



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Talles José dos Santos Linhares

**Análise de influência da variação granulométrica do agregado graúdo na resistência a
compressão do concreto**

MOSSORÓ

2023

Talles José dos Santos Linhares

Análise de influência da variação granulométrica do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Marília Pereira de Oliveira

MOSSORÓ

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L755a Linhares, Talles José dos Santos.
Análise de influência da variação
granulométrica do agregado graúdo na resistência
a compressão do concreto / Talles José dos Santos
Linhares. - 2023.
61 f. : il.

Orientadora: Marília Pereira de Oliveira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Empacotamento de agregados. 2. Otimização de
misturas. 3. Dosagem de concreto. 4. Engenharia
de materiais. 5. Qualidade do concreto. I.
Oliveira, Marília Pereira de, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Talles José dos Santos Linhares

**Análise de influência da variação granulométrica do agregado graúdo na
resistência a compressão do concreto**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 14 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARILIA PEREIRA DE OLIVEIRA**
Data: 20/10/2023 21:24:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Marilia Pereira de Oliveira
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **MARINEIDE JUSSARA DINIZ**
Data: 20/10/2023 12:16:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Marineide Jussara Diniz
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **THAYNON BRENDON PINTO NORONHA**
Data: 20/10/2023 09:38:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Thaynon Brendon Pinto Noronha
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiro, e acima de tudo, à Deus, por minha vida e saúde, e por sempre ter iluminado e permitido que eu prosseguisse, me dando perseverança e me mostrando sempre o melhor caminho, inclusive em momentos que tive a fé diminuída, fazendo com que hoje, eu pudesse escrever este trabalho, possibilitando que eu chegasse ao final desse curso, sem nunca ter faltado nada de realmente importante em minha casa e nem para minha família. Tu és fiel, muito obrigado, sem o Senhor, nada disso seria possível.

À minha companheira de vida, querida e adorável esposa, Kalyane, pela compreensão e paciência demonstrada durante todo o período dessa minha longa jornada, cada desafio que enfrentei, cada etapa que venci, foi moldada pela força e amor que você me deu, sempre estando ao meu lado nos momentos difíceis, não me deixando desistir, me apoiando e sendo por muito tempo o principal pilar de nossa casa. Obrigado pelo seu amor incondicional, pelas suas orações e por sempre estar disposta a ajudar, fosse com uma atividade ou pra medir incontáveis pedras. Tenho muito orgulho de ter você como minha companheira, amo você, essa conquista é nossa.

Aos meus pais, Francisco e Maria, por todo apoio e incentivo que me deram ao longo da minha trajetória, sempre acreditando que eu seria capaz. Graças aos senhores eu tive a base e educação necessária. Obrigado por cada dia de luta e trabalho para prover tudo que foi necessário para mim e meus irmãos, eu sei que não foi fácil. Espero que este trabalho não seja apenas um marco na minha jornada acadêmica, mas também uma maneira de honrar e agradecer por tudo que fizeram por mim.

Aos meus irmãos, Thaynara e Tarsio, minha gratidão por estarem ao meu lado ao longo da minha jornada, sei que sempre acreditaram e torceram muito por mim. Cada um de vocês é uma parte importante da minha história e contribuiu para esta realização.

Agradeço à minha orientadora, professora Marília Pereira, por aceitar conduzir este trabalho, pelo incentivo e pela dedicação do seu escasso tempo e principalmente, pela confiança depositada na minha proposta de projeto.

À banca examinadora, pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho, sua contribuição é inestimável para o êxito desta monografia.

À cada um dos professores do curso de engenharia civil que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação acadêmica, seja em conteúdo ou com experiências de vida.

Aos técnicos de laboratórios, Rudna, Augusto e Fabricio pela paciência, disponibilidade e apoio técnico prestado durante todo o desenvolvimento do projeto.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, me ajudaram e me apoiaram, ao longo dos últimos anos para a realização deste trabalho e para a minha formação.

