

## **Planejamento experimental para viabilização da utilização do resíduo da scheelita como agregado miúdo em pavimentos intertravados**

**Experimental planning to feasilibilize the use of scheelita waste as a small aggregate in interlocked floors**

**Planificación experimental para factibilizar el uso de residuos de scheelita como pequeño árido en pisos enclavados**

Recebido: 10/03/2022 | Revisado: 21/03/2022 | Aceito: 29/03/2022 | Publicado: 05/04/2022

### **Larissa Santana Batista**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5066-521X>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [Larissa.batista@ufcg.edu.br](mailto:Larissa.batista@ufcg.edu.br)

### **Oswaldo Soares da Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4608-0638>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [osvaldo@ccta.ufcg.edu.br](mailto:osvaldo@ccta.ufcg.edu.br)

### **Leovegildo Douglas Pereira de Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5598-1585>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [leovegildo.douglas@professor.ufcg.edu.br](mailto:leovegildo.douglas@professor.ufcg.edu.br)

### **Adriano Lopes Gualberto Filho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1141-1783>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [adrianolopesx@gmail.com](mailto:adrianolopesx@gmail.com)

### **Marcos André Lira Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7802-7957>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [Marcos.lira@ufpe.br](mailto:Marcos.lira@ufpe.br)

### **Resumo**

O setor da mineração no Brasil é um dos setores que mais geram rejeitos, poluindo os recursos hídricos superficiais, subterrâneos e também 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 ao meio ambiente. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo propor um destino adequado para os resíduos da mineração da scheelita, reutilizando-os em concretos como substituição parcial do agregado miúdo utilizados em pavimentos intertravados, a partir do estudo de planejamento experimental de misturas. Foi realizado a caracterização física, química e mineralógica dos resíduos e dos materiais convencionais, 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. O planejamento experimental de misturas e a análise de superfícies de resposta revela as proporções ideais para incorporação do resíduo no concreto. Verifica-se que o planejamento experimental de misturas da rede simples se mostra eficiente para a verificação de parâmetros ideais de composição, apresentando um bom padrão de qualidade dos dados, facilitando o estudo na análise de materiais homogêneos como o concreto. Pode-se concluir que o concreto para fins de pavimentos intertravados contendo apenas o resíduo da scheelita como agregado miúdo é satisfatório conforme norma brasileira vigente, tornando uma alternativa viável para inserção do resíduo.

**Palavras-chave:** Pavers; Resíduos; Concreto; Planejamento experimental.

### **Abstract**

The mining sector in Brazil is one of the sectors that generate the most waste, polluting surface and underground water resources and also the soil. The proper management of this waste through its use in civil construction, more specifically in alternative materials, is one way to minimize these impacts to the environment. In this sense, this paper aims to propose an appropriate destination for the scheelite mining waste, reusing it in concrete as a partial replacement of the fine aggregate used in interlocking sidewalks, from the study of experimental planning of mixtures. The physical, chemical and mineralogical characterization of the waste and conventional materials, coarse aggregate and binder were performed according to ABNT standards. Next, a study of the conventional mixtures was

performed, by the experimental dosage method, which served as a comparative basis when the waste was partially substituted, based on the results of the RCS and absorption tests. The experimental planning of mixtures and the analysis of response surfaces reveal the ideal proportions for incorporating the waste in the concrete. It is verified that the experimental planning of mixtures of the simple network proves to be efficient for the verification of ideal parameters of composition, presenting a good standard of data quality, facilitating the study in the analysis of homogeneous materials such as concrete. It can be concluded that the concrete for interlocked paving purposes containing only the scheelite waste as fine aggregate is satisfactory according to current Brazilian standards, making it a viable alternative for the insertion of waste.

**Keywords:** Pavers; Waste; Concrete; Experimental planning.

### Resumen

El sector minero en Brasil es uno de los que más residuos genera, contaminando los recursos hídricos superficiales y subterráneos y también el suelo. La gestión adecuada de estos residuos mediante su uso en la construcción civil, más concretamente en materiales alternativos, es una forma de minimizar estos impactos en el medio ambiente. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo proporcionar un destino adecuado para los residuos de la minería de la scheelita, reutilizando-os en concretos como sustitución parcial del miúdo agregado utilizado en pavimentos intertravados, a partir del estudio de planeamiento experimental de misturas. Se realizó la caracterización física, química y mineralógica de los recursos y materias convencionales, del agregado de grava y del aglomerante conforme a las normas de la ABNT. Posteriormente, se realizó un estudio de las mezclas convencionales, por el método de dosificación experimental, que sirvió de base comparativa al sustituir parcialmente los residuos, a partir de los resultados de las pruebas de RCS y absorción. El diseño experimental de la mezcla y el análisis de las superficies de respuesta revelan las proporciones ideales para incorporar los residuos al hormigón. Se comprueba que el plan experimental de misturas de la red simple se muestra eficiente para la verificación de parámetros de composición, presentando un buen patrón de calidad de los datos, facilitando el estudio en el análisis de materias homogéneas como el hormigón. Se puede concluir que el hormigón para pavimentación intercalada que contiene sólo el residuo de scheelita como agregado fino es satisfactorio según las normas brasileñas vigentes, lo que lo convierte en una alternativa viable para la inserción de residuos.

**Palabras clave:** Adoquines; Desperdicio; Hormigón; Planificación experimental.

## 1. Introdução

A mineração é indispensável para o desenvolvimento do Brasil, devido ao seu papel de extração e beneficiamento de diversas matérias-primas que abastecem vários setores da economia, como por exemplo a construção civil. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2020), no segundo semestre de 2020 o setor mineral foi decisivo para manter positivo o saldo da balança comercial brasileira. O saldo do setor foi de US\$ 32,5 bilhões, o equivalente a 63,8% do saldo da balança comercial brasileira, mesmo em meio à crise provocada pela pandemia do novo coronavírus.

A exploração dos recursos naturais estimula o constante processo de degradação, uma vez que excrementos não usufruídos são emitidos desordenadamente no meio ambiente. Dentre os mais variados resíduos produzidos a partir do beneficiamento de minérios, encontra-se a scheelita, com maior produção do resíduo no Brasil concentrando-se no estado do Rio Grande do Norte. Segundo Dana (1978), grande volume de rejeito é gerado ao final do processo de beneficiamento da scheelita, ocasionando depósitos em locais inadequados, e conseqüentemente preocupantes formas de degradação ambiental, algo facilmente percebido nas regiões exploradoras, pelas enormes pilhas de rejeitos expostas ao ar livre no longo de seu período de exploração.

