

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA CIVIL**  
**LEONARDO GERONIMO PROCK**

**USO DO PÓ DE GRANITO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DA AREIA EM  
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO PARA INDÚSTRIA DE PRÉ-MOLDADOS**

**Varginha**  
**2025**

**LEONARDO GERONIMO PROCK**

**USO DO PÓ DE GRANITO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DA AREIA EM  
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO PARA INDUSTRIA DE PRÉ-MOLDADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – Unis/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação da Prof. Esp. Leopoldo Freire Bueno.

**Varginha  
2025**

**LEONARDO GERONIMO PROCK**

**USO DO PÓ DE GRANITO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DA AREIA EM  
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO PARA INDUSTRIA DE PRÉ-MOLDADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – Unis/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof. Esp. Leopoldo Freire Bueno

---

Membro da Banca Examinadora 1

---

Membro da Banca Examinadora 2

OBS.:

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao Senhor Jesus Cristo, à minha esposa, e à minha família meus pais e irmã.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao Senhor Jesus Cristo, por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda esta jornada acadêmica. À minha esposa, pelo amor, paciência e apoio constante, e à minha família — meus pais e irmã — pelo incentivo e pelos valores que sempre me inspiraram. Estendo meus agradecimentos ao professor Leopoldo, pela orientação, dedicação e pelos conhecimentos compartilhados, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Aos meus colegas de classe, agradeço pela amizade, colaboração e companheirismo durante o curso, que tornaram essa caminhada mais leve e significativa. Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional.

## EPÍGRAFE

“E tudo o que vocês fizerem ou disserem,  
façam em nome do Senhor Jesus Cristo e  
por meio dele agradeçam a Deus, o Pai.”  
(Colossenses 3:17)

## RESUMO

O presente trabalho aborda a utilização do pó de granito como substituto parcial da areia natural na produção de concreto de alto desempenho (CAD) destinado à indústria de pré-moldados. O tema insere-se na busca por alternativas sustentáveis na construção civil, considerando que o beneficiamento de rochas ornamentais gera grandes volumes de resíduos finos, cujo descarte inadequado causa impactos ambientais significativos. Nesse contexto, a incorporação do pó de granito no concreto apresenta-se como uma alternativa ambientalmente viável, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos e a redução do consumo de recursos naturais. O objetivo geral consiste em avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial da areia natural pelo pó de granito, analisando os efeitos dessa substituição sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto. A metodologia aplicada foi de natureza experimental, desenvolvida no Laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS), onde foram moldados corpos de prova cilíndricos submetidos a ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias de cura, conforme as normas da ABNT. Também foram realizados ensaios de caracterização dos materiais constituintes e de determinação da atividade pozzolânica do pó de granito, seguindo os critérios estabelecidos na ABNT NBR 5752:2014. Os resultados obtidos indicaram que o pó de granito apresenta características adequadas para sua aplicação como substituto parcial do agregado miúdo, demonstrando que teores intermediários de substituição tendem a melhorar a compacidade da mistura e manter a resistência à compressão dentro de padrões aceitáveis. Esses resultados evidenciam o potencial do pó de granito como material alternativo para concretos de alto desempenho, contribuindo para o desenvolvimento de práticas construtivas mais sustentáveis.

**Palavras-chave:** Concreto de alto desempenho, Pó de granito, Sustentabilidade, Pré-moldados, Resistência mecânica.

## ABSTRACT

This study addresses the use of granite powder as a partial replacement for natural sand in the production of high-performance concrete (HPC) intended for the precast industry. The topic is part of the ongoing search for sustainable alternatives in civil construction, considering that the processing of ornamental stones generates large volumes of fine waste, whose improper disposal causes significant environmental impacts. In this context, incorporating granite powder into concrete represents an environmentally viable alternative, contributing to waste reuse and the reduction of natural resource consumption. The main objective is to evaluate the technical feasibility of partially replacing natural sand with granite powder, analyzing the effects of this substitution on the physical and mechanical properties of concrete. The methodology applied was of an experimental nature, carried out at the Civil Engineering Laboratory of Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS), where cylindrical specimens were molded and subjected to axial compressive strength tests at 7 and 28 days of curing, following ABNT standards. Material characterization and pozzolanic activity tests were also performed according to ABNT NBR 5752:2014. The results indicated that granite powder presents physical characteristics suitable for use as a partial replacement for fine aggregate, with intermediate substitution levels improving the mixture's compactness while maintaining adequate compressive strength. These findings highlight the potential of granite powder as an alternative material for high-performance concrete, contributing to the development of more sustainable construction practices. [Conclusion to be added after final results.]

**Keywords:** high-performance concrete; granite powder; sustainability; precast; mechanical strength.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo estrutural .....	16
Figura 2 - Sistema estrutural aporticado .....	17
Figura 3 - Concreto espalhado nas formas. ....	19
Figura 4 - Concreto adensado nas formas. ....	20
Figura 5 - Jazida de extração de granito. ....	28
Figura 6 - Amostra úmida do granito. ....	34
Figura 7 - Amostra seca após estufa.....	34
Figura 8 - Destorroamento da amostra. ....	35
Figura 9 - Aparelho vibratório usado para ensaio de granulometria. ....	37
Figura 10 - Amostra separada após ensaio. ....	37
Figura 11 - Características do agregado miúdo. ....	40
Figura 12 - Amostra de agregado graúdo.....	40
Figura 13 - Amostra do agregado graúdo.....	41
Figura 14 - Características do agregado graúdo .....	43
Figura 15 - Materiais para ensaio. ....	45
Figura 16 - Areia normal armazenada.....	45
Figura 17 - Amostra retirada para ensaio. ....	46
Figura 18 - Misturador utilizado.....	46
Figura 19 - Corpos de prova para atividades pozolânicas.....	47
Figura 20 – Consistência do concreto no estado fresco. ....	48
Figura 21 - Consistência do concreto.....	49
Figura 22 - Corpos de prova moldados.....	49
Figura 23 - Corpos de prova submersos. ....	50
Figura 24 - Amostra submetida ao ensaio.....	51
Figura 25 - Tipos de ruptura de corpos de prova. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantitativo de material por traço.....	33
Tabela 2 - Dados obtidos. ....	38
Tabela 3 - Dados obtidos do ensaio. ....	41
Tabela 4 - Índice de atividade pozolânica. ....	53
Tabela 5 - Resistência aos 7 dias de cura. ....	54
Tabela 6 - Resistência aos 28 dias de cura .....	54

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo. ....	38
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	42
Gráfico 3 - Comparativo entre resultados das argamassas. ....	53
Gráfico 4 - Comparativo entre amostras aos 7 dias.....	55
Gráfico 5 - Comparativo entre amostras aos 28 dias. ....	55

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	15
2.1 Histórico da Indústria de Pré-moldados .....	15
2.2 A indústria de pré-moldados .....	16
2.3 Dormentes ferroviários como exemplo de pré-moldado.....	18
2.3.1 Sistema de produção .....	18
2.4 Características dos materiais .....	21
2.4.1 Cimento .....	21
2.4.2 Agregados.....	22
2.4.3 Aditivos químicos .....	24
2.4.4 Adições minerais.....	25
2.5 Concreto de alto desempenho .....	26
2.5.1 Pó de granito integrado ao CAD .....	27
3 METODOLOGIA .....	31
3.1 Materiais utilizados .....	33
3.1.1 Pó de granito .....	33
3.1.1.1 Destorroamento do material .....	34
3.1.2 Cimento .....	36
3.1.3 Agregados.....	36
3.1.3.1 Ensaio em agregados miúdos .....	36
3.1.3.2 Ensaio em agregados graúdos .....	40
3.1.4 Adição mineral e aditivo plastificante .....	43
3.2 Classificação pozolânica.....	44
3.3 Moldagem dos traços .....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1 Atividade pozolânica.....	52
4.2 Avaliação dos Traços Produzidos .....	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
REFERÊNCIAS.....	60

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda o aproveitamento do pó de granito como substituição parcial do agregado miúdo na produção de concreto de alto desempenho (CAD). O beneficiamento de rochas ornamentais gera uma quantidade significativa de resíduos finos, como o pó de granito, que frequentemente são descartados de maneira inadequada, ocasionando impactos ambientais e custos adicionais de destinação. Diante desse contexto, surge a questão que norteia esta pesquisa: qual é a influência da substituição parcial da areia natural pelo pó de granito nas propriedades físicas e mecânicas do concreto de alto desempenho?

O estudo tem como objetivo geral analisar a viabilidade técnica da utilização do pó de granito como substituição parcial do agregado miúdo na produção de concreto de alto desempenho. Para alcançar esse propósito, foram definidos os seguintes objetivos específicos: caracterizar os materiais constituintes do concreto, incluindo agregados miúdos e graúdos, bem como as adições minerais; e avaliar as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, comparando os resultados com o traço de referência. O traço teórico adotado baseia-se na formulação atualmente empregada pela indústria conpreem – concreto pré-moldado, sendo utilizado neste estudo com o objetivo de avaliar o potencial de otimização do traço existente. Dessa forma, visa-se verificar se a composição convencional pode ser aprimorada em termos de desempenho mecânico e eficiência, contribuindo para o desenvolvimento de concretos mais sustentáveis e de melhor qualidade,

De forma complementar, pretende-se investigar a influência de diferentes teores de substituição — 10%, 20% e 30% — da areia natural por pó de granito; determinar a atividade pozolânica do pó de granito conforme as normas da ABNT; e identificar o teor de substituição que proporcione o melhor equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade prática do concreto, considerando aspectos de resistência mecânica, trabalhabilidade e sustentabilidade do material.

A justificativa para a realização deste estudo está pautada na crescente necessidade de reduzir os impactos ambientais gerados pela construção civil e na busca por alternativas sustentáveis que promovam o uso racional de recursos naturais. O pó de granito, por ser um subproduto do corte e polimento de rochas ornamentais, apresenta características físicas e químicas favoráveis à sua aplicação como substituto parcial da areia natural. A sua utilização possibilita minimizar o

descarte inadequado de resíduos, preservar recursos minerais não renováveis e promover práticas construtivas ambientalmente responsáveis, além de potencialmente melhorar a compacidade, a durabilidade e o desempenho mecânico do concreto.

A metodologia proposta consiste na realização de ensaios laboratoriais no laboratório de engenharia civil do centro universitário do sul de minas - UNIS, com a caracterização dos materiais e a moldagem de corpos de prova cilíndricos submetidos a ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias de cura, conforme as normas da ABNT. Serão produzidos quatro traços de concreto, sendo um de referência (100% de areia natural) e três com substituições parciais de 10%, 20% e 30% de pó de granito. As dosagens seguirão o método empírico de empacotamento granular, ajustado com base no ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR 16889:2020). Os resultados obtidos permitirão avaliar a influência do pó de granito nas propriedades do concreto e determinar a viabilidade técnica de sua utilização como material alternativo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Histórico da Indústria de Pré-moldados

O desenvolvimento da indústria de pré-moldados de concreto acompanha diretamente a evolução da construção civil e o avanço da industrialização do setor. A ideia de produzir peças estruturais em ambiente controlado e posteriormente transportá-las para o canteiro de obras surgiu como alternativa para reduzir custos, acelerar a execução e garantir maior padronização das estruturas. Esse modelo industrial se consolidou mundialmente a partir da segunda metade do século XX, especialmente em obras de infraestrutura, pontes e grandes edificações, onde a repetição de elementos e a necessidade de prazos mais curtos justificaram sua aplicação (Silva *et al*, 2022).