RESUMO

O presente trabalho se dedica a investigar a influência da granulometria e do empacotamento de agregados na dosagem de concretos, com foco na otimização de misturas para a obtenção de maiores resistências mecânicas. A pesquisa aborda a temática da dosagem de concretos e seu impacto no desempenho de resistência a compressão axial de estruturas de engenharia civil, tendo como objetivo principal a avaliação da influência da granulometria dos agregados na dosagem de concretos, analisando como diferentes distribuições de tamanho afetam a resistência à compressão e a trabalhabilidade. Além de investigar a viabilidade da otimização da granulometria dos agregados, buscando um empacotamento mais eficiente, com o intuito de melhorar as propriedades dos concretos, utilizou-se o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU) para avaliar a qualidade das misturas. Comparou-se os resultados obtidos de dois traços otimizados, composto por misturas percentuais de britas N°0, N°1 e N°2, com respectivos traços de referência, em diversas idades de cura (7, 14, 21 e 28 dias). Este estudo se justifica pela necessidade contínua de aprimorar as técnicas de dosagem de concretos, visando à construção de estruturas mais resistentes. A importância da temática reside na sua aplicação prática na engenharia civil, uma vez que a qualidade do concreto é um fator determinante para a segurança e vida útil de edifícios e infraestruturas. O estudo ocorreu através da realização de ensaios de granulometria, massa específica, abatimento do tronco de cone e determinação de resistência a compressão axial, sempre utilizando misturas referenciais e misturas em diferentes proporções. A VPU foi empregada para monitorar as propriedades do concreto ao final do período de cura (28 dias). Os resultados do ensaio destrutivo foram comparados entre os diferentes traços e idades. As principais conclusões deste estudo revelam que a otimização da granulometria dos agregados e o empacotamento mais eficiente têm um impacto positivo na resistência à compressão dos concretos. Os ganhos de resistência foram significativos, variando entre 14,12% e 28,50% aos 28 dias de cura, em relação aos traços convencionais que serviram como referência, evidenciando a eficácia da otimização da granulometria. Além disso, os resultados confirmaram as hipóteses iniciais de que o empacotamento mais eficiente dos agregados leva a uma menor quantidade de vazios no interior do concreto, resultando em uma maior densidade da mistura e, conseqüentemente, em maior resistência.

Palavras-chave: empacotamento de agregados; otimização de misturas; dosagem de concreto; velocidade de propagação ultrassônica (VPU); engenharia de materiais; qualidade do concreto.

ABSTRACT

The present work is dedicated to investigating the influence of granulometry and aggregate packaging on concrete dosing, focusing on optimizing mixtures to obtain greater mechanical resistance. The research addresses the topic of concrete dosage and its impact on the axial compression resistance performance of civil engineering structures. with the main objective of evaluating the influence of aggregate granulometry on concrete dosage, analyzing how different size distributions affect compressive strength and workability. In addition to investigating the feasibility of optimizing the granulometry of aggregates, seeking more efficient packaging, with the aim of improving the properties of concrete, the ultrasonic wave propagation speed (VPU) test was used to evaluate the quality of the mixtures. The results obtained from two optimized mixes were compared, composed of percentage mixtures of crushed stone N°0, N°1 and N°2, with respective reference mixes, at different curing ages (7, 14, 21 and 28 days) . This study is justified by the continuous need to improve concrete dosing techniques, aiming to build more resistant structures. The importance of the topic lies in its practical application in civil engineering, since the quality of concrete is a determining factor for the safety and useful life of buildings and infrastructures. The study took place by carrying out particle size, specific mass, cone slump and resistance to axial compression tests, always using reference mixtures and mixtures in different proportions. VPU was used to monitor concrete properties at the end of the curing period (28 days). The results of the destructive test were compared between different traits and ages. The main conclusions of this study reveal that optimizing aggregate particle size and more efficient packaging have a positive impact on the compressive strength of concrete. The resistance gains were significant, varying between 14.12% and 28.50% after 28 days of curing, in relation to the conventional traits that served as reference. highlighting the effectiveness of particle size optimization. Furthermore, the results confirmed the initial hypotheses that more efficient packaging of aggregates leads to a smaller amount of voids inside the concrete, resulting in a greater density of the mixture and, consequently, greater resistance.