A procura por um desenvolvimento sustentável nos mais variados setores possibilita avanços nas pesquisas, além do desenvolvimento de produtos que procura integrar rejeitos nos seus sistemas produtivos. Inúmeros estudos têm sido elaborados com o intuito de analisar a utilização dos rejeitos de mineração na construção civil, sobretudo na fabricação de materiais como blocos intertravados (Guimarães, et al. 2018).

O consumo desses resíduos gerados pela mineração gera benefícios sociais, ambientais e econômicos, ou seja, reduzindo o custo, impacto ambiental e tratando a construção não como atividade isolada, mas sim como parte de um contexto socioambiental (Barreto et al. 2017).

Nestes casos, a utilização dos resíduos minerais da scheelita como componente integrante do concreto com a função

de suceder total ou parcialmente os agregados miúdos, pode ser vista como um modo ambientalmente aceitável, com habilidade de restringir o impacto ao meio ambiente que a mineração concebe. (Ferrari e da Silva Manca, 2020).

Por outro lado, segundo Machado (2012), no Brasil o uso de peças pré-moldadas de concreto para confecção de pavimentação intertravado é amplamente utilizada, sendo estas indicadas tanto para tráfego leve, no caso de calçadas, praças e vias públicas, como para tráfego pesado, onde se incluem estacionamentos de veículos pesados e pátio de cargas. Atualmente, a utilização das peças pré-moldadas em pavimentação é cada vez mais abrangente, consolidando-se no setor na construção civil.

As peças de concreto do pavimento intertravado são maciças e possuem a capacidade de intertravamento com o objetivo de resistir os deslocamentos verticais, horizontais e de rotação em relação às suas peças vizinhas (Almeida, 2016).

De acordo ABCP (2010) e Fernandes (2016), o pavimento intertravado possui vantagens como a pigmentação clara das peças de concreto na qual proporciona menor absorção de luz e calor, transformando à área pavimentada um melhor conforto térmico em relação a pavimento com substâncias petrolíferas; superfície antiderrapante; diversidade de cores; liberação imediata ao tráfego – logo após a compactação final do pavimento, o mesmo pode ser liberado e produtos passíveis de reciclagem/reaproveitamento.

O concreto por ser um material homogêneo, seu estudo 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 as variáveis, além do alto consumo de material, se tornando inviável economicamente, demandando elevado tempo de execução. Além disto, 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).

Assim sendo, torna-se de fundamental importância da realização dessa pesquisa, com o intuito de propor uma solução para o problema da atividade mineradora e do descarte de rejeitos proveniente dessa atividade. Dessa maneira, este trabalho tem como objeto avaliar a incorporação de resíduos da scheelita como substituição parcial ou total do agregado miúdo para produção de blocos intertravados, com uso da ferramenta do planejamento experimental de misturas.

## **2. Metodologia**

Foram produzidos pavers em concreto convencional e com substituição do resíduo da scheelita como agregado miúdo conforme citado na introdução. Segue descrição dos materiais utilizados bem como a sequência de métodos utilizados neste trabalho.

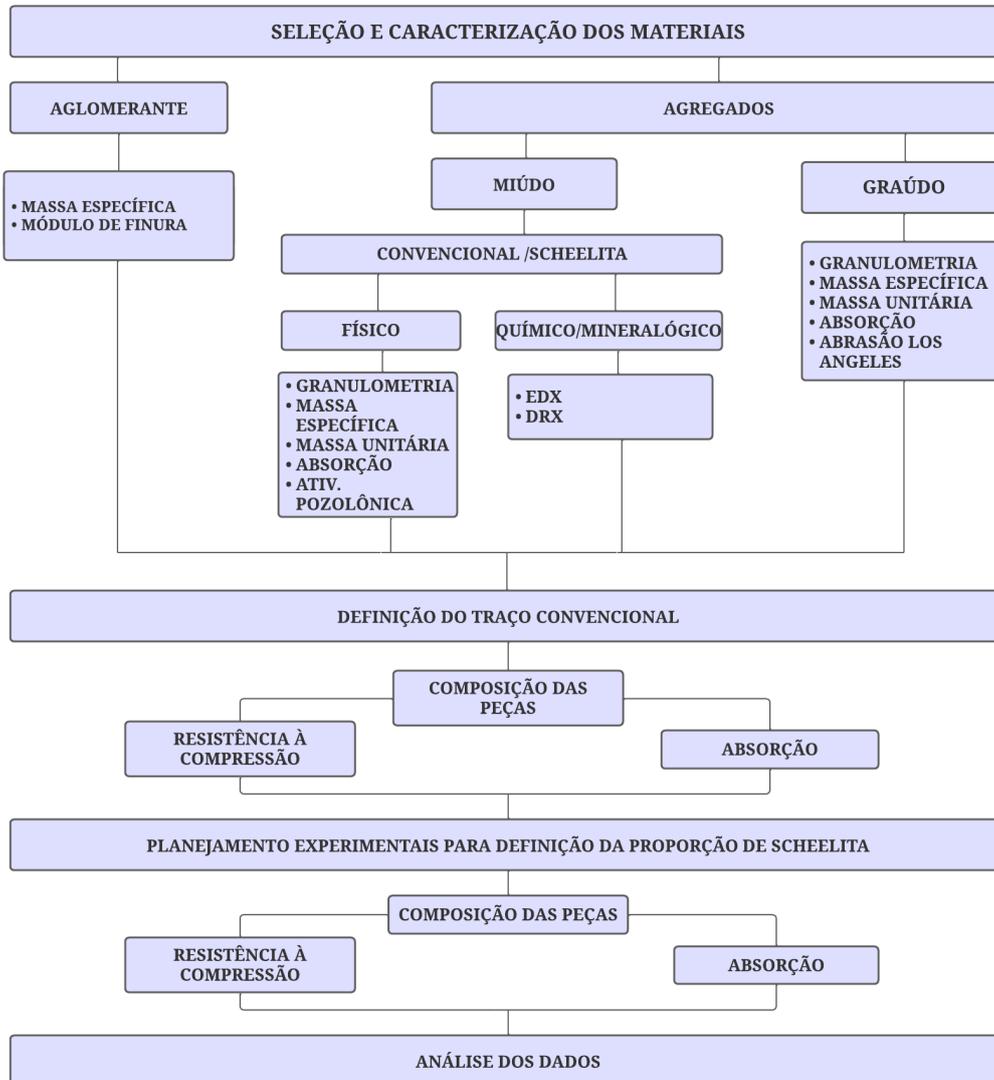
### **2.1 Materiais**

Para a produção do concreto para os pavers foi utilizado o cimento o CP V ARI, bastante empregado em concretos para a fabricação de pré-moldados, pois o mesmo confere elevada resistência em idades iniciais, proporcionando uma desforma rápida e um tempo mínimo de estocagem dos artefatos nas indústrias. O agregado graúdo utilizado foi brita 0 e os agregados miúdos convencionais utilizados foram a areia e o pó de pedra, por serem comumente empregados na produção de pavers. Todos adquiridos em Campina Grande – PB. Foram utilizados resíduos provenientes do beneficiamento do tungstênio, originando os resíduos de scheelita, extraído na Mineradora Brejuí, localizada na cidade de Currais Novos – RN.