No Brasil, a adoção dos pré-moldados começou a ganhar força entre as décadas de 1970 e 1980, em paralelo à expansão urbana e ao crescimento da demanda por construções de grande porte. Inicialmente voltada para galpões industriais, pavilhões e fundações especiais, a indústria de pré-moldados logo expandiu sua aplicação para edificações comerciais, residenciais e obras de arte, consolidando-se como uma alternativa viável frente ao método tradicional moldado in loco. A padronização dos componentes, aliada ao controle de qualidade realizado em fábricas especializadas, foi determinante para a consolidação do setor no país (Oliveira, 2019).

Um dos marcos da evolução dessa indústria é a capacidade de produzir elementos com elevado desempenho mecânico e durabilidade, aspectos alcançados por meio da utilização de concretos especiais e de tecnologias de adensamento e cura controlada. O processo industrial permitiu maior confiabilidade estrutural e menor variação entre peças, fatores que atendem às exigências normativas e às demandas de segurança estrutural das construções modernas (Silva *et al.*, 2022).

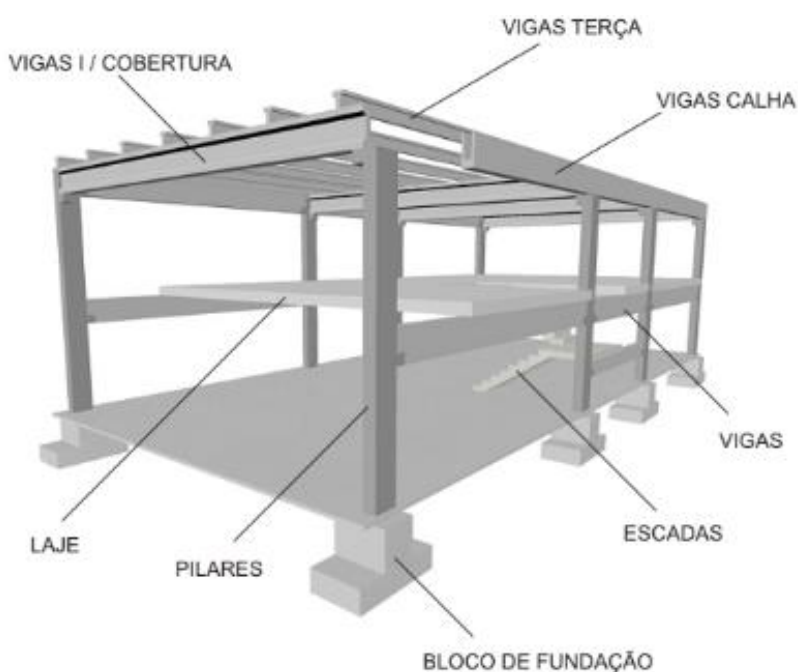
A indústria de pré-moldados também se destaca por sua contribuição para a sustentabilidade no setor da construção civil. A produção em ambiente fabril possibilita o aproveitamento racional de insumos e o controle rigoroso de desperdícios. Assim como, a incorporação de adições minerais e resíduos industriais, tem se mostrado uma alternativa eficaz para reduzir o consumo de recursos naturais e o descarte inadequado de resíduos. (Mendes, 2019).

Estudos recentes reforçam que a sustentabilidade é hoje um dos principais direcionadores da indústria de pré-moldados. A valorização de práticas como a economia circular, o reaproveitamento de resíduos e a produção de concretos mais duráveis se alinha às exigências ambientais e às necessidades de infraestrutura contemporânea. Nesse sentido, a indústria de pré-moldados se posiciona como um setor estratégico para a modernização da engenharia civil, unindo eficiência construtiva, inovação tecnológica e responsabilidade ambiental (Silva *et al.*, 2022).

## 2.2 A indústria de pré-moldados

A indústria de pré-moldados abrange uma grande variedade de elementos estruturais e não estruturais, que são fabricados em ambiente controlado e posteriormente transportados ao canteiro de obras. Entre os componentes mais comuns, destacam-se pilares, vigas, lajes e painéis de vedação, largamente utilizados em edifícios industriais e obras de infraestrutura, devido à possibilidade de fabricação seriada e ao rigoroso controle tecnológico (Silva *et al.*, 2022, apud Mendes, 2002). A figura 1 apresenta um modelo 3D de alguns dos elementos citados.

Figura 1 - Modelo estrutural



Fonte: Salema Pré-Fabricados em Concreto (2022).



No contexto da alvenaria estrutural, blocos de concreto pré-moldado têm se consolidado como alternativa eficiente e econômica, permitindo rapidez construtiva e racionalização de materiais. Esses blocos apresentam dimensões padronizadas e desempenham papel tanto estrutural quanto de vedação, sendo aplicados em edificações residenciais e comerciais com resultados satisfatórios em termos de resistência e durabilidade (Oliveira, 2019).

Do mesmo modo, estruturas multipavimento compostas por vigas, pilares e lajes pré-moldadas são amplamente utilizadas em obras de médio e grande porte. Esse tipo de sistema possibilita redução significativa no tempo de execução e melhor aproveitamento de mão de obra, ao mesmo tempo em que assegura qualidade e precisão dimensional. Tais características tornam o pré-moldado competitivo frente ao sistema convencional moldado in loco (Silva *et al.*, 2022). A Figura 2 apresenta uma edificação construída com elementos pré-moldados, exemplificando a aplicação dessa técnica construtiva na engenharia civil.

Figura 2 - Sistema estrutural aporticado



Fonte: Oliveira (2022).

Outro exemplo relevante é a utilização de painéis pré-moldados de concreto para fechamento lateral e fachadas. Esses elementos, além de contribuírem para a estética arquitetônica, também proporcionam isolamento térmico e acústico, ao mesmo tempo em que reduzem etapas de acabamento no canteiro. A versatilidade

dos painéis reforça o potencial dos pré-moldados em atender tanto exigências técnicas quanto demandas arquitetônicas (Silva *et al.*, 2022).

Dessa forma, observa-se que os pré-moldados não se restringem a um único tipo de aplicação, mas constituem uma gama diversificada de soluções construtivas, que vão desde blocos para alvenaria até sistemas estruturais completos. Essa flexibilidade confirma a relevância do setor para a modernização da engenharia civil, unindo produtividade, inovação e sustentabilidade (Silva *et al.*, 2022).

### **2.3 Dormentes ferroviários como exemplo de pré-moldado**

Uma das tecnologias mais avançadas e amplamente adotadas na infraestrutura ferroviária moderna são os dormentes de concreto protendido. Estes elementos têm a função de sustentar os trilhos, manter o espaçamento entre eles e distribuir os esforços das cargas transmitidas pelas composições ferroviárias ao lastro. A utilização de concreto de alto desempenho (CAD) em dormentes visa proporcionar maior resistência, durabilidade, estabilidade dimensional e redução na necessidade de manutenção, aspectos essenciais para o bom desempenho e a longevidade da via permanente (Nabais, 2014).

A norma ABNT NBR 11709:2015, estabelece os critérios técnicos que esses elementos devem atender quanto à geometria, resistência mecânica, durabilidade e controle de qualidade. A norma também determina valores mínimos para resistência à compressão axial, absorção de água, resistência à fissuração por flexão e ao arrancamento de fixações, garantindo o desempenho e a segurança dos dormentes durante a vida útil da ferrovia (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).

#### **2.3.1 Sistema de produção**

A produção dos dormentes de concreto protendido segue um processo industrializado, padronizado e altamente controlado, garantindo uniformidade dimensional, resistência mecânica e durabilidade. Este sistema de produção é essencial para atender às exigências do setor ferroviário, que demanda precisão técnica e desempenho elevado, especialmente em linhas de carga pesada e alta velocidade (Nabais, 2014).

Segundo Lima o processo inicia-se com o preparo das fôrmas metálicas, projetadas para acomodar os fios ou cordoalhas de aço de alta resistência utilizados na protensão. Essas fôrmas possuem dimensões padronizadas conforme as normas técnicas e especificações do cliente os fios são posicionados e tensionados conforme um pré-dimensionamento estrutural, utilizando macacos hidráulicos calibrados, no chamado sistema de pré-tração.

Após a instalação e protensão dos fios, procede-se à dosagem e lançamento do concreto, que pode ser o concreto de alto desempenho, ou concreto autoadensável, formulado com agregados selecionados, adições minerais e aditivos plastificantes para garantir uma boa trabalhabilidade, baixa porosidade e alta resistência inicial (Silva *et al.*, 2022). A utilização de resíduos industriais, como o pó de granito, é vista como uma alternativa sustentável, promovendo uma produção menor impacto ambiental, como demonstrado por Alves (2008) e Cardoso (2019). A figura 3 apresenta o concreto distribuído nas formas durante o processo de concretagem do elemento pré-moldado.

Figura 3 - Concreto espalhado nas formas.



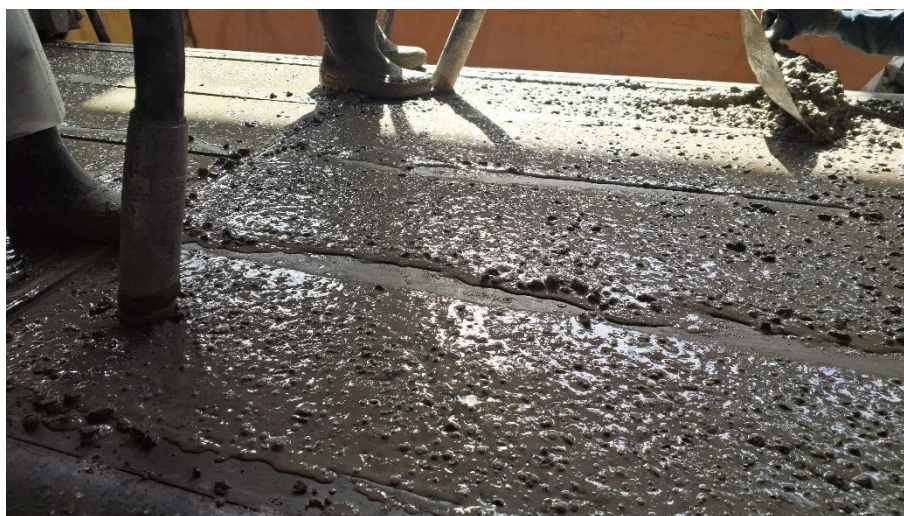
Fonte: O autor (2025).

O concreto é lançado nas fôrmas de forma contínua e compactado por meio de vibração mecânica. Após o preenchimento completo, inicia-se a cura que pode ser acelerada com uso de vapor (térmica) ou normal, tendo por objetivo atingir a resistência necessária para a liberação da protensão (Lima, 2022). O processo de cura térmica é realizado em câmaras de vapor, mantendo a temperatura controlada, segunda as diretrizes da ABNT NBR 11709:2015 a temperatura deve ser de no

máximo 70°C, as diretrizes gerais para cura acelerada do concreto estão presentes na ABNT NBR 9062:2017 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017).

A Figura 4 apresenta o concreto sendo adensado com o auxílio de mangotes vibratórios, etapa essencial para garantir a compactação e a homogeneidade da mistura.

Figura 4 - Concreto adensado nas formas.



Fonte: O autor (2025).