Keywords: aggregate packaging; mixture optimization; concrete dosage; ultrasonic pulse velocity (VPU); materials engineering; concrete quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Graduação de britas N°0, N°1, N°2, respectivamente.	27
Figura 2 - Determinação de índice de forma pelo método do paquímetro.	29
Figura 3 - Ferramenta Solver do Microsoft Excel.	32
Figura 4 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.	35
Figura 5 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.	36
Figura 6 - Cura inicial dos corpos de prova.	37
Figura 7 - Cura final dos corpos de prova por imersão em água.	37
Figura 8 - Determinação da massa específica aparente.	38
Figura 9 - Determinação de resistência a compressão axial.	38
Figura 10 - Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica.	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Influência da dimensão do agregado e relação água/cimento na resistência do concreto.	19
Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia.	42
Gráfico 3 - Curva granulométrica da brita N°0.	43
Gráfico 4 - Curva granulométrica da brita N°1.	44
Gráfico 5 - Curva granulométrica da brita N°2.	45
Gráfico 6 - Curva granulométrica da mistura de britas N°0 e N°1 (B0B1).	47
Gráfico 7 - Curva granulométrica da mistura de britas N°1 e N°2 (B1B2).	49
Gráfico 8 - Comparativo de resistência à compressão aos 7 dias para todas as misturas.	52
Gráfico 9 - Comparativo de resistência à compressão aos 14 dias para todas as misturas.	53
Gráfico 10 - Comparativo de resistência à compressão aos 21 dias para todas as misturas. ...	53
Gráfico 11 - Comparativo de resistência à compressão aos 28 dias para todas as misturas. ...	53
Gráfico 12 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B0.....	54
Gráfico 13 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B1.....	54
Gráfico 14 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B2.....	55
Gráfico 15 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B0B1	55
Gráfico 16- Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B1B2	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre velocidade ultrassônica e qualidade do concreto.....	25
Tabela 2 - Massa mínima, por amostra de ensaio.....	27
Tabela 3 – Determinação do traço	32
Tabela 4 - Determinação do teor de brita N°0 e N°1.	33
Tabela 5 - Determinação do teor de brita N°1 e N°2.	34
Tabela 6 - Proporções de traços produzidos.....	34
Tabela 7 - Análise granulométrica da Areia.....	41
Tabela 8 - Propriedades físicas da areia.	41
Tabela 9 - Análise granulométrica da brita N°0.	43
Tabela 10 - Análise granulométrica da brita N°1.....	44
Tabela 11 - Análise granulométrica da brita N°2.....	45
Tabela 12 - Propriedades físicas das britas N°0, N°1 e N°2.	46
Tabela 13 - Análise granulométrica da mistura de britas N°0 e N°1 (B0B1).	47
Tabela 14 - Análise granulométrica da mistura de britas N°1 e N°2 (B1B2)	48
Tabela 15 - Propriedades físicas da mistura de britas N°0 e N°1 (B0B1) e N°1 e N°2 (B1B2).	49
Tabela 16 - Resultado do ensaio de consistência.	50
Tabela 17 - Resultado do peso específico aparente.....	51
Tabela 18 - Resultado da resistência à compressão axial.....	52
Tabela 19 - Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 28 dias.....	56

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVO GERAL	14
2.1.	Objetivos específicos	14
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1.	Concreto	15
3.1.1.	Cimento Portland	16
3.1.2.	Água de Amassamento	16
3.1.3.	Agregados	17
3.1.3.1.	Agregados miúdos	18
3.1.3.2.	Agregados graúdos	18
3.1.3.2.1.	Influência dos agregados graúdos nas propriedades do concreto	18
3.1.3.2.2.	Empacotamento das partículas	20
3.1.3.3.	Massa específica e massa unitária dos agregados	21
3.1.3.4.	Porosidade nos agregados	22
3.2.	Propriedades do concreto no estado fresco	23
3.2.1.	Trabalhabilidade e consistência	23
3.2.2.	Coesão e segregação	23
3.3.	Propriedades no estado endurecido	24
3.3.1.	Resistência a compressão axial	24
3.3.2.	Ensaio de ultrassom em concreto	24
4.	METODOLOGIA	26
4.1.	Caracterização dos materiais	26
4.1.1.	Cimento Portland	26
4.1.2.	Agregado graúdo	26
4.1.2.1.	Análise granulométrica	27
4.1.2.2.	Índice de forma dos grãos	28
4.1.2.3.	Massa unitária	29
4.1.3.	Agregado miúdo	30
4.1.3.1.	Análise granulométrica	30
4.1.3.2.	Massa unitária	30
4.1.3.3.	Massa específica	30
4.1.4.	Água de emassamento	31