## Métodos

Visando alcançar o que se objetiva neste trabalho, realizou-se um planejamento experimental das atividades de caracterização, execução e avaliação do concreto com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo da scheelita para peças de pavimento intertravado. A Figura 1 mostra a sequência das atividades realizadas.

**Figura 1:** Fluxograma das atividades realizadas.



Fonte: Autores (2022).

Conforme observado no fluxograma apresentado, segue descrição das atividades desenvolvidas.

### 2.2 Seleção e caracterização dos materiais

Obtenção, coleta e preparação das amostras para a caracterização física do aglomerante; caracterização física e química dos agregados miúdos (areia, pó de pedra, scheelita) e a caracterização física do agregado graúdo (brita 0). Na caracterização dos materiais foram realizados os ensaios descritos no Quadro 1, e as respectivas normas consultadas.

**Quadro 1:** Ensaios dos agregados e suas respectivas normas para a realização de cada etapa.

	ENSAIOS	NORMA
<b>Aglomerante</b>	Massa específica	ABNT NBR 11513/2016
	Módulo de finura	ABNT NBR 11579/2013
<b>Caracterização física dos agregados miúdos</b>	Granulometria: módulo de finura e dimensão máxima	NBR NM 248/2003
	Massa unitária - estado solto e compactado	ABNT NBR 16972:2021
	Absorção de água	ABNT NBR 16916:2021
	Massa específica	ABNT NBR 16916:2021
	Massa específica do agregado seco; Massa específica SSS; Massa Específica.	ABNT NBR 16917:2021
<b>Caracterização física dos agregados graúdos</b>	Granulometria: módulo de finura e dimensão máxima	NBR NM 248/2003
	Massa unitária - estado solto e compactado	ABNT NBR 16972:2021
	Absorção de água	ABNT NBR 16916:2021
	Massa específica	ABNT NBR 16916:2021
	Massa específica do agregado seco; Massa específica SSS; Massa Específica.	ABNT NBR 16917:2021
	Abrasão Los Angeles	ABNT NBR 16974:2021

Fonte: Autores (2022).

Além da caracterização física dos agregados miúdos, também foi realizada a caracterização química e mineralógica. Esta etapa compreende a apresentação da composição química dos agregados convencionais (areia e pó de pedra) e do resíduo da scheelita realizada através dos seguintes métodos: análise química (EDX) e Difração de Raios-X (DRX).

### 2.3 Definição do traço convencional

Após a caracterização física dos agregados foi realizado o empacotamento dos agregados para análise da melhor proporção a ser inserido no traço do concreto definindo a composição do concreto convencional - CONV (sem inserção de resíduos da mineração) a serem utilizados. A composição dos agregados foi baseada no menor índice de vazios, visando alcançar maiores massas unitárias, as quais são 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-se a quantidade de aglomerante e água.

Avaliou-se, neste trabalho, 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. O uso das fôrmas plásticas tem por finalidade viabilizar uma alternativa às pequenas empresas de artefatos de cimento como também às pequenas prefeituras, que não dispõem de recursos para a aquisição desses equipamentos.

Para definição do traço CONV, foram avaliados alguns parâmetros tais como: consumo de cimento, trabalhabilidade, absorção e resistência à compressão. Este traço será referência e servirá de comparação para parâmetros de resistência além da análise de viabilidade de utilização dos resíduos. A metodologia utilizada foi empírica no qual foram analisados 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 Resistência a Compressão Simples (RCS) e absorção.

Para obtenção dos dados, os corpos de prova foram moldados em formas retangulares em PVC, com dimensões de 20 cm x 10 cm x 6 cm e foram produzidas para obtenção de parâmetros de RCS e absorção. O processo utilizado foi conforme indicado na norma NBR 5738/2003, para confecção de concreto. Os materiais foram misturados em betoneira, espalhados nos moldes (devidamente limpas e untadas com desmoldante) e adensados em mesa vibratória. Em seguida é realizado todo acabamento da face superior.

Para melhor regularização das faces minimizando falhas na prensa ao romper o paver, após 24 h da moldagem foi executado o capeamento com pasta de cimento (proporção do a/c de 0,35 a 0,45). Percebe-se que o capeamento deve ser melhor realizado na região central da peça, onde será apoiado o molde para o ensaio de RCS, conforme prescrito na norma NBR 9781/2013.

Após 24 horas, as peças foram submetidas à cura por imersão em água em um tanque durante 28 dias para realização do ensaio de RCS e absorção.

#### 2.4 Ensaio de resistência à compressão

Segundo a norma ABNT NBR 9781/13, 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 (mm<sup>2</sup>), multiplicando-se o resultado pelo fator p, em função da altura da peça, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1:** Fator multiplicativo p.

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

Fonte: ABNT NBR 9781:2013.

Com isso, a resistência característica estimada à compressão é dada pela Equação 1.

$$f_{pk,est} = f_p - t * s \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

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

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 2.

**Tabela 2:** Coeficiente de Student.

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

Fonte: ABNT NBR 9781:2013.

Nesta pesquisa utilizou-se  $p=0,95$  e  $t= 0,92$ . Para realização deste ensaio utilizou-se 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.

## 2.5 Ensaio de absorção de água

Segundo a norma ABNT NBR 9781/13, a absorção de água, expressa em porcentagem, representa o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido a 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  $(23\pm 5)$  °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 0,5% 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  $(110\pm 5)$  °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 0,5% em relação ao valor anterior, anotando-se o valor da massa saturada  $m_1$ .