De acordo as diretrizes normativas da ABNT NBR 11709:2015, após a desforma, os dormentes passam por ensaios de controle de qualidade, que incluem verificação dimensional, resistência à compressão, absorção de água e inspeções visuais para detectar trincas, falhas ou imperfeições superficiais (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).

Este sistema de produção apresenta vantagens significativas: permite o reaproveitamento das fôrmas, otimiza o uso de materiais, reduz o tempo de fabricação e assegura excelente controle de qualidade. Bem como, o modelo industrial permite a adoção de práticas sustentáveis, como a reutilização de resíduos e o uso de concretos com adições minerais, sem comprometer o desempenho estrutural final do produto (Cardoso, 2019).

## 2.4 Características dos materiais

Para a definição dos traços a serem dosados, foram conduzidos estudos acerca das propriedades físicas, químicas e mecânicas de cada um dos componentes que integram o concreto. Essa etapa teve como objetivo compreender de forma aprofundada o comportamento individual e conjunto dos materiais, como o cimento, os agregados miúdos e graúdos, a água e os aditivos a fim de estabelecer proporções adequadas que garantam a trabalhabilidade, a resistência e a durabilidade do compósito, em conformidade com os parâmetros técnicos e normativos vigentes.

### 2.4.1 Cimento

O cimento é o principal agente ligante da matriz cimentícia no concreto e exerce influência decisiva sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material. Nos dormentes de concreto protendido, cuja exigência por resistência, durabilidade e estabilidade dimensional é elevada, a escolha adequada do tipo de cimento é um fator crítico para garantir a qualidade e o desempenho do produto (Mehta e Monteiro, 2014).

O cimento Portland é um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínques constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição na moagem. Clínques são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de matérias sintetizado que é produzido quando uma mistura de matérias-primas com proporcionamento adequado é aquecida sob altas temperaturas (Mehta e Monteiro, 2014, p. 217).

A reação química da mistura da água com o cimento, denominado como, hidratação do cimento, resulta em características de pega e endurecimento. A velocidade e a intensidade dessas reações estão diretamente relacionadas ao tipo de cimento utilizado, à sua finura, à composição mineralógica e à presença de adições (Mehta e Monteiro, 2014).

Nos processos industriais de produção de pré-moldados, prioriza-se a utilização do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), regulamentado atualmente pela ABNT NBR 16697:2018, por sua capacidade de atingir rapidamente elevadas resistências, o que é compatível com a necessidade de desforma rápida, especialmente em ciclos de cura térmica acelerada (SILVA *et al.*, 2022; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018).



Segundo Lima (2022), em projetos ferroviários, a resistência inicial do concreto é fundamental para a eficiência do processo produtivo. A obtenção de valores mínimos de resistência em até 24 horas permite que a linha de produção opere com maior frequência de ciclos, reduzindo custos e aumentando a produtividade. O autor também destaca que a escolha do cimento deve levar em consideração sua compatibilidade com aditivos plastificantes e plastificantes, frequentemente empregados na produção de concretos de alto desempenho (CAD), pois interações inadequadas entre esses componentes podem comprometer a trabalhabilidade, o tempo de pega e o ganho de resistência do concreto.

O impacto ambiental da produção de cimento é um tema de crescente importância. A adição de escórias e pozolanas no cimento Portland, pode trazer benefícios ao meio ambiente com a redução nas emissões de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) que são gerados no processo de fabricação do cimento portland. Também nota-se que, com a produção do clínquer, a cada tonelada fabricada igualmente seja dispersa uma tonelada de gás carbônico no ambiente (Alves, 2008 apud Petrucci, 1975). Entre as possibilidades estudadas, o pó de granito é uma alternativa, visto que é resíduo gerado no beneficiamento de rochas ornamentais, cuja utilização tem mostrado resultados promissores na produção de concretos sustentáveis (Cardoso, 2019).

O controle de qualidade do cimento na produção de pré-moldados deve seguir critérios estabelecidos por normas técnicas como a ABNT NBR 16697:2018, que define os requisitos para cimentos Portland com ou sem adições. Ensaio rotineiros incluem determinação da resistência à compressão ABNT NBR 7215:2025, finura por meio da peneira 75 µm (número 200) ABNT NBR 11579:2012, tempo de pega ABNT NBR 16607:2018, expansão Le Chatelier ABNT NBR 11582:2016 e teor de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) ABNT NBR NM 16 ou ABNT NBR 14656, entre outros conforme especificações ABNT, garantindo que o cimento atenda às exigências de resistência, estabilidade dimensional e durabilidade necessárias.

#### 2.4.2 Agregados

Os agregados compõem a maior parte do volume do concreto e exercem influência direta sobre suas propriedades mecânicas, trabalhabilidade, durabilidade e estabilidade dimensional. Na produção de concreto de alto desempenho, a escolha

adequada dos agregados é essencial para garantir o desempenho estrutural e a durabilidade esperada ao longo da vida útil do concreto (Mehta e Monteiro, 2014).

Dividem-se em agregados miúdos (geralmente areia natural ou artificial) e agregados graúdos (geralmente gnaisses 0, 1 ou 2), ambos devendo atender às exigências de pureza, granulometria adequada, resistência e ausência de contaminantes. Conforme a ABNT NBR 7211:2022 – Agregados para concreto – Requisitos, os agregados utilizados devem estar livres de materiais deletérios como matéria orgânica, partículas friáveis, substâncias solúveis em água e contaminantes que possam prejudicar a aderência com a pasta de cimento ou comprometer a durabilidade da estrutura. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022)

A distribuição granulométrica adequada é um dos principais fatores que contribuem para a compacidade e a redução da porosidade do concreto. Em concretos de alto desempenho, busca-se uma distribuição contínua entre os agregados miúdos e graúdos, de modo a melhorar o empacotamento das partículas, reduzir a quantidade de pasta necessária e melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade. (Silva et al., 2022).

Segundo Lima (2022) ressalta a importância do controle da origem e da qualidade dos agregados utilizados na produção de dormentes ferroviários. No estudo de caso analisado, observou-se que agregados de qualidade inferior ou mal lavados podem estar associados ao aparecimento de patologias, como fissuras superficiais e destacamento de bordas, que comprometem a vida útil da peça. Segundo o autor, o controle granulométrico e a pureza dos agregados são tão importantes quanto o tipo de cimento e a execução da protensão para garantir a durabilidade da estrutura.

Estudos de Alves (2008) e Cardoso (2019) demonstram que o pó de granito, quando utilizado como substituição parcial do agregado miúdo, pode atuar como material de enchimento (filler), otimizando a matriz do concreto e promovendo melhorias em propriedades como resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade. Esse resíduo, ao ser incorporado ao concreto, contribui ainda para a sustentabilidade ambiental do processo produtivo, reduzindo a exploração de areias naturais e diminuindo o volume de descarte industrial.

No entanto, a utilização de resíduos substitutivos exige cuidados específicos. Sua finura e alta superfície específica podem influenciar negativamente a relação água/cimento se não for bem ajustada com o uso de aditivos. Por isso, é essencial

realizar ensaios prévios para determinar a influência na trabalhabilidade, tempo de pega, resistência à compressão e permeabilidade do concreto (Silva et al., 2022).

Em termos operacionais, os agregados devem ser armazenados em condições adequadas, sobre bases impermeáveis, protegidos de contaminantes e umidade excessiva, para evitar variações de teor de água na mistura que possam afetar a consistência e a resistência do concreto. Esse cuidado é particularmente importante na produção em série, onde a constância das propriedades do concreto é um requisito essencial (Nabais, 2014).

#### 2.4.3 Aditivos químicos

Os aditivos são componentes químicos incorporados ao concreto durante sua preparação, com o objetivo de modificar determinadas propriedades da mistura no estado fresco ou endurecido. No caso do concreto de alto desempenho, os aditivos exercem papel fundamental para garantir a trabalhabilidade adequada, acelerar o ganho de resistência, controlar o tempo de pega e reduzir a relação água/cimento, aspectos essenciais para a eficiência e qualidade do processo produtivo (Mehta e Monteiro, 2014).

Os principais aditivos utilizados em concretos para indústria de pré-moldados são os redutores de água tipo 1 e tipo 2, aceleradores de pega, aceleradores de resistência e retardadores. Esses produtos são regulamentados pela ABNT NBR 11768:2019 – Aditivos para concreto de cimento Portland, que define critérios de desempenho e compatibilidade com os demais componentes do concreto (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

A utilização de redutores de água é comum em concretos de alto desempenho (CAD), como os empregados na indústria civil. Esses aditivos promovem grande redução do teor de água, sem comprometer a fluidez, permitindo a obtenção de concretos com elevada resistência mecânica e excelente compacidade. Isso é fundamental, pois uma matriz menos porosa garante melhor desempenho frente a ciclos de carregamento e exposição ambiental (Silva et al., 2022).

A dissertação de Lima (2022) evidencia que a incorporação de aditivos plastificantes e redutores de água, quando corretamente dosados, permite uma melhora significativa na trabalhabilidade do concreto, sem que haja prejuízo nas resistências iniciais necessárias para a desforma e o corte da protensão. No entanto,



o autor alerta para a necessidade de ensaios prévios, pois a combinação de aditivos com diferentes tipos de cimento pode provocar reações indesejadas, como retenção excessiva de água, variações no tempo de pega e até segregação.

Segundo Cardoso (2019) também ressaltam a importância dos aditivos quando se utiliza pó de granito como substituição parcial de agregados ou como adição mineral. Por ser um material muito fino, o pó de granito pode aumentar a demanda de água do concreto; por isso, o uso de aditivos redutores de água se torna ainda mais necessário para garantir a trabalhabilidade sem elevar a relação água/cimento.

#### 2.4.4 Adições minerais

As adições minerais são materiais finamente divididos incorporados ao concreto com o objetivo de melhorar suas propriedades no estado fresco e endurecido, além de promover ganhos de desempenho, durabilidade e sustentabilidade. No contexto da produção de CAD, as adições desempenham papel fundamental na otimização da compacidade da matriz cimentícia, na redução da porosidade e na mitigação dos impactos ambientais associados ao elevado consumo de cimento Portland (Mehta e Monteiro, 2014).

As adições podem ser classificadas como cimentantes e pozolânicas, pozolanas altamente reativas, pozolanas comuns e pozolanas pouco reativas. As pozolanas, como a sílica ativa e as cinzas volantes, reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos cimentantes adicionais que contribuem para a densificação da matriz e o aumento da resistência. Já os materiais como a escória de alto-forno apresentam reatividade latente, necessitando de ativadores para desenvolver suas propriedades hidráulicas (Mehta e Monteiro, 2014).

As adições inertes, como o pó de granito não reagem quimicamente, mas atuam como filler, preenchendo os vazios entre as partículas, reduzindo o calor de hidratação, e melhorando a estrutura do concreto (Silva *et al.*, 2022).

Lima (2022), destaca a importância da utilização de adições minerais na produção de dormentes, principalmente quando se busca melhorar a durabilidade frente a ambientes agressivos, como regiões com alta umidade, variações térmicas e exposição constante à água. Segundo o autor, o uso adequado de adições minerais reduz a permeabilidade do concreto e aumenta a resistência à penetração de agentes

agressivos, o que é essencial para garantir a integridade da estrutura ao longo do tempo.

