadas na estufa a uma temperatura de (110 ± 5) °C durante 24 horas. Posteriormente, as peças foram pesadas individualmente e repetiu-se o processo a cada 2 horas até que a diferença de massa não fosse maior do que 0,50% em relação ao valor anterior, anotando-se o valor da massa saturada m_1 .

Na Figura 17 apresentam-se registros fotográficos das etapas de realização do ensaio de absorção de água dos *pavers*, que foi realizado no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, *Campus* de Campina Grande.

Figura 17 - Determinação da absorção de água dos *pavers*.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

O cálculo da absorção de água em peças de concreto para pavimentação foi obtido através da Equação 3.

$$A(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_2} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

m_1 = massa do corpo de prova seco, em gramas.

m_2 = massa do corpo de prova saturado, em gramas.

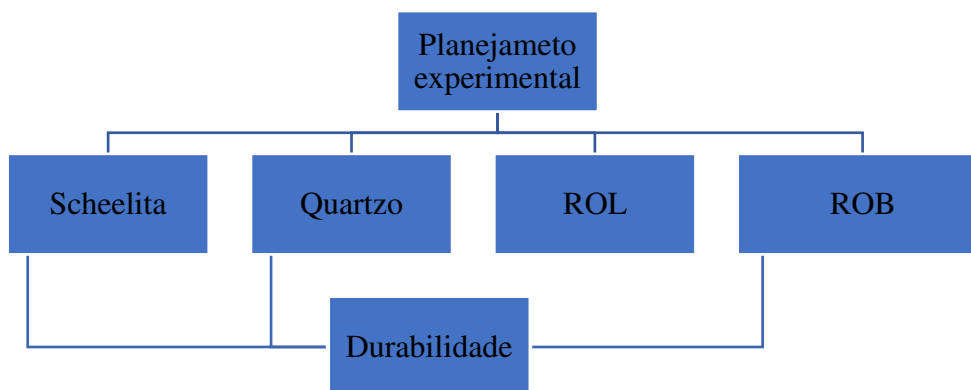
3.2.3 Planejamento Experimental e Análises de Superfícies de Resposta

Algumas dificuldades encontradas ao realizar ensaios são decorrentes da necessidade de estudar simultaneamente o efeito das variáveis que constituem os concretos, com diferentes níveis, o que torna os experimentos industriais inviáveis economicamente, visto que os custos e o tempo de execução são elevados.

Desta forma, para melhor viabilidade de confiabilidade dos dados após a definição do traço de referência, foi utilizado o planejamento experimental de misturas rede simplex para análise da melhor proporção de substituição do resíduo no traço convencional, estabelecendo como variáveis de entrada os agregados miúdos (proporção de resíduo, areia e pó de pedra) e como resposta a RCS e a absorção.

Uma vez que o objetivo é a substituição agregados miúdos convencionais por resíduos, foram realizados planejamentos individuais para definir a proporção ideal de cada um dos resíduos. Neste caso, inicialmente, foram realizados 04 planejamentos experimentais, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma do planejamento experimental.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Conforme o fluxograma apresentado, foram executados 4 planejamentos experimentais:

1. Traço com Resíduo de Scheelita – Cimento: Agregado Miúdo (areia + pó de pedra+ scheelita): Agregado Graúdo: Água;
2. Traço com Resíduo de Pó de Quartzo – Cimento: Agregado Miúdo (areia + pó de pedra+ pó de quartzo): Agregado Graúdo: Água;

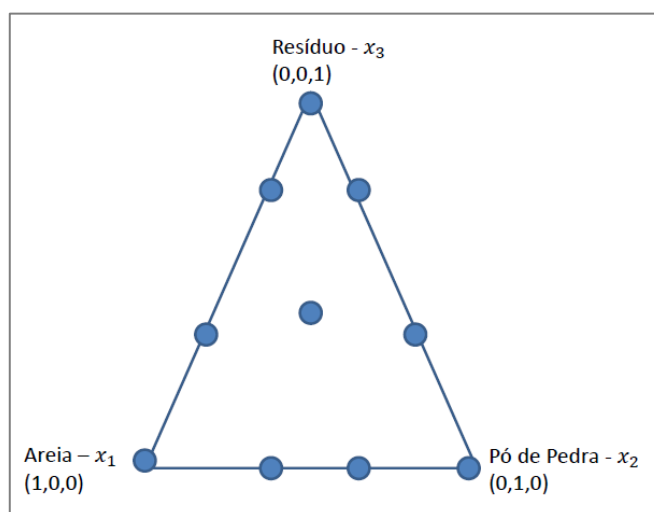
3. Traço com Resíduo de ROL – Cimento: Agregado Miúdo (areia + pó de pedra+ Lama de ROL): Agregado Graúdo : Água;
4. Traço com Resíduo de ROB – Cimento: Agregado Miúdo (areia + pó de pedra+ Britagem de ROB): Agregado Graúdo: Água.

Segundo Nunes (1998), as variáveis X_1 devem ser linearmente dependentes, ou seja, a alteração da proporção de um componente implicará automaticamente na mudança de pelo menos uma das demais variáveis.

Logo, as variáveis escolhidas no planejamento foram os agregados miúdos que são dependentes entre si, representados da seguinte forma: areia (X_1), pó de pedra (X_2) e o resíduo em questão (X_3). Logo, $X_1 + X_2 + X_3 = 1$.

Para cada planejamento experimental foram utilizados o planejamento de misturas simplex lattice com grau de polinômio 3, resultando assim em 10 pontos de estudos na superfície, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Pontos de estudo na superfície.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Com o intuito de obter resultados mais consistentes, os processos foram realizados em duas repetições. Percebe-se que os pontos “1,0,0” e “0,1,0” e os dois pontos da aresta da areia e do pó de pedra se repetiram com as proporções em todos os experimentos. Além do mais, para cada processo foram considerados 06 corpos de prova (04 para ensaio de RCS e 02 para o ensaio de absorção) resultando em um total de 57 traços e 268 corpos de prova prismáticos medindo 20 cm x 10 cm x 6 cm, sendo distribuídos conforme mostrado no Quadro 9.

Quadro 9 - Distribuição do experimento.

Resíduo			
Traço	Proporções		
	Resíduo	Areia	Pó
1	1,000000	0,000000	0,000000
2	0,000000	1,000000	0,000000
3	0,000000	0,000000	1,000000
4	0,333333	0,666667	0,000000
5	0,333333	0,000000	0,666667
6	0,000000	0,333333	0,666667
7	0,666667	0,333333	0,000000
8	0,666667	0,000000	0,333333
9	0,000000	0,666667	0,333333
10	0,333333	0,333333	0,333333

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

As proporções dos materiais para realização dos ensaios foram calculadas matematicamente gerando o modelo numérico estabelecido para a resposta de interesse e comprovação experimental da eficiência dos modelos gerados por meio da análise de variância (ANOVA).

3.2.4 Durabilidade com traços de melhor desempenho

A análise dos ensaios tecnológicos e de durabilidade foram realizadas para as composições que apresentaram melhor desempenho mecânico, nos ensaios de RCS e absorção de água. Vale salientar que os *pavers* com o traço CONV também foram submetidos aos ensaios para comparação com os demais. Os ensaios que foram realizados para análise da durabilidade estão descritos no Quadro 10 e serão detalhados posteriormente.

Quadro 10 - Ensaios e suas respectivas normas para a realização de cada etapa.

Blocos Intertravados – Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos	ENSAIOS	NORMA
	Avaliação de Atividade Pozolânica	Adaptado, NBR 5751/2015; Figueiredo (2015)
	Índice de vazios e Massa específica	NBR 9778/2009
	Absorção por capilaridade	Adaptada NBR 9779/2012
	Resistência à tração na flexão	NBR 12142/2010
	Desgaste por Abrasão	NBR 9781/2013

Blocos Intertravados – Durabilidade	Suscetibilidade ao Ataque por Sulfatos	Adaptado NBR 13583/2014; Figueiredo (2015) e Almeida (2016)
	Chuva Dirigida	Adaptado Figueiredo (2015) e Almeida (2016)
	Envelhecimento Natural	Adaptado Figueiredo (2015)

Fonte: Dado da pesquisa (2022).

Assim, para a execução dos ensaios durabilidade, foram moldados mais 204 corpos de provas, conforme indicado no Quadro 11.

Quadro 11 - Moldagens de CP para cada ensaio de durabilidade.

ENSAIOS	QTDE CP / Resíduo	QTDE TOTAL
Avaliação de Atividade Pozolânica	6	24
Índice de vazios e Massa específica	3	12
Absorção por capilaridade	3	12
Resistência à tração na flexão	3	12
Desgaste por Abrasão	3	12
Suscetibilidade ao Ataque por Sulfatos	12	60
Chuva Dirigida	12	48
Envelhecimento Natural	6	24

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

3.2.4.1 Avaliação de Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica das composições dos *pavers* incorporados com os resíduos foi determinada segundo a norma da NBR 5751 (ABNT, 2015) modificada, seguindo a metodologia utilizada por Figueiredo (2015).

Desse modo, a avaliação foi realizada tomando-se como parâmetro os resultados da resistência à compressão simples (RCS), ou seja, o índice de atividade pozolânica foi determinado pela diferença da RCS dos traços incorporados com os resíduos e o traço CONV.

3.2.4.2 Índice de vazios e Massa específica

Para este ensaio, foram utilizados três corpos de prova para cada composição estudada. Seguiram-se os procedimentos descritos na NBR 9778 (ABNT, 2009). Inicialmente, retiraram-se os corpos de prova da cura após 28 dias e determinou-se a massa da amostra ao ar, em seguida foi colocada na estufa a temperatura de 105 °C, e determinou-se a massa após intervalos de 24, 48 e 72 h de permanência na estufa. Em seguida, procedeu-se à imersão da amostra em água à temperatura de 23 °C, de maneira gradual, primeiro 1/3 do seu volume nas primeiras 4 horas e 2/3 nas 4 horas seguintes, sendo completamente submerso nas 64 horas restantes. Em cada uma das condições foi registrada a massa do corpo de prova, além das leituras nos intervalos de 24, 48 e 72 h de permanência na imersão.

A absorção foi calculada por meio da Equação 4.

$$A_b = \left(\frac{B-A}{A}\right) \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

Ab = absorção após imersão da água (%);

A = massa da amostra seca em estufa (gramas);

B = massa da amostra saturada em água na condição SSS (gramas).

O índice de vazios foi calculado por meio da Equação 5.

$$I = \left(\frac{B-A}{B-D}\right) \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

I = índice de vazios após imersão em água (%);

A = massa da amostra seca em estufa (gramas);

B = massa da amostra saturada em água na condição SSS (gramas);

D = massa da amostra após saturação em água (gramas).

3.2.4.3 Absorção por capilaridade

O teste de capilaridade consiste em determinar a absorção de água a partir da ascensão capilar da argamassa endurecida. As especificações são feitas com base na norma NBR 9779 (ABNT, 2012), com algumas adaptações para o uso dos *pavers*.

Foram moldados três *pavers* para cada composição e com 28 dias de cura foram secas em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C, até constância da massa. Em seguida foram resfriados ao ar determinada da massa inicial (m_c) em gramas. Os corpos de prova foram posicionados com a face inferior em um recipiente com nível de água de (5 ± 1) mm (este nível foi mantido durante todo o ensaio).

Pesaram-se os corpos de prova após 3, 6, 24, 48 e 72h após contato com a água na condição saturada da superfície seca (SSS). Realizou-se ainda a marcação externa do nível que a água atingiu. Após o fim do ensaio, os corpos de prova foram rompidos, por compressão diametral, para avaliação do perfil de água interno.

A absorção por capilaridade é calculada através da Equação 6.

$$C = \frac{A-B}{S} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

C = absorção de água por capilaridade, para cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo (g/cm^2);

A = massa do corpo de prova em cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo (gramas);

B = massa do corpo de prova seco ao ar (gramas);

S = área da seção transversal do corpo-de-prova (cm^2).

3.2.4.4 Ensaio de Resistência à tração na flexão

O ensaio para avaliação da resistência à tração na flexão foi regido pela norma NBR 12142 (ABNT, 2010). Apesar deste ensaio não constar como parâmetro necessário na aprovação de *pavers* de acordo com as normativas brasileiras, outros países já o levam em consideração, por ser um parâmetro indicativo para peças de concreto exposto a cargas dinâmicas (tráfego).

Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo resíduo e para o de concreto CONV. Após o tempo de cura, o ensaio foi realizado numa prensa de marca Shimadzu, modelo Serve Pulser Controller 4890, com capacidade de 10 toneladas, no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* de Campina Grande. Na Figura 20 mostra-se o ensaio sendo executado.

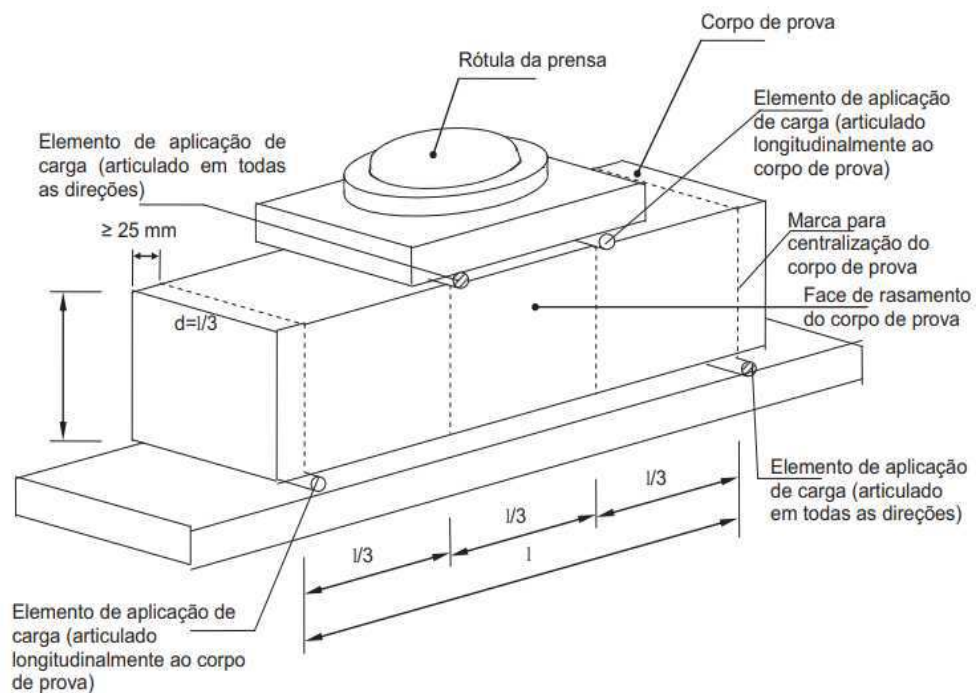
Figura 20 - Ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A norma estabelece o método de ensaio de tração por flexão de corpos de prova de concreto, empregando o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão. Logo, os blocos, após retirados da cura, foram medidos e marcados, conforme medidas representadas na Figura 21.

Figura 21 - Esquema de medição dos blocos para o ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010).

O ensaio consistiu na aplicação de uma força continuamente e sem choque, de modo que o aumento da tensão sobre o corpo de prova estivesse compreendido entre 0,9 MPa/min e 1,2 MPa/min.

A resistência à tração na flexão foi calculada pela Equação 7.

$$f_{ct,f} = \frac{F * l}{b * d^2} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão, expressa em Megapascals (MPa);

F = força máxima registrada, em N;

l = dimensão do vão entre os apoios, em mm;

b = largura média do corpo de prova na seção de ruptura, em mm;

d = altura média do corpo de prova na seção de ruptura, em mm.

3.2.4.5 Ensaio de Desgaste por Abrasão

O ensaio para avaliação de desgaste por abrasão foi regido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013). De acordo com a norma, este ensaio é facultativo, não sendo obrigada a realização do ensaio para aceitação dos blocos de concreto.

Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo de resíduo e para o de concreto CONV, nos quais, após o tempo de cura, foram submetidos ao ensaio no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), *Campus* de Caruaru.

Segundo a referida norma, a determinação da resistência à abrasão se deu pressionando um disco rotativo de aço com diâmetro de 200 mm e espessura de 70 mm contra a peça de concreto, equipado com um reservatório que libera um material abrasivo (óxido de alumínio malha 80) entre a peça e o disco, provocando o desgaste. O tempo de contato é de (60 ± 3) segundos da peça com o disco em uma rotação de 75 RPM, ao mesmo tempo em que o material abrasivo é derramado a uma vazão de $100 \pm 0,05$ g a cada 100 ± 5 g rotações do disco. Ao final do ensaio, o material abrasivo não foi reaproveitado.

Na Figura 22, mostra-se o aparato experimental de execução do ensaio.

Figura 22 - Ensaio de desgaste por abrasão

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

O resultado foi obtido com a medida da largura da cavidade, em mm, corrigindo-se essa dimensão com um fator de calibração.

3.2.4.6 Ensaio de Suscetibilidade ao Ataque por Sulfatos

O ensaio para avaliação da variação dimensional decorrente da exposição à solução de sulfatos foi adaptado da NBR 13583 (ABNT, 2014), que prescreve o método para avaliação em barras de argamassa de cimento Portland. Segundo Almeida (2016), a agressividade do meio em que as estruturas de concreto estão inseridas pode reduzir significativamente a vida útil das mesmas, apresentando o íon de sulfato nesses ambientes. Logo, este ensaio foi realizado objetivando-se verificar se a presença dos resíduos provocaria alteração de variação de massa, variação das medidas e da RCS. Nesse sentido, foram executadas estas três aferições.

Para verificação da variação das medidas, com auxílio de um paquímetro, foram feitas três medições (mm) de largura, comprimento e altura dos *pavers* previamente demarcados com tinta permanente no início do ensaio para que posteriormente as medições fossem efetuadas nos mesmos pontos.

Os corpos de prova, após serem devidamente identificados e passado o seu período de cura, foram imersos em água por 48 horas sendo então retirados e, após secagem da água superficial com um pano úmido, feita a leitura inicial das dimensões com duas casas decimais, nas linhas previamente marcadas e o registro de massa úmida. Foram moldados 3 corpos de

prova para cada tipo de resíduo e para o concreto CONV, os quais foram divididos em dois grupos: um grupo foi imerso em solução de sulfato de sódio (10%) e outro em água (23 ± 2)°C, sendo distribuídos conforme o Quadro 12.

Quadro 12 - Distribuição dos Cp

Paver	Quantidade de <i>Pavers</i>			
	Solução		Água	
	Volume, Massa, RCS 28 dias	Volume, Massa, RCS 42 dias	Volume, Massa, RCS 28 dias	Volume, Massa, RCS 42 dias
CONV	3	3	3	3
Resíduo de Scheelita	3	3	3	3
Pó de Quartzo Quartzo	3	3	3	3
ROL	3	3	3	3
ROB	3	3	3	3

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

As medições foram efetuadas no início do ensaio e com 28 e 42 dias após a imersão, sendo a expansão individual calculada por meio da Equação 8:

$$E_{id} = \frac{(M_{idade} - M_{inicial})}{M_{inicial}} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

E_{id} = expansão individual (%)

$M_{inicial}$ = média das medições (md.) iniciais em cada corpo de prova (mm)

M_{idade} = média de md. efetuadas na idade correspondente em cada corpo de prova (mm).

A expansão resultante é a diferença entre a expansão dos corpos de prova imersos em solução de sulfato de sódio e a dos corpos de prova imersos em água.

Para a medição da variação de massa sofrida pelos blocos de *pavers*, também foram registrados os quantitativos de massa úmida dos corpos de prova a cada leitura de dimensões. Analogamente, a variação de massa individual foi calculada por meio da Equação 9.

$$M_{id} = \frac{(m_{idade} - m_{inicial})}{m_{inicial}} \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

M_{id} = Massa individual (%);

$m_{inicial}$ = massas iniciais em cada corpo de prova (mm);

m_{idade} = massa efetuadas na idade correspondente em cada corpo de prova (mm).

O resultado é expresso pelo aumento ou diminuição da expansão e da massa dos *pavers* devido ao ataque da solução de sulfato de sódio em relação à expansão dos *pavers* curados em água, devendo ser calculado por meio das Equações 10 e 11.

$$E_r = E_s - E_a \text{ Equação 10}$$

Em que:

E_r = expansão resultante (%);

E_s = expansão média curadas em solução de sulfato de sódio, em %;

E_a = expansão média curadas em água, em % .

Analogamente,

$$M_r = M_s - M_a \text{ Equação 11}$$

Em que:

M_r = expansão de massa resultante (%);

M_s = expansão de massa média curadas em solução de sulfato de sódio, em %;

M_a = expansão de massa média curadas em água, em %.

Verificadas as variações de volume e de massa, foram realizados os ensaios de RCS conforme descrito anteriormente, nas duas idades de cura.

3.2.4.7 Ensaio de Chuva Dirigida

A metodologia adotada no ensaio de durabilidade de chuva dirigida foi uma adaptação da metodologia adotada por Figueiredo (2015) e Almeida (2016). Este ensaio tem por objetivo acelerar o envelhecimento dos *pavers* quando submetidos à ação da chuva e do sol. O equipamento utilizado neste ensaio foi o *Basic Hydrology System* (BHS), disponibilizado pelo laboratório de hidráulica da UFCG.

O BHS é formado por um conjunto de oito aspersores distribuindo um fluxo de água regulável, além de conter um reservatório e uma bomba de circulação que permite a reutilização da água ao longo do processo, podendo ser visualizado de forma ilustrativa na figura 23.

Figura 23 - Equipamento *Basic Hydrology System* (BHS)



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESPA), até o ano de 2021, registrou-se que a maior precipitação no estado foi de 12/litros/m². Já segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a temperatura média de um pavimento de concreto nas regiões mais quentes do Brasil alcança até 65 °C. Logo, na intenção de submeter as peças a condições mais extremas possíveis, o quantitativo de exposição e tempo nos ciclos atentaram para estes dados.

O ensaio de envelhecimento acelerado por simulação da chuva dirigida foi realizado através de ciclos de molhagem (chuva) durante o período de duas horas com vazão de 12/litros/m² por hora e secagem em estufa com temperatura de 70 °C em 21h e 30 min, para permitir a completa secagem dos corpos de prova, e 30 minutos para pesagem dos *pavers*, totalizando ciclos de 24h de duração.

Foram realizados 24 ciclos no total. As propriedades mecânicas para este estudo foram avaliadas ao término do 12º e 24º ciclos, através da RCS. A perda de massa foi determinada pela determinação do peso ao término de cada ciclo.

A variação de massa foi utilizada como parâmetro para avaliar a resistência à erosão causada pela chuva, sendo os resultados comparados aos encontrados para os corpos de prova de referência (sem adição de resíduos).

3.2.4.8 *Ensaio de Envelhecimento Natural*

Seguindo a metodologia de Figueiredo (2015), na avaliação do ensaio de envelhecimento natural, após o período de cura de 28 dias, seis corpos de prova de cada composição foram expostos às condições climáticas no jardim de uma residência no município de Campina Grande – PB, de 13 de Novembro de 2021 a 13 de Novembro de 2022. Após o período, os *pavers* foram submetidos aos ensaios de RCS, para verificação do comportamento ao longo do tempo.

Capítulo 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes a todo o estudo desenvolvido, desde a caracterização dos materiais utilizados até os ensaios de durabilidade das peças de concreto para pavimento intertravado.

4.1 Caracterização dos Materiais

Os primeiros resultados analisados dizem respeito às caracterizações de todos os materiais utilizados neste estudo. Para melhor organização dos dados, as análises foram divididas em aglomerante, agregados miúdos (convencionais e resíduos) e posteriormente agregado graúdo, conforme segue.

4.1.1 Aglomerante

Na Tabela 5 são apresentados os valores encontrados nos ensaios de módulo de finura, massa específica e tempo de pega da argamassa fresca, conforme os ensaios executados.

Tabela 5 - Índice de finura e massa específica do cimento CP V ARI.