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

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

Em que:

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

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

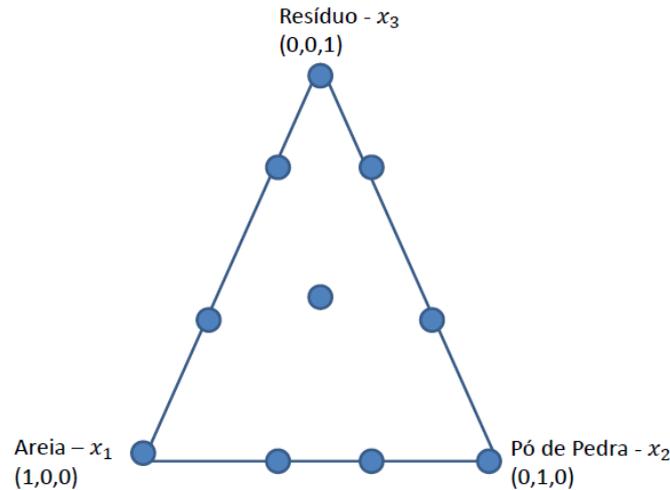
## 2.6 Metodologia de planejamento experimental e análise de superfícies de resposta para definição da proporção de cada resíduo

Após a definição do traço convencional, realizou-se o planejamento experimental de misturas rede simplex para três variáveis em corpos de prova de concreto. Uma vez que o objetivo é a substituição de resíduos por agregados miúdos convencionais, foi realizado o planejamento para definir a proporção ideal de substituição do resíduo.

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: areia ( $x_1$ ), pó de pedra ( $x_2$ ) e o resíduo da scheelita ( $x_3$ ), nos quais são dependentes entre si. Logo,  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ .

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 2.

**Figura 2:** Pontos de estudo na superfície.



Fonte: Autores (2022).

Com o intuito de obter resultados confiáveis, os processos foram realizados duas vezes. Para cada processo foram considerados 06 corpos de prova (04 para ensaio de RCS e 02 para o ensaio de absorção). As proporções dos materiais para realização dos ensaios foram calculadas matematicamente, e após o modelo numérico estabelecido para a resposta de interesse, seguiu-se uma comprovação experimental da eficiência dos modelos gerados por meio da análise de variância (ANOVA).

### 3. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados, e posteriormente discutidos, os resultados referentes à caracterização dos materiais utilizados, à composição do traço e aos ensaios de RCS e absorção de água, bem como os resultados obtidos a partir do planejamento experimental realizado.

#### 3.1 Caracterização dos materiais

##### 3.1.1 Aglomerante

A Tabela 3 mostra os valores encontrados dos ensaios de índice de finura, conforme a NBR 11579 (ABNT, 2013), e massa específica, de acordo com a NBR 11513 (ABNT, 2016).

**Tabela 3:** Índice de finura e massa específica do cimento CP V ARI.

Ensaio	Valor Obtido
Índice de Finura	0,22%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,05

Fonte: Autores (2022).

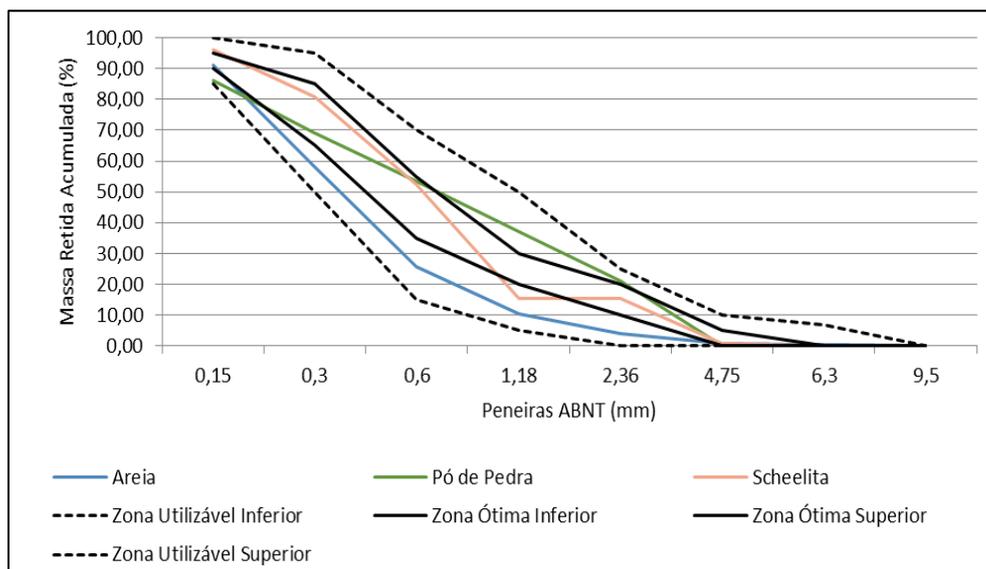
A determinação da massa específica do cimento se faz necessária para os cálculos do traço de concreto utilizado. A finura do cimento utilizado foi de 0,22%, atendendo os requisitos da norma, que sugere que o índice de finura do cimento Portland de alta resistência inicial, CP V – ARI, deve ser menor do que 6%.

O baixo índice de finura em relação a outros tipos de cimento se dá devido às peculiaridades na sua fabricação. Esse tipo de cimento passa por uma moagem mais fina que garante uma maior velocidade de reação com água, resultando em elevadas resistências em menos tempo, comparado aos demais.

### 3.1.2 Agregado Miúdo

Foram realizadas as composições granulométricas do resíduo de scheelita e areia utilizados como agregados miúdo neste estudo. A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas da areia e do pó de pedra utilizados como agregado natural e da scheelita e apresenta o comparativo com as curvas que representam as zonas estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

**Figura 3:** Comparativo com as zonas da Figura 3 NBR 7211 (ABNT, 2009).



Fonte: Autores (2022).

Pode-se observar uma diferença entre o diâmetro máximo característico da areia e da scheelita, que são respectivamente 4,75 mm e 2,36 mm, como apresentado na Tabela 4, contudo, conforme a NBR 7211:2009, normativa que determina os requisitos necessários para que os agregados estejam aptos a serem utilizados na produção de concreto, ambos os materiais estão dentro dos limites indicados como utilizáveis pela norma.

**Tabela 4:** Módulo de finura, diâmetro máximo e equivalente areia.

	Pó de Pedra	Scheelita	Areia
Módulo de Finura (%)	2,67	2,61	1,90
Diâmetro máximo (mm)	4,75	4,75	2,36

Fonte: Autores (2022).

Os módulos de finura do resíduo da scheelita, areia e pó de pedra expostos na Tabela 4 são de 2,61%, 1,90% e 2,67% nesta ordem. Essa medida é inversamente proporcional ao percentual de reposição do agregado, isto significa, à medida que o percentual de resíduo aumenta, o módulo de finura diminui.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) 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. O módulo de finura está diretamente relacionado com o tamanho das partículas dos agregados, de tal forma que, quanto maior for o módulo de finura, maiores serão suas partículas.

A areia apresenta-se dentro dos limites que configuram o agregado como utilizável no concreto, enquanto a scheelita apresenta grande parcela dentro da zona ótima, sendo então considerada, adequada com relação à granulometria, para incorporação no concreto.

Na Tabela 5 abaixo pode-se identificar os demais parâmetros físicos dos agregados miúdos.