Entre as adições estudadas no Brasil, o pó de granito vem ganhando destaque como alternativa viável e sustentável. Esse material é um resíduo gerado durante o polimento e beneficiamento de rochas ornamentais, sendo normalmente descartado de forma inadequada, o que gera impactos ambientais relevantes. Segundo Alves (2008) e Cardoso (2019) a substituição parcial de cimento ou de agregados miúdos por esse resíduo, demonstrando que, quando bem dosado, o pó de granito contribui para melhorar a trabalhabilidade, reduzir a porosidade e até aumentar a resistência mecânica do concreto.

Para que uma adição mineral seja considerada tecnicamente viável, é necessário que ela atenda aos requisitos definidos pela ABNT NBR 12653:2014 – Materiais pozolânicos – Requisitos, que inclui ensaios de composição química, finura, atividade pozolânica, perda ao fogo, entre outros. No caso de adições inertes, mesmo que não sejam submetidas à norma como pozolanas, é essencial realizar ensaios laboratoriais para avaliar seu impacto nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

## **2.5 Concreto de alto desempenho**

O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é um material avançado que apresenta propriedades superiores ao concreto convencional, como alta resistência à compressão, durabilidade excepcional, baixa permeabilidade e elevada compacidade. Seu desenvolvimento representa um marco na engenharia civil moderna, possibilitando o projeto de estruturas mais esbeltas, duráveis e sustentáveis, sendo amplamente utilizado na fabricação de elementos pré-moldados (Mehta e Monteiro, 2014).

O CAD é caracterizado por uma microestrutura densificada, obtida por meio da utilização de agregados selecionados, baixos teores de água, adições minerais (Cimentantes e pozolanas) e aditivos plastificantes. Essa composição permite obter concretos com resistência à compressão superior a 50 MPa, podendo atingir até 100 Mpa ou mais, em aplicações específicas (Silva *et al.*, 2022).

A principal vantagem do CAD está na sua durabilidade, sendo mais resistente à penetração de agentes agressivos, como cloretos, sulfatos e dióxido de carbono,

fatores que estão diretamente relacionados à vida útil da estrutura. De acordo com a dissertação de Lima (2022), a baixa permeabilidade do CAD impede a progressão de fissuras e a corrosão das armaduras, reduzindo significativamente os custos com manutenção e aumentando a confiabilidade estrutural.

O uso do CAD na produção de pré-moldados está associado à cura térmica acelerada, prática comum na indústria. A baixa relação água/cimento (frequentemente em torno de 0,35) aliada ao uso de aditivos, permite ganhos de resistência em poucas horas, viabilizando ciclos produtivos mais rápidos e eficientes. Conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 11709:2015, que determina os valores mínimos de resistência à compressão requeridos para a liberação da protensão em dormentes, essa característica torna-se claramente identificável (Lima, 2022; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).

Outro diferencial do CAD é sua flexibilidade em aceitar materiais alternativos, especialmente adições minerais que contribuem para a sustentabilidade do concreto. De acordo com Alves (2008) e Cardoso (2019) o uso do pó de granito como adição ou substituição parcial dos agregados miúdos no traço do CAD, é uma opção viável em algumas regiões, visto que é amplamente disponível em regiões com indústrias de rochas ornamentais e apresenta potencial técnico ambiental relevante, promovendo a reutilização de subprodutos industriais e reduzindo o impacto ambiental da produção de concreto.

A presença do pó de granito no CAD pode contribuir para a melhora da densificação da matriz cimentícia e redução da porosidade, desde que sua dosagem seja corretamente ajustada com o uso de aditivos químicos. Além disso, a adição de resíduos finos exige controle rigoroso da água total na mistura, evitando segregações e perdas de resistência (Silva *et al.*, 2022).

#### 2.5.1 Pó de granito integrado ao CAD

A crescente demanda por soluções sustentáveis na construção civil tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas voltadas à reutilização de resíduos industriais em materiais de construção. Dentre esses resíduos, destaca-se o pó de granito, proveniente do beneficiamento de rochas ornamentais, cuja disposição inadequada tem gerado sérios impactos ambientais, como o assoreamento de corpos hídricos, poluição do solo e comprometimento de lençóis freáticos (Alves, 2008). A

figura 5 apresenta uma jazida de extração de granito localizada no sul do estado de minas gerais.

Figura 5 - Jazida de extração de granito.



Fonte: Grupo paraná (2025).

O uso de resíduos sólidos na construção civil, especialmente como adições ou substituições em concretos estruturais, tem sido objeto de diversos estudos que buscam aliar desempenho técnico à sustentabilidade ambiental. O pó de granito, um resíduo gerado no processo de beneficiamento de rochas ornamentais, desponta como alternativa viável na produção de concretos de alto desempenho (CAD), contribuindo para a redução da extração de recursos naturais e do impacto ambiental associado ao descarte inadequado de resíduos industriais (Alves, 2008).

Caracterizado por elevada finura e baixa reatividade pozolânica, o pó de granito atua predominantemente como filler inerte, otimizando a compactação da matriz cimentícia e reduzindo os vazios capilares do concreto. Essa melhoria na microestrutura está associada ao aumento da durabilidade e à menor permeabilidade do material endurecido, requisitos essenciais para elementos pré-moldados expostos a solicitações intensas, como os dormentes ferroviários (Cardoso, 2019).

Segundo Gonçalves (2000), a presença de partículas finas no concreto pode contribuir significativamente para a redução da porosidade e da permeabilidade,

desde que sejam compatibilizadas com a dosagem e os demais componentes da mistura.

Estudos experimentais realizados por Mendes (2019) mostraram que a substituição parcial da areia por pó de granito em percentuais de até 15% manteve ou até melhorou as propriedades do concreto auto adensável no estado fresco, a resistência quanto a compressão e à tração por compressão diametral não obtiveram ganhos, a trabalhabilidade quando associados ao uso de aditivos hiperplastificantes obtiveram bons resultados. Além disso, observou-se redução na absorção de água e melhora na coesão e fluidez da mistura entre 15% e 30% de substituição, o que é especialmente importante em concretos autoadensáveis e de alto desempenho, usados em pré-moldados.

Segundo Alves (2008), a adição do pó de granito ao concreto convencional, sem substituição dos agregados, resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas do material, especialmente na resistência à compressão axial. O estudo demonstrou que o comportamento positivo está associado ao efeito de preenchimento proporcionado pelas partículas finas do pó de granito, que atuam reduzindo os vazios capilares e aumentando a densidade da matriz cimentícia. Esse aprimoramento estrutural favorece a coesão interna do concreto e melhora a transferência de esforços, refletindo diretamente em seu desempenho mecânico. Alves (2008) ressalta ainda que, quando incorporado em teores adequados, o pó de granito não compromete a trabalhabilidade da mistura, podendo inclusive contribuir para a estabilidade e uniformidade do concreto no estado fresco. Dessa forma, a pesquisa indica que a utilização controlada desse resíduo industrial representa uma alternativa viável para o aprimoramento do concreto convencional, agregando valor a um subproduto amplamente disponível e contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil.

Do ponto de vista ambiental, a incorporação do pó de granito no concreto se alinha aos princípios da economia circular e da sustentabilidade, permitindo o reaproveitamento de um resíduo amplamente disponível em polos industriais do Brasil, como Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia. Alves (2008) estima que cerca de 25% a 30% do volume extraído das rochas ornamentais é convertido em resíduo, cuja destinação inadequada pode causar impactos como assoreamento, poluição do solo e das águas subterrâneas. Nesse sentido, Gonçalves (2000) reforça a importância da

valorização de resíduos industriais como estratégia para mitigar os impactos ambientais da construção civil.

A aplicação do pó de granito na indústria exige, no entanto, rigoroso controle tecnológico. Como exemplo para o rigor na caracterização dos materiais, Lima (2022) aponta que falhas patológicas em dormentes podem estar relacionadas à má qualidade dos agregados e à presença de impurezas, o que reforça a necessidade de caracterização prévia do resíduo e do controle da sua granulometria. A norma ABNT NBR 7211:2022 estabelece critérios para a utilização de agregados em concretos, enquanto a NBR 12653:2014 orienta sobre os requisitos mínimos para materiais pozolânicos e adições minerais, mesmo no caso de materiais inertes como o pó de granito (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

Além disso, o uso de materiais de elevada superfície específica, como o pó de granito, tende a aumentar a demanda de água da mistura, o que pode comprometer a relação água/cimento se não for compensado com o uso de aditivos apropriados. Conforme observado por Silva *et al.* (2022), o uso de plastificantes é essencial nesses casos, permitindo manter a trabalhabilidade sem prejuízo à resistência e à durabilidade do concreto, especialmente em misturas com baixa relação a/c, como as empregadas na produção de concreto de alto desempenho.

Em síntese, a aplicação do pó de granito em concretos de alto desempenho para indústria de pré-moldados mostra-se tecnicamente promissora e ambientalmente desejável. Desde que adequadamente caracterizado e dosado, o resíduo pode contribuir para a melhoria das propriedades do concreto e para a sustentabilidade do processo construtivo, atendendo às exigências normativas e às condições operacionais conforme destacado nos estudos de Alves (2008) e Cardoso (2019).

### 3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza básica, exploratória, experimental e laboratorial, desenvolvido por meio da realização de ensaios laboratoriais voltados à caracterização dos materiais constituintes do concreto. O trabalho tem como proposta a utilização do pó de granito como substituto parcial do agregado miúdo (areia natural) em concretos de alto desempenho (CAD), com o intuito de avaliar o comportamento e o desempenho das misturas nos estados fresco e endurecido.

A metodologia adotada baseou-se em um método empírico de dosagem, uma vez que o objetivo deste trabalho não foi definir uma dosagem ótima, mas sim realizar um comparativo entre diferentes traços de concreto. A escolha dessa abordagem fundamenta-se no conceito de empacotamento granular, que orienta a avaliação das misturas considerando suas propriedades de fluxo e o desempenho mecânico resultante do compósito. Esse procedimento possibilita a determinação da composição ideal do CAD, levando em conta as interações de superfície entre as partículas sólidas e os efeitos de adsorção de água, aspectos essenciais para a obtenção de maior compacidade e estabilidade da mistura.

O objetivo principal consiste em analisar a influência da substituição parcial do agregado miúdo pelo pó de granito, uma vez que, devido à sua baixa granulometria e reduzida reatividade química, o material apresenta potencial para atuar como preenchedor de vazios na matriz cimentícia, promovendo o aumento da densidade, da compacidade e, conseqüentemente, da resistência mecânica do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a dosagem do concreto consiste na definição da combinação adequada entre cimento, agregados, água, adições e aditivos, de modo a produzir um material que atenda às especificações de desempenho estabelecidas. Os autores destacam que, embora existam princípios técnicos bem definidos, o processo de dosagem envolve ajustes finos e experiência prática, sendo por isso considerado uma verdadeira arte, mais do que uma ciência estritamente exata.

Diversos procedimentos e métodos para o cálculo das dosagens do concreto são utilizados em diferentes países, porém a aplicação de abordagens puramente matemáticas para definir as proporções adequadas dos materiais em uma mistura

nem sempre é eficiente. Isso ocorre porque os componentes do concreto apresentam grande variabilidade em suas características físicas e químicas, inviabilizando a adoção de fórmulas rígidas. Por essa razão, Mehta e Monteiro (2014) destacam que inúmeros métodos empíricos foram desenvolvidos com base em extensos bancos de dados e em ensaios realizados com materiais locais, tornando possível ajustar as misturas de forma mais realista e compatível com as condições práticas de cada região. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o processo de dosagem do concreto envolve nove passos fundamentais, que orientam a definição das proporções adequadas dos materiais constituintes para atender às especificações de desempenho previstas.