Ensaio	Valor Obtido
Módulo de Finura	0,86%
Massa Específica	3,04 g/cm ³
Tempo início de pega da argamassa fresca	1h 45min
Tempo fim de pega da argamassa fresca	4h 07min

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com a tabela, a massa específica do cimento obtida foi de 3,04g/cm³, satisfazendo os requisitos exigidos pela norma NBR 11513 (ABNT, 1990), que especifica um valor menor que 6,0g/cm³. A finura do cimento utilizado foi de 0,86%, atendendo os requisitos

da norma NBR 11579 (ABNT, 2016), que sugere que o índice de finura do cimento Portland de alta resistência inicial, CP V – ARI, deve ser menor do que 6%.

De acordo com a NBR NM 65 (ABNT, 2003), o tempo de início de pega não deve ser inferior a 1h e o de fim não deve exceder o limite de 10h. Portanto, o tempo de início e fim da pega do cimento utilizado, como mostrado na Tabela 5, estão de acordo com a norma, caracterizando o cimento como adequado.

4.1.2 Agregado Miúdo

Os agregados miúdos são de grande valia para o estudo em questão, tendo em vista que a base central da pesquisa foi desenvolvida considerando a substituição de materiais convencionais, com práticas de estudo e aplicações, por materiais alternativos, como os resíduos da mineração.

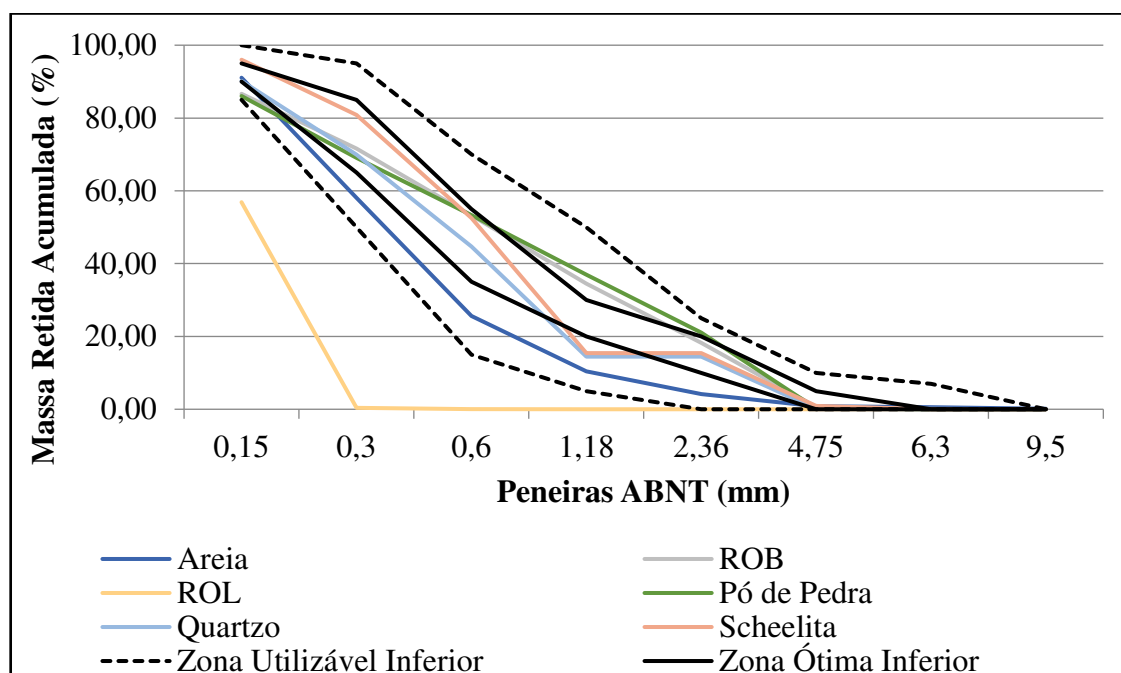
Vale salientar que os materiais citados ainda estão em estudo, sob análise da aprovação da aplicabilidade perante a luz da ciência. Logo, essa análise é de suma importância para em seguida ser possível a avaliação e entendimento do comportamento desde materiais quando usados em misturas heterogêneas como o concreto.

Para melhor compreensão, a análise dos agregados miúdos foi dividida em duas etapas: a caracterização física e caracterização química.

4.1.2.1 Caracterização Física

No ensaio de granulometria, foram identificados os comportamentos da curva granulométrica, bem como o módulo de finura e a dimensão máxima dos agregados. Isso se deu dado que esses fatores influenciam diretamente no comportamento do concreto, principalmente nos quesitos de trabalhabilidade, fator água/cimento, absorção e índice de vazios. Ao longo do ensaio, foi observado que todos os materiais utilizados possuem comportamentos semelhante, com exceção do resíduo de ornamentais de lama, o que pode ser constatado e melhor compreendido a partir da Figura 24, que mostra as curvas granulométricas dos agregados naturais e dos resíduos.

Figura 24 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Como explicitado nas curvas granulométricas da Figura 24, pode-se observar que o ROL se mostra um material muito fino, estando fora da curva do limite inferior de utilização em concretos de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Materiais com granulometria muito fina certamente necessitarão de mais água para garantir uma melhor trabalhabilidade, o que poderá comprometer a RCS do concreto, no entanto, o material pode contribuir para melhor arranjo do esqueleto.

Assim, percebe-se que todos os materiais estudados (exceto o ROL) para composição do concreto como agregado miúdo enquadram-se dentro dos limites de zona utilizáveis inferiores e superiores, estando aptos a sua utilização conforme a norma utilizada em estudo. Além do mais, pode-se observar que se torna viável a substituição da areia e do pó de pedra pelos resíduos propostos, levando em consideração a análise granulométrica, exceto o ROL que pode apresentar comportamento distinto.

Uma alternativa encontrada é a substituição do ROL pelo aglomerante como filler, conforme identificado no estudo realizado por Nascimento (2022), que fez o aproveitamento dos resíduos de rochas ornamentais, em pó, incorporando no concreto, com relações $a/c = 0,45$ e $0,55$, e adições de 10 e 20% do resíduo em relação à massa de cimento, comparados com um traço referência, sem adições. O autor verificou que, no estado fresco, houve uma redução da consistência à medida que o teor de adições aumentava. Já no estado endurecido, os concretos

com adições de resíduo apresentaram perda de resistência à compressão na idade avaliada, porém, com uma redução na absorção de água por capilaridade.

Ainda em relação à Figura 24, analisando a areia e o pó de pedra, utilizados nesta pesquisa como agregados miúdos convencionais, é verificável que o pó de pedra apresenta uma curva granulométrica mais contínua e uniforme, permanecendo em quase toda sua totalidade dentro dos limites ótimos de utilização, com grãos de maiores dimensões quando comparado com a areia. A partir da peneira de abertura de 0,60mm, a quantidade das frações de partículas retidas é bem próxima, propondo uma similaridade no comportamento destes materiais.

A scheelita, por sua vez, apresentou comportamento similar aos agregados convencionais (Figura 24), demonstrando maior familiaridade na composição granulométrica do pó de pedra. A scheelita e o pó de quartzo apresentam grande parcela dentro da zona ótima, sendo então considerados, entre os resíduos avaliados, os melhores com relação à granulometria, para incorporação no concreto em substituição aos agregados convencionais.

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas, torna-se possível conhecer o módulo de finura e o diâmetro máximo de cada um dos agregados analisados, conforme pode ser observado no Quadro 13.

Quadro 13 - Ensaio dos agregados miúdos.

Agregado/ Parâmetro	Areia	Pó de pedra	Scheelita	Pó de quartzo	ROL	ROB
Módulo de finura	1,90	2,67	2,34	2,61	0,57	2,65
Diâmetro Máximo (mm)	2,36	4,75	4,75	4,75	0,30	4,75

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir do quadro, é factível que o módulo de finura está diretamente relacionado com o tamanho das partículas dos agregados, de modo que quanto maior for o módulo de finura, maiores serão suas partículas. A NBR NM 248 (ABNT, 2003) estabelece que o agregado miúdo com módulo de finura entre 2,20 e 2,90 enquadra-se na zona ótima, entre 1,55 e 2,20 na zona utilizável inferior e entre 2,90 e 3,50 na zona utilizável superior. Logo, percebe-se que o pó de pedra, a scheelita, o pó de quartzo e o ROB enquadram-se na zona ótima de utilização, a areia na zona utilizável inferior e o ROL não se enquadra dentro dos limites. Essa medida é

inversamente proporcional ao percentual de reposição do agregado, isto significa que à medida que o percentual de resíduo aumenta, o módulo de finura diminui.

Os diâmetros máximos encontrados do pó de pedra, da scheelita, do pó de quartzo e o do ROB foram de 4,75 mm, enquanto o da areia foi de 2,36 mm e do ROL 0,30 mm.

Almeida (2016), em seus estudos, analisou o resíduo de PET, com módulo de finura de 1,29 e dimensão máxima de 0,60 mm incorporado ao concreto para fins de pavimentação intertravada. Mesmo apresentando granulometria fora das especificações, semelhante ao comportamento do ROL, o autor encontrou resultados satisfatórios para determinados traços.

Na Tabela 6, pode-se identificar os demais parâmetros físicos dos agregados miúdos.

Tabela 6 - Parâmetros físicos dos agregados miúdos.

Ensaio	Areia	Pó de Pedra	Scheelita	Pó de Quartzito	ROL	ROB
Massa específica real (g/cm ³)	2,42	2,58	2,61	2,39	2,52	2,51
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,40	2,56	2,57	2,24	2,49	2,47
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,54	1,68	1,58	1,45	-	1,53
Índice de Vazios estado compactado	35,78	29,83	39,27	39,23	-	38,85
Absorção (%)	0,60	0,80	1,07	0,41	-	0,24
Teor de Material Pulverulento (%)	4,39%	8,03%	1,24%	3,86%	69,51%	7,52%

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com a Tabela 6, nota-se que o resíduo de scheelita apresenta uma massa específica maior em relação aos demais materiais. Isto, provavelmente, é devido aos minerais constituintes nas frações dos resíduos, visto que, com a cominação da rocha no beneficiamento, ocorre uma geração de resíduo com diversos constituintes, o que pode ser justificado pela presença de tungstênio no mineral, que possui massa específica aproximadamente de 19,55 g/cm³. Souza (2019) caracterizou o resíduo de mineração de scheelita encontrando o valor de massa específica 3,04 g/cm³, Costa Filho (2017) apresentou o valor de massa específica 2,98 g/cm³ para fração grossa e 2,90 g/cm³ para fração fina e Gerab (2014) obteve o resultado de massa específica de 2,84 g/cm³, valores ainda maiores do que os obtidos nesta pesquisa.

De forma contrária, o resíduo de quartzo é o que se apresenta com menor valor de massa específica. Uma provável explicação é que o mineral quartzo dispõe de massa específica em torno de 2,60 g/cm³, bem menor que a da scheelita, por exemplo. A massa específica é diretamente

proporcional ao teor de finos, o que pode ser verificado comparando-se as curvas granulométricas com os resultados de massas específicas.

O pó de pedra e a scheelita apresentam maior massa unitária entre os agregados miúdos, portanto, a substituição na mistura pelos demais resíduos pode resultar em uma redução da densidade do material. Segundo Bauer (2008), todos os materiais foram classificados como agregado normal. De acordo com ele, é o ideal para uso em argamassas e concretos, pois o valor da massa unitária apresentada por esses resíduos se encontra na faixa de valor $1 \leq \gamma \leq 2 \text{ g/cm}^3$.

Ainda de acordo com Bauer (2008), a compactidade se relaciona diretamente entre o volume total das partículas e o volume do agregado, a resistência do concreto e a durabilidade do concreto aumentam quando aumenta a compactidade do agregado. Assim, se o agregado possuir baixo índice de vazios, reduz a quantidade de argamassa utilizada, resultando em um concreto eficiente.

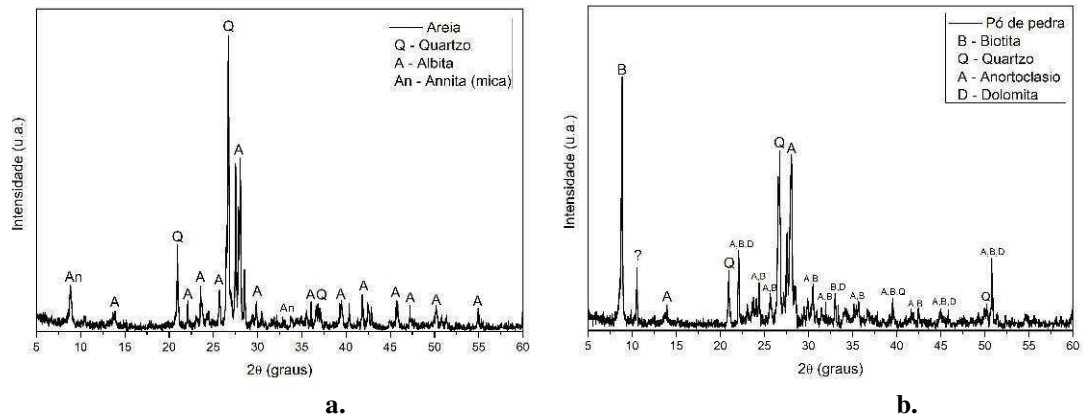
Além disso, observa-se, na Tabela 6, que o resíduo de scheelita possui maior absorção que os agregados miúdos convencionais, contendo maior número e absorvendo 1,07% do peso agregado seco, logo, no comportamento do concreto essa absorção maior pode requisitar uma maior quantidade de água para garantir a mesma trabalhabilidade do traço convencional.

Os teores de materiais pulverulentos encontrados nesta pesquisa foram abaixo de 8% (exceto o ROL) que são valores baixos e não são capazes de ocasionarem problemas de fissuração por retração, por apresentarem poucos finos. O ROL apresentou um alto teor de materiais pulverulentos, na ordem de 69,51%, valor bem acima quando comparado aos demais resíduos, corroborando com a curva granulométrica apresentada. É possível que o resíduo tenha mais finos que o cimento, que pode ter efeito de enchimento em matrizes de cimento.

4.1.2.2 Caracterização Química e Mineralógica

No DRX dos agregados miúdos convencionais, verifica-se que a areia contém quartzo, albita e annita como principais minerais identificados. Pode ser constatado que a areia possui mais intensidade em quartzo, o pó de pedra é mais intenso com biotita (Figura 25a). No que se relaciona ao pó de pedra, a biotita, quartzo, anortoclasio e dolomita, pode-se afirmar que esses são os minerais que se destacam, conforme está disposto e pode ser observado detalhadamente na Figura 25b.

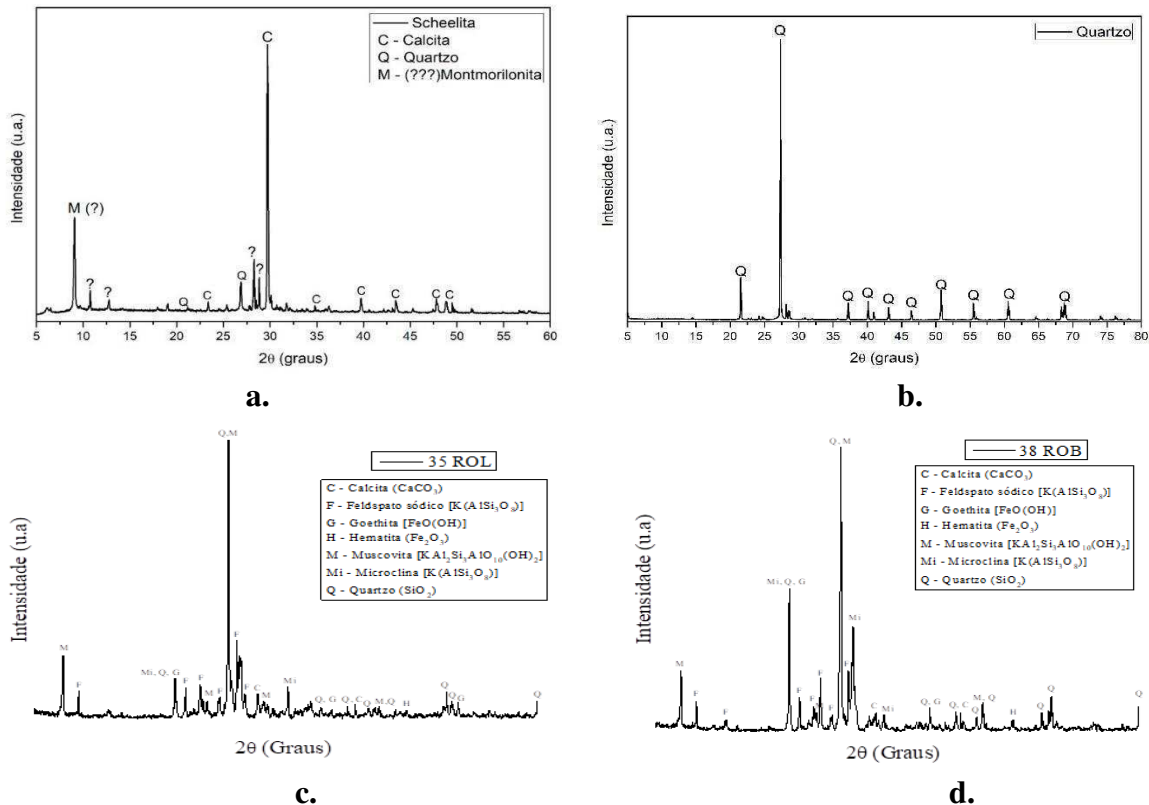
Figura 25 - DRX dos agregados miúdos convencionais.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A difração de Raios-X (DRX) do resíduo da scheelita apresentou como principais constituintes a calcita e o quartzo. Além desses materiais, foi percebida uma leve presença de montmorilonita (argilomineral), conforme pode ser analisado na Figura 26.a. No trabalho de Costa Filho (2017), também foi identificado calcita, quartzo como minerais predominantes e outros em menores proporções como enstatite e grossular ferrian. Já em Medeiros (2016), foram encontrados calcita, quartzo além de grossular ferrian, pyroxmanguite e llite.

Figura 26 - DRX do resíduo da scheelita.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A análise de DRX do quartzo mostra que a fase principal identificada foi o óxido de silício (Quartzo), conforme Figura 26b. Nas amostras do ROL e do ROB foram identificadas picos principais de óxido de silício (Quartzo) e o carbonato de cálcio (Calcita) conforme mostra a Figura 26c. e Figura 26d. Os óxidos de silício estão bem cristalizados e não contribuem para as reações que ocorrem durante o período de cura do concreto.

Observe-se, no Quadro 14, o EDX de todos os agregados miúdos.

Quadro 14 - EDX dos agregados miúdos.

Elemento	Areia	Pó de Pedra	Scheelita	ROL	ROB	Pó de Quartzito
CaO	3,15%	6,16%	42,55%	4,61%	5,48%	0,45%
SiO ₂	64,68%	58,81%	29,92%	58,20%	64,72%	92,87%
Al ₂ O ₃	18,98%	16,20%	10,63%	17,00%	16,22%	4,91%
Fe ₂ O ₃	4,39%	6,99%	7,66%	8,67%	3,97%	0,51%
MgO	1,40%	1,31%	4,55%	1,27%	1,03%	0,00%
SO ₃	0,24%	0,42%	1,82%	0,23%	0,19%	0,44%
K ₂ O	4,87%	4,21%	1,15%	5,18%	3,90%	0,68%
TiO ₂	1,24%	1,55%	0,60%	1,30%	0,81%	0,00%
MnO	0,10%	0,11%	0,54%	0,13%	0,09%	0,03%
WO ₃	0,00%	0,00%	0,20%	0,00%	0,00%	0,00%
BaO	0,23%	0,00%	0,17%	0,00%	0,16%	0,00%
SrO	0,04%	0,04%	0,15%	0,05%	0,03%	0,00%
ZnO	0,00%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%
MoO ₃	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%
Rb ₂ O	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
SeO ₂	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
Y ₂ O ₃	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%
C	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
ZrO ₂	0,32%	0,22%	0,00%	0,01%	0,08%	0,00%
P ₂ O ₅	0,33%	1,32%	0,00%	0,47%	0,69%	0,00%
Na ₂ O	0,00%	2,62%	0,00%	2,78%	2,58%	0,00%
NbO	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Conforme a tabela, os principais elementos químicos constituintes da areia e do pó de pedra são a sílica e alumina. A areia de Scheelita apresentou na sua composição valores

elevados de óxido de cálcio (CaO) e de sílica (SiO₂), 38,46% e 21,76%, respectivamente, indicando a presença de calcita e quartzo na composição mineralógica desse agregado. O alto teor de sílica indica que o resíduo é oriundo de rochas silicatas ácidas que contribuem para a formação de novos cristais na matriz cimentícia da argamassa. Os resultados do resíduo do beneficiamento corroboram com os apresentados por Paiva (2013), Gerab (2014), Medeiros (2016) e Souza (2019). A elevada presença de CaO podem contribuir com a melhor plasticidade do concreto.

O resíduo de scheelita é proveniente da extração do tungstênio, por esse motivo há presença, ainda que mínima, de WO₃ (0,20%). No estudo de Medeiros (2016), o resíduo apresentou 0,19% de WO₃ e Costa Filho (2017) explanou no seu trabalho 0,91% de tungstênio.

Em todos os agregados ocorreu a presença de óxido de ferro (Fe₂O₃) e de alumina (Al₂O₃) que indicam a necessidade de investigar se essa alumina é reativa aos ataques químicos que ocorrem em meios agressivos, caso seja utilizado em concretos voltados para ambientes com essas características.

As análises químicas das frações dos resíduos da scheelita estudados por Costa e Filho (2017) através da fluorescência de Raio-X, mostraram uma variabilidade na composição dos óxidos constituintes, porém ambas possuem como principais representantes de óxidos, o CaO, SiO₂ e Fe₂O₃, e a presença do ferro na constituição das frações ressalta a hipótese de que as massas específicas reais estão elevadas devido à presença de metais na composição.

Bastos (2018) utilizou pó de quartzito na produção de vidro e encontrou na sua composição elevado teor de quase 94 % de SiO₂ a impureza encontrada em maior fração no material foi a alumina, em uma proporção de 3 %.

A presença de óxido de cálcio e óxido de ferro (CaO e Fe₂O₃), encontrados na amostra de ROB e ROL é oriunda principalmente da granalha e da cal utilizada como abrasivo e lubrificante no processo de beneficiamento de granito, respectivamente.

Segundo Santos (2013), os resíduos ricos em SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ apresentam grande potencial para serem utilizados na confecção de argamassas para a construção civil. Os demais óxidos com percentuais abaixo de 1,5% são considerados impurezas.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), para que o resíduo seja material pozolânico da Classe E deve apresentar um somatório maior que 50 %, tais materiais são: Dióxido de Silício (SiO₂), Óxido de Alumínio (Al₂O₃) e Óxido de Ferro (Fe₂O₃). Além disto o Óxido de Enxofre (SO₃) deve ser no máximo de 5%. No Quadro 15 podem ser observado tais parâmetros.

Quadro 15 - Análise Pozolânica dos agregados miúdos.

Elemento	Areia	Pó de Pedra	Scheelita	ROL	ROB	Pó de Quartzito
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	88,05%	82,00%	48,21%	83,87%	84,91%	98,29%
SO ₃	0,24%	0,42%	1,82%	0,23%	0,19%	0,44%
MgO	1,40%	1,31%	4,55%	1,27%	1,03%	0,00%

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com o Quadro 15, os materiais que ofereceram um comportamento com essas características são a areia, pó de pedra, ROL, ROB e pó de quartzito, com somatórios de 88,05%, 82,00%, 83,87%, 84,91% e 98,29%, respectivamente. Já o resíduo da scheelita apresentou o somatório de 48,21%, não sendo considerado material pozolânico, mas podendo conferir alguma melhoria na RCS quando incorporado ao concreto. Contudo, esses componentes são semelhantes à composição do clínquer, o que sugere que algum processo de queima ou beneficiamento possa originar um aglomerante hidráulico. Quanto à análise do Óxido de Enxofre (SO₃), todos os agregados apresentaram índices menor que 5% requerido pela norma.