**Tabela 5:** Parâmetros físicos dos agregados miúdos.

Ensaio	Areia	Pó de Pedra	Scheelita
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,42	2,58	2,61
Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )	1,54	1,68	1,58
Índice de Vazios estado compactado	35,78	29,83	39,27
Absorção (%)	0,60	0,80	1,07
Atividade Pozolânica			

Fonte: Autores (2022).

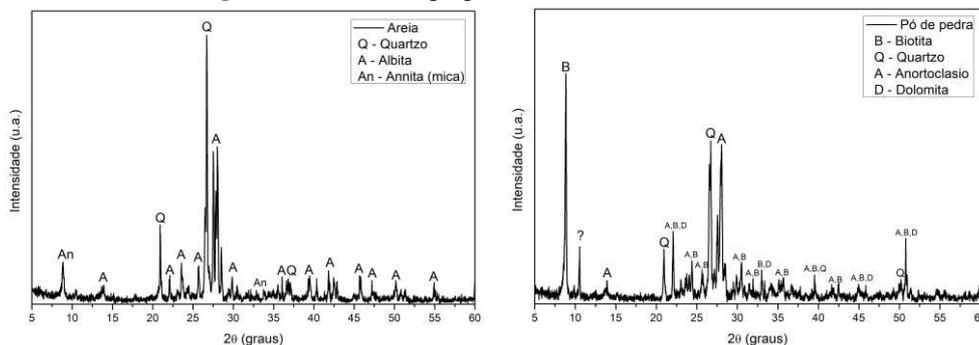
Analisando a Tabela 5 o valor da massa unitária da scheelita é superior em comparação com os agregados convencionais, o que indica que o resíduo precisa de mais espaço, aumentando assim o volume e gerando grande quantidade de vazios em comparação com a areia. De acordo com Bauer (2008), a compactidade se relaciona diretamente entre o volume total dos grãos 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 um concreto eficiente.

De acordo com a Tabela 5 o resultado da massa específica do resíduo de scheelita e pó de pedra são superiores 7,85 % e 6,61%, respectivamente, em relação a massa da areia utilizada nesse planejamento experimental. Significa que a scheelita e pó de pedra são mais pesadas que areia, sendo com menor valor de módulo de finura. O mesmo ocorreu no trabalho de Paiva (2013) e Costa (2019), onde o resíduo de scheelita com massa específica 2,631g/cm<sup>3</sup> e 2,94g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, maior que a areia e o no trabalho de Sipres (2019) sobre pó de pedra a massa específica 2,45 g/cm<sup>3</sup> maior que a areia.

Observa-se 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.

No DRX dos agregados miúdos convencionais, repare-se que na areia contém quartzo, albita e annita sendo os principais minerais. Em relação ao pó de pedra, a biotita, quartzo, anortoclásio e dolomita são os minerais que se destacam. A areia possui mais intensidade em quartzo, o pó de pedra é mais intenso com biotita, conforme a Figura 4.

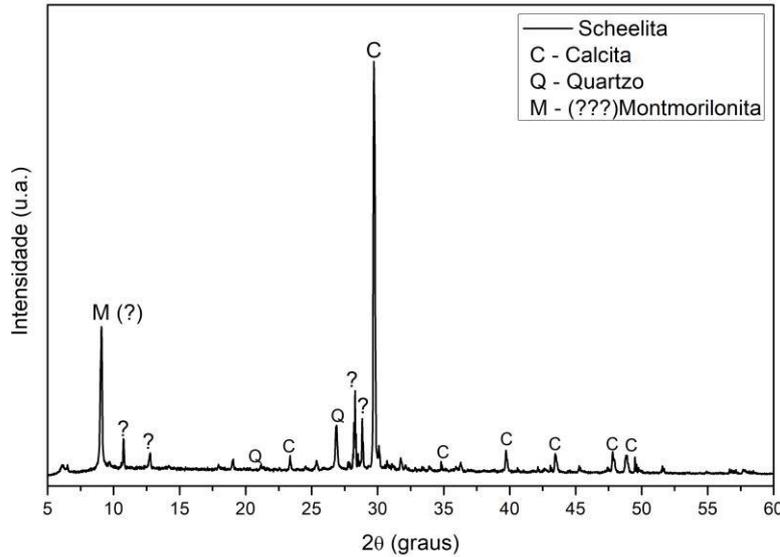
**Figura 4:** DRX dos agregados miúdos convencionais.



Fonte: Autores (2022).

A difração de Raios-X (DRX) do resíduo da scheelita, apresentou como principais constituintes a calcita e o quartzo. Além desses materiais uma leve presença de montmorilonita (argilomineral). No trabalho de Costa Filho (2017), também foi identificado calcita, quartzo como minerais predominantes e outros em menores proporções como enstatite e grossular ferrian. Em Medeiros (2016), também se encontrou calcita, quartzo além de grossular ferrian, pyroxmanguite e Ilite (Figura 5).

**Figura 5:** DRX do resíduo da scheelita.



Fonte: Autores (2022).

Na Tabela 6 demonstra EDX da areia, pó de pedra e scheelita. De acordo com a NBR 12653 para que o resíduo seja material pozolânico deve apresentar um somatório maior que 50 %, tais materiais são: Dióxido de Silício (SiO<sub>2</sub>), Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Óxido de Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Sobre resíduo de scheelita o somatório é de 48,21%, ou seja, menor que 50%, logo não é material pozolânico mas pode conferir alguma melhoria na RCS quando incorporado ao concreto.

**Tabela 6:** EDX dos agregados miúdos.

	Areia	Pó de Pedra	Scheelita
CaO	3,15%	6,16%	42,55%
SiO <sub>2</sub>	64,68%	58,81%	29,92%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,98%	16,20%	10,63%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,39%	6,99%	7,66%
MgO	1,40%	1,31%	4,55%
SO <sub>3</sub>	0,24%	0,42%	1,82%
K <sub>2</sub> O	4,87%	4,21%	1,15%
TiO <sub>2</sub>	1,24%	1,55%	0,60%
MnO	0,10%	0,11%	0,54%
WO <sub>3</sub>	0,00%	0,00%	0,20%
BaO	0,23%	0,00%	0,17%
SrO	0,04%	0,04%	0,15%
ZnO	0,00%	0,01%	0,03%
MoO <sub>3</sub>	0,00%	0,00%	0,02%
Rb <sub>2</sub> O	0,02%	0,01%	0,01%
SeO <sub>2</sub>	0,00%	0,00%	0,01%
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02%	0,01%	0,01%
C	0,00%	0,00%	0,00%
ZrO <sub>2</sub>	0,32%	0,22%	0,00%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,33%	1,32%	0,00%
Na <sub>2</sub> O	0,00%	2,62%	0,00%
NbO	0,00%	0,01%	0,00%

Fonte: Autores (2022).