4.2.	Preparação do concreto.....	31
4.2.1.	Moldagem.....	36
4.2.2.	Massa específica aparente do concreto.....	37
4.3.	Resistência a compressão axial.....	38
4.4.	Velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1.	Análise granulométrica	41
5.1.1.	Agregado miúdo	41
5.1.2.	Agregado graúdo	42
5.2.	Ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>)	50
5.3.	Peso específico aparente	51
5.4.	Resistência à compressão	51
5.5.	Velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto	56
6.	CONCLUSÕES.....	57
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A resistência à compressão do concreto é um fator fundamental na engenharia civil, influenciando diretamente a capacidade de suportar cargas e resistir às tensões em diversas aplicações estruturais (PINHEIRO, 2010). A busca contínua por materiais mais eficazes e econômicos na construção civil levou a um interesse crescente na otimização das propriedades do concreto, que é uma composição que inclui cimento, água, agregado miúdo (como areia) e agregado graúdo (como pedra ou brita), sua formulação cuidadosa determina a quantidade de cada material, garantindo características desejadas tanto no estado fresco quanto endurecido (BASTOS, 2023).

Historicamente, os egípcios foram construtores habilidosos e mestres na arte de erguer estruturas usando blocos de rocha. Ainda assim, o potencial desse material não foi completamente explorado por eles. Na Idade Média, os engenheiros deram continuidade a essa tradição, criando as majestosas igrejas góticas, onde exploraram ao máximo os limites da construção em concreto, demonstrando sua maestria na arte da construção, deixando claro a importância da seleção adequada dos agregados e do cimento (HELENE; ANDRADE, 2010). De acordo com Helene e Andrade (2010), apenas no século XIX, com o desenvolvimento da teoria do concreto, as implicações da granulometria dos agregados, juntamente com a qualidade do cimento, na resistência do material começaram a ser mais amplamente compreendidas.

Castro (2009), destaca que a pesquisa contemporânea na área de materiais de construção e engenharia civil tem explorado a relação entre a granulometria dos agregados, a qualidade do cimento e a resistência à compressão do concreto em detalhes. Estudos pioneiros, como o de Linhares (2019), demonstraram que a variação no tamanho das partículas de agregado graúdo, bem como a qualidade do cimento utilizado, pode afetar significativamente a densidade e a resistência do concreto. A substituição de parte da brita número 1 pela brita número 0, por exemplo, tem sido uma abordagem investigada, uma vez que pode resultar em uma maior compactação das partículas no interior do concreto, teoricamente levando a um material mais resistente (LINHARES, 2019).

No Brasil, a produção de concreto e os processos de controle de qualidade seguem as diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além de incorporar recomendações técnicas de diversas empresas e órgãos relacionados à indústria da construção civil.

Além dos estudos experimentais, modelos teóricos têm sido desenvolvidos para explicar a relação entre a granulometria dos agregados, a qualidade do cimento e a resistência

à compressão do concreto. Esses modelos auxiliam na compreensão dos processos envolvidos e na previsão do comportamento do material sob diferentes condições.

A evolução das normas e regulamentos na indústria da construção também reflete a importância da granulometria dos agregados e da qualidade do cimento. Especificações técnicas detalhadas foram estabelecidas para orientar a dosagem de concreto em projetos de engenharia civil, levando em consideração fatores como o tamanho e a distribuição dos agregados, bem como a composição e a resistência do cimento (CASTRO, 2009).

No contexto atual, as pesquisas continuam a explorar novas possibilidades para otimizar a granulometria dos agregados e a qualidade do cimento em busca de concretos mais eficientes e resistentes. Esses esforços não apenas impactam a construção civil, mas também contribuem para a sustentabilidade e a segurança das estruturas em todo o mundo (LINHARES, 2019). Neste sentido, esse trabalho visa investigar a influência da variação granulométrica do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto.

2. OBJETIVO GERAL

Investigar a influência da variação da granulometria do agregado graúdo na resistência à compressão axial do concreto, utilizando diferentes proporções granulométricas em traços de concreto e analisando como essas variações impactam nas propriedades mecânicas do material.