Comparando a ASTM C618 (1998), verifica-se que estes resíduos, exceto a scheelita, apresentaram cerca de 84% de óxidos de silício, alumínio e ferro, superando o valor mínimo de 70% exigido pela norma para que um material seja considerado com atividade pozolânica. O percentual de MgO também satisfaz o valor máximo de 5% exigido, atendendo as especificações químicas exigidas pela ASTM C618(1998).

Vale ressaltar que, embora a substituição dos agregados não tenha sido pelo cimento, no processo químico da mistura na produção do concreto, poderia haver interações entre as reações químicas dos componentes não cristalinos presentes, o que poderá ser observado nos resultados da RCS.

Desta forma, importa evidenciar que as maiores percentagens de cálcio e sílica presentes nos agregados, na possibilidade de caráter reativo de material amorfo, podem contribuir para a melhoria da resistência do concreto, respectivamente em idades mais avançadas a partir da contribuição na atividade pozolânica e na formação de C-S-H nas primeiras idades. Entretanto, a quantidade de magnésio presente, embora pequena pode ocasionar reações expansivas no concreto endurecido (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Figueiredo (2015), em seus estudos, apresentou resultados para a composição química do ROL elevado teor de dióxido de silício (SiO₂) de 49,03%, óxido de alumínio (Al₂O₃) de 18,38%

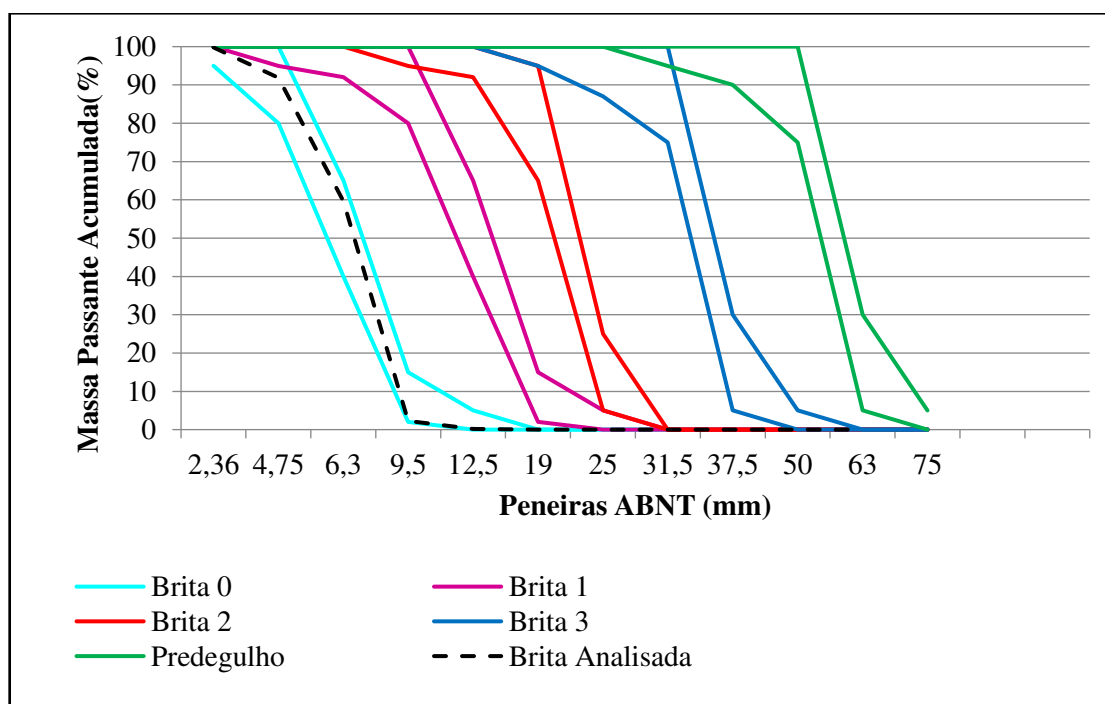
e o óxido de ferro (Fe_2O_3) de 12,38%, resultados bem semelhantes ao encontrado nessa pesquisa.

Uliana (2014) e Soares (2014) constataram que o ROL não atende aos requisitos em seu aspecto de verificar pozolanicidade em argamassas, tanto com cal hidratada quanto com Portland cimento. Desta forma, o ROL pode ser utilizado como enchimento em argamassas e concretos, e pode empregar um efeito físico de preenchimento de vazios e adensamento das misturas.

4.1.3 Agregado Graúdo

As curvas granulométricas resultantes do ensaio de granulometria da brita utilizada estão representadas na Figura 27, com diâmetro de 9,5 mm.

Figura 27 - Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir do exposto na figura, é possível constatar que a brita analisada encontra-se dentro da zona limite de classificação de brita 0. Portanto, o agregado graúdo empregado na pesquisa satisfaz os limites de distribuição granulométrica impostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Na Tabela 7, encontram-se os dados obtidos a partir da caracterização física da brita 0.

Tabela 7 - Parâmetros físicos do agregado graúdo.

Ensaio	Brita 0
Massa Esp. Agregado Seco	2,73
Massa Esp. Agregado Sat Sup Seca	2,69
Massa Esp. Aparente	2,67
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,72
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,83
Índice de Vazios estado compactado	99,93
Absorção (%)	0,76
Abrasão Los Angeles (%)	40,1

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Pode-se observar na Tabela 7 que a absorção da brita analisada é 0,76%, primordial para realizar a correção da água constituinte, para que a água de amassamento determinada durante o cálculo da dosagem não seja absorvida, alterando a relação água/cimento e prejudicando a trabalhabilidade do concreto. O material utilizado apresenta elevado índice de vazios estado compactado possuindo um bom arranjo entre seus grãos.

A brita utilizada apresenta no ensaio de abrasão Los Angeles um desgaste à abrasão de 40,1 % abaixo do limite apresentado na NBR 7211 (ABNT, 2009), que define o máximo deste desgaste a 50%. Uma vez que a aplicabilidade será para produção de blocos de concreto para *pavers*, este é um importante fator a ser considerado, é desejável uma resistência ao desgaste relativamente alta por tratar-se da camada de rolamento do pavimento, que estará em contato direto com o tráfego.

4.2 Cálculo do Traço Convencional

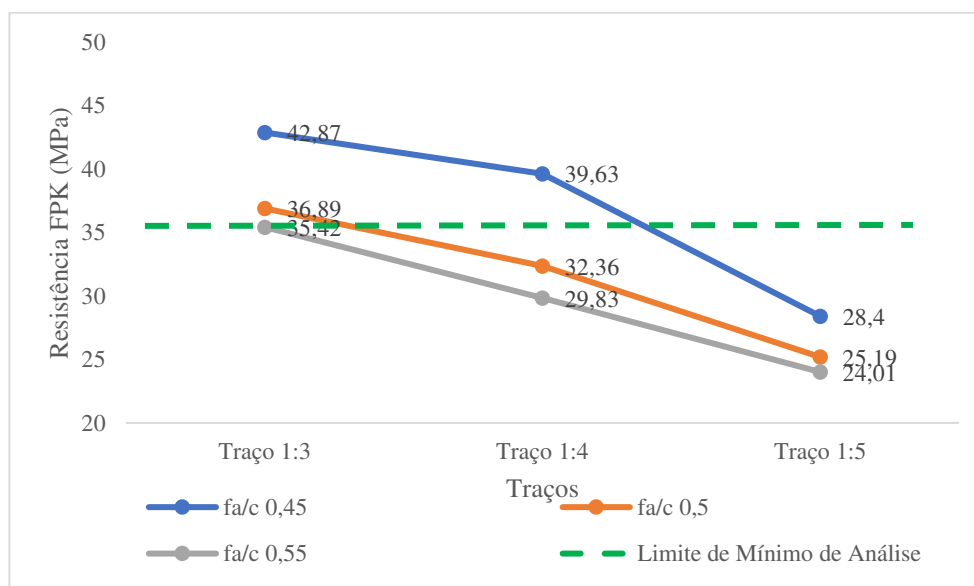
Para determinação do traço convencional foram realizados ensaios de RCS e absorção para parâmetro de decisão. Os demais parâmetros foram analisados no auxílio da tomada de decisão como parâmetros auxiliares, tais como: consumo de cimento, trabalhabilidade, absorção e resistência à compressão.

4.2.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes do concreto quando se avalia/estuda sua estrutura. É o parâmetro de resposta mais importante no estudo desse elemento pois está ligada à capacidade do material resistir a tensões sem que haja ruptura. No estudo do pavimento intertravado, essa característica determina o uso ao qual o pavimento será destinado, conforme a solicitação de tráfego prevista. Esta propriedade é referência na maioria das normas nacionais e internacionais como um dos principais parâmetros de avaliação do desempenho dos *pavers*.

Conforme pode ser visto na Figura 28, apenas quatro traços se apresentaram satisfatórios quando da análise da resistência à compressão, conforme exigido pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013), que estabelece o limite de resistência mínima de 35 MPa para que as peças possam ser utilizadas em solicitações para passagem de pedestres e veículos leves. Logo, apenas o Traço 1 (1:3:0,45), o Traço 2 (1:3:0,50), o Traço 3 (1:3:0,55) e o Traço 4 (1:4:0,45) atenderam a esta exigência, sendo os demais encontrando-se abaixo da resistência mínima solicitada, não podendo ser utilizado para o estudo em questão.

Figura 28 - Resistência a compressão dos traços estudados.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Considerando gráfico da Figura 28, percebe-se que a diminuição da resistência à compressão aconteceu de maneira gradativa à medida que se aumenta a proporção de agregado no traço e o a/c. Todos os traços com proporção de 1:5, na quantidade de cimento e agregados,

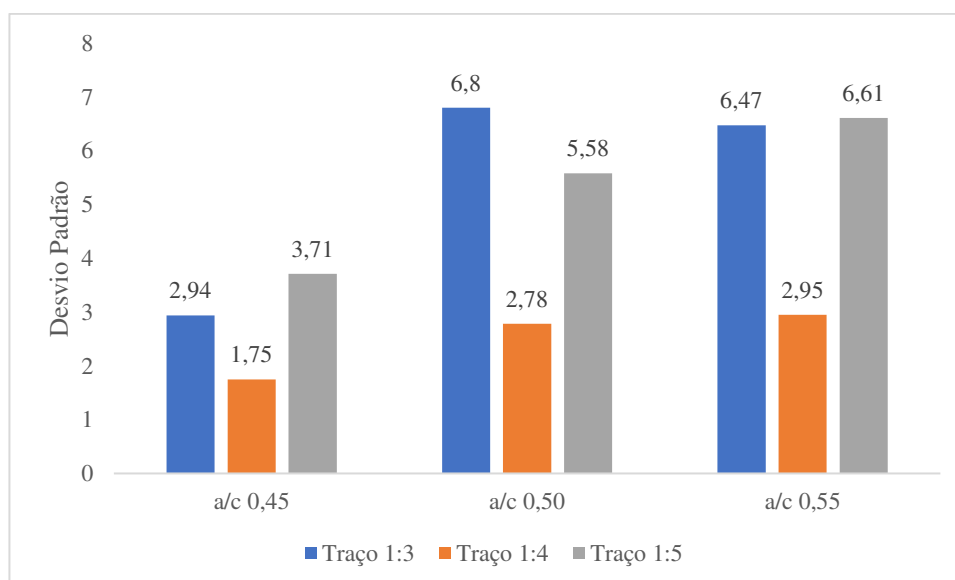
a qualquer teor de a/c, apresentaram resistência inferior à requerida, o que pode ser justificado pela alta quantidade de agregados em relação a variação do cimento.

Fatores como trabalhabilidade e homogeneidade podem ter interferido para o resultado obtido, uma vez que foi mantido o tempo de mistura na betoneira, bem como no adensamento das peças. Observa-se ainda, conforme a RCS da Figura 28, que todos os traços tiveram comportamento previsto conforme a Lei de Abrams para concretos plásticos, que estabelece a diminuição gradativa da RCS conforme o aumenta a quantidade de água no traço.

Analisando os resultados em consonância com normas internacionais da Austrália e África do Sul, por exemplo, todos os traços, com exceção do Traço 9 (1:5:0,55), estariam aptos para utilização em pavimentos intertravados, pois obtiveram resistências à compressão acima de 25 MPa, indicados para veículos leves. De acordo com a norma Australiana, o Traço 9 (1:5:0,55), podia ser aplicado em pavimentos com solicitações leves como calçadas, praças, áreas de lazer, ciclovias, etc.

Analisando-se os resultados obtidos em comparação ao desvio padrão obtido para cada traço, tem-se o gráfico da Figura 29.

Figura 29 - Resistência à compressão dos traços estudados sob análise do desvio padrão.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

No caso do concreto, o menor desvio padrão será aquele cujo processo de produção seja o mais regular possível, logo, desvio padrão muito alto indica pouca confiabilidade dos dados. De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), desvios padrão de até 7,0 podem ser aceitos a depender das condições de preparo do concreto. Para este trabalho e melhor confiabilidade dos

dados, determinou-se como um parâmetro de aceitação um desvio padrão de 4,0, tendo em vista que o cimento, o agregado e a água foram medidos em massa.

A partir disto e conforme o gráfico da Figura 29, percebe-se que o Traço 1 (1:3:0,45), o Traço 4 (1:4:0,45), o Traço 5 (1:4:0,50), o Traço 6 (1:4:0,55) e o Traço 7 (1:5:0,45) obtiveram desvio padrão satisfatórios, ou seja, abaixo de 4,0. No entanto, uma vez que os Traços 5, 6 e 7 não obtiveram resistência à compressão satisfatória, não foram cogitados para serem utilizados como traço de referência do concreto convencional.

Um último parâmetro analisado para a tomada de decisão do traço a ser escolhido como o traço de referência foi o consumo de cimento, pois quanto menor o consumo de cimento, menor custo para a fabricação dos blocos de concreto para pavimentos intertravados.

Como pode ser observado na Tabela 8, o consumo de cimento é inversamente proporcional à quantidade de agregados presente no traço. Percebe-se que à medida que o consumo de cimento decresce, a resistência das peças também decresce, comportamento já esperado nos concretos plásticos.

Tabela 8 - Resistência à compressão dos traços estudados sob análise consumo de cimento.

Traços	Resistência à Compressão (MPa)	Consumo de Cimento / m ³
Traço 1 (1:3:0,45)	42,87	512,57
Traço 2 (1:3:0,50)	36,89	499,76
Traço 3 (1:3:0,55)	35,42	487,58
Traço 4 (1:4:0,45)	39,63	426,66
Traço 5 (1:4:0,50)	32,36	417,75
Traço 6 (1:4:0,55)	29,83	409,21
Traço 7 (1:5:0,45)	28,40	365,42
Traço 8 (1:5:0,50)	25,19	358,87
Traço 9 (1:5:0,55)	24,01	352,54

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Cruz (2003) trabalhou com variações no consumo de cimento da ordem de 270 kg/m³ a 550 kg/m³, enquanto Fernandez *et al.* (2018) trabalharam com consumo de cimento de 381 kg/m³ para concretos aplicados a blocos intertravados obtendo RSC de 42 MPa. Já Matos (2019) utilizou 371,62 kg/m³ para blocos de concretos de *pavers* obtendo RSC de 40,93 MPa.

Logo, a partir da análise das RCS, do desvio padrão e do consumo de cimento obtido, o melhor traço para ser a referência neste trabalho (sem adição de resíduos) foi o Traço 4 (1:4:0,45), com resistência à compressão satisfatória (acima de 35 MPa), baixo desvio padrão

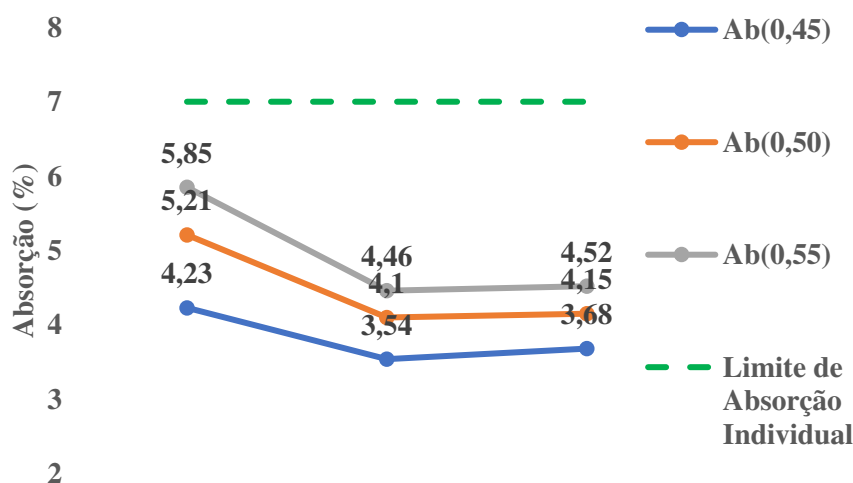
(1,75), indicando boa confiabilidade nos dados e consumo de cimento considerado aceitável (426,66 kg/m³).

4.2.2 Absorção

O controle da absorção de água dos *pavers* é importante, especialmente para aplicação em áreas úmidas, em que as peças estarão sujeitas ao acelerado processo de eflorescência, por exemplo. Com relação aos percentuais máximos admitidos, o valor de controle utilizado pela NBR 9781 (ABNT, 2013) é de 6% de absorção na média, não sendo admitido nenhum valor individual superior a 7%.

Na Figura 30, estão dispostos os resultados individuais de absorção de água das peças intertravadas para o traço 1:3.

Figura 30 - Absorção do Traço 1:3

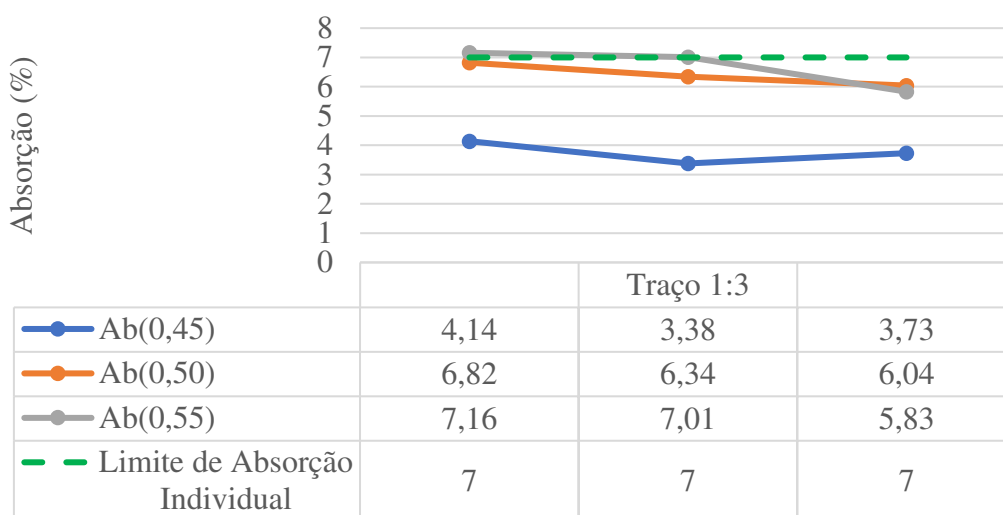


Fonte: Dados da pesquisa 2022).

De acordo com os valores apresentados na Figura 30, todos os valores individuais ficaram abaixo de 7% conforme prescreve a NBR 9781 (ABNT, 2013), apresentando comportamento similar ao de RCS, no qual conforme cresce o teor de a/c, também aumenta a porosidade da peça e diminui a RCS gradativamente.

Na Figura 31, mostram-se os resultados individuais de absorção de água das peças intertravadas para o Traço 1:4.

Figura 31 - Absorção do Traço 1:4

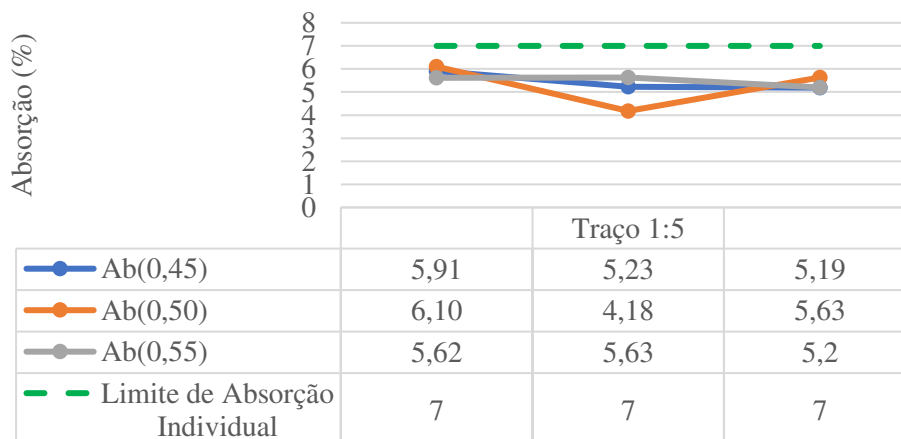


Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com os valores apresentados na Figura 31, a absorção para o Traço 6 (1:4:0,55), que apresentou absorção individual de 7,16% e 7,01%, com absorção acima de 7%, o que não estaria apto para ser utilizado para fins de pavimento intertravado conforme prescreve a NBR 9781 (ABNT, 2013). O Traço 4 (1:4:0,45) e o Traço 5 (1:4:0,50) apresentaram absorção permitida na referida norma, corroborando com o comportamento da RCS.

Na Figura 32, observam-se os resultados individuais de absorção de água das peças intertravadas para o traço 1:5.

Figura 32 - Absorção do Traço 1:5

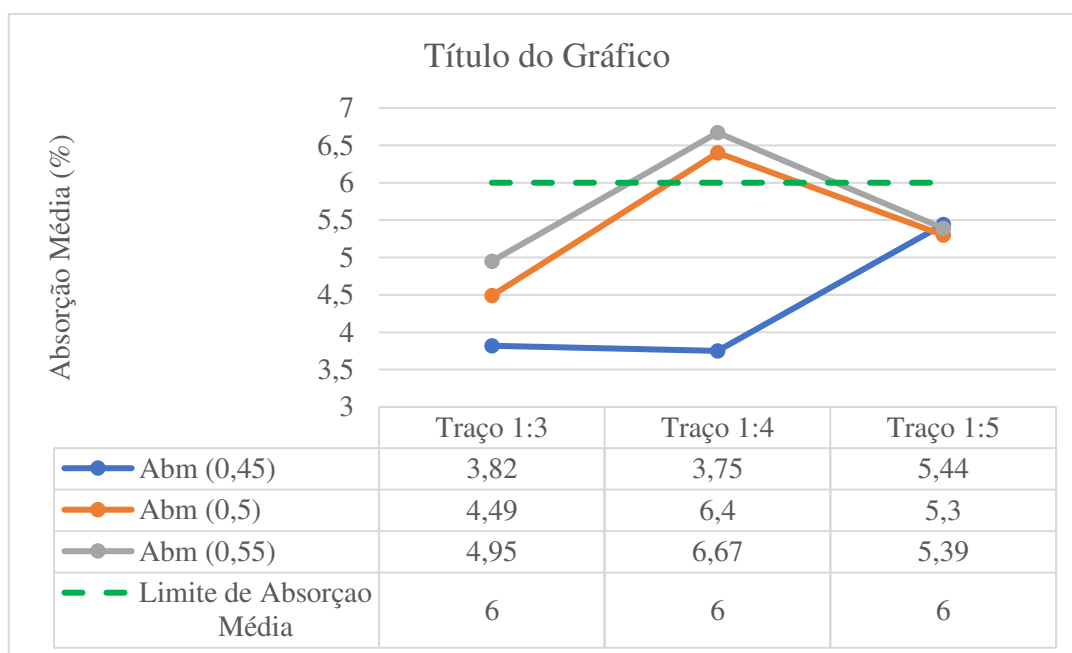


Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com os valores apresentados na Figura 33, todos os valores individuais ficaram abaixo de 7%, conforme prescreve a norma brasileira, estando todos aptos a serem utilizados como pavimento intertravado.