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 (SiO<sub>2</sub>), 38,46% e 21,76%, respectivamente, indicando a presença de calcita e quartzo na composição mineralógica desse agregado. O alto teor de sílica

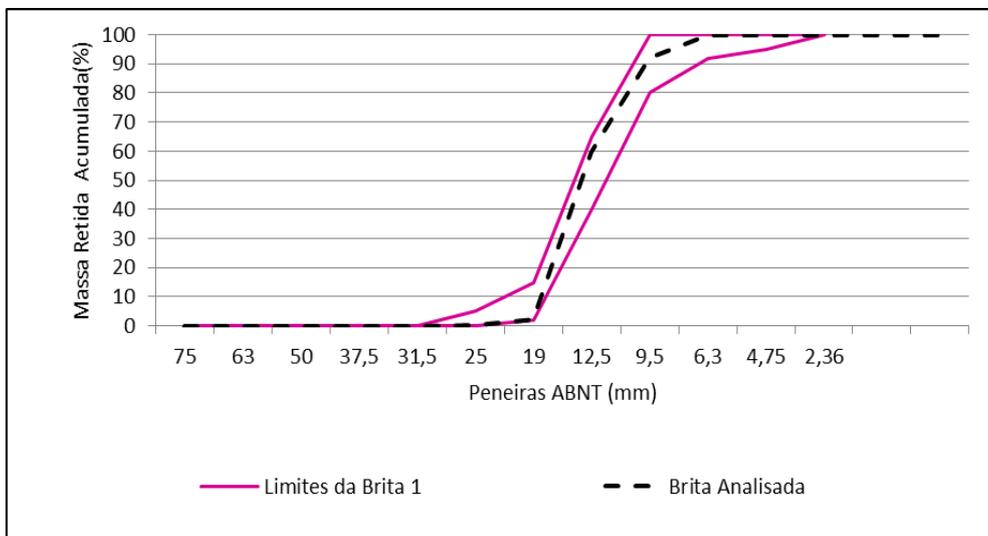
indica que o resíduo é oriundo de rochas silicatas ácidas que contribuem para a formação de novos cristais na matriz cimentícia da argamassa. Os resultados corroboram com (Medeiros et al., 2021) que identificou predominância de óxido de cálcio (47,3%) e de sílica (31,2%) no resíduo da scheelita.

O resíduo de scheelita é proveniente da extração do tungstênio, por esse motivo há presença, ainda que mínima, de WO<sub>3</sub> (0,20%). Medeiros (2016), o resíduo apresentou 0,19% % de WO<sub>3</sub> e Costa Filho (2017) explanou no seu trabalho 0,91% de tungstênio.

### 3.1.3 Agregado Graúdo

As curvas granulométricas resultantes do ensaio de granulometria da brita utilizada está representada na Figura 6. Pode-se observar que as brita analisada possui diâmetro máximo característico de 9,5 mm.

**Figura 6:** Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Autores (2022).

Pode-se observar que a brita utilizada encontra-se dentro da zona limite de classificação de Brita 1, portanto, o agregado graúdo empregado na pesquisa satisfaz os limites de distribuição granulométrica impostos pela NBR 7211:2009. Na Tabela 7 encontra-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 <sup>3</sup> )	1,83
Índice de Vazios estado compactado	99,93
Absorção (%)	0,76
Abrasão Los Angeles (%)	40,1

Fonte: Autores (2022).

Podemos observar na Tabela a considerável absorção da brita analisada, 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. A Tabela 7 também apresenta que o material utilizado apresenta elevado índice de vazios estado compactado possuindo um bom arranjo entre seus grãos.

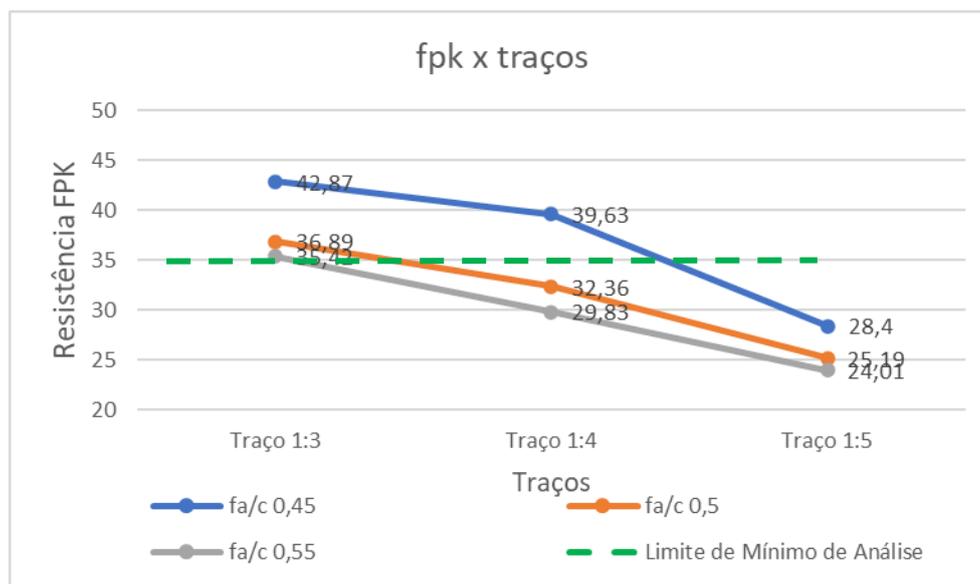
A brita utilizada apresenta no ensaio de abrasão Los Angeles um desgaste à abrasão de 40,1 % ainda de acordo com o limite apresentado na NBR 7211:2009, que define o máximo deste desgaste a 50%.

### 3.2 Traço Convencional

A partir dos traços testados para avaliação do traço convencional, com base na metodologia empírica e verificados parâmetros tais como: consumo de cimento, trabalhabilidade, absorção e resistência à compressão. Destes, foram realizados ensaios de resistência a compressão e absorção para parâmetro de decisão, conforme exigido pela NBR 9781/2013. Os demais parâmetros foram analisados no auxílio da tomada de decisão como parâmetros auxiliares.

A resistência a 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 a 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. A partir dos traços estudados, obteve-se os resultados conforme o gráfico da Figura 7.

**Figura 7:** Resistência a compressão dos traços estudados.



Fonte: Autores (2022).