2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar os materiais utilizados na produção de concreto.
- Utilizar o *software Microsoft Excel* para encontrar percentuais de substituição do agregado graúdo de referência, variando o traço com misturas de britas de granulometrias diferentes, visando diminuir os vazios presentes na mistura e aumentar sua resistência a compressão axial.
- Produzir concreto com as granulometrias de agregado graúdos mais utilizados na construção civil (brita N°0, N°1 e N°2), assim como misturas entre tais dimensões.
- Realizar ensaios de resistência à compressão axial em diferentes idades (7, 14, 21 e 28 dias) para os corpos de prova produzidos.
- Analisar os resultados obtidos nos ensaios para determinar como a variação da granulometria do agregado graúdo afetou a resistência à compressão do concreto em diferentes idades.
- Realizar ensaio de determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova aos 28 dias.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Concreto

Para Helene e Andrade (2010), o concreto de cimento Portland é, atualmente, o material mais essencial na construção civil e na estruturação de edificações. Apesar de ser uma das inovações mais recentes na história dos materiais de construção, pode ser considerado uma das descobertas mais fascinantes no desenvolvimento da humanidade e no aprimoramento da sua qualidade de vida. Bastos (2023) complementa dizendo que, para compreender o comportamento, projetar e dimensionar estruturas de concreto de forma adequada, é crucial possuir um entendimento profundo das características e propriedades desse material.

Para Pinheiro (2010), o concreto tem uma estrutura interna altamente complexa e heterogênea, o que torna sua compreensão ainda mais desafiadora. No entanto, o entendimento das estruturas e propriedades individuais dos materiais que o compõem é fundamental para compreender as características dos diferentes tipos de concreto, sendo enumerados em três perspectivas por Neville (2010): na primeira, o material cimentício é o principal, com os agregados sendo utilizados apenas como enchimento. Na segunda, os agregados maiores são como pequenos blocos, ligados pela argamassa. E por último, a conceituação de que o concreto é composto por duas partes: a pasta de cimento e os agregados, com propriedades influenciadas por ambas.

Mehta e Monteiro (2008), destacam como principais motivos para o alto volume de utilização do concreto, sua alta resistência a água, sua flexibilidade e capacidade de execução de grandes elementos e, ainda, seu baixo custo e disponibilidade em qualquer lugar do mundo.

Com isso, vale salientar, que a composição do concreto mais simples, confeccionado desde a antiguidade, é fabricado com uma mistura de cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo. A proporção entre esses diferentes componentes é, cuidadosamente, ajustada pelos estudos das novas tecnologias construtivas aplicadas a engenharia civil, com o objetivo de atender às demandas das propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade necessárias, bem como às características de trabalhabilidade essenciais para seu transporte e aplicação. Essas condições podem variar dependendo das circunstâncias específicas de cada caso (HELENE; ANDRADE, 2010).

3.1.1. Cimento Portland

A descoberta do cimento teve início na Inglaterra, que para Battagin (2009), o nome "cimento Portland" foi concebido por Joseph Aspdin, um químico britânico, como uma homenagem à Ilha de Portland, devido à semelhança na cor e durabilidade das rochas encontradas nesta ilha britânica. Em 1824, Joseph observou que ao submeter argila e pó de calcário a um processo de queima, resultava em um material pulverulento. Ao adicionar água a essa mistura, ele obteve um material de notável resistência.

Neville (2010), define o produto "Cimento Portland" como resultado da combinação homogênea de calcário, argila ou substâncias silicosas similares, alumina e materiais que contenham óxido de ferro, que adquire resistência devido à influência da água. Inclusive, suas capacidades de resistir a alterações químicas ao longo do tempo em contato com a água, desempenharam um papel fundamental na difusão generalizada do uso do concreto na construção civil. As principais adições são o gesso, as escórias de alto-forno, e os materiais pozolânicos e carbonáticos. Quando homogeneizados dão origem a diferentes tipos de cimento Portland, como: comum, composto, de alto-forno, pozolânico, de alta resistência inicial, resistentes a sulfatos, branco e o de baixo calor de hidratação (ABCP, 2002). O cimento Portland é um dos materiais mais consumidos no mundo, perdendo apenas para água (ABCP, 2009).