Os resultados da absorção média estão descritos no gráfico da Figura 33, conforme segue:

Figura 33 - Absorção média dos traços estudados.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando a Figura 33, apenas dois traços encontram-se acima da média determinada pela Norma Brasileira, o Traço 5 (1:4:0,50), com absorção de 6,40%, e o Traço 6 (1:4:0,55), com absorção de 6,67%. Todos os demais traços apresentaram comportamento satisfatório, ou seja, absorção média abaixo de 6%.

Os traços em todos os teores de a/c apresentaram comportamentos semelhantes: conforme aumenta o teor a/c, percebe-se um aumento na absorção dos blocos, corroborando com o comportamento encontrado na RSC. Isto acontece porque a resistência está intimamente relacionada à porosidade dos materiais, quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende a ser sua resistência.

Segundo Almeida (2016), no concreto, além da porosidade da matriz de cimento e do agregado graúdo, deve ser considerada a porosidade da zona de transição entre a matriz e o agregado. No estudo da resistência do concreto com agregados naturais, geralmente o uso de

agregados densos e resistentes faz com que esta propriedade seja influenciada basicamente pela porosidade da matriz e da zona de transição. Contudo, quando se estuda a resistência de concretos com material reciclado, a porosidade do agregado passa a ter um papel importante na determinação da resistência do concreto.

Helene e Andrade (2010) propõem que os concretos com absorção de água menor do que 4,2% podem ser classificados como duráveis; quando a absorção está entre 4,2% e 6,3% são normais, e, para valores maiores que 6,3%, os concretos são considerados deficientes. Analisando os dados obtidos, apenas o Traço 6 (1:4:0,55) seria considerado como deficiente. Os demais estariam dentro da classificação de duráveis ou normais, sendo satisfatório a sua empregabilidade.

Uma vez que o traço escolhido para o traço de referência foi o Traço 4 (1:4:0,45), este encontra-se satisfatório tanto na absorção individual, quanto na absorção média. Na Tabela 9, encontram-se os valores definidos para o traço convencional.

Tabela 9 - Valores do traço de referência.

Dados Traço de Referência		
Traço	RCS (MPa)	Absorção média (%)
1:4:0,45	39,63	3,75

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

4.3 Planejamento Experimental

Para o planejamento experimental foram moldados *pavers* e realizados ensaios de RCS para verificar qual a melhor proporção de resíduos incorporados no concreto convencional. Vale salientar que a partir do traço convencional (1:2:2:0,45), fixou-se as proporções de cimento, brita e a/c e variou-se apenas as proporções do agregado miúdo (areia, pó de pedra e resíduo), uma vez que a intenção do estudo é avaliar a proporção de resíduo que pode ser substituída no traço pelos agregados convencionais mantendo ou melhorando as características de RCS e absorção.

Os resultados da RCS foram analisados via o planejamento experimental de misturas rede simplex para três variáveis por meio do software *Statistica 8.0*, resultando em 10 composições diferentes. Utilizando 40 CP's submetidos ao teste de RCS para cada resíduo.

4.3.1 Scheelita

Para planejamento experimental do resíduo da scheelita, seguem os resultados da RCS do concreto conforme mostram os resultados da Tabela 10.

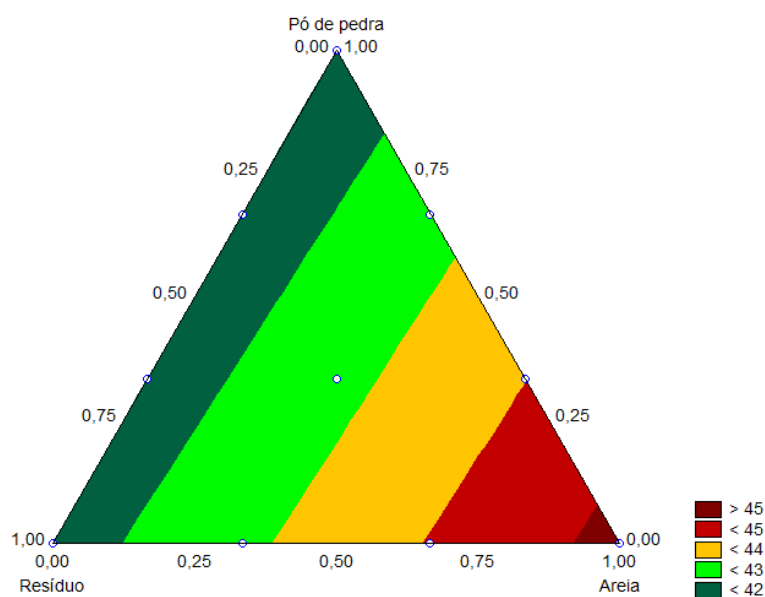
Tabela 10 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto.

#	Proporções			RCS (MPa)	Média RCS (MPa)
	Resíduo	Areia	Pó de Pedra		
1	1	0	0	39,989	38,86
				37,597	
				38,995	
2	0	1	0	42,989	41,16
				39,810	
				40,695	
3	0	0	1	40,781	40,39
				39,716	
				40,686	
4	0,33333	0,66667	0	48,844	47,65
				47,632	
				46,465	
5	0,33333	0	0,66667	38,373	39,46
				40,900	
				39,104	
6	0	0,33333	0,66667	42,591	43,48
				44,743	
				43,118	
7	0,66667	0,33333	0	44,332	43,78
				43,806	
				43,208	
8	0,66667	0	0,33333	43,218	44,86
				43,930	
				47,441	
9	0	0,66667	0,33333	47,236	47,50
				46,321	
				48,929	
10	0,33333	0,33333	0,33333	43,829	44,30
				45,615	
				43,451	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando os dados apresentados na tabela 10, pode-se verificar que os resultados de RCS foram acima de 35MPa, indicando que qualquer uma das proporções pode ser utilizada para o estudo de concreto em *pavers*, conforme preconiza a norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013). A superfície de resposta gerada representa os 10 pontos do planejamento experimental, conforme ilustra a Figura 34, facilitando a visualização dos dados obtidos na Tabela 10.

Figura 34 - Superfície de resposta da scheelita.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir da figura, observa-se que, com qualquer uma das dez proporções utilizadas, a RCS se apresenta satisfatória. Para traços com RCS maior, se faz a indicação de utilização apenas da areia como composição do agregado miúdo no concreto, o que corrobora com os aspectos físicos e químicos do agregado. A qualquer porcentagem de resíduo utilizado, obtém-se a resistência desejada, para aplicação em *pavers* de tráfego leve, conforme NBR 9781 (ABNT, 2013). Observando os resultados encontrados, os *pavers*, com relação à RCS, estariam aptos para serem utilizados também na África e na Austrália.

Por intermédio da regressão linear dos dados experimentais do planejamento de misturas, foram calculados os coeficientes da equação do modelo matemático, conforme segue na Equação 12:

$$R = 41,60 A + 45,31B + 41,23C \text{ Equação 12}$$

Em que R representa a Resistência, A o Resíduo, B a Areia e C o pó de pedra.

Através da análise do planejamento experimental de misturas rede simplex no software Statistica 8.0 foram obtidos os parâmetros de análise de variância para a equação de ajuste exibidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Análise da Variância.

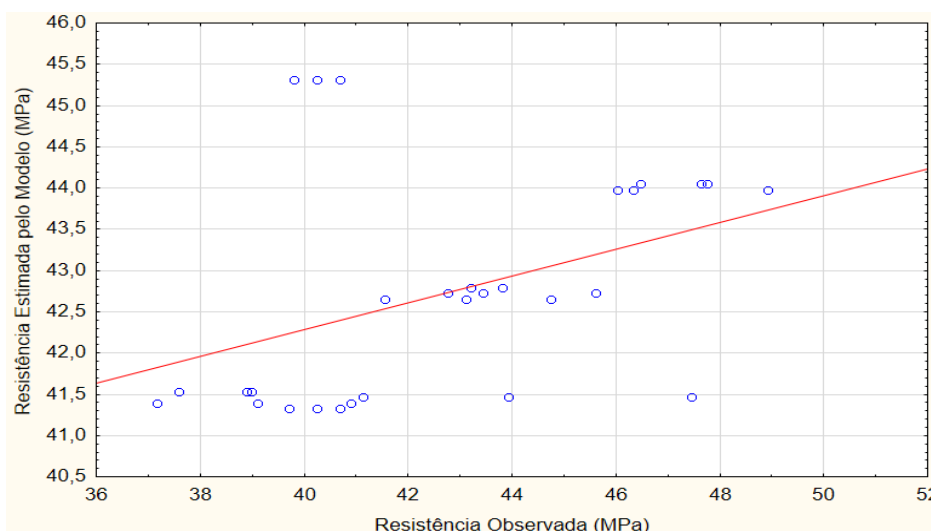
Variável Explicada	S.Q.	G.L. (df)	Q.M	Fcalc	Ftab	Teste F
Regressão (= Total – Resíduo)	5899,993	2	2949,9965	205,741	4,53	45,4175
Resíduo (Error)	387,136	27	14,33837			
Falta de Ajuste (Lack of Fit)	184,036	7	26,29085714	2,58896	19,25	0,13449
Erro Puro (Pure Error; Model)	203,1	20	10,155			
Total (Total SS)	6287,129	29				
R²	0,93842					

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Na Tabela 11, os parâmetros de soma quadrática, graus de liberdade e quadrados médios funcionam como passos intermediários para o cálculo dos parâmetros de testes de hipóteses, como o teste F, que se apresentou satisfatório com valor 0,13449 sendo menor 1. Neste caso, obteve-se um coeficiente de determinação de 93,84%, representando a qualidade do ajuste da curva de regressão.

Na Figura 35, tem-se a curva de dispersão entre os valores observados e os valores estimados da scheelita.

Figura 35 - Curva de dispersão entre os valores observados e os valores estimados da scheelita.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Os pontos da Figura 35 se mantiveram dentro do esperado na variação linear, com poucas dispersões.

Logo, as análises estatísticas se mostraram satisfatórias, sendo utilizado o percentual da scheelita no concreto para fins de ensaios de durabilidade o teor máximo, ou seja 100%. Desta forma, para a etapa seguinte da pesquisa, o traço do concreto da scheelita terá apenas o resíduo como agregado miúdo. Foi escolhida essa proporção uma vez que este estudo tem como objetivo viabilizar a máxima reutilização dos resíduos da mineração no concreto.

Para validação desde percentual de resíduo da scheelita, faz-se necessária a análise do comportamento da absorção nos *pavers* por se tratar de um parâmetro de suma importância e aceitação conforme normativa técnica da NBR 9781 (ABNT, 2013). Logo, seguem os dados coletados de absorção para o percentual de 100% do resíduo no concreto conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Absorção para o percentual de 100% do resíduo da scheelita.

ABSORÇÃO			
M1	M2	Aborção (%)	Abméd (%)
2456,10	2588,90	5,41	5,46
2444,90	2576,40	5,38	
2438,20	2574,40	5,59	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir da Tabela 12, percebe-se que as amostras de peças de concreto apresentaram absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, não sendo nenhum valor individual maior do que 7%. Dessa forma, é possível concluir que a scheelita está apta a utilização em *pavers*.

4.3.2 Pó de Quartzito

Para planejamento experimental do resíduo do pó de quartzito, seguem os resultados da resistência à compressão simples do concreto, conforme disposto na Tabela 13. Em sequência, tem-se a análise dos resultados relacionados ao apresentado na tabela.

Tabela 13 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto com o resíduo de quartzo.

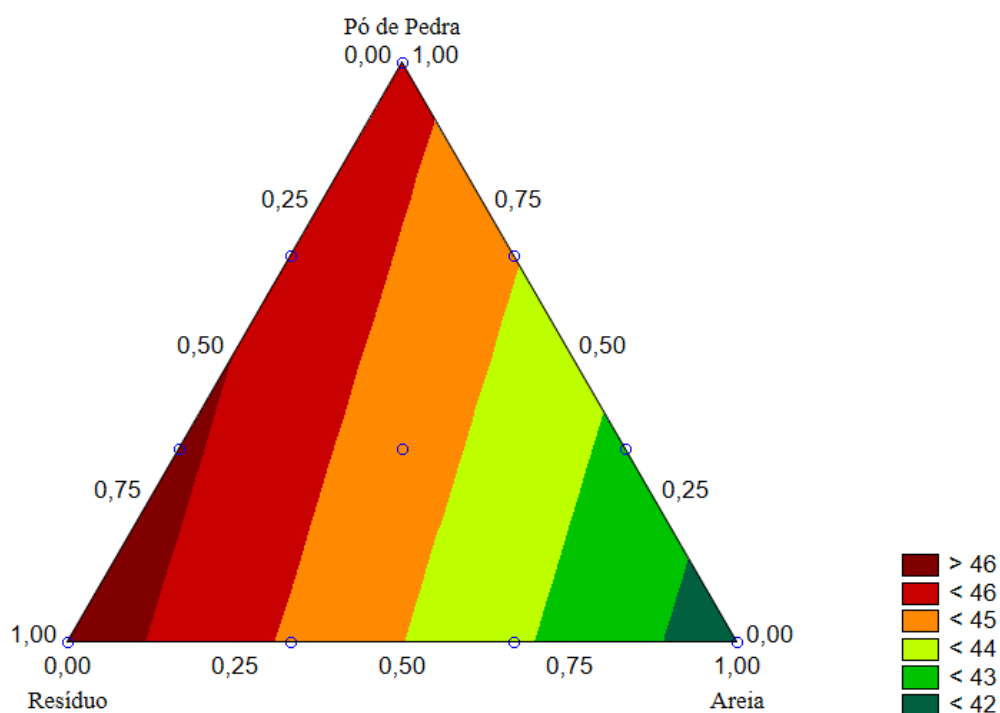
#	Proporções			RCS (MPa)	Média RCS (MPa)
	Resíduo	Areia	Pó de Pedra		
1	1	0	0	46,341	43,08
				42,321	
				40,568	
2	0	1	0	42,989	41,16
				39,810	
				40,695	
3	0	0	1	40,781	40,39
				39,716	
				40,686	
4	0,33333	0,66667	0	35,295	39,41
				41,124	
				41,820	
5	0,33333	0	0,66667	47,246	46,45
				46,480	
				45,618	
6	0	0,33333	0,66667	42,591	43,48
				44,743	
				43,118	
7	0,66667	0,33333	0	44,004	40,86
				40,929	
				37,632	
8	0,66667	0	0,33333	44,296	46,25
				45,896	
				48,553	
9	0	0,66667	0,33333	47,236	47,50
				46,321	
				48,929	
10	0,33333	0,33333	0,33333	47,009	46,40
				46,174	
				46,007	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando os dados apresentados na Tabela 13, pode-se verificar que os resultados de RCS foram acima de 35MPa, indicando que qualquer uma das proporções pode ser utilizada para o estudo de concreto em *pavers*, conforme preconiza a norma brasileira NBR 9781 (ABNT,

2013). Observando os resultados encontrados, os *pavers*, com relação a RCS, estariam aptos para serem utilizados também na África e na Austrália. A superfície de resposta gerada representa os 10 pontos iniciais do planejamento experimental, conforme ilustrado na Figura 36, facilitando a visualização dos dados inseridos na Tabela 13.

Figura 36 - Superfície de resposta do quartzo.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Com base na figura, observa-se que a partir de qualquer uma das dez proporções utilizadas, a RCS se apresenta satisfatória. Neste caso, para traços com RCS maior, se faz a necessária a indicação de utilização apenas do resíduo como composição do agregado miúdo no concreto, diferentemente do planejamento experimental realizado com o resíduo da scheelita. A partir de qualquer porcentagem de resíduo utilizado, obtém-se a resistência desejada.

Por intermédio da regressão linear dos dados experimentais do planejamento de misturas, foram calculados os coeficientes da equação do modelo matemático, conforme segue na Equação 13:

$$R = 46,61 A + 41,43B + 45,38C \quad \text{Equação 13}$$

Em que R representa a Resistência, A o Resíduo, B a Areia e C o pó de pedra.

Logo, as análises estatísticas se mostraram satisfatórias, sendo utilizado o percentual do pó de quartzito no concreto para fins de ensaios de durabilidade o teor máximo, ou seja 100%. Desta forma, para a etapa seguinte da pesquisa, o traço do concreto do pó de quartzito terá apenas o resíduo como agregado miúdo. Foi escolhida essa proporção uma vez que este estudo tem como objetivo viabilizar a máxima reutilização dos resíduos da mineração no concreto.

Para validação desde percentual de resíduo do pó de quartzito, faz-se necessária a análise do comportamento da absorção nos *pavers*, por se tratar de um parâmetro de suma importância, conforme dispõe a normativa técnica da NBR 9781/2013. Desse modo, seguem os dados coletados de absorção para o percentual de 100% do resíduo no concreto, distribuídos na Tabela 14.

Tabela 14 - Absorção para o percentual de 100% do resíduo de quartzito.

ABSORÇÃO			
M1	M2	Absorção (%)	Abm (%)
2525,80	2626,50	3,99	3,86
2525,60	2625,20	3,94	
2512,70	2604,30	3,65	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Com base na Tabela 14, percebe-se que as amostras de peças de concreto apresentaram absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, com nenhum valor individual maior do que 7 %, estando apta a utilização em *pavers*. Analisando os resultados e comparando-as as normas internacionais estudadas, os *pavers* de quartzito poderiam ser utilizados em todas as localidades. Comparando com os dados obtidos a partir da substituição da scheelita, a absorção foi menor, o que pode justificar o aumento da RCS dos blocos com quartzito, com menores poros e melhor agregação e densificação das partículas.

4.3.3 ROL

Para planejamento experimental do resíduo ROL, seguem os resultados da resistência à compressão simples do concreto, dispostos detalhadamente na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto com o ROL.

#	Proporções			RCS (MPa)	Média RCS (MPa)
	Resíduo	Areia	Pó de Pedra		
1	1	0	0	0	0,00
				0	
				0	
2	0	1	0	42,989	41,16
				39,81	
				40,695	
3	0	0	1	40,781	40,39
				39,716	
				40,686	
4	0,33333	0,66667	0	24,105	31,05
				37,987	
				31,046	
5	0,33333	0	0,66667	28,319	28,24
				28,425	
				27,971	
6	0	0,33333	0,66667	42,591	43,48
				44,743	
				43,118	
7	0,66667	0,33333	0	16,522	17,81
				20,707	
				16,197	
8	0,66667	0	0,33333	10,95	12,90
				12,228	
				15,523	
9	0	0,66667	0,33333	47,236	47,50
				46,321	
				48,929	
10	0,33333	0,33333	0,33333	27,107	33,48
				34,326	
				38,998	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir da Tabela 15, percebe-se que apenas os traços com 0% de inserção do resíduo apresentaram RCS superior a 35 MPa, conforme preconiza a norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013). Os traços 4, 5, e 10, com inserção de resíduo na ordem de 0,3333%, estariam aptos para serem utilizados também na África e na Austrália para tráfego leve, tendo em vista que são requeridas RCS maior que 25 MPa. O traço 7, conforme a norma Australiana, poderia ter aplicabilidade em calçadas e rodovias, tendo em vista que a norma requer RCS maior que 15 MPa para esta finalidade.

Para todos os resíduos, foram fixadas a quantidade de cimento, brita e a/c, variando apenas a proporção dos agregados miúdos (areia, pó de pedra e resíduos). Seguindo a mesma metodologia, verificou-se que o traço com o resíduo ROL ficou mais seco, dificultando a trabalhabilidade do concreto, não sendo possível a desmoldagem do traço com 100% de ROL, conforme pode ser analisado na Tabela 15 e na Figura 37.

Figura 37 - Moldagem do concreto com utilização do ROL.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

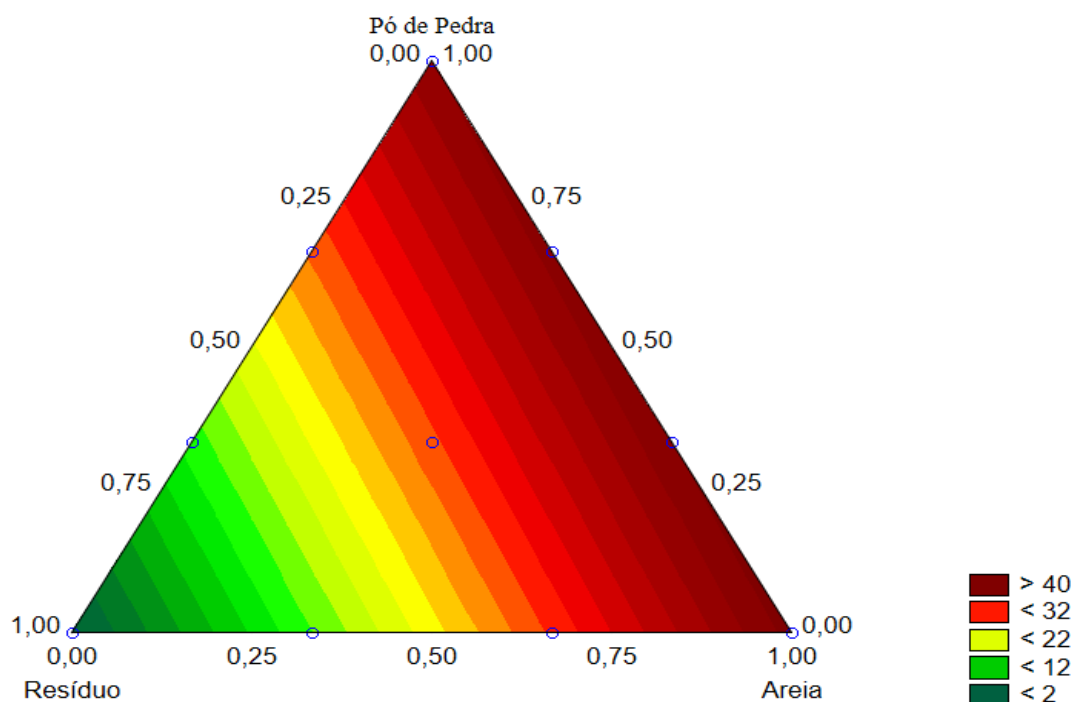
Conforme visto na curva granulométrica do ROL, por ser um material com granulometria predominantemente fina, quando comparado aos demais resíduos, é esperado que esta propriedade interfira na homogeneidade do concreto, exigindo assim mais água para garantir a mesma trabalhabilidade. O resultado dos materiais pulverulentos, na ordem de 69,51%, também corrobora com o comportamento apresentado pelo resíduo.

Desta forma, conforme esperado, o traço com proporções maiores desse resíduo não permitiu a moldagem dos CP, apresentando textura extremamente seca e dificuldade na agregação das partículas. Segundo Silva e Campiteli, (2006), quando em excesso, os finos

podem causar a exsudação da nata de cimento, por necessitar de maior quantidade de água para o preparo da mistura em decorrência da maior área superficial das partículas.

Analisando os dados da tabela, pode-se verificar que os resultados de RCS só foram acima de 35MPa para as combinações com 0% de inserção de resíduo. A superfície de resposta gerada representa os 10 pontos iniciais do planejamento experimental, conforme mostra a Figura 38, facilitando a visualização dos dados inseridos na Tabela 15.

Figura 38 - Superfície de resposta do ROL.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Observa-se, na Figura 38, que a RCS tende a diminuir conforme cresce a proporção de ROL no traço. Neste caso, para traços com RCS maior, se faz a indicação de utilização apenas dos materiais convencionais.

Por intermédio da regressão linear dos dados experimentais do planejamento de misturas, foram calculados os coeficientes da equação do modelo matemático, conforme segue na Equação 14:

$$R = 1,42A + 44,87B + 41,97C \quad \text{Equação 14}$$

Em que R representa a Resistência, A o Resíduo, B a Areia e C o pó de pedra.

Dullius *et al.* (2018), ao utilizarem o ROL para fabricação de pisos intertravados, aplicaram variação de incorporação de resíduo no concreto alterando de 0 a 12% para traços com a/c de 0,60, encontrando RCS e absorção satisfatórios para os teores de 8 e 10%.

Já Teixeira *et al.* (2020) utilizaram o ROL como substituto parcial do aglomerante na produção de concretos estruturais variando as proporções de 5% a 12,5% para traços a/c de 0,60, obtendo resistências de 18,89MPa a 29,96MPa, sendo satisfatório para finalidades estruturais.