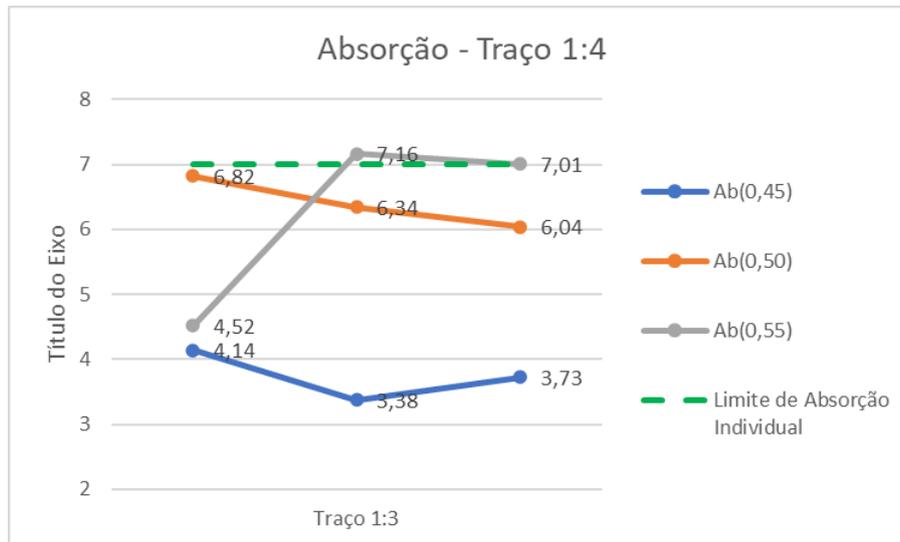
Conforme pode ser visto na Figura 7, apenas quatro traços se apresentaram satisfatórios quando da análise da resistência a compressão. Conforme exigido pela norma NBR 9781/2013, que estabelece o limite de resistência mínima de 35 MPa para que as peças possam ser utilizadas em solicitações para passagem 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 encontram-se abaixo da resistência mínima solicitada, não podendo ser utilizado para o estudo em questão.

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 a compressão acima de 25 MPa. Logo, poderiam ser aplicados em pavimentos com solicitações leves como calçadas, praças, ciclovias, etc.

Dos traços com resistência satisfatória, optou-se por utilizar nesta pesquisa o Traço 4 (1:4:0,45), com resistência a compressão satisfatória (acima de 35 Mpa), baixo desvio padrão (1,75), indicando boa confiabilidade nos dados e baixo consumo de cimento (426,66 kg/m<sup>3</sup>).

Conforme indica a Figura 8, o Traço (1:4:0,45) também se mostrou satisfatório quanto a análise da absorção de água. Todos os resultados indicam absorção média abaixo de 6% e nenhum valor individual acima de 7%.

**Figura 8:** Absorção do traço selecionado.



Fonte: Autores (2022).

Definido o traço convencional, a partir dele serão incorporadas proporções de resíduos para verificar qual melhor quantidade a ser adicionado garantindo suas condições de aceitação dos parâmetros de RCS e absorção conforme normativa.

### 3.3 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 água 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 resistência à compressão simples do concreto 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 análise experimental, segue resultados conforme Tabela 8.

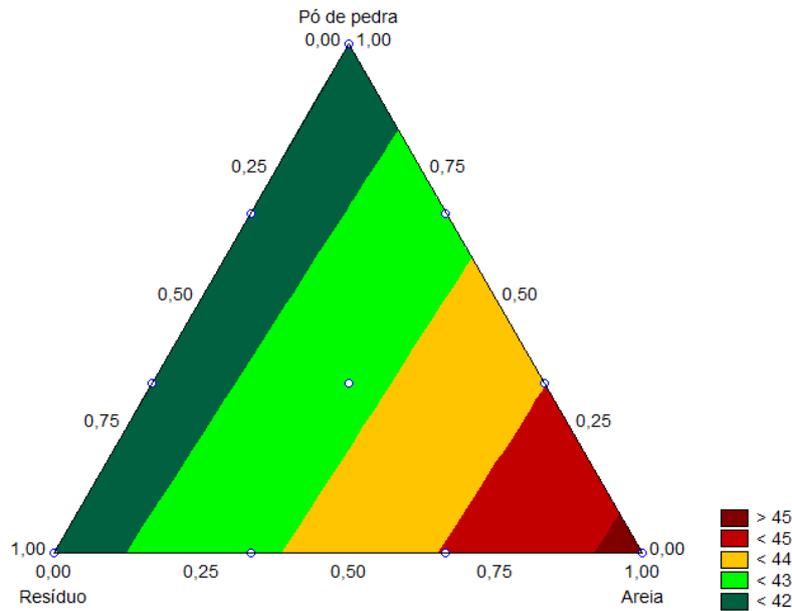
**Tabela 8:** RCS da scheelita para cada composição do planejamento experimental.

#	Proporções			RCS (MPa)	Média RCS (MPa)
	Resíduo	Areia	Pó de Pedra		
1	1	0	0	39,989	37,58
				37,597	
				33,742	
				38,995	
2	0	1	0	42,989	40,94
				39,810	
				40,248	
				40,695	
3	0	0	1	40,781	36,65
				39,716	
				25,433	
				40,686	
4	0,33333	0,66667	0	48,844	48,67
				47,632	
				46,465	
				51,728	
5	0,33333	0	0,66667	38,373	38,19
				34,369	
				40,900	
				39,104	
6	0	0,33333	0,66667	42,591	44,79
				48,708	
				44,743	
				43,118	
7	0,66667	0,33333	0	44,332	44,23
				43,806	
				43,208	
				45,563	
8	0,66667	0	0,33333	43,218	45,63
				43,930	
				47,944	
				47,441	
9	0	0,66667	0,33333	47,236	48,50
				46,321	
				51,510	
				48,929	
10	0,33333	0,33333	0,33333	43,829	45,10
				45,615	
				43,451	
				47,486	

Fonte: Autores (2022).

Analisando os dados, 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. A superfície de resposta gerada representa os 10 pontos iniciais do planejamento experimental, conforme Figura 9, facilitando a visualização dos dados inseridos na Tabela.

**Figura 9:** Absorção do traço selecionado.



Observa-se que a partir de 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 9781/2013.

Por intermédio da regressão linear dos dados experimentais do planejamento de misturas, foram calculados os coeficientes da equação do modelo matemático, conforme segue em equação 4:

$$R = 41,60 A + 45,31B + 41,23C \text{ (Eq. 4)}$$

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

Também por meio 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 9.