Passo 1 consiste na escolha do abatimento, adotando-se o valor mais baixo possível que ainda permita o lançamento e a compactação sem ocorrência de segregação.

Passo 2, determina-se a dimensão máxima do agregado graúdo, sendo preferível o uso de partículas maiores para reduzir os vazios e, conseqüentemente, a quantidade de argamassa requerida.

O Passo 3 refere-se à estimativa do consumo de água e do teor de ar, uma vez que o abatimento desejado depende essencialmente da dimensão máxima dos agregados e da eventual incorporação de ar.

Passo 4, define-se a relação água/cimento, recomendando-se estabelecer experimentalmente a correlação entre resistência e relação a/c para os materiais utilizados. A partir disso,

Passo 5 permite estimar o consumo de cimento, dividindo-se a quantidade de água obtida no passo anterior pela relação água/cimento selecionada.

O Passo 6 trata da estimativa do consumo de agregado graúdo, sugerindo-se utilizar o maior volume possível desse material no estado seco e compactado para otimizar economicamente a mistura.

Passo 7, determina-se a quantidade de agregado miúdo, calculada por diferença, utilizando-se os métodos por “peso” ou “volume” apresentados pelos autores.

Passo 8 exige o ajuste da umidade dos agregados, uma vez que, em condições reais de estocagem, esses materiais apresentam variações significativas.



Passo 9 corresponde ao ajuste da mistura experimental, visto que as proporções teóricas devem sempre ser verificadas em laboratório, a fim de corrigir possíveis discrepâncias.

Diante do exposto, procedeu-se à seleção e à quantificação dos materiais utilizados para a moldagem dos traços de concreto avaliados neste estudo. A tabela 1 descreve a quantidade de material utilizado para a moldagem dos traços produzidos, considerando o volume de 4 corpos de prova cilíndricos de acordo com a ABNT NBR 5738:2015, com 10 centímetros de diâmetro na base e altura de 20 centímetros.

Tabela 1 - Quantitativo de material por traço.

Dosagem de cada traço a ser testado (kg)							
	Cimento	Areia	Brita	A/C	Sílica Ativa	Aditivo (g)	Granito
Ref.	2,00	4,00	7,30	0,35	0,15	0,20	0,00
Amostra 1	2,00	3,60	7,30	0,35	0,15	0,20	0,40
Amostra 2	2,00	3,20	7,30	0,35	0,15	0,20	0,80
Amostra 3	2,00	2,80	7,30	0,35	0,15	0,20	1,20

Fonte: O autor (2025).

### 3.1 Materiais utilizados

Neste tópico, será apresentada a metodologia adotada para a coleta, preparação e realização dos ensaios dos materiais constituintes do concreto, descrevendo de forma detalhada os procedimentos executados para garantir a caracterização adequada e a confiabilidade dos resultados obtidos.

#### 3.1.1 Pó de granito

Foi coletado uma amostra do material utilizado com aproximadamente 2,5kg em uma marmoraria localizada no município de Campanha – MG, apresentando-se inicialmente na forma de lama residual proveniente do processo de beneficiamento de rochas ornamentais. Posteriormente, o resíduo foi submetido a um processo de secagem em estufa, mantida a uma temperatura controlada de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , até apresentar massa constante. Todo o procedimento foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS), assegurando

condições padronizadas e controle adequado durante a preparação do material. O comparativo entre a Figura 6 e 7 apresenta o aspecto do material antes e após o processo de secagem em estufa, evidenciando as alterações em sua coloração e textura decorrentes da remoção da umidade.

Figura 6 - Amostra úmida do granito.



Fonte: O autor (2025).

Figura 7 - Amostra seca após estufa.



Fonte: O autor (2025).

#### 3.1.1.1 Destorroamento do material

Após a completa secagem do material em estufa, foi iniciado o processo de destorroamento, etapa necessária para posterior avaliação, pesagem e dosagem do

resíduo. O material foi peneirado na malha de 75 µm, com o objetivo de reter possíveis impurezas ou partículas contaminantes presentes na amostra. Durante o procedimento, não foram observados materiais contaminantes, tampouco partículas com granulometria superior à da peneira utilizada. A Figura 8 apresenta o processo de destorroamento manual da amostra, realizado cuidadosamente a fim de garantir a homogeneização do material antes das etapas subsequentes de caracterização.

Figura 8 - Destorroamento da amostra.



Fonte: O autor (2025).

Concluído o processo de destorroamento, procedeu-se à separação do material destinado ao ensaio de massa unitária conforme ABNT NBR 16972:2021 e massa específica. Utilizou-se da seguinte fórmula para realização dos cálculos utilizados para a determinação da massa do agregado.

Determinação da massa unitária:

$$pap = \frac{Mar - Mr}{V} = 866,67 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

$pap$  é a massa unitária do agregado, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ );

$Mar$  é a massa do recipiente com o agregado, expressa em quilogramas (kg);

$Mr$  é a massa do recipiente vazio, expresso em quilogramas (kg);

$V$  é o volume do recipiente, expresso em metros cúbicos ( $\text{m}^3$ ).

Determinação da massa específica:

$$\gamma = \frac{Ma}{V_t - V_g} = 2.600 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

$\gamma$  é a massa específica, expressa em gramas por  $\text{cm}^3$  ( $\text{g/cm}^3$ );

$Ma$  é a massa da amostra, expressa em gramas (g);

$V_t$  é o volume total da água mais a amostra, expressa em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ );

$V_g$  é o volume inicial de água, expressa em m centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ ).

### 3.1.2 Cimento

O cimento utilizado para a moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à tração axial foi do tipo CP V-ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), fornecido pela instituição de ensino UNIS. Para a realização dos ensaios de avaliação do comportamento pozolânico do material, empregou-se o cimento CP II-F (Cimento Portland Composto com Filler Calcário), adquirido em uma distribuidora localizada no município de Campanha – MG.

### 3.1.3 Agregados

Neste tópico, são descritos os ensaios realizados nos agregados miúdos e graúdos, contemplando os procedimentos adotados para a caracterização física e granulométrica desses materiais, de acordo com as normas técnicas vigentes.

#### 3.1.3.1 Ensaios em agregados miúdos

O agregado miúdo, denominado “areia média”, utilizado na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência à tração axial, foi fornecido pela instituição de ensino UNIS. O agregado miúdo foi pesado e classificado de acordo com a sua granulometria, em conformidade com a ABNT NBR 7211;2022. Para tanto, utilizou-se uma mesa vibratória equipada com peneiras de série normal conforme

figura 9, permitindo a separação das frações granulométricas e a garantia de que o material atendesse aos requisitos normativos para a moldagem dos corpos de prova.

Figura 9 - Aparelho vibratório usado para ensaio de granulometria.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 10 apresenta a amostra de areia após o processo de peneiramento, etapa fundamental para a caracterização granulométrica do material. Nesse procedimento, ocorre a separação das partículas em frações de diferentes dimensões, permitindo a obtenção de uma distribuição mais uniforme e representativa do agregado miúdo. Essa preparação é essencial para garantir a precisão dos resultados nos ensaios subsequentes, assegurando que o material analisado atenda aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis.

Figura 10 - Amostra separada após ensaio.



Fonte: O autor (2025).

Com base nos valores obtidos por meio do ensaio de granulometria, foi possível construir a curva granulométrica dos agregados, em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 17054:2022. Essa análise permite avaliar a distribuição de tamanhos das partículas, fornecendo informações essenciais para a determinação da dosagem adequada e otimização da compacidade das misturas. A tabela 2 apresenta os dados obtidos nos ensaios de granulometria, demonstrando a distribuição das partículas e o comportamento dos agregados analisados.

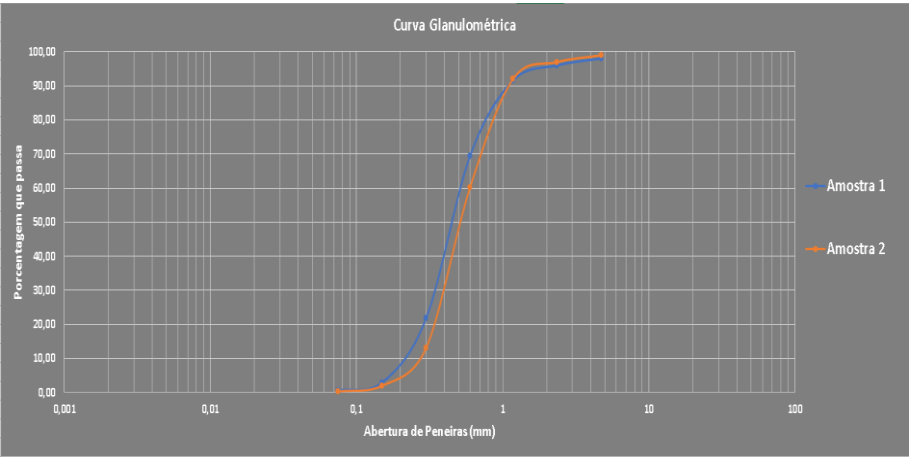
Tabela 2 - Dados obtidos.

Amostra 1			Amostra 2			% Retida	% Retida
Peneira	Peso retido (g)	%Retida	Peneira	Peso retido (g)	%Retida	Média	Acumulada
4,75	19,53	1,95	4,75	10,75	1,08	15,14	1,51
2,36	20,19	2,02	2,36	19,79	1,98	19,99	3,51
1,18	44,48	4,45	1,18	50,00	5,00	47,24	8,24
0,6	221,56	22,15	0,6	317,79	31,80	269,675	35,22
0,3	476,93	47,69	0,3	471,24	47,16	474,085	82,64
0,15	188,17	18,82	0,15	110,51	11,06	149,34	97,58
0,075	22,80	2,28	0,075	16,50	1,65	19,65	99,54
Fundo	6,41	0,64	Fundo	2,76	0,28	4,585	100,00
Total	1000,07	100,00	Total	999,34	100,00		
	MF	2,20		MF	2,37		
	D.M.C	4,75		D.M.C	4,75		

Fonte: O autor (2025).

O gráfico 1 apresenta o gráfico da curva granulométrica, elaborado a partir dos dados obtidos nos ensaios de granulometria, permitindo a análise da distribuição dos tamanhos de partículas do agregado.

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: O autor (2025).

Foram realizados ensaios nos agregados para determinação de suas propriedades físicas essenciais ao CAD. A massa específica e a massa unitária dos agregados foram avaliadas em conformidade com a ABNT NBR 16916:2021, enquanto o teor de material pulverulento foi determinado de acordo com a ABNT NBR 16973:2021. Esses ensaios permitem caracterizar adequadamente os agregados, garantindo a qualidade e a confiabilidade das misturas de concreto utilizadas na pesquisa.

Determinação da massa específica:

$$\gamma = \frac{Ma}{V_t - V_g} = 2.665 \text{ kg/m}^3 \quad (3)$$

Foi realizada a determinação da massa unitária do agregado miúdo, seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16972:2021. Este ensaio permite avaliar a densidade aparente do agregado, fornecendo informações importantes para o dimensionamento das dosagens e para o controle de qualidade do concreto.

Determinação da massa unitária:

$$pap = \frac{Mar - Mr}{V} = 1.408 \text{ kg/m}^3 \quad (4)$$

Foram realizados os ensaios para determinação do teor de material pulverulento conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16973:2021. Esse ensaio permite quantificar a presença de partículas extremamente finas aderidas à superfície dos agregados, as quais podem interferir na aderência entre a pasta de cimento e os grãos de agregado, comprometendo a resistência mecânica, a durabilidade e a trabalhabilidade do concreto.