Sena *et al.* (2020) realizaram a adição do ROL em composições de 5, 10 e 15 % em relação à massa do cimento na confecção concreto. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de compressão axial e de trabalhabilidade para análise dos resultados com adição em relação a um concreto convencional de referência. Com os resultados obtidos, verificou-se que o concreto com a composição de 5% possuiu uma resistência maior do que os demais, constatando um aumento da fluidez proporcional ao aumento do teor de finos dentre os ensaiados.

Araújo (2020), por sua vez, substituiu parte do pó de pedra por ROL nos traços de concreto para utilização em *pavers* nas proporções de 5, 10, 15 e 20%. Seus estudos mostraram que a adição do resíduo na confecção dos blocos apresentou um resultado satisfatório, aumentando a resistência à compressão. Os traços com incorporação de 15 e 20% alcançaram resistências acima de 35Mpa, conforme aceitação da Norma Brasileira, que exige no mínimo 35MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

Diante dos estudos expostos, percebe-se que o teor de finos para ROL deve seguir uma porcentagem de substituição abaixo 20% e teores de a/c maiores, para que se obtenha uma melhor trabalhabilidade com este resíduo e alcançar RCS satisfatórias. Por escolha técnica para fins comparativos entre os resíduos de mesmas proporções, esse resíduo não seguiu para os ensaios de durabilidade.

4.3.4 ROB

Para planejamento experimental do ROB, seguem os resultados da resistência à compressão simples do concreto, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados da resistência à compressão simples do concreto com o ROB.

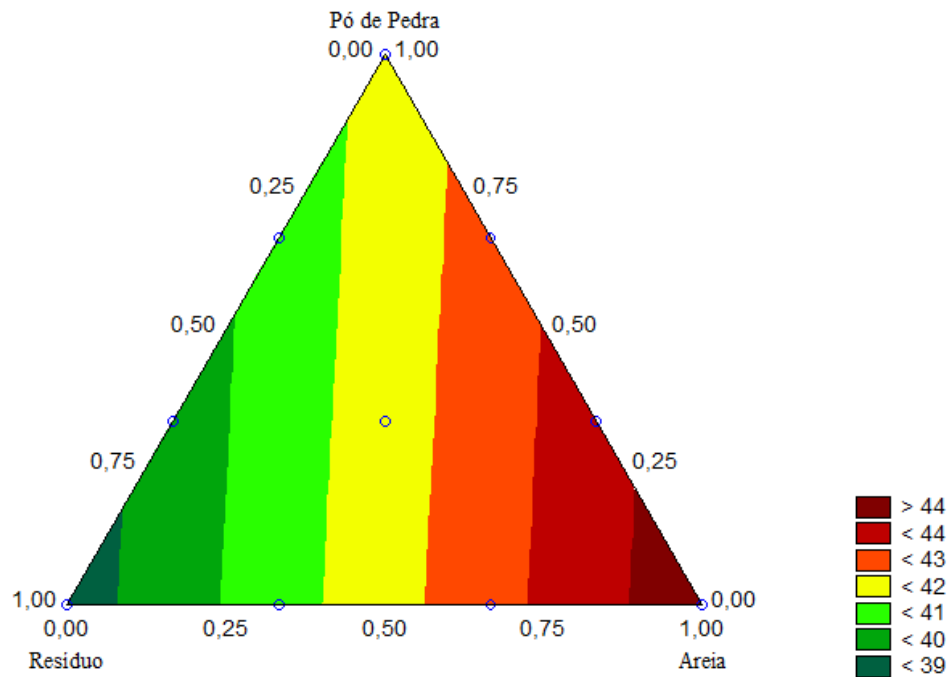
#	Proporções			RCS (MPa)	Média RCS (MPa)
	Resíduo	Areia	Pó de Pedra		
1	1	0	0	42,53	39,86
				36,99	
				40,07	
2	0	1	0	42,99	41,16
				39,81	
				40,70	
3	0	0	1	40,78	40,39
				39,72	
				40,69	
4	0,33333	0,66667	0	48,36	43,87
				41,98	
				41,27	
5	0,33333	0	0,66667	33,54	37,94
				46,20	
				34,08	
6	0	0,33333	0,66667	42,59	43,48
				44,74	
				43,12	
7	0,66667	0,33333	0	39,91	38,53
				46,63	
				29,05	
8	0,66667	0	0,33333	38,97	37,49
				35,22	
				38,29	
9	0	0,66667	0,33333	47,24	47,50
				46,32	
				48,93	
10	0,33333	0,33333	0,33333	45,97	46,82
				48,49	
				46,00	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando os dados apresentados na Tabela 16, pode-se verificar que os resultados de RCS foram acima de 35MPa, indicando que qualquer uma das proporções pode ser utilizada

para o estudo de concreto em *pavers*. Observando os números encontrados na tabela 16, os *pavers*, com relação a RCS, estariam aptos para serem utilizados também na África e na Austrália. A superfície de resposta gerada representa os 10 pontos iniciais do planejamento experimental, conforme Figura 39, facilitando a visualização dos dados inseridos na Tabela 16.

Figura 39 - Superfície de resposta do ROB.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Observa-se que, a partir de qualquer uma das dez proporções utilizadas, a RCS se apresenta satisfatória. Neste caso, para traços com RCS maior, se faz a indicação de utilização de maiores porcentagens da areia e em seguida do pó de pedra, diferentemente do planejamento experimental realizado com o resíduo do quartzo. No entanto, a qualquer porcentagem de resíduo utilizado, obtém-se a resistência desejada.

Por intermédio da regressão linear dos dados experimentais do planejamento de misturas, foram calculados os coeficientes da equação do modelo matemático, conforme segue na Equação 15:

$$R = 38,50 A + 44,72B + 41,35C \quad \text{Equação 15}$$

Em que R representa a Resistência, A o Resíduo, B a Areia e C o pó de pedra.

Logo, as análises estatísticas se mostraram satisfatórias, sendo utilizado o percentual do ROB no concreto para fins de ensaios de durabilidade o teor máximo, ou seja 100%. Desta forma, para a etapa seguinte da pesquisa, o traço do concreto do ROB terá apenas o resíduo como agregado miúdo. Foi escolhida essa proporção uma vez que este estudo tem como objetivo viabilizar a máxima reutilização dos resíduos da mineração no concreto.

Para validação desde percentual de resíduo do ROB, faz-se necessária a análise do comportamento da absorção nos *pavers* por se tratar de um parâmetro de suma importância conforme normativa técnica da NBR 9781/2013. Logo, segue os dados coletados de absorção para o percentual de 100% do resíduo no concreto conforme a Tabela 17.

Tabela 17 - Absorção para o percentual de 100% do resíduo de ROB.

ABSORÇÃO			
M1	M2	Absorção (%)	Abm (%)
2508,30	2614,60	4,24	4,09
2454,00	2556,20	4,16	
2510,40	2607,40	3,86	

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Com base na Tabela 17, percebe-se que as amostras de peças de concreto apresentaram absorção de água com valor médio menor ou igual a 6 %, com nenhum valor individual maior do que 7 %, estando aptas à utilização em *pavers*. Analisando os resultados em comparação às normas internacionais estudadas, os *pavers* de quartzito poderiam ser utilizados em todas as localidades. Contrastando com os dados obtidos a partir da substituição da scheelita, a absorção foi menor, comportamento este que pode justificar o aumento da RCS dos blocos com quartzo, com menores poros e melhor agregação e densificação das partículas.

4.4 Durabilidade dos *Pavers*

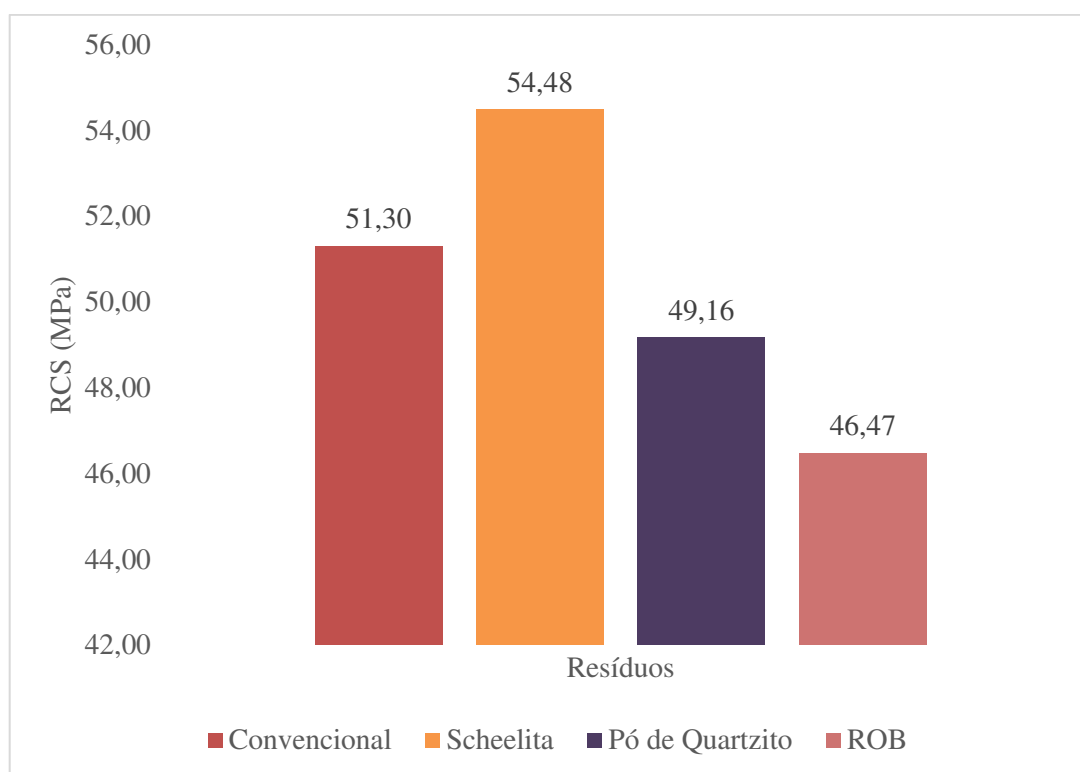
As análises dos planejamentos experimentais revelaram que os resíduos estudados poderiam ser substituídos em 100% no traço convencional, uma vez que se teria a RCS acima de 35 MPa, viabilizando a máxima reutilização dos resíduos da mineração no concreto. Por consequência, incorporando cada resíduo em total substituição a areia e o pó de pedra no traço

dos concretos, foram desenvolvidos os blocos de concreto para análise da durabilidade conforme segue.

4.4.1 Atividade Pozolânica

Observando o gráfico da Figura 40, verifica-se que a scheelita é o único resíduo que dá algum indicativo de que se tenha alguma atividade pozolânica, dado que a média da RCS aumentou 6,19% em relação ao traço convencional. As resistências do pó de quartzito e do ROB ficaram 4,17% e 9,41% abaixo quando comparado com o RCS do traço convencional, respectivamente.

Figura 40 - RCS dos *pavers* convencionais e dos blocos com resíduos.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Os resultados obtidos para os resíduos caracterizaram-os como um material que não possui atividade pozolânica, confirmando o que já se esperava, à medida que a composição mineralógica destes resíduos mostrou que eles são constituídos essencialmente por quartzo e sílica. Porém, a sílica que constitui o quartzo é uma sílica que se apresenta na forma cristalina,

logo não é uma sílica reativa. Dado isso, compreende-se que a atividade pozolânica depende da sílica encontrada na composição química dos materiais, sendo necessário apresentarem sílicas amorfas (com estrutura desordenadas atômicamente) que são reativas para estes possuírem atividade pozolânica (BARROS, 2017).

Na Tabela 18, observam-se as variações estatísticas das RCS.

Tabela 18 - Variações estatísticas das RCS para atividade pozolânica.

Resíduo	Média	Desvio Padrão	CV
Convencional	51,30	2,40	4,67
Scheelita	54,48	4,52	8,30
Pó de Quartzito	49,16	3,41	6,95
ROB	46,47	7,20	15,49

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando o desvio padrão bem como o coeficiente de transformações que fornecem as variações dos dados obtidos, quanto menor for o seu valor, mais homogêneos serão os dados, logo, os valores apresentam boa aceitação estatística.

Os acréscimos nos valores da RCS ocorridos nos *pavers* de concreto com resíduo de scheelita estudados podem ser atribuídos às reações pozolânicas, desenvolvidas durante o processo de hidratação do cimento e de carbonatação, que aconteceram devido ao dióxido de carbono do ar reagir com o hidróxido de cálcio presente nos concretos, pois essas reações contribuem para o refinamento da microestrutura e aumento da resistência mecânica.

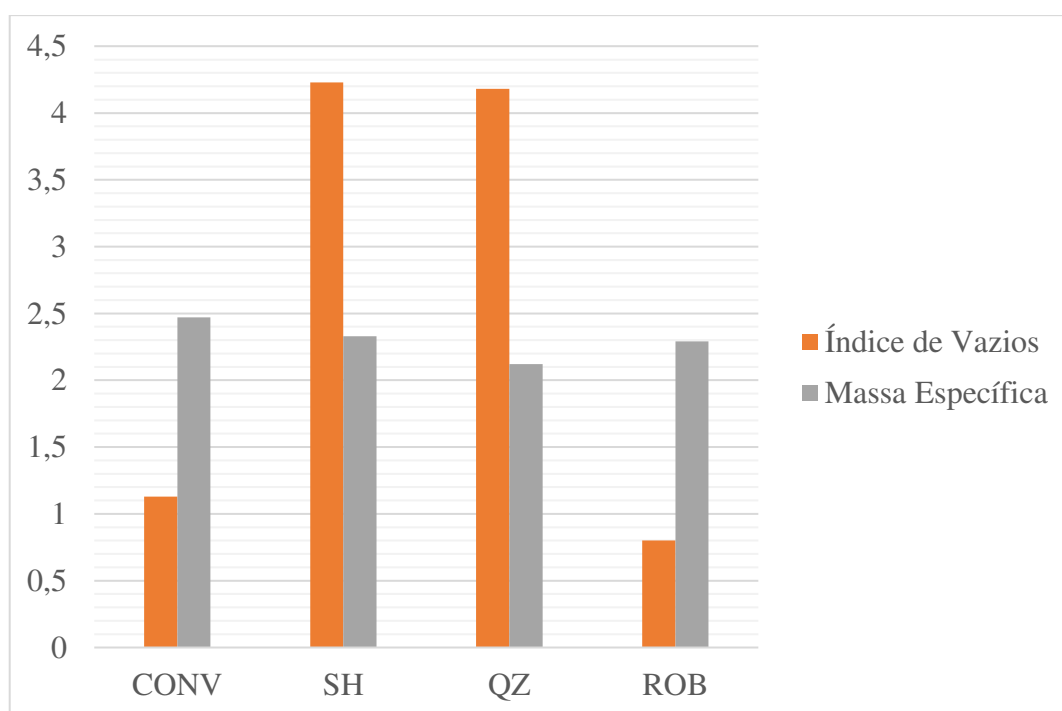
Barbosa *et al.* (2013), Alves (2008) e Binici *et al.* (2008) estudaram a fabricação de concreto utilizando rejeito de granito incorporado ao cimento. Os resultados da pesquisa demonstraram que, além de não ter comprometido a estrutura física dos materiais obtidos, a incorporação do resíduo tem como vantagem o aumento da resistência à compressão dos produtos.

Barros (2017), em seus estudos, analisou que o índice de atividade pozolânica obtido com o cimento, aos 28 dias, em relação à argamassa de referência, foi de 53%, confirmando que o pó de quartzo não apresentou atividade pozolânica com o cimento. Destaca-se que para apresentar essa atividade, de acordo com a ABNT NBR 12653 (2014), esse índice teria que ter dado no mínimo 75%.

4.4.2 Índice de Vazios, Massa específica e Capilaridade

Na Figura 41, podem ser observados os resultados dos índices de vazios e da massa específica dos *pavers* estudados.

Figura 41 - Índice de Vazios e Massa Específica para os *pavers* sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Os blocos com SH apresentou uma maior massa específica quando comparado aos demais resíduos, o que já era esperado tendo em vista a elevada massa específica do resíduo da scheelita. No entanto, apresentou um decréscimo de 5,67% na massa específica quando comparado com o CONV, o que pode ser justificado pelo alto índice de vazios presente nos blocos produzidos com resíduos da scheelita. Uma explicação para este fenômeno é a dificuldade de adensamento de concretos de baixa relação *a/c* quando formulados com incorporação de adições minerais. Devido à adição a consistência da mistura fica menos fluida ocasionando o aumento de poros de ar aprisionado, o que pode ser observado no traço do concreto com 100% do resíduo da scheelita.

A partir dos dados observados na Figura 42, percebe-se que a massa específica do concreto produzido com substituição dos resíduos da mineração sofreu redução em todas as situações quando comparados com o CONV. Além disso, pode ser verificada uma maior densificação desses *pavers*, se analisado em conjunto com o índice de vazios. Este fato pode estar justificado pelo estudo empacotamento dos grãos realizado para o desenvolvimento do traço CONV.

Com relação ao índice de vazios, os valores corroboram com os dados de absorção, estando diretamente proporcional com os dados avaliados, ou seja, quanto maior a absorção, maior o índice de vazios. Logo, pode-se observar que a substituição dos agregados naturais pelos resíduos, deixou o concreto mais poroso, exceto para o ROB. No entanto, não foi observada uma relação diretamente proporcional com a massa específica, estas discordâncias podem estar relacionadas às diferenças de espalhamento da massa de concreto nas formas de PVC.

A SH e o QZ apresentaram um incremento nos índices de vazios que também estão em consonância com as propriedades físicas dos agregados, uma vez que a SH e o QZ apresentaram maiores índices de vazios em suas caracterizações. Medeiros (2016) em seus estudos observou que a argamassa apresentou maior tendência a absorção e índice de vazios ao substituir o agregado natural pela fração grossa do resíduo de scheelita.

Era esperado que o concreto do ROB, com menor índice de vazios, apresentasse maior massa específica e maior RCS. No entanto, mesmo o traço ter apresentado uma menor quantidade de poros, e conseqüentemente menor teor de ar incorporado, isso não ocorreu. Mesmo assim, os resultados obtidos são satisfatórios, demonstrando que a adição de resíduos da mineração proporciona maior leveza ao concreto sem aumentar de forma significativa a sua absorção.

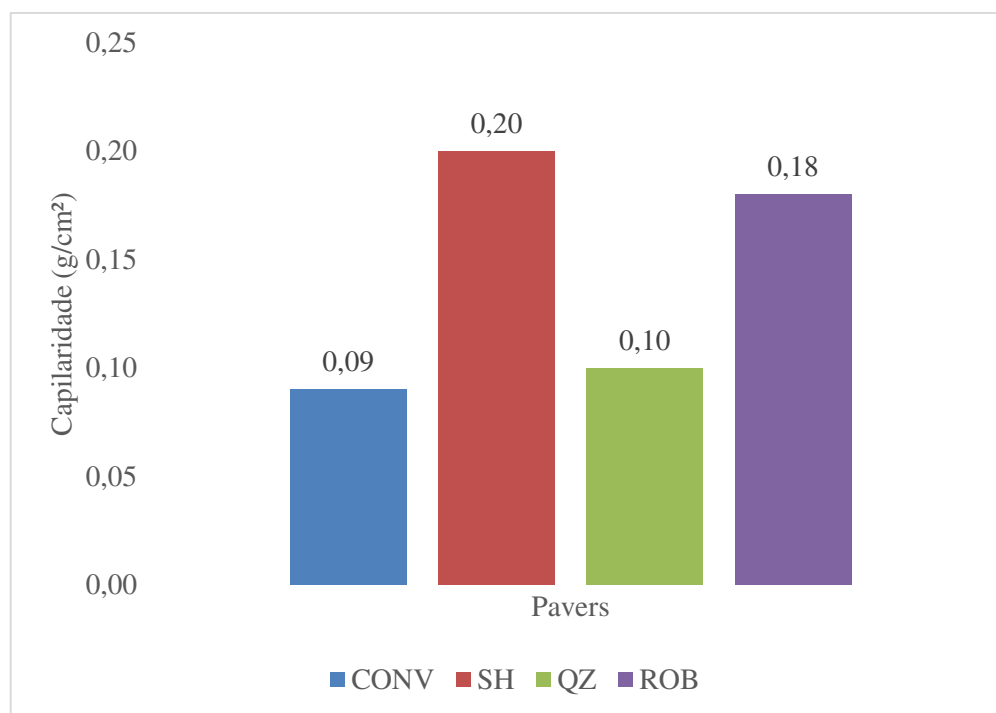
É evidente o aumento da porosidade aberta do concreto mediante a substituição parcial da areia pelos resíduos, compreendendo que a absorção do concreto se deu em função da incorporação de uma fase mais porosa, dada as características dos resíduos da mineração. Ao secar os concretos a 105°C, toda água absorvida em seu interior é removida, incluindo a água presente no interior dos grãos dos resíduos; à medida que é realizada a imersão dos corpos de prova, estes são saturados e todos os vazios apresentados por eles são preenchidos por água, o que igualmente engloba os poros presentes nos resíduos (ZAGO, 2019).

Dietrich *et al.*, (2017) analisou que os concretos com 5%, 10% e 15% de RBRO absorveram menos água ou quantidade equivalente quando comparados aos concretos de referência. Os resultados corroboram com os encontrados por ALMEIDA *et al.* (2019) que

utilizaram resíduos de mármore e calcário como substituto parcial do agregado miúdo; os autores atribuíram a menor absorção à redução do volume de poros e à descontinuidade entre os poros na matriz.

Na Figura 42, podem ser observados os resultados da capilaridade dos *pavers* estudados.

Figura 42 - Capilaridade dos *pavers* sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

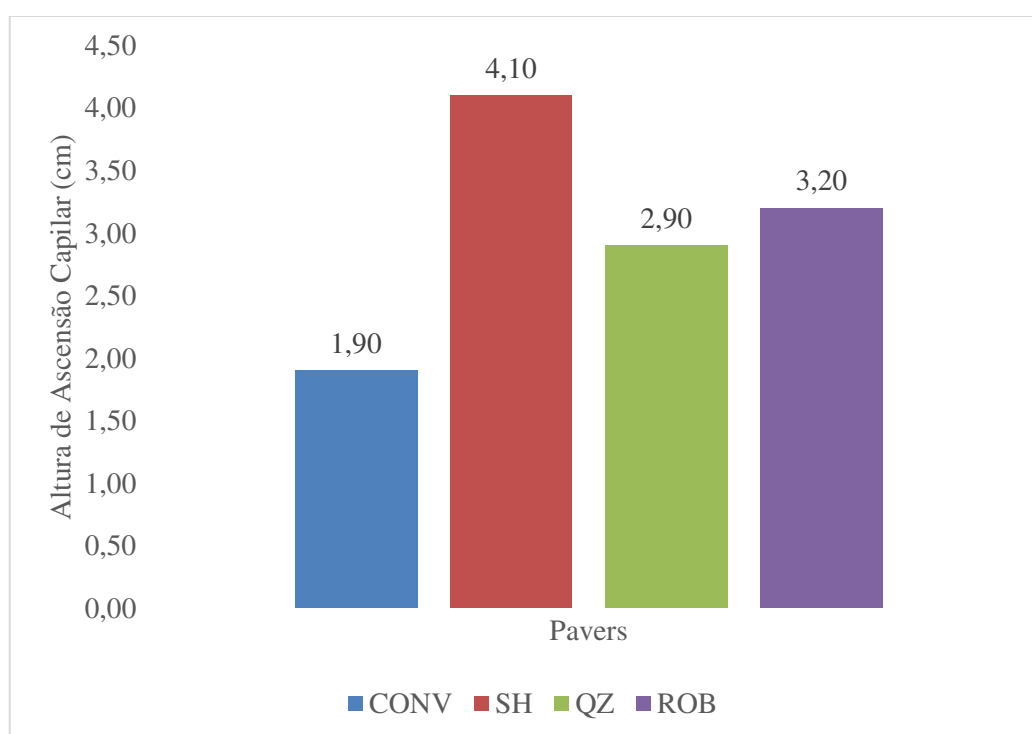
Conforme mostra a Figura 42, o traço CONV apresentou menor valor de absorção por capilaridade, indicando que houve uma diminuição dos poros ou desconexão destes, favorecendo a redução da ascensão da água, corroborando com o índice de vazios apresentado. Também pode-se observar um incremento na capilaridade dos blocos quando comparados ao CONV na ordem de 55,00%, 11,11% e 50,00% para a SH, o QZ e o ROB, respectivamente. Esse fato tem relação com a porosidade do concreto, corroborando com o resultado do índice de vazios uma vez que a scheelita e o pó de quartzo apresentaram maiores índices.