**Tabela 9:** Análise de Variância.

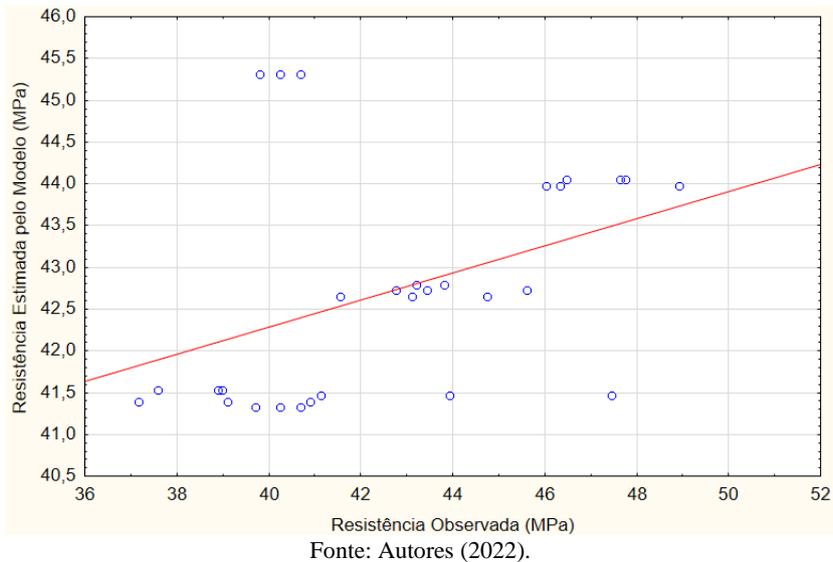
Variável Explicada	S.Q.	G.L. (df)	Q.M	Fcalc	Ftab	Teste F
Regressão (= Total - Resíduo)	5899,993	2	2949,9965	205,741	4,53	45,4175
Resíduo (Error)	387,136	27	14,33837			
Falta de Ajuste (Lack of Fit)	184,036	7	26,29085714	2,58896	19,25	0,13449
Erro Puro (Pure Error; Model)	203,1	20	10,155			
Total (Total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

Fonte: Autores (2022).

Na Tabela 9, 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 boa qualidade do ajuste da curva de regressão.

Na Figura 10 tem-se a curva de dispersão entre os valores observados e os valores estimados.

**Figura 10:** Curva de dispersão entre os valores observados e os valores estimados.



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

#### 4. Considerações Finais

Finalizando este estudo é possível sintetizar as conclusões técnicas a respeito do estudo em corpos de prova de concreto conforme os seguintes tópicos:

Na caracterização dos agregados miúdos, a scheelita apresenta características físicas semelhantes aos materiais convencionais, corroborando com os resultados nas moldagens de concreto, nas quais as variações de RCS não sofreram grandes variações a medida que se aumenta o teor de resíduo em substituição aos agregados naturais.

Utilizando-se a superfície de resposta gerada no planejamento experimental, podem-se determinar faixas de misturas para uma mesma resistência requerida combinando proporcionalmente o teor de cada material.

O planejamento experimental de misturas da rede simples se mostra eficiente para a verificação de parâmetros ideais de composição, apresentando um bom padrão de qualidade dos dados, facilitando o estudo na análise de materiais homogêneos como o concreto. Pode-se concluir que um traço de concreto para fins de pavimentos intertravados com o resíduo da scheelita como agregado miúdo é satisfatório para o uso conforme norma brasileira vigente, apresentando RCS acima de 42 MPa, contribuindo para a diminuição de extração de recursos naturais bem como fornecendo uma alternativa viável para inserção do resíduo.

Para trabalhos futuros sugere-se alterar o traço do concreto convencional para obter parâmetros que atendam maiores RCS para utilização em escala industrial bem como realização de ensaios de durabilidade para verificação do comportamento do bloco para parâmetros de envelhecimento.

## Referências

- Almeida, S. P. D. (2016). *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, PB, Brasil.
- ABNT. (2016). NBR 11513. Materiais granulares usados em fundição - Determinação da massa específica pelo uso do frasco volumétrico de "Le Chatelier". Rio de Janeiro.
- ABNT. (2013). NBR 11579. Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (n° 200).
- ABNT. (2003). NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica.
- ABNT. (2021). NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. In ABNT NBR 45:2006.
- ABNT. (2021). NBR 16916. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.
- ABNT. (2021). NBR 16917. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.
- ABNT. (2021). NBR 16974. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles.
- ABNT. (2013). NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro.
- Bauer, L. A. F. (2008). *Materiais de Construção*: LTC.
- Costa, C. Y. M. (2019). *Analogia das propriedades de concretos com diferentes cimentos e incorporados de resíduos do porcelanato e scheelita*. Monografia de Graduação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil.
- Costa, F. F. D. C. D. (2017). *Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de Scheelita na composição de concretos asfálticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Barreto, R. D. (2017). Produção de pavimento intertravado com a utilização de resíduos da construção civil como agregado miúdo. *Revista Univap*, 22(40), 553. <https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.1179>
- Dana, J. D. (1978). *Manual de Mineralogia* (5ª edição). Revisto por Hurlbut Jr., CS Tradução: Rui Ribeiro Franco. Livros Técnicos e Científicos Editora SA, Rio de Janeiro. Brasil.
- Fernandes, I. (2016). *Blocos e pavers: Produção e controle de qualidade*. (7ª edição).
- Ferrari, H., & da Silva Manca, R. (2020). Utilização de resíduos plásticos no traço de blocos de concreto tipo paver. *Prospectus* 2(1).
- Guimarães, A. C. P. D., Oliveira, M. F. M., Silva, J. P., & Lameiras, F. S. (2018). Obtenção de geopolímero com adição de rejeito de mineração depositado na barragem de Candonga (Rio Doce-MG, Brasil). In 3º Congresso Luso-Brasileiro, *Materiais de Construção Sustentáveis* (pp. 14-16).
- IBRAM. (2020). Indicadores da mineração têm saldo positivo em 2020. [ibram.org.br](http://ibram.org.br). <https://ibram.org.br/release/indicadores-da-mineracao-tem-saldo-positivo-em-2020/>
- Machado, T. G. (2012). *Estudo da adição de resíduo de scheelita em Matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Medeiros, M. (2016). *Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Medeiros, B. L. de A. V.; Fernandes, J. V.; Costa, F. P. da; Barros, S. V. A.; Rodrigues, A. M. & Neves, G. de A. (2021). Resistance to the alkali-aggregate reaction of sustainable mortars produced with scheelite tailings in replacing natural sand aggregates. *Research, Society and Development*, 10 (6), e567101422209. DOI: 10.33448/rsd-v10i14.22209.
- Nunes, D. B. (1998). *Rotinas para a otimização experimental de misturas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Paiva, E. H. G. (2013). *Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.
- Rodrigues, M. I., & Lemma, A. (2009). *Planejamento de experimentos e otimização de processos*. 2. Ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor.
- Sipres, C. (2019). *Análise técnica do uso de resíduos de construção e demolição (rcd) na produção de concreto seco para piso intertravado*. Monografia de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.