Cálculo do teor de material pulverulento:

$$m = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100 = 1,13\% \quad (5)$$



m é a quantidade de material mais fino que a peneira de 75  $\mu$ m, por lavagem, expressa em porcentagem (%);

$m_i$  é a massa inicial da amostra seca, expressa em gramas (g);

$m_f$  é a massa da amostra seca, expressa em gramas(g).

Figura 11 - Características do agregado miúdo.

Agregado Miúdo	
Módulo de finura (NBR NM 248)	2,29
Massa unitária (NBR NM 45)	1408 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica (NBR NM 52)	2,66 kg/m <sup>3</sup>
Teor de material pulverulento (NBR NM 44)	1,13%

Fonte: O autor (2025).

### 3.1.3.2 Ensaios em agregados graúdos

O agregado graúdo, empregado na moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à tração axial, foi fornecido pela instituição de ensino UNIS, atendendo aos requisitos de qualidade e padronização necessários para a execução dos ensaios laboratoriais. A Figura 12 mostra o agregado graúdo sendo despejado nas peneiras, etapa inicial do ensaio de análise granulométrica para determinação da distribuição das partículas.

Figura 12 - Amostra de agregado graúdo.

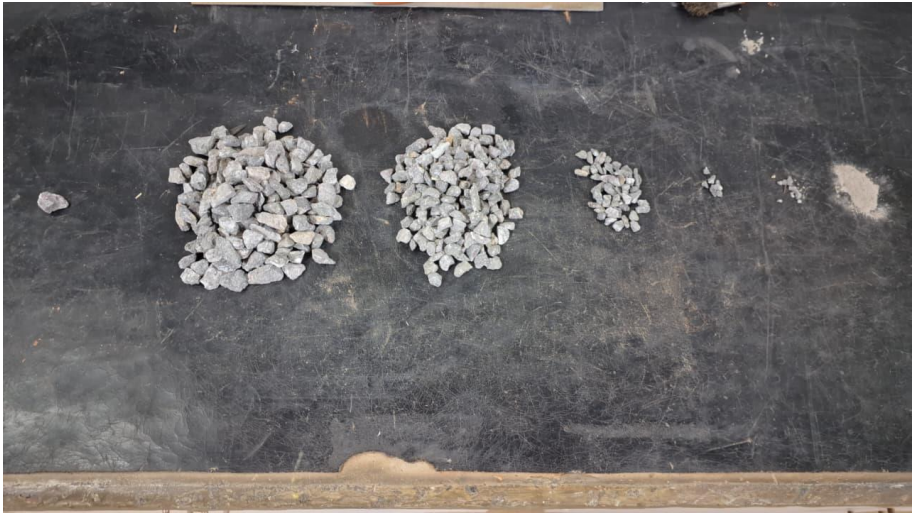


Fonte: O autor (2025).



O agregado graúdo foi peneirado e classificado de acordo com a sua granulometria, em conformidade com a norma ABNT NBR 17054:2022. Para a realização do ensaio, adotaram-se os mesmos procedimentos aplicados ao ensaio do agregado miúdo (areia), utilizando-se uma mesa vibratória equipada com peneiras de série normal. Esse processo permitiu a separação adequada das frações granulométricas, garantindo que o material atendesse aos requisitos normativos necessários para a moldagem dos corpos de prova. A Figura 13 ilustra o material separado após o ensaio de granulometria, evidenciando as frações retidas em cada peneira e a distribuição das partículas do agregado analisado.

Figura 13 - Amostra do agregado graúdo.



Fonte: O autor (2025).

Na tabela 3 são apresentados os dados obtidos no ensaio de granulometria, evidenciando a caracterização do tamanho das partículas do agregado.

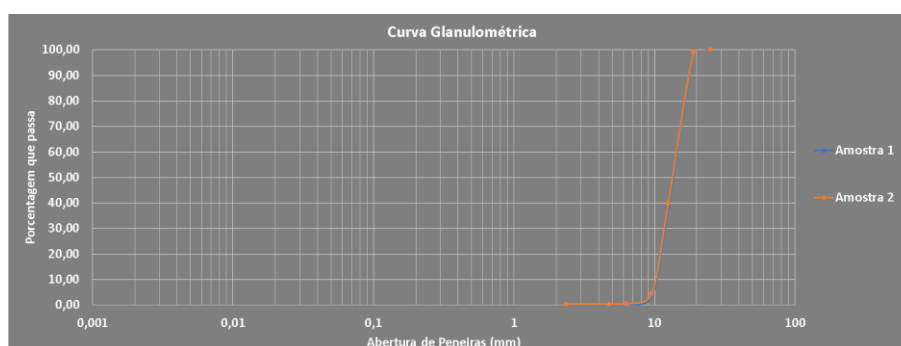
Tabela 3 - Dados obtidos do ensaio.

Amostra 1			Amostra 2			% Retida	% Retida
Peneira	Peso retido (g)	%Retida	Peneira	Peso retido (g)	%Retida	Média	Acumulada
25	0,00	0,00	25	0,00	0,00	0	0,00
19	10,93	0,73	19	12,47	0,83	11,7	0,78
12,5	917,86	61,14	12,5	890,85	59,35	904,355	61,02
9,5	520,88	34,70	9,5	535,26	35,66	528,07	96,20
6,3	44,65	2,97	6,3	53,43	3,56	49,04	99,47
4,75	1,84	0,12	4,75	2,83	0,19	2,335	99,62
2,36	0,98	0,07	2,36	1,25	0,08	1,115	99,70
Fundo	4,06	0,27	Fundo	4,98	0,33	4,52	100,00
<b>Total</b>	<b>1501,20</b>	<b>100,00</b>	<b>Total</b>	<b>1501,07</b>	<b>100,00</b>		
	D.M.C	19,00		D.M.C	19,00		

Fonte: O autor (2025).

Com base nos valores obtidos por meio do ensaio de granulometria, foi possível construir a curva granulométrica dos agregados, em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 17054:2022. Essa análise permite avaliar a distribuição de tamanhos das partículas, fornecendo informações essenciais para a determinação da dosagem adequada e otimização da compacidade das misturas. O gráfico da curva granulométrica, representado na Figura 17, fornece informações sobre a distribuição granulométrica do agregado.

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: O autor (2025).

Foram realizados ensaios no agregado graúdo com o objetivo de determinar suas propriedades físicas fundamentais para a produção do concreto. A massa específica e a massa unitária foram determinadas conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16917:2021 e ABNT NBR 16972:2021, enquanto o teor de material pulverulento foi avaliado de acordo com a ABNT NBR 16973:2021. A execução desses ensaios possibilitou a caracterização adequada do agregado graúdo, assegurando a qualidade, a uniformidade e a confiabilidade das misturas de concreto desenvolvidas durante a pesquisa.

Determinação da massa específica:

$$\gamma = \frac{Ma}{V_t - V_g} = 2.710 \text{ kg/m}^3 \quad (6)$$

Foi realizada a determinação da massa unitária do agregado miúdo, seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 17054:2022. Este ensaio permite avaliar a densidade aparente do agregado, fornecendo informações importantes para o dimensionamento das dosagens e para o controle de qualidade do concreto.

Determinação da massa unitária:

$$pap = \frac{Mar - Mr}{V} = 1.641 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

Foram realizados os ensaios para determinação do teor de material pulverulento conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 16973:2021. Esse ensaio é importante porque permite quantificar a presença de partículas extremamente finas aderidas à superfície dos agregados, as quais podem interferir na aderência entre a pasta de cimento e os grãos de agregado, comprometendo a resistência mecânica, a durabilidade e a trabalhabilidade do concreto.

$$m = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100 = 0,24\% \quad (8)$$

Figura 14 - Características do agregado graúdo

Agregado Graúdo	
Dimensão máxima característica (NBR NM 248)	19 mm
Massa unitária (NBR NM 45)	1641 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica (NBR NM 52)	2,71 kg/m <sup>3</sup>
Teor de material pulverulento (NBR NM 44)	0,24%

Fonte: O autor (2025).

### 3.1.4 Adição mineral e aditivo plastificante

A amostra de adição (sílica ativa), bem como o aditivo plastificante de terceira geração à base de policarboxilatos, foram fornecidos pela empresa CONPREM – Concreto Pré-Moldado, unidade de Campanha – MG, por meio de doação. Ressalta-se que a empresa já utiliza esses materiais na produção de seus concretos, o que assegura a eficácia e a aplicabilidade prática dos aditivos. No presente estudo, esses

produtos foram empregados na formulação do concreto de alto desempenho (CAD), com o objetivo de otimizar as propriedades reológicas e mecânicas da mistura, garantindo maior trabalhabilidade, densidade, compacidade e resistência mecânica do concreto produzido.

### **3.2 Classificação pozolânica**

Para a determinação da atividade pozolânica da adição proveniente do beneficiamento do granito, será empregado o método físico, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5752:2014.

Foram moldados três corpos de prova com dimensões de 5 centímetros de diâmetro e 10 centímetros de altura para a amostra de argamassa A, composta por 100% de cimento CP II-F 32, areia normal e água, não foram usados aditivos plastificantes e três corpos de prova adicionais com argamassa B com as mesmas dimensões, contendo substituição de 25% do volume de cimento pela adição de pó de granito. Para que se comprove atividade pozolânica deve-se obter como resultado nas amostras com substituição no mínimo 75% das resistências das amostras de referência. As amostras devem ficar em ambiente com temperatura controlada por 28 dias até a realização dos ensaios de compressão axial.

Os resultados obtidos serão comparados entre argamassa A e B para verificar a influência da adição de pó de granito nas propriedades do concreto. A análise estatística descritiva será empregada para validação e interpretação dos dados.

Conforme estabelecido na ABNT NBR 5752:2014, que trata da determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias, o material foi separado de acordo com suas massas individuais, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Materiais para ensaio.

**Tabela 1 – Quantidade de material, em massa, para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos**

Material	Massa g	
	Argamassa A	Argamassa B <sup>a</sup>
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material pozolânico	–	156 ± 0,2
Areia normal <sup>b</sup>	1872,0	1872,0
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo superplastificante	–	<sup>c</sup>

<sup>a</sup> O material pozolânico e o cimento CP II-F-32 devem ser previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min, aproximadamente.

<sup>b</sup> Quatro frações de (468,0 ± 0,3) g.

<sup>c</sup> Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência normal da Argamassa B em ± 10 mm do obtido com a argamassa A, determinado conforme ABNT NBR 7215:1997, Anexo B. O aditivo deve ser adicionado na água de amassamento diretamente na cuba. O uso de aditivo é dispensável quando o índice de consistência da argamassa B for igual (± 10 mm) ou maior que o da argamassa A.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014).

A areia normal, empregada nos ensaios de atividade pozolânica, foi fornecida pela instituição de ensino UNIS, que as disponibilizou devidamente armazenadas em recipientes plásticos, conforme ilustrado na Figura 16 e 17, assegurando a preservação de suas propriedades físicas até o momento da utilização.

Figura 16 - Areia normal armazenada.



Fonte: O autor (2025).

Figura 17 - Amostra retirada para ensaio.



Fonte: O autor (2025).