Por outro lado, os resíduos com maior porcentagem de finos colaboram com o refinamento dos poros do concreto, que acaba por dificultar a absorção de água por capilaridade no concreto, como pode ser justificado pelo ROB, que mesmo apresentando um baixo índice de vazios, apresentou considerável capilaridade. Ao verificar a curva granulométrica do resíduo, percebe-se um alto teor de finos quando comparado a areia, por exemplo, utilizado no traço CONV.

Arruda *et al.* (2018) estudaram o concreto produzido quanto a absorção capilar na idade de 28 dias, utilizando o cimento Portland CII-Z 32 e as porcentagens de sílica ativa como aditivos no concreto foram de 5%, 8% e 10%. Observou-se que o uso de sílica ativa melhorou as propriedades do concreto, preenchendo os vazios dos grãos de cimento e permitindo que os espaços entre as partículas maiores fossem preenchidos por partículas imediatamente menores. Com isso, houve uma redução da porosidade do concreto e observou-se uma diminuição na absorção de água por capilaridade. Com a adição de 10% de sílica ativa, foram obtidos resultados mais relevantes, pois houve uma maior redução na absorção de água.

Na Figura 43, podem ser observados os resultados da altura da ascensão capilar dos *pavers* estudados.

Figura 43 - Altura da ascensão capilar dos *pavers* sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Na Figura 43, observam-se as alturas da ascensão capilar medidas em centímetros. Percebe-se que os resultados corroboram com os dados de absorção capilar apresentados na Figura 42. Os blocos, por sua vez, apresentaram um mesmo padrão de comportamento com o traço CONV dispondo de menor altura e os blocos de sheelita de um maior incremento.

Na Figura 44, é possível verificar a altura capilar referente ao *paver* do CONV.

Figura 44 - Altura da ascensão capilar do CONV.



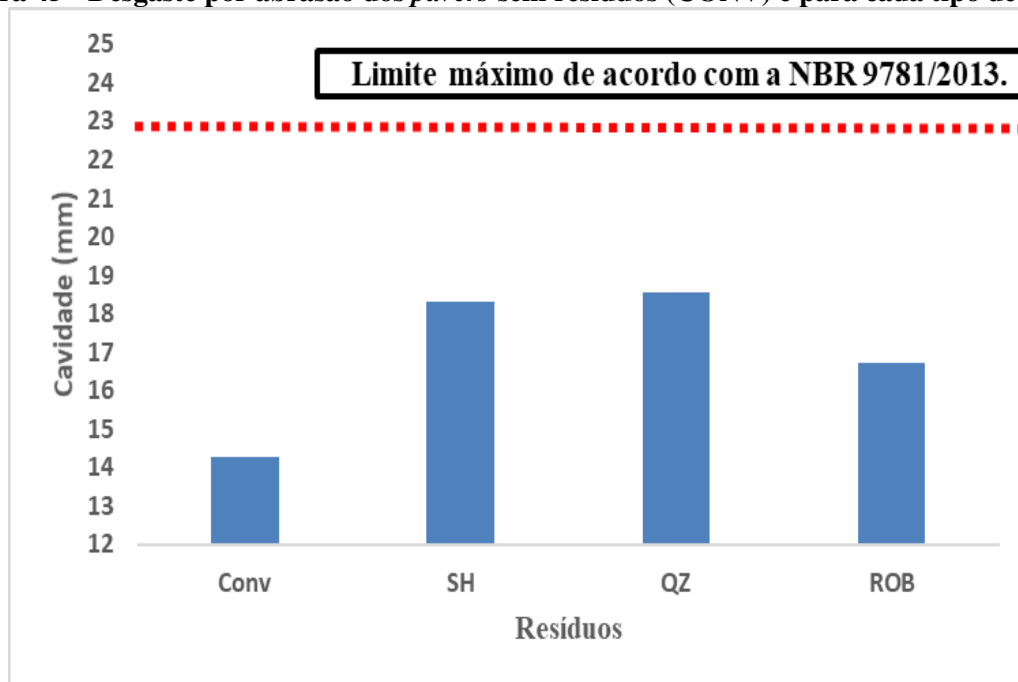
Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Na Figura 44, observa-se a capilaridade ao longo do *paver*. As medições foram realizadas considerando as marcações exteriores dos blocos tendo em vista que ao se romper a tração não se tornou possível a demarcação do nível capilar.

4.4.3 Desgaste à Abrasão

O desgaste por abrasão para os *pavers* sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo pode ser observado na Figura 45, conforme segue:

Figura 45 - Desgaste por abrasão dos *pavers* sem resíduos (CONV) e para cada tipo de resíduo.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir da figura 45, é possível comprovar que quanto menor o desgaste, maior a resistência à abrasão da peça. Os resultados podem ser considerados satisfatórios de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), podendo ser usados em situações com efeitos de abrasão acentuados, pois apresentaram números abaixo de 20 mm. Percebe-se que os *pavers* convencionais apresentaram um menor desgaste abrasão quando comparada as peças com alguma composição de resíduos. Comparando os resultados obtidos com as normas internacionais, teriam aceitação com a norma Européia BS EM-1338:2003 e a Colombiana NTC 2017:2004.

Os *pavers* com resíduos obtiveram um desgaste maior na ordem de 22,04%, 23,16% e 14,74% para a scheelita, o quartzo e o ROB, respectivamente, quando comparados aos *pavers* convencionais. Em contrapartida, os *pavers* com substituição de resíduos apresentaram comportamento semelhante em relação ao desgaste da superfície.

Diante do exposto, pode-se analisar que o desgaste por abrasão dos *pavers* é satisfatório, tanto para utilização de pavimento para tráfego leve, como para outras aplicações, como em: calçadas, ciclovias, áreas de lazer, entre outras opções.

Na Tabela 19, apresentam-se as variações estatísticas das leituras das cavidades.

Tabela 19 - Variações estatísticas das leituras das cavidades.

Resíduo	Média da Cavidade (mm)	Desvio Padrão (mm)	CV (%)
CONV	14,27	2,33	16,33
SH	18,30	0,85	4,66
QZ	18,57	0,90	4,84
ROB	16,73	1,86	11,10

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando o desvio padrão bem como o coeficiente de variação que fornecem as mudanças dos dados obtidos, quanto menor for o seu valor, mais homogêneos serão os dados, logo, os valores apresentam boa aceitação estatística.

Na Figura 46, é possível verificar as leituras do ensaio e as devidas marcações para cada *paver*.

Figura 46 - Leituras do ensaio e as devidas marcações para cada *paver*.

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Diversas pesquisas realizaram esse ensaio em adaptação à norma NBR 12.042 (ABNT,1992), assim, não podem ser passíveis de comparação, tendo em vista que no presente estudo foi utilizada a metodologia prevista na própria norma NBR 9781 (ABNT, 2013), referência para os limites desejados para este ensaio.

Alcantara (2015) incorporou resíduo de cerâmica vermelha (RCV) como matiz colorimétrica em prol da redução de pigmento em *pavers* coloridos, considerando também a possibilidade de melhoria de suas propriedades por efeitos filler e pozolânico. De modo geral, as adições de RCV de forma isolada tenderam a diminuir o valor da cavidade em relação ao *paver* padrão colorido, tornando as peças mais resistentes à abrasão. Destaca-se o traço 1:5 40% RCV, cuja cavidade média teve uma redução de 16,16% em relação à cavidade do traço padrão colorido.

Almeida (2016) encontrou abrasão satisfatória para *pavers* com adição de PET nas proporções com 0,0%, 2,5%, 5,0% e 7,5%, com larguras de cavidade abaixo de 20 mm. Já as peças com 10,0% de PET apresentaram cavidade de 23 mm, podendo ser usadas no tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha.

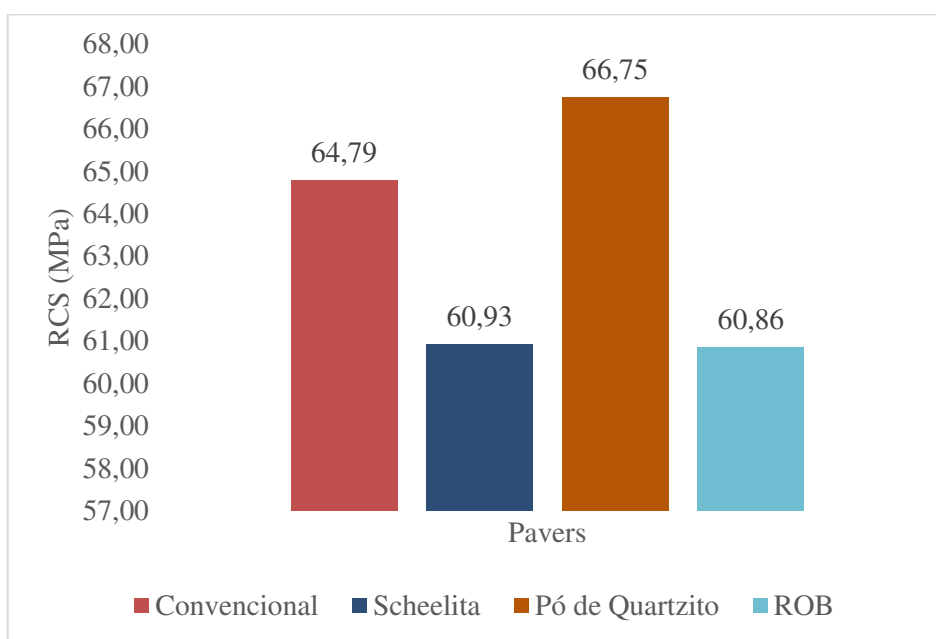
Estolano (2018) apresentou resultados para o desgaste à abrasão em *pavers* com adição de metacaulim no concreto, em substituição do cimento Portland nas proporções de 0% a 30%, com variações a cada 5%. Nos resultados obtidos, as cavidades obtiveram baixa variação, com o menor valor de 11,05mm para o teor de 0% e 13,65mm para o teor de 10%, todos estando dentro da faixa aceitável de desgaste.

4.4.4 Envelhecimento Natural

Ao longo de 365 dias, os blocos de concreto foram mantidos em cura ao ar, sob ação das condições climáticas do ambiente. Ao longo desse período, nenhuma alteração visual foi observada nos blocos de concreto, considerando que os corpos de prova não foram expostos a condições de agressividade ambiental. Assim, foi possível a verificação de que o tempo de cura pode ter sido insuficiente para se observar o desenvolvimento de patologias.

Na Figura 47, é possível verificar as médias das RCS para cada *paver* após os dias 365 dias de exposição, isto é, o seu índice de envelhecimento natural

Figura 47 – RCS dos *pavers* no envelhecimento natural.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com a Figura 47, apenas os blocos com resíduo de quartzito apresentaram incremento na RCS de 3,03% com relação aos blocos CONV. A scheelita e o ROB tiveram diferença de RCS de 5,96% e 6,07%, respectivamente, se comparado aos blocos de referência. Esse comportamento de ganho de RCS do pó de quartzito pode estar ligado ao alto teor de Dióxido de Silício (SiO_2), Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e Óxido de Ferro (Fe_2O_3) presentes no resíduo, indicando uma possível atividade pozolânica.

Comparando os ganhos de resistência de cada resíduo do período inicial de RCS e após 365 dias, tem-se os dados dispostos na tabela 20.

Tabela 20 - Variações da RCS nos períodos avaliados.

Resíduo	Aos 28 dias	365 Dias	Ganho de RCS
Convencional	51,30	64,79	26,30%
Scheelita	54,48	60,93	11,84%
Pó de Quartzito	49,16	66,75	35,78%
ROB	46,47	60,86	30,97%

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

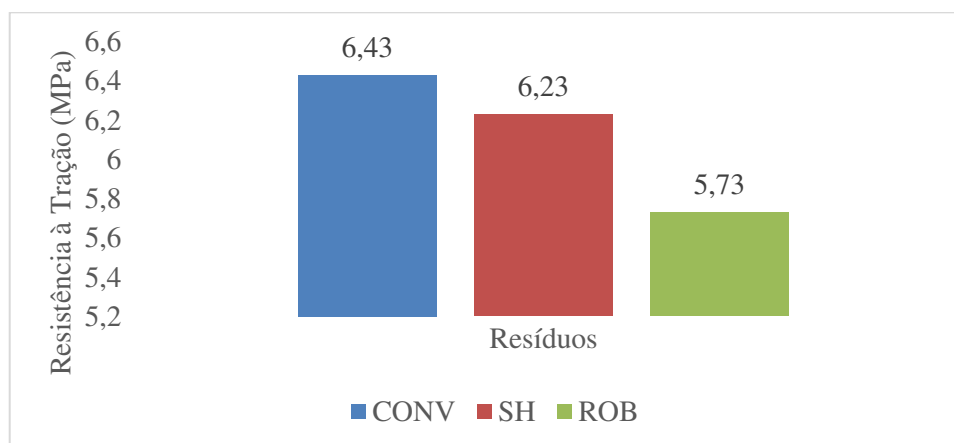
Conforme dispõe a Tabela 20, os blocos de todos os resíduos, inclusive o CONV, apresentaram ganhos de RCS durante o intervalo de tempo proposto, o que pode estar ligado às reações do concreto que continuaram em processo de hidratação e ganho de RCS.

Por outro lado, a scheelita apresentou incremento na RCS de 11,48% se comparado aos 28 dias de cura, em que apresentou RCS de 54,48 MPa. Zago (2019) em seus estudos, embora não se tenha observado evidências visuais do efeito do uso de resíduos na deterioração das barras de argamassa. Pelos resultados de resistência à tração, compreende-se que o efeito produzido se restringiu a uma alteração em escala microestrutural, de maneira que, possivelmente, microfissurações geradas na microestrutura das argamassas tendem a reduzir a resistência mecânica do material, principalmente quando o maior teor de substituição é observado.

Barros (2018) analisou os resultados obtidos para RCS dos corpos de prova submetidos ao envelhecimento natural. Eles indicaram que as argamassas adicionadas com resíduos de quartzito tiveram comportamento da RCS semelhante ao longo do processo de envelhecimento ao comportamento das respectivas argamassas de referência.

4.4.5 Resistência à Tração

Devido à quantidade de resíduos de quartzo disponíveis, o ensaio de resistência à tração não contemplou esse resíduo. Logo, na Figura 48, é possível observar os resultados da resistência à tração para os *pavers* CONV, a scheelita e o ROB.

Figura 48 - Resistência à Tração dos traços estudados.

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Para todos os corpos de prova, a ruptura no ensaio de resistência à tração na flexão ocorreu no terço médio e os valores de resistência estão dispostos na Figura 48. Para as amostras com a incorporação de resíduo, percebe-se que houve um decréscimo das resistências à tração de 3,11% e 10,95% para a scheelita e para o ROB, respectivamente, quando comparados ao traço CONV. O comportamento do ROB corroborou com os resultados de RCS, quando apresentou a tração à flexão mais baixa, quando comparado ao traço CONV. Os resultados demonstraram que o resíduo não foi eficiente para elevar a resistência à tração na flexão do concreto, mas ele permitiu que, mesmo após a ruptura, o corpo de prova não se fragmentasse.

Segundo Metha e Monteiro (1994), os valores de resistência à tração na flexão correspondem de 7 a 11% dos valores de resistência à compressão. De acordo com os dados, os valores de resistência à tração na flexão correspondem a 12,53%, 11,43% e 12,32% para o CONV, a SH e o ROB, respectivamente, em relação aos valores de RCS.

A norma brasileira NBR 9781 (ABNT, 2013) não referencia esse parâmetro para aceitação na produção de blocos intertravados. Comparando os resultados obtidos com as normas internacionais, teriam aceitação com a norma Europeia BS EM-1338:2003, Colombiana NTC 2017:2004 e pela Africana SANS-1058:2009.

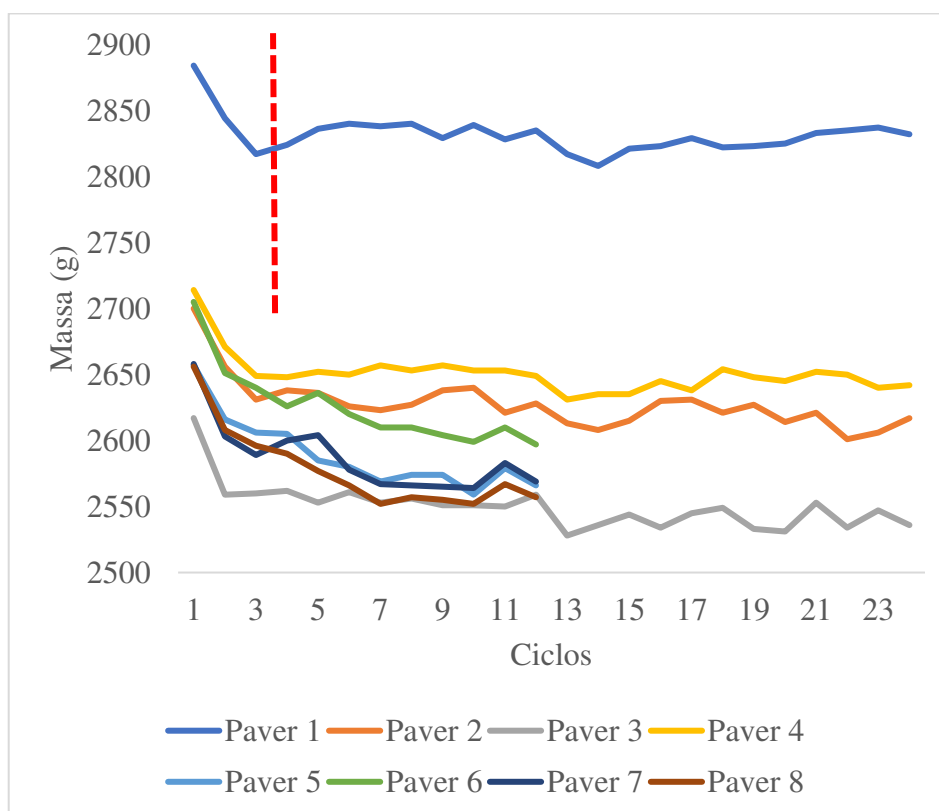
Oliveira *et al.* (2021) encontraram a resistência a tração de 4,77 Mpa em seus estudos. Já Almeida (2016), nos resultados de tração na flexão, observou resistências de tração de 4,98 MPa para peças prismáticas e de 5,14 MPa para *pavers* de 16 faces. Souza *et al.*, (2019) ao estudar concreto para fins de pavimento intertravado, avaliou a resistência à tração de 5,28 MPa para os *pavers* de referência e 5,56 MPa para os blocos com resíduo de caulim na proporção de

10%. Assim, analisando os dados obtidos, o ensaio realizado apresentou resistência à tração satisfatória, quando comparado a estudos semelhantes.

4.4.5 Chuva Dirigida

Devido a fatores logísticos do laboratório no qual foi realizado, o ensaio de chuva dirigida foi executado para o CONV, a scheelita e o ROB. A análise das variações de massa para o traço CONV apresenta-se no gráfico das Figura 49 e 50.

Figura 49 - Análise das variações de massa para o CONV

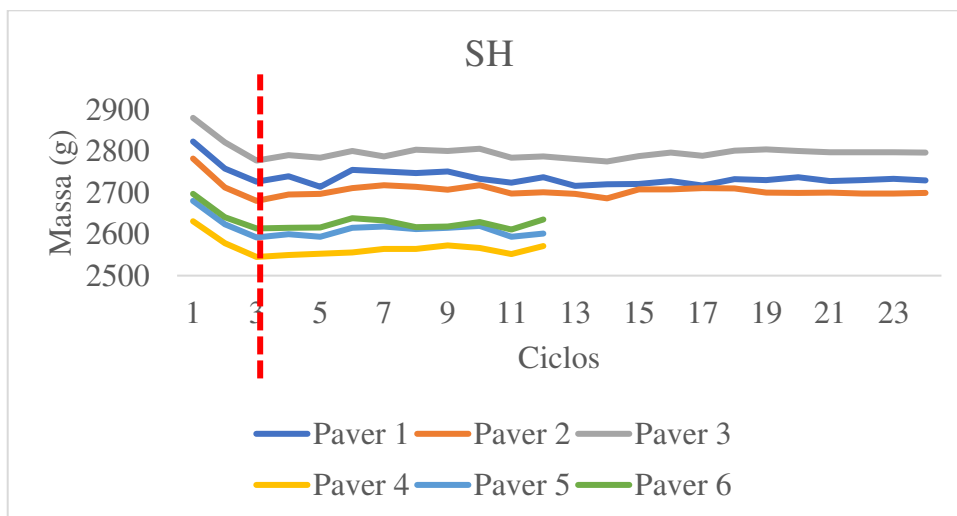


Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Conforme ilustra a Figura 49, até o terceiro ciclo os *pavers* apresentaram perda de massa média na ordem de 2,33% em relação à massa inicial. Esse valor de perda de massa é considerado satisfatório, indicando boa resistência do bloco quando submetidos a ação da chuva e do calor.

A análise das variações de massa para o traço SH está disposta no gráfico da Figura 50.

Figura 50 - Análise das variações de massa para a SH

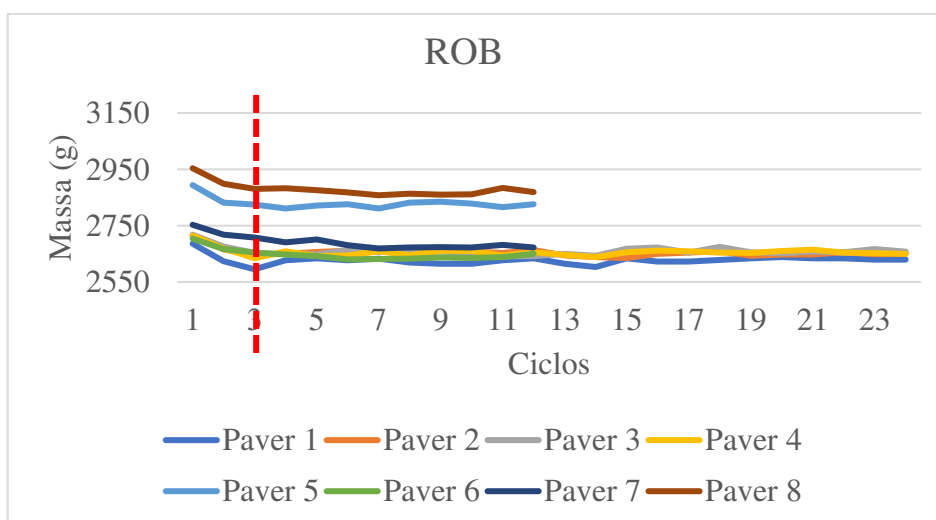


Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Segundo mostra a Figura 50, até o terceiro ciclo os *pavers* de SH apresentaram perda de massa média na ordem 3,38%. Se comparado com o traço CONV, a SH apresentou uma perda de massa maior na ordem de 1,05%. Essa perda pode estar diretamente ligada à resistência de desgaste do bloco, uma vez que o resultado corrobora com o ensaio de desgaste por abrasão, no qual a SH também teve desgaste maior, quando comparado com os blocos dos traços CONV. No entanto, esse valor de perda de massa é considerado satisfatório, indicando boa resistência do bloco, quando submetidos à ação da chuva e do calor.

A análise das variações de massa para o traço SH encontra-se no gráfico das Figura 51.