3.1.2. Água de Amassamento

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo que abrange uma sequência de reações químicas simultâneas e consecutivas. Esse processo ocorre de maneira automática quando o cimento entra em contato com a água e está ligado à liberação de calor. O avanço da hidratação pode ser afetado por diversos fatores, como a composição e granulometria do cimento, a relação água-cimento, a temperatura de cura e a presença de misturas e/ou aditivos na pasta de cimento (CASTRO, 2021). De acordo com Bastos (2023), esse componente influencia diretamente a criação das propriedades de resistência e durabilidade do material. Para o uso cotidiano de obra, seguindo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), a água de abastecimento público é considerada adequada, não necessitando de nenhum tipo de ensaio ou tratamento anterior a seu uso. Esse componente é de extrema importância tanto para o emassamento do concreto quanto para a etapa de cura, cujas especificações são declaradas pela NBR 14931 (ABNT, 2023), que versa sobre a importância de execução da cura primária, que ocorre após o

lançamento do concreto e perdura até o fim da pega, e secundária que dura do fim do tempo de pega do concreto e se estende até que o material atinja a capacidade de carga de 15 MPa. Andolfato (2002), conceitua que a cura do concreto tem como principal objetivo evitar a evaporação da água utilizada na mistura durante a fase inicial de hidratação. Quanto a isso, Bastos (2023) conclui que, a aplicação de água no concreto durante o processo de cura é o método mais eficaz para evitar a formação de fissuras durante a fase inicial de endurecimento do material e para promover o desenvolvimento adequado das reações químicas de hidratação do cimento. É evidente a distinção entre os corpos de prova que passam por cura em ambiente aberto e aqueles que recebem um processo de cura úmida durante todo esse ciclo, resultando em um aumento de mais de 60% no aumento da resistência, enquanto na primeira situação, muitas vezes, o material não chega a atingir nem sua resistência característica aos 28 dias (ANDOLFATO, 2002).

3.1.3. Agregados

Agregados são materiais granulares que não possuem forma ou volume definidos, mas possuem dimensões e propriedades adequadas para serem utilizados em projetos de engenharia civil. Esses materiais podem ser categorizados com base em suas dimensões, origens e massa unitária, desempenhando um papel crucial na formação da estrutura e das propriedades do concreto (SBRIGHI NETO, 2005). De acordo com Neville (2010), a seleção adequada dos agregados é de suma importância na elaboração do concreto. No estado fresco, esses agregados desempenham um papel crucial, afetando significativamente o custo e a trabalhabilidade da mistura. Já no estado endurecido, sua influência se estende à resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto.

Como materiais para agregados, é possível empregar tanto substâncias naturais quanto artificiais, desde que possuam resistência adequada e não interfiram negativamente no processo de endurecimento do concreto (ALMEIDA, 2002). Para Sbrighi Neto (2005), os agregados podem ser classificados como naturais, britados, artificiais ou reciclados.

Andolfato (2002) destaca que, os agregados representam uma parcela significativa da composição do concreto, aproximadamente 75%. Portanto, suas características desempenham um papel crucial nas proporções utilizadas e na economia global do concreto. Em geral, esses agregados são compostos por partículas robustas e resistentes, livres de elementos prejudiciais. Com o desenvolvimento dos estudos do concreto de cimento Portland, o conceito do agregado como material de enchimento vem sendo drasticamente modificado e a sua influência nas

proporções das misturas e no seu custo, vem tomando maior destaque. Diante disso, pode-se verificar que muitas propriedades do concreto são influenciadas pelas suas características. A NBR 7211 (ABNT, 2022), separa esses elementos em dois grupos, sendo eles:

3.1.3.1. Agregados miúdos

Seguindo o que rege a NBR 7211 (ABNT, 2022), são partículas que conseguem atravessar uma peneira com uma abertura de malha de 4,75 mm, mas ficam retidas em uma peneira com uma abertura de malha de 150 μ m.

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022), os agregados miúdos são classificados da seguinte forma com base no módulo de finura: aqueles com módulo de finura entre 1,55 e 2,2 são considerados finos (zona utilizável inferior), entre 2,2 e 2,9 são classificados como médios (zona ótima) e os que possuem módulo de finura de 2,9 a 3,5 são categorizados como areias grossas (zona utilizável superior). De acordo com Andolfato (2002), a areia grossa é ideal para concreto armado, porém é admitido o uso de areia média.

3.1.3.2. Agregados graúdos

Agregado composto por partículas que conseguem passar pela peneira com malha de 75 mm, mas ficam retidas em uma peneira com uma abertura de malha de 4,75 mm, sendo classificados em diferentes tamanhos, identificados como: brita número 0, têm dimensões que variam de 4,75 mm até 9,5 mm, brita número 1, variando de 9,5 mm até 19 mm e brita número 2, com partículas variando de 19 mm até 25 mm (ABNT NBR 7211, 2022).