A argamassa foi homogeneizada com o cimento, água e no caso da argamassa B com o material pozolânico, com o auxílio de um misturador, conforme ilustrado na Figura 18, a fim de garantir uma mistura uniforme e estável dos materiais constituintes. Esse procedimento é essencial para assegurar a distribuição homogênea das partículas e evitar a formação de aglomerados, contribuindo assim para a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios subsequentes.

Figura 18 - Misturador utilizado.



Fonte: O autor (2025).



Após o processo de mistura, o material foi vertido nos moldes e mantido em repouso por 24 horas conforme a figura 19, período após o qual os corpos de prova foram desmoldados e encaminhados para cura úmida, permanecendo submersos por 28 dias até a data prevista para a realização dos ensaios de resistência.

Figura 19 - Corpos de prova para atividades pozolânicas.



Fonte: O autor (2025).

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de compressão axial dos corpos de prova, foi possível avaliar a atividade pozolânica do pó de granito, verificando sua potencial contribuição para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto. Os resultados decorrentes dos ensaios experimentais estão descritos no Tópico 4 – Resultados Obtidos.

### 3.3 Moldagem dos traços

**Preparo dos Traços de Concreto:** Foram moldados quatro traços de concreto, sendo um traço de referência composto por 100% de areia natural e três traços com substituições parciais da areia por pó de granito, nas proporções de 10%, 20% e 30%, respectivamente. As dosagens foram realizadas pelo método empírico e ajustadas de forma a identificar parâmetros comparativos, permitindo determinar qual nível de substituição se aproxima do desempenho ideal em termos de trabalhabilidade, compacidade e resistência do concreto.

Foram realizados ensaios no estado endurecido após a realização da cura padrão de 7 e 28 dias, os corpos de prova serão submetidos aos ensaios de

resistência à compressão axial, conduzidos em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 5739:2018.

Esses ensaios têm como objetivo avaliar o desempenho mecânico do concreto, permitindo a comparação entre os diferentes traços e a determinação do efeito da substituição parcial da areia natural pelo pó de granito. A realização dos testes em diferentes idades de cura possibilita analisar o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo, fornecendo informações importantes sobre a evolução das propriedades do concreto e a eficácia das adições utilizadas na mistura.

Os traços de concreto foram produzidos com o auxílio de uma betoneira, no Laboratório de Materiais do UNIS. Durante o preparo das misturas, constatou-se a necessidade de reajuste da quantidade de água em função das características dos agregados utilizados. Para tanto, foram adotadas as seguintes relações água/cimento (a/c): 0,45 para o traço com 100% de areia natural, 0,50 para o traço com 10% de substituição por pó de granito, 0,55 para 20% de substituição e 0,60 para 30% de substituição, de modo que o abatimento no ensaio de consistência (slump test), realizado conforme a ABNT NBR 16889:2020, permanecesse próximo ao valor de referência de  $70 \pm 10$  mm. As Figuras 20 e 21 ilustram a coesão obtida nas misturas, evidenciando a consistência do concreto para moldagem dos corpos de prova.

Figura 20 – Consistência do concreto no estado fresco.



Fonte: O autor (2025).



Figura 21 - Consistência do concreto.



Fonte: O autor (2025).

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram mantidos em repouso por 24 horas no Laboratório de Materiais do UNIS, em condições ambientais controladas, até o momento do desmolde. Em seguida, os corpos de prova foram encaminhados à câmara úmida, onde permaneceram submersos em água saturada com cal até a data de realização dos ensaios, garantindo as condições adequadas de cura e desenvolvimento da resistência mecânica do concreto. A figura 22 representa os corpos de prova logo após a moldagem.

Figura 22 - Corpos de prova moldados.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 23 demonstra o procedimento de cura úmida dos corpos de prova, evidenciando as condições em que permaneceram submersos durante o período de cura até a data de realização dos ensaios.

Figura 23 - Corpos de prova submersos.



Fonte: O autor (2025).

Após o período de cura estabelecido, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova, conduzidos em conformidade com as normas técnicas vigentes. Para a execução do ensaio, utilizou-se a máquina de compressão conforme demonstrado na figura 24, disponibilizada pela instituição, devidamente calibrada e adequada às especificações normativas, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 24 - Amostra submetida ao ensaio.



Fonte: O autor (2025).

Os resultados obtidos a partir desses ensaios serão apresentados e discutidos no tópico Resultados e Discussões, possibilitando uma análise comparativa entre os diferentes traços de concreto avaliados. Essa etapa tem como finalidade verificar o comportamento mecânico e a influência das variações de traço sobre as propriedades do concreto, especialmente quanto à resistência à compressão e à eficiência das substituições propostas. A análise dos resultados permitirá, ainda, identificar tendências de desempenho associadas aos diferentes teores de pó de granito incorporados, contribuindo para a avaliação do potencial de aplicação desse resíduo como material alternativo na produção de concretos mais sustentáveis.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste tópico são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados para a atividade pozolânica e com os diferentes traços de concreto desenvolvidos ao longo da pesquisa. A análise dos dados tem como finalidade avaliar a influência das substituições propostas do concreto. Os resultados foram organizados em tabelas e gráficos, possibilitando uma comparação clara e objetiva entre o traço de referência e os traços com diferentes percentuais de substituição. Dessa forma, busca-se compreender o comportamento do concreto frente às variações na composição, destacando os efeitos da adição do pó de granito sobre seu desempenho geral.

Os ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de prova foram executados de acordo com os procedimentos descritos na ABNT NBR 5739:2018, que estabelece as condições e métodos para determinação da resistência à compressão em concretos endurecidos. Cada corpo de prova foi submetido à aplicação de carga axial crescente, até o momento da ruptura, em prensa hidráulica devidamente calibrada e de capacidade compatível com os esforços exigidos.

Durante os ensaios, foram registradas as cargas máximas de ruptura, expressas em toneladas-força (tf), para cada amostra correspondente aos diferentes traços produzidos. Esses valores possibilitam a avaliação do comportamento mecânico do concreto e servem como base para o cálculo da resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ), em megapascal (MPa), conforme os critérios normativos.

### **4.1 Atividade pozolânica**

Para a análise física da atividade pozolânica da adição, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial das amostras aos 28 dias de cura. De acordo com o critério estabelecido, a adição é considerada pozolânica quando a resistência obtida nas amostras com adição corresponde a, no mínimo, 75% da resistência apresentada pelo corpo de prova de referência, produzido apenas com cimento. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Tabela 4 - Índice de atividade pozolânica.

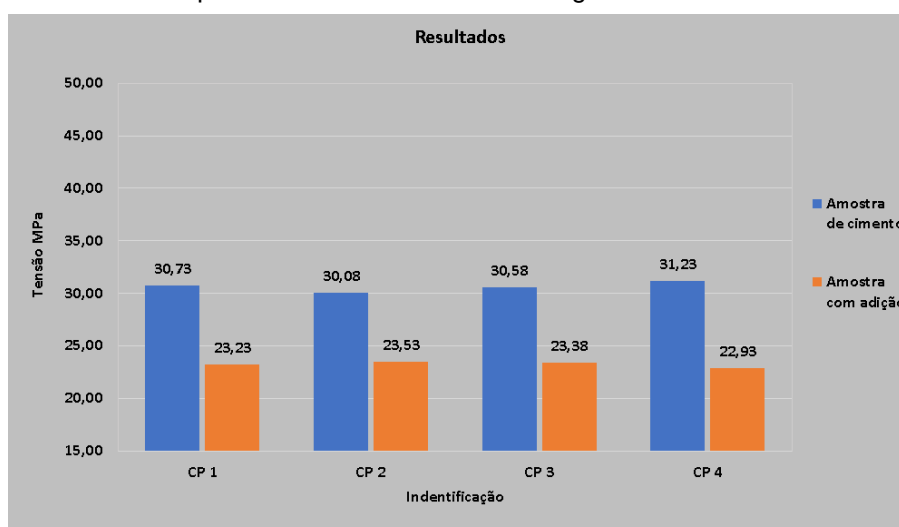
<b>Resistencia a compressão 28 dias (MPa)</b>				
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4
<b>Amostra de cimento</b>	30,73	30,08	30,58	31,23
<b>Amostra com adição</b>	23,23	23,53	23,38	22,93

Fonte: O autor (2025).

Após a obtenção dos resultados, procedeu-se à análise conforme os critérios estabelecidos pela ABNT. Verificou-se que, pelo método físico de avaliação da atividade pozolânica, o pó de granito não apresentou comportamento pozolânico, não atingindo o índice mínimo exigido pela norma. Dessa forma, o material deve ser classificado apenas como filler inerte, atuando exclusivamente no preenchimento de vazios e na melhoria da compacidade da matriz cimentícia, sem contribuição reativa.

O Gráfico 3 apresenta a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial das argamassas A (100% de cimento) com uma média de 30,65 MPa e B (25% de adição pozolânica) com uma média de 23,27 MPa, evidenciando a relação de desempenho entre a mistura de referência (A) e aquela contendo a adição de pó de granito (B).

Gráfico 3 - Comparativo entre resultados das argamassas.



Fonte: O autor (2025).

## 4.2 Avaliação dos Traços Produzidos

A tabela 5 e 6 a seguir apresenta os resultados obtidos experimentalmente, permitindo observar as variações de desempenho entre o traço de referência e os traços modificados com diferentes teores de substituição. A análise comparativa desses dados possibilita compreender de que forma a adição do resíduo influenciou a resistência mecânica e a eficiência estrutural do concreto produzido.

Tabela 5 - Resistência aos 7 dias de cura.

<b>Resistencia a compressão 7 dias (MPa)</b>				
<b>Percentual de substituição</b>	<b>0%</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>
<b>Amostra 1</b>	<b>27,90</b>	<b>27,25</b>	<b>39,94</b>	<b>42,56</b>
<b>Amostra 2</b>	<b>29,17</b>	<b>27,09</b>	<b>39,78</b>	<b>43,86</b>

Fonte: O autor (2025).

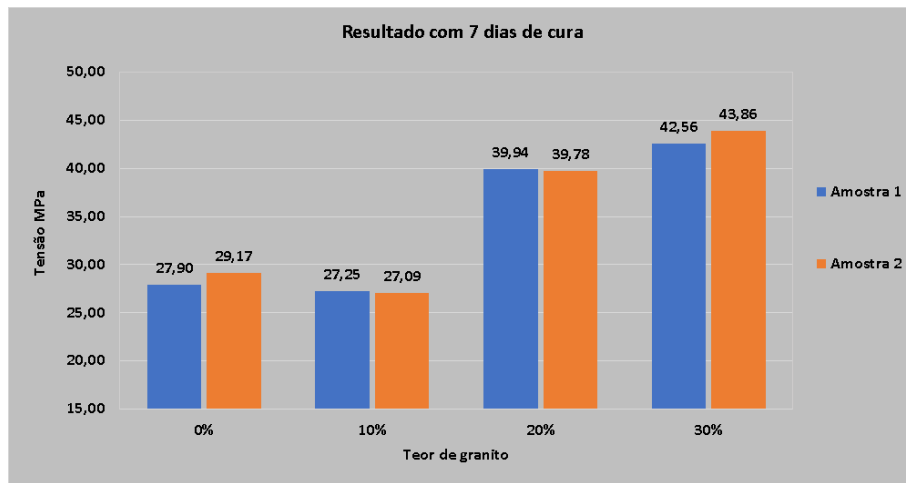
Tabela 6 - Resistência aos 28 dias de cura

<b>Resistencia a compressão 28 dias (MPa)</b>				
<b>Percentual de substituição</b>	<b>0%</b>	<b>10%</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>
<b>Amostra 3</b>	<b>44,50</b>	<b>43,23</b>	<b>55,38</b>	<b>63,68</b>
<b>Amostra 4</b>	<b>46,45</b>	<b>43,78</b>	<b>52,87</b>	<b>63,35</b>

Fonte: O autor (2025).