Figura 51 - Análise das variações de massa para o ROB



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com a Figura 51, até o terceiro ciclo o ROB apresenta perda de massa média na ordem de 2,68%, logo, demonstrando uma perda de massa maior na ordem de 0,35%, se comparado com o CONV e menor de 0,70%, se comparado com a SH. Esses resultados corroboram mais uma vez com o ensaio de desgaste à abrasão, no qual os blocos de CONV teve desgaste menor e os blocos SH teve desgaste maior, quando comparado com os blocos de ROB. No entanto, esse valor de perda de massa é considerado satisfatório, indicando boa resistência do bloco quando submetidos a ação da chuva e do calor.

Nos ciclos seguintes, conforme apresentados nas Figuras 49, 50 e 51, percebe-se uma estabilização da massa, o que pode estar relacionado ao grau de hidratação do concreto com o processo de cura acelerado, decorrente de ciclos de molhagem e elevação da temperatura pela secagem em estufa, causando uma maior densificação do bloco. Esse comportamento corrobora com o ensaio de desgaste à abrasão, nos quais o CONV e o ROB apresentaram menos desgaste à abrasão, enquanto a SH apresentou uma taxa maior de desgaste. Logo, a substituição dos resíduos não alterou a qualidade dos *pavers* nesse aspecto, podendo ser utilizados para essa finalidade.

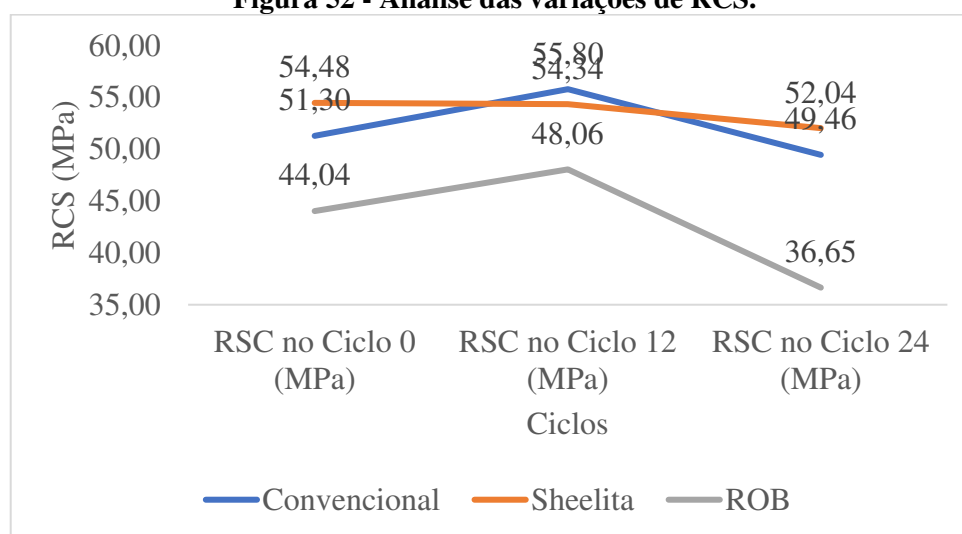
Rezende (2013) estudou a potencialidade do resíduo de caulim para uso como material pozolânico em concretos secos, avaliando também a durabilidade a partir do ensaio de degradação de chuva dirigida. As placas de concreto com metacaulim, obtidas com o resíduo de caulim, apresentaram maior suscetibilidade à erosão causada pelos respingos de água dos aspersores do que as placas de referência sem metacaulim, em comparação à elevação do teor de substituição acarreta em aumento dos valores de perda de massa.

Almeida (2016), em seus estudos, encontrou perda de massa satisfatória para *pavers* com adição de 7,5% de PET incorporado ao concreto. As peças com PET utilizadas neste ensaio apresentaram uma variação de massa quando submetidas à ação do calor e da chuva, enquanto o concreto convencional apresentou uma perda de massa gradual.

Barros (2017) verificou que os corpos de prova curados por 60d apresentaram para os traços incorporados com resíduos de quartzito uma redução no valor da perda de massa do primeiro para o vigésimo ciclo, enquanto para os traços de referência houve um aumento no valor da perda de massa do primeiro para o vigésimo ciclo, demonstrando que ocorre uma maior suscetibilidade à erosão causada pela ação da chuva, logo as argamassas alternativas apresentaram melhor desempenho que suas respectivas argamassas de referência.

No que tange à variação de RCS dos ciclos avaliados no ensaio de durabilidade de chuva dirigida, a Figura 52 dispõe o seu comportamento.

Figura 52 - Análise das variações de RCS.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com a figura 52, o traço convencional apresentou um aumento de RCS no ciclo doze de 8,06% com relação à resistência inicial, o que pode ser explicado pelo fato de que os *pavers* ainda estavam em estágio inicial de hidratação do concreto com consequente ganho de resistência. Do ciclo doze ao vigésimo quarto, ocorreu uma perda de resistência na ordem de 11,36%. O ROB teve comportamento semelhante ao concreto convencional, com acréscimo de resistência ao término do ciclo doze na ordem de 8,26% e ao final do vigésimo quarto ciclo uma perda de 23,74%. Já a scheelita, apresentou perdas de resistência em menores proporções. Ao final do ciclo doze já revelou uma perda de 0,26% e ao final do vigésimo quarto ciclo uma perda de 4,23%.

Barros (2017), em seu estudo, percebeu que ocorreram reações pozolânicas e de carbonatação, tanto nas argamassas incorporadas com resíduos de quartzito quanto nas argamassas de referência, durante o processo de envelhecimento acelerado por ciclos de exposição à chuva dirigida e a secagem em estufa para as argamassas curadas por 60d e 90d, com aumento da RCS. Assim, podem ter ocorrido reações pozolânicas e de carbonatação que favoreceram a ocorrência do aumento da resistência à compressão simples entre o primeiro e o vigésimo ciclo de envelhecimento.

Silva (2019) analisou *pavers* com inserção de PET nas proporções de 0%, 10%, 20% e 30% para o ensaio de chuva dirigida. Além disso, observou que a perda de massa aumenta nos corpos de prova com maior percentual de polímero, ou seja, quanto maior a presença do PET na composição, maior a perda de massa no ensaio quanto a RCS. Tal propriedade continuou aumentando, pois os desgastes sofridos pelos blocos foram insignificantes.

Rezende (2019) estudou provetes de concreto e BTCs (blocos de terra compactada) estabilizados com metacaulim. Como ligantes, foram utilizados cimento Portland CEM I 42.5R e metacaulino (Mk) de alta reatividade (substituindo 10% e 15% da massa do cimento) e, como agregados, pedra britada de origem granítica, areia quartzosa e pó de pedra, na proporção de 37%, 40% e 23% respectivamente. Verificou-se que o uso de metacaulim promoveu aumento nos valores de resistência à compressão. Entretanto, os resultados obtidos para os provetes submetidos ao ensaio de exposição à chuvas foram muito superiores aos de mesma composição mantidos em ambiente protegido, resultados esses justificados, em parte, pelas análises térmicas as quais evidenciaram maior ocorrência de carbonatação nos provetes submetidos ao teste acelerado de exposição a chuvas.

Na Tabela 21, encontram-se as variações estatísticas das leituras das cavidades.

Tabela 21 - Variações estatísticas das leituras das cavidades.

Resíduo	Ciclo 0		Ciclo 12		Ciclo 24	
	Desvio Padrão (mm)	CV (%)	Desvio Padrão (mm)	CV (%)	Desvio Padrão (mm)	CV (%)
Convencional	2,40	4,67	4,38	7,85	3,71	7,49
Scheelita	4,52	8,30	6,59	12,13	6,25	12,02
ROB	6,74	15,31	5,59	11,63	0,61	1,66

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando o desvio padrão, bem como o coeficiente de variação que fornecem os números dos dados obtidos, quanto menor for o seu valor, mais homogêneos serão os dados. Logo, os valores apresentam boa aceitação estatística para todos os resíduos em todos os ciclos.

4.4.6 Ataque ao Sulfato

Na análise de ataque aos sulfatos, tanto na idade de cura de 28 dias como em 42 dias, não houve alterações quanto às medidas das dimensões, o que significa que não ocorreu

agressão suficiente para degradar os blocos. Segundo Leite (2018), os íons de sulfato são altamente prejudiciais às estruturas de concreto, estando presentes nos solos, agregados, na água do mar e em águas subterrâneas, reagindo com os produtos de hidratação do cimento. Assim, formam a gipsita e etringita secundária, as quais têm propriedades expansivas, provocando fissurações, expansões e comprometimento da vida útil do concreto. No entanto, nas análises realizadas com os *pavers* em estudo, não foi observado este tipo de degradação.

Souza (2016), ao investigar o ataque por sulfato de sódio e magnésio em barras de argamassa, verificou igualdade estatística entre séries com diferentes adições minerais para o período de 6 semanas. O autor ainda comenta que tais resultados são indicativos de que o período de ensaio de 6 semanas seja insatisfatório. Diante disso, as conclusões reforçam a importância do prolongamento do período de exposição.

Barros (2017) obteve os seguintes resultados para as expansões das argamassas de cimento Portland incorporadas com resíduos de Areia de Quartzo (QS) e Pó de Quartzo (QP) aos 42 dias de exposição ao ataque por sulfato de sódio: 0,07% para o traço 1:3(Cimento: 0% QP e 100% QS), 0,07 % para o traço 1:3(Cimento: 15% QP e 85% QS), 0,07% para o traço 1:1:6 (Cimento: Cal: 0% QP e 100% QS) e 0,06% para o traço 1:1:6 (Cimento: Cal: 15% QP e 85% QS). Partindo disso, a autora concluiu que esses valores comprovaram que as argamassas estudadas não são resistentes ao ataque por sulfato de sódio, quando o método de avaliação aplicado for a variação dimensional de barras de argamassas imersas em solução de sulfato.

Neta *et al.* (2018), ao estudar a expansão do ataque por sulfato de sódio em peças de argamassa de cimento Portland incorporada com scheelita no traço 1:3 aos 42 dias de exposição, encontraram 0,083%. Logo, esse valor evidencia que a argamassa estudada foi reativa. ao ataque por sulfato de sódio quando o método de avaliação aplicado foi a variação dimensional de barras de argamassas. Os autores evidenciam que as expansões ocorreram, possivelmente, em razão da alumina presente no agregado ao reagir com o sulfato do cimento, formou a etringita tardia. Conforme afirmam Merida et al. (2015), quando essa reação acontece, pode-se afirmar que os agregados são reativos com os íons sulfato, ocasionando expansões ou retrações. Estas não afetarão o comportamento do material se ficarem dentro do limite estabelecido pela norma, pois se trata de um ensaio acelerado.

Pinto (2019) estudou o comportamento do Cimento Supersulfatado (CSS) em relação à durabilidade quanto ao ataque de sulfato de sódio. Com base nos resultados apresentados, a autora verificou que houve uma variação dimensional positiva, uma expansão nas amostras compostas com cimento CP V ARI expostas ao sulfato de sódio. Além disso, percebeu que a

capacidade de resistência aos 56 dias pode ainda não ser representativa do real comportamento verificado em estruturas de concreto em ambientes com sulfatos.

Na Tabela 22, é possível observar a variação das massas dos *pavers* no início e ao término de 42 dias.

Tabela 22 - Variação das massas no período inicial e aos 42 dias.

Descrição	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Diferença (%)
CONV	2742	2754	0,44
	2730	2769	1,43
	2654	2672	0,68
SH	2842	2902	2,11
	2572	2625	2,06
	2788	2852	2,30
QZ	2606	2639	1,27
	2850	2881	1,09
	2616	2638	0,84
ROB	2640	2677	1,40
	2610	2634	0,92
	2632	2655	0,87

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Analisando os dados expostos na Tabela 22, todos os concretos se comportaram de forma análoga durante o ensaio de ataque por sulfatos. Houve um incremento médio de massa com números semelhantes em todos os teores analisados. Os ganhos médios de massa foram de 0,85%, 2,15%, 1,06% e 1,06% para o CONV, a SH, o QZ e o ROB, respectivamente. Verifica-se com isso que, com o passar do tempo, há um menor ganho de massa pois os poros vão sendo gradualmente preenchidos. O comportamento do ganho de massa corrobora com a absorção dos blocos. Logo, este ganho de massa pode ser justificado pelo fato do sulfato se aderir nos poros do concreto.

O ganho mais expressivo foi verificado nos *pavers* com scheelita, o que, segundo Barros *et al.* (2017), pode ser ocasionado pelo teor de alumina na composição química do agregado.

Almeida (2016) encontrou resultado semelhante ao realizar o ensaio em concretos com e sem adição de PET. Ele analisou que houve ganhos médios de massa na ordem de 1,17%, 1,00%, 0,78% e 0,73%.

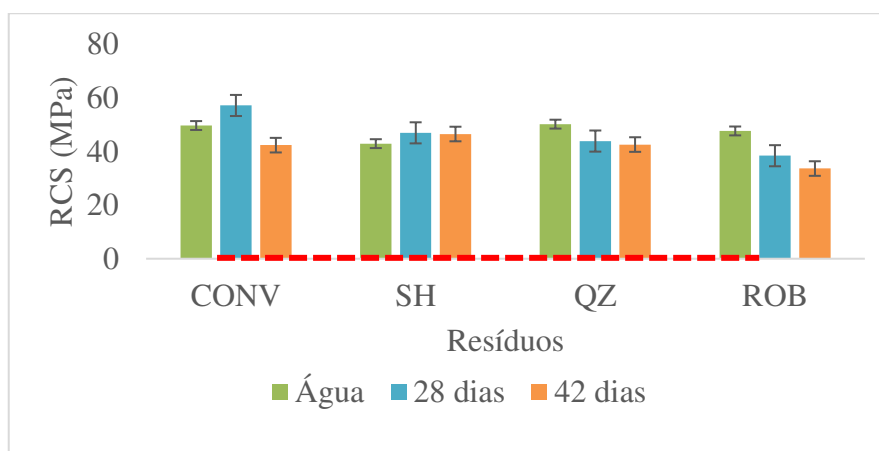
Swiderski (2019) estudou o desempenho de concretos com substituição parcial do cimento CP II F 40 por cinza da casca de arroz (CCA) nos teores de 0%, 5%, 10% e 15% e o desempenho de concretos com o cimento CP V ARI RS quanto à resistência ao ataque por

sulfato de sódio. O autor observou que a substituição parcial do cimento por CCA foi eficiente na mitigação da expansão das argamassas expostas à solução sulfatada e a argamassa com 10% de CCA apresentou a menor expansão atingindo 0,011% com 15 semanas e as argamassas sofreram um ganho de massa ao permanecerem imersas na solução de sulfato, mesmo apresentando aspecto visual poroso.

Pinto (2019) avaliou que barras de argamassa com CP V ARI apresentaram ganho de massa ao final do período de avaliação (20 semanas), atingindo um valor de 3,4%. A autora relata que este fato pode estar associado à formação de produtos da reação entre os íons sulfatos e fases hidratadas, que se depositam nos espaços vazios disponíveis e promovem a densificação da amostra. Além disso, ocorreu também maior absorção da própria solução de exposição, o que pode influenciar no ganho de massa.

Quanto à análise de RCS, na Figura 53 pode ser observada a variação desse parâmetro no início e ao término de 42 dias para os blocos CONV, SH, QZ e o ROB.

Figura 53 - Análise das variações de RCS para o ensaio de ataque de sulfato



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Quanto à análise de RCS para o ensaio de ataque a sulfatos, observa-se na Figura 48 que o traço CONV apresentou o seguinte comportamento: quando comparado com a RCS da água, teve um incremento de RCS aos 28 dias de ataque de sulfato, de 15,05%. Aos 42 dias, apresentou um decréscimo da RCS de 14,75%. A SH também ganhou resistência aos 28 dias, de 9,39% e, manteve o mesmo valor de RCS, mesmo com um tempo maior na presença do sulfato. Dessa forma, a SH demonstrou ser mais resistente ao ataque de sulfato quando comprado ao CONV. Aos 28 dias de exposição, pode-se observar que o CONV e a SH apresentaram um aumento na resistência, o que pode ser atribuído à formação de etringita que

no início de sua formação tem um certo impacto positivo na resistência, uma vez que aumenta a compacidade do concreto. O decréscimo na resistência apresentada aos 42 dias de exposição, pode ser justificado porque a etringita começou a ter crescimento excessivo dentro do concreto que pode ter efeitos adversos, como perda de resistência. (Majhi e Nayak, 2019).

Já o QZ e o ROB apresentaram um mesmo padrão de comportamento: ambos tiveram decréscimo de RCS na presença de sulfato. Quando comparado com a RCS dos blocos imersos em água, o QZ apresentou uma perda de RCS de 12,57% aos 28 dias e 15,16 aos 42 dias. Já o ROB apresentou uma perda de RCS de 19,40% aos 28 dias e 29,413% aos 42 dias. Analisando todos os *pavers*, verifica-se que o ROB apresentou uma maior fragilidade em relação ao sulfo e a scheelita uma maior resistência. Portanto, apesar dos resultados de expansão indicarem que não houve reatividade das *pavers* ao sulfato de sódio, para o CONV, o QZ e o ROB foram suficientes para degradar mecanicamente os corpos de prova para a idade de exposição aos íons durante o tempo de exposição. Contudo, todos os *pavers*, após exposição ao ataque de sulfatos aos 28 dias, apresentaram RCS acima de 35MPa. Para 42 dias de imersão, apenas o ROB não atingiu a resistência mínima, conforme indica a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) para uso em tráfego leve.

Barros (2017), em seus estudos, indicou que não ocorreu perda da RCS quando se compara os valores da RCS obtidos após imersão em água destilada e solução de sulfato de sódio por 42d para as argamassas estudadas. Então, de acordo com o comportamento mecânico apresentado, verificou-se que não ocorreu a degradação dos corpos de prova, apesar deles terem apresentado expansões características de argamassas não resistentes ao ataque por sulfatos.

Urrego (2020) realizou um estudo experimental sobre a resistência ao ataque externo de sulfato de sódio em concretos autoadensáveis com resíduo de alvenaria. A partir do estudo, foi verificada que a exposição de concreto autoadensável na solução de sulfato de sódio gera na matriz formação de etringita e gesso, que proporciona uma expansão interna levando à deterioração do concreto. A adição do resíduo de alvenaria tende a melhorar a resistência ao ataque de sulfato de concreto autoadensável, que é mais perceptível em idades prolongadas de exposição.

4.5 Análise de Viabilidade Econômica

A análise econômica tem como objetivo mostrar os custos básicos para produção de blocos de concreto intertravados utilizando material convencional, em comparativo aos

resíduos da mineração. Para essa análise, foram utilizados os dados de consumo obtidos do cálculo do traço convencional. Em seguida, para base de preço, foi aplicada a base do SINAPI, por apresentarem valores mais próximos possível da realidade. Não foram consideradas para composição dos custos possíveis encargos sociais e nem o lucro, pois os valores foram utilizados somente para estimativa de preços.

A ficha composição de preço utilizada foi a 102478/SINAPI, adaptada para determinar o m³ do concreto para produção dos *pavers*, com preços de insumos de referência do estado da Paraíba, conforme mostra a Tabela 23.

Tabela 23 – Preço do concreto para m³.

Serviço					Unidade
Concreto fck = 35Mpa – preparo mecânico com betoneira 400 l. af_05/2021					m ³
Composição de Preço					
Código	Descrição da Composição	Unid	Quant	Custo Unit.	Custo Total
00370/SINAPI	Areia media – posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	m ³	0,176	R\$ 110,00	R\$ 19,36
04741/SINAPI	Pó de Pedra	m ³	0,165	R\$ 98,66	R\$ 16,28
01379/SINAPI	Cimento ortland composto cp ii-32	kg	426,66	R\$ 0,70	R\$ 298,66
04720/SINAPI	Pedra britada N. 0 (4,8 A 9,5 mm)	m ³	0,32	R\$ 120,59	R\$ 38,59
88316/SINAPI	Servente com encargos complementares	h	2,2483	R\$ 17,41	R\$ 39,14
88377/SINAPI	Operador de betoneira estacionária/misturador com encargos complementares	h	1,423	R\$ 19,69	R\$ 28,02
88831/SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador – chi diurno. Af_10/2014	chi	0,6906	R\$ 0,41	R\$ 0,28
88830/SINAPI	Betoneira capacidade nominal de 400 l, capacidade de mistura 280 l, motor elétrico trifásico potência de 2 cv, sem carregador – chp diurno. Af_10/2014	chp	0,7324	R\$ 1,82	R\$ 1,33
Totais					R\$ 441,67

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

De acordo com a ficha de composição de preço apresentada, percebe-se que o preço do metro cúbico do concreto com as especificações do traço estudado nesta pesquisa custa R\$ 441,67. Considerando que a areia e o pó de pedra seriam substituídos em sua totalidade, pelos resíduos em estudo, o valor do metro cúbico do concreto passaria a custar R\$ 406,03, para as mineradoras, com economia de R\$ 35,64 por metro cúbico de concreto produzido.

Na Tabela 24, mostra-se um comparativo de custo/benefício quando utilizado *pavers* com resíduo da mineração.

Tabela 24 - Comparativo do custo/benefício do concreto com resíduo

Comparativo do custo/benefício				
Descrição	UND	Convencional	Resíduo	Economia
		Valor	Valor	Valor
Concreto (m ³)	m ³	R\$ 441,67	R\$ 406,03	R\$ 35,64
Bloco com medidas de 20 x 20 x 6 cm, com resistência mínima de 35 MPa.	und	R\$ 0,53	R\$ 0,49	R\$ 0,04
Bloco com medidas de 20 x 20 x 6 cm, com resistência mínima de 35 MPa.	m ²	R\$ 26,61	R\$ 24,46	R\$ 2,15
Km de estrada, considerando largura de 7m	Km	R\$ 186.246,39	R\$ 171.217,47	R\$ 15.028,92

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Cada metro cúbico de concreto produz em média 830 *pavers* dentro das especificações estudadas nesta pesquisa, medindo 20 x 10 x 6 cm. Logo, o valor de cada unidade de bloco convencional custa em média R\$ 0,53 e do reciclado, R\$ 0,49. Esse tipo de pavimento é comercialmente vendido por metro quadrado, de forma que um metro quadrado consome 50 blocos nas medidas estudadas. Assim, o valor do metro quadrado convencional custa R\$ 26,61 e do reciclado R\$ 24,46. Considerando o custo por quilometro de estrada, com 7 metros de largura, têm-se uma economia de R\$ 15.028,92, ou seja, de 8,07% em relação ao concreto convencional.

De acordo com o SINAPI da Paraíba, código 711, com data base de setembro de 2022, os blocos de pavimento intertravado são comercializados por R\$ 33,48, representando um aumento de 26,94% no custo do *paver* com maior indicativo de viabilidade econômica. Assim,

é possível verificar que a utilização dos resíduos ocasionou ganho de RCS, o que indica que pode ser diminuído o consumo de cimento por metro cúbico, e assim obter um maior ganho econômico na produção desses blocos. Portanto, é possível afirmar que a utilização desses *pavers* na construção civil é economicamente viável.

Capítulo 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da caracterização dos agregados, todos os resíduos da mineração estudados apresentaram comportamentos semelhantes para utilização no concreto como agregado miúdo em substituição aos materiais convencionais, exceto o ROL, que apresentou granulometria mais fina que os demais e alto teor de materiais pulverulento, comprometendo traços de concreto com teores maiores de inserção deste resíduo. Também foi verificado que os resíduos não apresentam propriedades pozolônicas, podendo ser utilizados como *filler* nas misturas de concreto. Em função dos resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos agregados, foi determinado o traço CONV de 1:4:0,45, com RCS de 39,63 MPa e absorção média de 3,75%.

Na etapa de planejamento experimental, verificou-se que o resíduo da scheelita, do quartzo e o ROB pode ser substituído 100% com relação aos agregados miúdos convencionais, mantendo ou crescendo a RCS e mantendo ou decrescendo a absorção, sendo aptos na utilização de *pavers*. Apenas o ROL, dentro do traço inicial estudado não apresentou RCS suficiente devido a trabalhabilidade que ficou comprometida.

A partir da substituição dos agregados convencionais por resíduos da mineração, foram comprovados nas etapas de durabilidade, apresentando os seguintes resultados:

- ✓ Na atividade pozolânica, apenas o resíduo da SH apresentou aumento da RCS quando comparado com o traço CONV. O resíduo de quartzo e ROB tiveram pequenas reduções de RCS;
- ✓ Foi analisado que a massa específica do concreto produzido com substituição dos resíduos da mineração sofreu redução em todas as situações quando comparados com o CONV, percebendo uma maior densificação desses *pavers*, se analisado em conjunto com o índice de vazios. Com relação ao índice de vazios, os valores corroboram com os dados de absorção, estando diretamente proporcional com os dados avaliados, ou seja, quanto maior a absorção, maior o índice de vazios;
- ✓ Na análise da capilaridade, o traço CONV apresentou menor valor de absorção por capilaridade, indicando que houve uma diminuição dos poros ou desconexão destes, favorecendo a redução da ascensão da água. Além disto, percebe-se um incremento na

capilaridade dos blocos quando comparados ao CONV na ordem de 55,00%, 11,11% e 50,00% para a SH, o QZ e o ROB, respectivamente;

- ✓ Quanto aos desgastes à abrasão, os *pavers* CONV apresentaram um menor desgaste quando comparada as peças com alguma composição de resíduos. Os *pavers* com resíduos obtiveram um desgaste maior na ordem de 22,04%, 23,16% e 14,74% para a scheelita, o quartzo e o ROB, respectivamente, quando comparados aos convencionais;
- ✓ Ao se estudar o envelhecimento natural, os blocos com resíduo de quartzito apresentaram incremento na RCS de 3,03% com relação aos blocos CONV. A scheelita e o ROB tiveram diferença de RCS de 5,96% e 6,07%, respectivamente, se comparado aos blocos de referência. Esse comportamento de ganho de RCS do pó de quartzo pode estar ligado ao alto teor de Dióxido de Silício (SiO_2), Óxido de Alumínio (Al_2O_3) e Óxido de Ferro (Fe_2O_3) presente no resíduo, indicando uma possível atividade pozolânica;
- ✓ No ensaio de resistência à tração na flexão ocorreu no terço médio e os valores de resistência são apresentados e para as amostras com a incorporação de resíduo percebe-se que houve um decréscimo das resistências à tração de 3,11% e 10,95% para a scheelita e para o ROB, respectivamente, quando comparados ao traço CONV. Apesar da norma brasileira não contemplar esse ensaio, se comparado as normas internacionais, os resultados obtidos foram satisfatórios para o uso nos países estudados nesta pesquisa.
- ✓ No ensaio de chuva dirigida, realizado com os blocos do traço CONV, SH e ROB, o valor de perda de massa foi considerado satisfatório, indicando boa resistência do bloco quando submetidos a ação da chuva e do calor. Quanto ao RCS, todos os traços apresentaram perda de resistência ao término do 12º ciclo, mas todos acima de 35MPa, sem comprometer o desempenho dos blocos na pavimentação intertravada.
- ✓ Na análise de ataque aos sulfatos, tanto na idade de cura de 28 dias como em 42 dias, não houve alterações quanto as medidas das dimensões, o que significa que não ocorreu agressão suficiente para degradar os blocos. Para a RCS, apesar dos resultados de expansão indicarem que não houve reatividade das *pavers* ao sulfato de sódio, para o CONV, o QZ e o ROB foram suficientes para degradar mecanicamente os corpos de prova para a idade de exposição aos íons durante o tempo de exposição. No entanto, todos os *pavers* após exposição ao ataque de sulfatos aos 28 dias, apresentaram RCS acima de 35MPa. Para 42 dias de imersão, apenas o ROB não atingiu a resistência mínima, conforme indica a norma NBR 9781 (ABNT, 2013) para uso em tráfego leve.

Conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013), os *pavers* com resíduos da mineração da scheelita, quartzo e o ROB podem ser utilizados para o tráfego leve. Se levado em consideração

as normas internacionais o ROL poderia ser utilizado para tráfego leve conforme as normas da África e na Austrália para o percentual de 0,33% de substituição de resíduo por agregados convencionais.

Desse modo, considerando todos dos resultados obtidos a partir da pesquisa, é possível concluir que é economicamente viável a utilização dos resíduos da mineração nos blocos intertravados, dado que de acordo com o SINAPI da Paraíba, código 711, com data base de setembro de 2022, blocos de pavimento intertravado são comercializados por R\$ 33,48, representando um aumento de 26,94% no custo do *paver* com maior indicativo de viabilidade econômica, produzido no decorrer do experimento descrito nessa tese.

Para a continuação desse estudo e desenvolvimento de estudos similares, são sugeridas assim algumas ações, como a testagem do ROL em proporções menores de inserção do resíduo (até 20% de incorporação) e maiores teores de a/c, já que se trata de um resíduo com alta presença de finos; execução dos mesmos ensaios de durabilidade, variando uma mistura de resíduos da mineração em substituição à areia e ao pó de pedra; realização de ensaios de durabilidade em datas maiores de análises; ensaio de névoa salina para análise do comportamento dos *pavers* em áreas com intervenção de mareas; e análise da água utilizada em todo processo de confecção do concreto.

REFERÊNCIAS

- ABCP. BT 106: **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo: ABCP, 2002.
- ABCP. **Manual de revestimentos de argamassa**. 1.ed. São Paulo, 2003. 104p.
- ABDELBARY, A; MOHAMED, A. R. **Investigating the abrasion resistance of interlocking blocks incorporating steel slag aggregate**.
- ABIROCHAS. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Relatório 05/2018, Brasília (2018).
- ALCANTARA, P. S. X. **Blocos intertravados coloridos para pavimentação com incorporação de resíduos de cerâmica vermelha em prol da redução de pigmentos** - Caruaru: O Autor, 2015.
- ALMEIDA, A. B. D. de *et al.* **Adição de resíduo de scheelita da mina bodó em Cerro Corá/RN na composição de materiais cerâmicos**. Anais do 22º CBECIMAT, Natal, RN, Brasil. 2016.
- ALMEIDA, S. P. de *et al.* **Application of micronized pet as aggregate in concrete to paving**. In: 16º NOCMAT Non-Conventional Materials and Technologies. Winnipeg – Canada, 2015.
- ALMEIDA, S. P. **Uso de politereftalato de etileno (PET) como agregado em peças de concreto para pavimento intertravado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- ALTOÉ, S. P. S. *et al.* **Avaliação da durabilidade em blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos da queima do bagaço da cana-de-açúcar e de pneu**. In: anais do encontro internacional de produção científica, 2017. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2017.
- ALYAMAC, K. E.. **Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method**. Journal of Cleaner Production, v.144, p.192-202. 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM-C936 (1996.) **Standart specification for solid concrete interlocking paving units**. Conshohocken, Pennsylvania, USA, 1996.
- ANDRADE, S. S. F. *et al.* **Análise da viabilidade da utilização de resíduos da mineração para fins de pavimentação com base na caracterização e avaliação mecânica**. In: Congresso Sul Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2019, Foz do Iguaçu-PR.
- Application guide for interlocking concrete pavements, ICPI Tech Spec nº 10, Chantilly, 2015.

ARAÚJO, E. R. *et al.* Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. **Mineralis**. 2015.

ARAÚJO, N. C. *et al.* **Degradação térmica de tijolo fabricado com solo e manipueira**. Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental. Santa Maria – RS, V.16, N.3, p.861-870, Dez, 2015b. DOI: 105902/2236117018098.

ARAÚJO, T. C. B.; DOURADO, H.. **Avaliação De Desempenho De Pavers Intertravado Produzidos Com Rejeitos Gerados Nos Desdobramentos De Rochas Ornamentais**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 15, n. 2, p. 245-261, 2019.

AREL, H. S. **Recyclability of waste marble in concrete production**. Journal of Cleaner Production, v. 131, p. 179-188, 2016.

ARRUDA., F. F. *et al.* **Absorção por capilaridade em concreto produzido com adição de sílica ativa**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2018, Maceió.

ASHISH, D.K. **Feasibility of waste marble powder in concrete as a partial substitution of cement and sand amalgam for sustainable growth**. 2018. J. Build. Eng.15, 236e242. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.job.201.11.024>> Acesso em: 20 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (2001). **In: Palestra Pavimento Intertravado – MKT**. São Paulo. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland: Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12142**: Concreto: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15953/2011** - Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução (ABNT, 2011b)

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

_____. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto: Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR NM 248:** Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo: Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45:** Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004c.

BARBATO, C. N. *et al.* **A. Série Rochas e Minerais Industriais: Aproveitamento de feldspato pegmatítico da Região Borborema-Seridó para produção de vitrocerâmica feldspática reforçada com leucita.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008.

BARROS, S. V. A. **Durabilidade de argamassas alternativas aditivadas com resíduos de quartzito.** Tese. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande. 113f. Campina Grande. 2017.

BEZERRA, J. J *et al.* **Impactos ambientais causados pela mineração: uma análise da percepção de pequenos mineradores do município de Frei Martinho – PB.** Revista Monografias Ambientais Santa Maria, v.19, e8, 2020.

BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2012.

BÔSSO, A. R. S. A. *et. al.*, **Utilização de resíduos de serragem de rochas ornamentais na fabricação de peças intertravadas de concreto.** Revista Humanidades e Inovação v.8, n.50. 2021

JÚNIOR, S. V. A *et al.* **Utilização de Resíduos de Quartzito para Aplicação em Pavimentos Intertravados.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 13, n. 3, p. 196-200. 2018

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, CSA A231.2-95 (1995). **Precast concrete pavers.** CSA, Rexdale, Ontario, Canadian, 1995.

CARLOS, E. M. **Efeito da adição de resíduo de scheelita no comportamento técnico mecânico e reológico de argamassas para engobes cerâmicos.** Tese. 122f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

CARVALHO, F. A. **Resíduo de mineração de quartzo como insumo para a construção civil com abordagem em sustentabilidade e saúde**. Dissertação. 153f. Universidade Federal dos vales do Jequitinhonha e Mucuri, Centro de Tecnologia, Diamantina, 2018

CHEN, J. J. *et al.* **Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar**. Powder Technology. 364: p. 404-415. 2020

Composição de misturas asfálticas. In: 2º Congresso Sul-americano de Resíduos
COSTA FILHO, F. C. **Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de scheelita na composição de concretos asfálticos**. Dissertação de Mestrado. Brasil. 2017.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. Dissertação. Mestrado Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.

Da reutilização de rejeito de scheelita em substituição do agregado miúdo na
DANA, J. D. **Manual de Mineralogia**. Livros técnicos e científicos editora, vol. 2, Rio de Janeiro, p. 421-422. 1974

DI MASCIO, P. *et al.* **Concrete block pavements in urban and local roads: Analysis of stress-strain condition and proposal for a catalogue**. J. Traffic Transp. Eng. 2019.

DIETRICH, Y. P. *et al.* **Desempenho mecânico e análise da corrosão das armaduras em concretos produzidos com adição de resíduos de rochas ornamentais**. Revista Matéria. Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, 2017.

DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Cadastro Nacional de Produtores de Brita** / Coord. Geral Wagner Fernandes Pinheiro [et. al]; Equipe Técnica por Júlio Recuero e[et. al]. Ano base, 2015. Brasília: DNPM, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN, BS EN-1338 (2003). **Concrete paving blocks, requirements and test methods**. Brussels, Belgium, 2003.

FARES, G. *et al.* **Pó de calcário fino de fábricas de pedras ornamentais: um potencial enchimento na produção de concreto reforçado com fibra híbrida de alto desempenho**. Construção e Materiais de Construção, v. 262, p. 120009, 2020.

FEITOSA, C. J. D. *et al.* **Caracterização e aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de concreto seco**. Revista Principia. João Pessoa. jul. 2022. ISSN 2447-9187.

FERNANDES, I. D. **Blocos & pavers – Produção e controle de qualidade**. 4ª ed. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais. 200 p. 2013. ISBN: 978-85-62290-03-9.

- FERRARI, A. K. **Influência do resíduo de pvc moído como substituto parcial do agregado miúdo no concreto dosado para peças de pavimento intertravado.** Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- FIGUEIREDO, S. S. **Influência da adição de resíduos industriais na durabilidade de blocos solo-cal.** 124f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2015.
- FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo.** Tese. Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.
- FRANCELINO, B. M. **Avaliação da eficiência no comportamento mecânico de pavers produzidos com o uso de sílica ativa.** Engenharia civil: demandas sustentáveis e tecnológicas e aspectos ambientais. Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.
- VIGNESH PANDIAN, E. A. *et al.* **Utilisation of waste marble dust as fine aggregate in concrete.** IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, v. 80, p. 1-6, 2017.
- GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. **A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector.** Construction and Building Materials, v. 102, p. 769-781, 2016.
- GALVÃO, Á. C. P. **Estudo dos compósitos de PURM com rejeitos do porcelanato e da scheelita para aplicações em isolantes térmicos.** Tese de Doutorado. 90fls. UFRN – Natal, 2018.
- GERAB, A. T. F. S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias.** 123f. Dissertação. Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- GHANNAMA, H.; NAJM, R. V. **Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand.** Sustain. Mater. Technol. 9 2016.
- GHORBANI, S. *et al.*, **Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions.** Construction and Building Materials, v. 194, p. 143-152, 2019.
- GHORBANI, S. *et al.* **Effect of Magnetized Water on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Block Pavers.** *Materials*, Basel, v. 11, n. 1647, p.1-16, set. 2018.
- GIOVANELLA, C. **Reutilização do lodo remanescente do processo de beneficiamento de gemas na fabricação de pisos intertravados de concreto.** Dissertação de Mestrado. Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017.
- GODINHO, D. P. **Pavimento intertravado: uma reflexão na ótica da durabilidade e sustentabilidade.** Dissertação (mestrado). 157f. - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura. 2009.

GONDIM, T. F. *et al.* **Potencialidade de uso do resíduo da scheelita em sistemas de cobertura de aterro de resíduos.** Eng Sanit Ambiental | v.27 n.3 | maio/jun 2022 | 597-606. 2022.

GUERRA, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro *pellet feed* em pavimentos de blocos intertravados de concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

H. A. C. K. HETTIARACHCHI & W. K. MAMPEARACHCHI. **New block design and laying parameters for interlocking concrete block pavements to improve human thermal comfort levels in urban spaces.** International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, 7:2, 104-115. 2016.

H.L. HENGL, W. KLUGER-EIGL, R. BLAB, J. FÜSSL, **The performance of paving blockstructures with mortar filled joints under temperature loading, accessed by means of numerical simulations,** Road Mater. Pavement Des.1–20. 2017.

HENGL, HERWIG & KLUGER-EIGL, W. & LUKACEVIC, MARKUS & BLAB, RONALD & FÜSSL, JOSEF. **Horizontal deformation resistance of paving block superstructures – Influence of paving block type, laying pattern, and joint behaviour. International.** Journal of Pavement Research and Technology. 11. 846-860. 2018.

ICPI, PICP – Installer Technician Certificate Course. ICPI. 2009. Manutenção de Pavimentos Intertravados Permeáveis. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND ABCP, 2011. Disponível em: <www.abcp.org.br/>. Acesso em: 05 abr. 2018.

INCONTEC. NTC 2017: **Adoquines de concreto para pavimentos.** Bogotá, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Economia Mineral.** Disponível em: <http://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2022/07/ColetivaResultados-2TRI2020-VERSAO-FINAL-21JUL2022.pdf>. Acesso em: 23 de julho de 2022.

J. FÜSSL, W. KLUGER-EIGL & R. BLAB. **Experimental identification and mechanical interpretation of the interaction behaviour between concrete paving blocks,** International. Journal of Pavement Engineering, 17:6, 478-488. 2016.

JAMSHIDI, A., KURUMISAWA, K., WHITE, G., NISHIZAWA, T., IGARASHI, T., NAWA, T., & MAO, J. **State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement.** Construction and Building Materials, 200, 713-755. 2019.

K. AARTHI, K. ARUNACHALAM. **Durability studies on fibre reinforced self compacting concrete with sustainable wastes.** J. Cleaner Prod. 174. 247–255. 2018.

K.K. GUAN. **Surface and ambient air temperatures associated with different ground material: a case study at the University of California, Berkeley.** MA. diss., University of Berkeley, 1998.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais.** 23a ed. Bookman, 2012.

LEAL, C. E. F. **Peças para pavimento intertravado de concreto: estudo de viabilidade técnica na incorporação de agregado reciclado**. Dissertação. 153f. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018.

LEITE, A. L. *et al.* **Atividade mineradora e impactos ambientais em uma empresa cearense**. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física, v. 1. São Paulo. **Anais....** p. 7282-7286, 2018.

LEITE, B. de L. F.; LUCENA, A. M. D. S. **Utilização de resíduos da construção e demolição – RCD com aditivos plásticos (polietilenos) na construção de pavimento intertravado permeável “PAVERS”**. *Brazilian Journal of Development*, v.8, 40788–40801. 2022.

LUZ, A. B.; BRAZ, E. **Série Rochas e Minerais Industriais: Quartzo**. Rio de Janeiro. CETEM/MCT. Rio de Janeiro. 2000. p. 5-6.

MACEDO, J. W. N. de. **Argamassa de revestimento produzida a partir da substituição do agregado natural por resíduo de scheelita e pó de pedra**. Dissertação. 93f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, 2021.

MACHADO, T. G. **Estudo da adição de resíduos de scheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura**. 144 f. Tese (Doutorado) Centro de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.

MAHAPATRA, G., KALITA, K. **Efeitos das condições de bloqueio e suporte em pavimentos de blocos de concreto**. *J. Inst. Eng. India Ser. A* **99**, 29-36. 2018

MARCHIONI, M.; SILVA, C.O. **Pavimento intertravado permeável - melhores práticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011.

MARTINS, F. M. **Caracterização química e mineralógica de resíduos sólidos industriais minerais do Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

MASHALY, A. O. *et al.* **Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement**. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 800-818, 2018.

MEDEIROS, B. A. *et al.* **Mechanical properties of mortar produced with the replacement of natural sand by scheelite residue**. *Cerâmica*, 65(375), 443-451. Epub August 15, 2019. DOI: 10.1590/0366-69132019653752571.

MEDEIROS, M. **Estudos de Argamassas de Revestimento Com Resíduo de Scheelita**. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal/RN, 2016.

- MEDINA, P.; GOMES, H. J. P. **Educação ambiental na escola: uma ação educativa visando o destino correto dos resíduos sólidos**. Revista Monografias Ambientais, v.17, e13, 2019
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Microstructure and properties of hardened concrete**. *Concrete: Microstructure, properties and materials*, p. 254, 2006.
- MENDONÇA, A. M. G. D. *et al.* **Estudo de Viabilidade da Incorporação de Resíduos Cerâmicos Micronizados em Concreto Estrutural**. Revista Cubana de Ingeniería. V. 8. e.333. 2022
- MINERAÇÃO TOMAZ SALUSTINO. **História – Mina Brejuí**. Disponível em: <<http://minabrejui.com.br/site/>>. Acesso em: 3 mar. 2022.
- MOKHTAR, M. *et al.* **The utilisation of shredded pet as aggregate replacement for interlocking concrete block**. In: E3S Web of Conferences – International Conference on Civil & Environmental Engineering (CENVIRON 2017). V. 34, Malaysia, 2018.
- NASCIMENTO, A. R. V. J. do. **Atributos físicos e químicos de áreas degradadas pela mineração de scheelita na região tropical semiárida**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2015
- NASCIMENTO, D. W. *et. al.* **Estudo sobre a influência da adição de resíduos de rochas ornamentais (rro) e cerâmica (rc), provenientes da cidade de teixeira de Freitas – BA, nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Revista Mosaicum. n. 35, jan./jun. 2022.
- NASCIMENTO, M. V. L. A. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pernambuco, Caruaru, 2016.
- NAVYA, G.; RAO, J.V. **Experimental investigation on properties concrete paver block with the inclusion of natural fibers**. Int. J. Eng. Res. Appl. V.8, 34–38. 2014
- NETA, M. L. X. F. *et al.* **Avaliação da reatividade ao ataque químico de resíduo oriundo da mineração da scheelita utilizado como agregado em argamassas cimentícias**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. v.26 n.6. 2021.
- OBERLE, B. *et al.* **Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want**. 2019. ISBN: 978-92-807-3741-7.
- PACHECO, A. P. G. *et al.* **Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta**. Revista Matéria. Rio de Janeiro, 23(1), e-11950. 2018.
- PAIVA, EMANUEL HENRIQUE GOMES. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

PETRY, N. S. *et al.* **Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos.** Revista De Arquitetura Imed. v.6, n. 2, 2017.

PIMENTEL, L. L. *et al.* **Concreto produzido com agregado reciclado: uma análise de durabilidade visando uso em estruturas.** Revista IBRACON. [online]. vol.13, n.6, e13613. Epub Oct 21, 2020.

PINTO, S. R. **Durabilidade de matrizes cimentícias de cimento supersulfatado e de cimentos portland: ataque por sulfatos, carbonatação e penetração de cloretos** [recurso eletrônico]. Curitiba, 2019

RAMOS FILHO, R. E. B. **Estudo da combinação de resíduo de scheelita, pó de pedra e manipueira com aglomerantes para produção de tijolos ecológicos.** 155 f. Tese. Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal / RN, 2020

RIGOLIN, F. R. **Estudo de viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Ciência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

SATO, A. G. *et al.* **Contribution to the rheological study of cementitious pastes with addition of residues from the processing of ornamental rocks.** IBRACON Structures and Materials Journal, v. 6, p. 1284- 1307, 2018.

SILVA, F. M. *et al.* **Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber.** Construction and Building Materials, v. 91, p. 71-79, 2015.

SILVA, F. M. *et al.* **Análise da aplicação de resíduo de borracha de pneus em piso tátil intertravado de concreto.** 2014. 129f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Inovação) - Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014.

SILVA, L. E. B., *et al.* **Aspectos gerais e peculiaridades sobre mandioca (*Manihot esculenta* Crantz).** Diversitas Journal, v. 3, n. 1, p. 13-23, 2018.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Análise da potencialidade de uso da escória de aciaria como matéria-prima alternativa na produção de pisos intertravados.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SINGH, A.; SRIVASTAVA, D. B. **Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry,** Constr.Build.Mater.v. 198. p.553–569. 2019.

SINGH, M. *et al.* **An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry.** Construction and Building Materials, v. 134, p. 471-488, 2017.

SINGH, R.; NAGAR, V. A. **Performance of Granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions.** Journal of Cleaner Production. (2016) 172-182.

SINIR – Sistema Nacional de Informação Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. Disponível em: <<https://www.sinir.gov.br/>>. Acesso em: 9 set. 2022.

Sólidos e Sustentabilidade, 2., 2019. Anais ... Foz do Iguaçu. Corensol, 2019.

SOUZA, N. S. L. *et al.* **Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de corte de pedras ornamentais (granitos e mármore) e argila.** Revista Matéria. Rio de Janeiro. v. 25, n. 1. 2020.

SOUZA, R, S. de. **Argamassas produzidas a partir da substituição do agregado miúdo pelo resíduo do beneficiamento da scheelita e da água de hidratação por manipueira.** 127f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019.

STRIEDER, G. B. **A utilização de cinza gerada em unidade agroindustrial como potencial componente para a produção de pavimento intertravado de concreto.** Dissertação. 93 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Santa Helena, 2021.

TAFAREL, N. F. *et al.* **Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água.** Revista Matéria, v.21, n.4, pp. 974-986, 2016.

TEIXEIRA, F. R. *et al.* **Use of ornamental rock waste as a partial substitute for binder in the production of structural concrete.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, n. 3, p. 501-514, 2020.

TOUBAL, L. *et al.* **Hygrothermal aging effects on mechanical and fatigue behaviors of a short natural-fiber-reinforced composite.** International Journal of Fatigue, v. 108, p. 96–108, 2018.

VAZZOLER, J. S. *et al.* **Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste.** Construction and Building Materials, v. 177, p. 314-321, 2018.

ZAGO, S. C. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de aciaria LD.** 2019. 260 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

ZULCÃO, R. *et al.* **Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials.** Construction and Building Materials, v. 257, p. 119523, 2020.