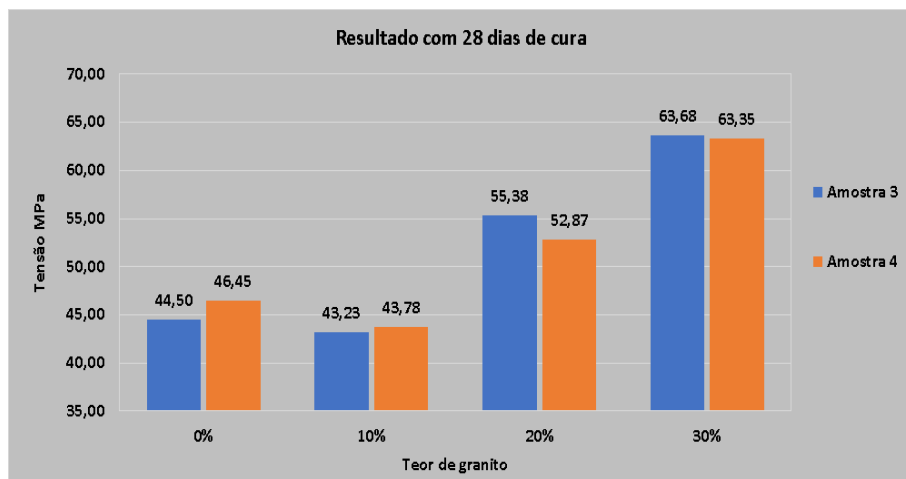
O gráfico 4 e 5 apresenta o gráfico comparativo dos resultados obtidos nos ensaios, essa representação gráfica facilita a análise das variações de resistência decorrentes dos distintos percentuais de substituição, evidenciando a influência direta dessa adição nas propriedades mecânicas do material.

Gráfico 4 - Comparativo entre amostras aos 7 dias



Fonte: O autor (2025).

Gráfico 5 - Comparativo entre amostras aos 28 dias.



Fonte: O autor (2025).

Seguindo as recomendações estabelecidas pela ABNT NBR 5739:2018, o cálculo da resistência à compressão dos corpos de prova que foi realizado por meio da seguinte expressão matemática, que relaciona a carga máxima de ruptura com a área da seção transversal do corpo de prova.

Cálculo da resistência:

$$f_c = \frac{4F}{\pi * D^2}$$

$f_c$  é a resistência à compressão, expressa em megapascal (Mpa);

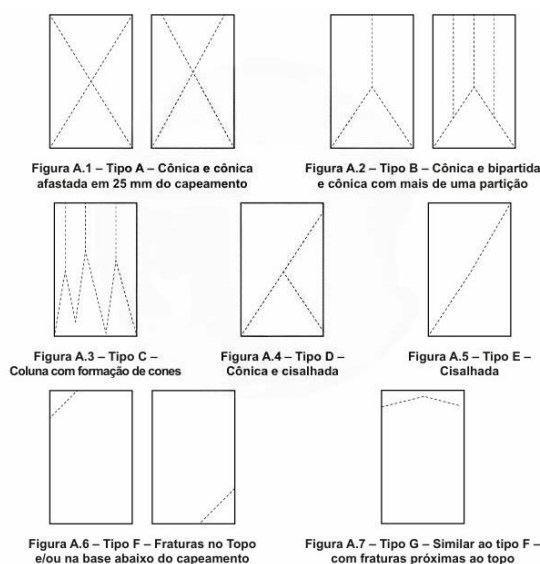


$F$  é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

De acordo com a figura 25 do Anexo A da ABNT NBR 5739:2018, foi também identificado o tipo de ruptura apresentado por cada corpo de prova durante os ensaios de compressão axial. Observou-se que o modo de falha mais recorrente entre as amostras com 7 dias de cura, foi o tipo E – ruptura cisalhada, caracterizada pela formação de planos inclinados de fratura, típicos de concretos com boa aderência interna e distribuição uniforme de tensões.

Figura 25 - Tipos de ruptura de corpos de prova.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018).

As rupturas observadas nos corpos de prova com 7 dias de cura apresentaram variações entre as séries analisadas. Para a amostra 1, os resultados obtidos foram: 0% – ruptura do tipo G; 10% – ruptura do tipo E; 20% – ruptura do tipo E; 30% – ruptura do tipo E. Já para a amostra 2, verificou-se o seguinte comportamento: 0% – ruptura do tipo E, 10% – ruptura do tipo F, 20% – ruptura do tipo E e 30% – ruptura do tipo F. Essas classificações seguem as definições estabelecidas no Anexo A da ABNT NBR 5739:2018, que padroniza os tipos de ruptura em ensaios de compressão axial de corpos de prova cilíndricos de concreto.

As rupturas observadas nos corpos de prova com 28 dias de cura apresentaram variações entre as séries analisadas. Para a amostra 3, os resultados



obtidos foram: 0% – ruptura do tipo G; 10% – ruptura do tipo G; 20% – ruptura do tipo F; 30% – ruptura do tipo F. Já para a amostra 4, verificou-se o seguinte comportamento: 0% – ruptura do tipo F, 10% – ruptura do tipo F, 20% – ruptura do tipo F e 30% – ruptura do tipo F. Essas classificações seguem as definições estabelecidas no Anexo A da ABNT NBR 5739:2018, que padroniza os tipos de ruptura em ensaios de compressão axial de corpos de prova cilíndricos de concreto.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como propósito principal avaliar a viabilidade técnica e ambiental da utilização do pó de granito como substituto parcial da areia natural na produção de concreto de alto desempenho (CAD) voltado à indústria de pré-moldados, além de investigar sua possível atividade pozolânica. A pesquisa foi desenvolvida com base em ensaios laboratoriais conduzidos no Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS), contemplando a caracterização dos materiais, a preparação dos traços e a análise do comportamento mecânico do concreto com diferentes teores de substituição.

Com base nos resultados obtidos, observou-se que o pó de granito apresenta características físicas compatíveis com o uso em concretos estruturais, atuando principalmente como material de enchimento (filler). Essa função contribui para o aumento da densidade da matriz cimentícia, para a redução da porosidade e, conseqüentemente, para uma melhor compactação e desempenho mecânico. Nos ensaios de resistência à compressão realizados aos 7 e 28 dias, os concretos produzidos com substituição parcial da areia natural apresentaram resultados satisfatórios, com o percentual de substituição de 10%, os resultados obtidos foram semelhantes aos do traço de referência, demonstrando comportamento mecânico equivalente. Já os traços com substituições de 20% e 30% apresentaram desempenho superior, registrando maiores valores de resistência à compressão, o que indica uma contribuição positiva do pó de granito para o aprimoramento das propriedades mecânicas do concreto, indicando que o resíduo pode ser incorporado de forma técnica e segura, sem comprometer as propriedades iniciais do material.

Além do aspecto técnico, o estudo reforça o potencial do pó de granito como alternativa sustentável, uma vez que promove o reaproveitamento de um resíduo amplamente gerado pela indústria de beneficiamento de rochas ornamentais, reduzindo os impactos ambientais associados ao seu descarte e diminuindo a demanda por agregados naturais. Dessa forma, a utilização desse material contribui diretamente para práticas construtivas mais sustentáveis, alinhadas aos princípios da economia circular e da conservação de recursos naturais.

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se a ampliação do estudo com a aplicação de diferentes teores de adição de pó de granito bem como uma

possível substituição total do agregado miúdo, investigação de sua influência em outras propriedades do concreto, como durabilidade, absorção de água, permeabilidade e comportamento sob ciclos de carga e variação térmica. Além disso, seria pertinente avaliar o desempenho do material em concretos auto adensáveis e em elementos estruturais reais, como dormentes e painéis pré-moldados, a fim de verificar seu comportamento em escala prática. Também é recomendável incluir análises microestruturais, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX), para compreender com maior profundidade os efeitos do pó de granito na matriz cimentícia e seu potencial reativo. Por fim, estudos futuros poderiam abordar a viabilidade econômica da utilização do pó de granito, considerando o custo de beneficiamento, transporte e incorporação do resíduo em comparação aos agregados naturais, permitindo avaliar não apenas o benefício técnico e ambiental, mas também o impacto financeiro dessa prática sustentável na indústria da construção civil.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Moisés Silva. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 44:1995 — Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. MERCOSUR, 1996. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2015 – Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:2014 – Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:2025 – Solos - Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm**. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2022 – Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214:2015 – Areia normal para ensaio de cimento - Especificação**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:2025 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7218:2025 – Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062:2017 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579:2012 – Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582:2016 – Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11709:2015 – Dormente de concreto - Projeto, materiais e componentes.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768:2019 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1 Requisitos.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:2014 – Materiais pozolânicos – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607:2018 – Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018 – Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916:2021 – Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917:2021 – Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973:2021 – Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054:2021 – Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2021.

CARDOSO, Danilo Mendes. **Análise da influência da utilização do pó de granito nas propriedades do concreto auto adensável.** Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA), Palmas, 2019.

GONÇALVES, Admilson Ferreira. **Estudo do comportamento mecânico de dormentes de concreto protendido.** Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

LIMA, Eros Henrique de Souza. **Patologias em dormentes de concreto protendido:** estudo de caso de uma ferrovia brasileira. UFPE, 2022.

MEHTA, P. Kumar.; MONTEIRO, Paulo. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo, 2014.

NABAIS, Rui José da Silva. **Manual Básico de Engenharia Ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

OLIVEIRA, R. P. de. Elementos Pré-Moldados: Fabricação e Aplicação de Blocos de concreto Pré-Moldados em Alvenaria Estrutural. **ETIS – Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 5-39, 2022. Disponível em: <https://revistas.unievangelica.edu.br/index.php/etis/article/view/3438>. Acesso em: 30 ago.2025.

PR GRUPO PARANÁ. **Existem granitos e mármore brasileiros? Conheça jazidas do país**. 3 mai. 2021. Disponível em: <https://prgrupoparana.com/existem-granitos-e-marmores-brasileiros-conheca-jazidas-do-pais/>. Acesso em: 23/08/2025.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento portland**. 4. ed. Porto Alegre, RS: ediPUCRS, 2017. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 06 out 2025.

SALE Prefabricados. **Estrutura multipavimento**. 2025. Disponível em: <https://www.salemaprefabricados.com.br/estrutura-multipavimento>. Acesso em: 30 set. 2025.

SILVA, Celiane Mendes et al. **Concreto de alto desempenho: composição, produção e propriedades**. Ponta Grossa, Atena Editora, 2022. 55 p.

SILVA, Nathalia Luisa França; FERREIRA, Luis Felipe; CRIST, Eduardo Felipe; CAETANO, João Vitor; PROENÇA, Melissa Pastorini. **Sistemas construtivos: pré-moldados e modulares**. Iguazu Science, São Miguel do Iguaçu, v. 2, n. 6, p. 57-63, dez. 2024. Disponível em: <https://iguazu.uniguacu.com.br/index.php/iguazu/article/view/139/116> Acesso em: 29 set. 2025.

TEIXEIRA, Nuno Miguel Guedes. **Sistemas de Transporte Ferroviário: Evolução e Perspetivas de Desenvolvimento**. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.