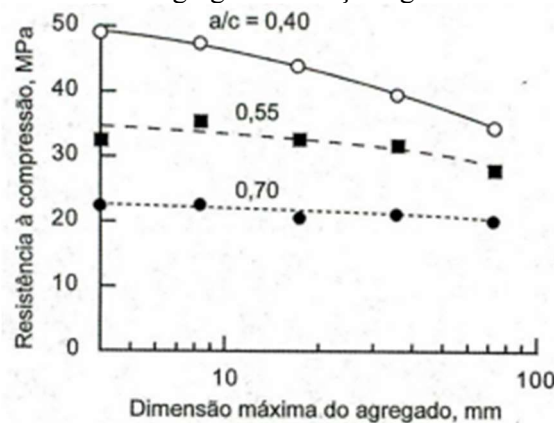
No passado, era comum usar uma combinação de britas 1 e 2 em concretos, mas atualmente, a brita número 1 é a escolha predominante em muitas obras correntes. Essa mudança ocorreu devido à necessidade de controle mais rigoroso na granulometria dos agregados, a fim de atender a especificações técnicas rigorosas e garantir a uniformidade das propriedades do concreto (Bastos, 2023)

3.1.3.2.1. Influência dos agregados graúdos nas propriedades do concreto

Na tecnologia do concreto, uma ênfase excessiva na relação água/cimento tem gerado alguns problemas. Um exemplo disso, é a tendência de negligenciar a influência que os agregados exercem sobre a resistência do concreto, fato esse que não deveria acontecer, já que

esses elementos ocupam de 60 a 80% do volume de sua composição. Em função desta elevada quantidade, influenciam em maior ou menor grau a compacidade, de acordo com a distribuição granulométrica e com a forma da partícula. Em geral, a resistência do agregado não é um fator crítico em sua resistência, visto que, muitas vezes, essas partículas são mais resistentes do que a matriz e a zona de transição na interface da estrutura. Inclusive, existem evidências substanciais na literatura de que uma alteração nas dimensões máximas dos agregados graúdos pode ter um impacto direto na resistência do concreto à tração e compressão (Gráfico 1) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Gráfico 1 - Influência da dimensão do agregado e relação água/cimento na resistência do concreto.



Fonte: (Cordon, W.A.; Gillespie H. A., J ACI, Proc, v. 60, n. 8, 1963).

Ainda nesse contexto, conforme destaca Neville (2010), a forma e a textura do agregado desempenham um papel crucial na resistência à compressão do concreto, sendo mais evidenciados em concretos de alta resistência, especialmente em suas idades iniciais. Evidenciando, principalmente, que quando mantemos a mesma composição mineral dos agregados, concretos que utilizam agregados com superfície mais áspera tendem a exibir maior resistência em comparação com aqueles que empregam agregados de superfície mais lisa.

Além disso, a forma dos grãos e a conformação superficial estão ligados diretamente a trabalhabilidade e as propriedades de aderência do concreto: agregados redondos e lisos facilitam a mistura e o adensamento do concreto; agregados com superfícies ásperas aumentam a resistência à tração (ALMEIDA, 2002).

Mehta e Monteiro (2008) complementam esse conceito evidenciando que, a forma e a textura superficial das partículas do agregado têm um impacto maior sobre o estado fresco do concreto em comparação com o estado endurecido. Sendo assim, as propriedades do agregado não apenas influenciam as características de dosagem do concreto, mas também o

comportamento do concreto nos estados fresco e endurecido. Além disso, a incorporação de agregados no concreto impõe limitações à sua capacidade de deformação, sendo que o teor e o módulo de deformação dos agregados são os principais fatores que afetam o fenômeno de retração (HELENE e ANDRADE, 2007).

Almeida (2002) evidencia que, o peso específico do concreto endurecido é influenciado pela proporção de agregados graúdos na mistura e pela sua natureza, granulometria e método de compactação empregado, sendo maior à medida que os agregados utilizados possuírem maior densidade. Além disso, Mehta e Monteiro (2008) citam que, é essencial analisar diversas características dos agregados antes de dosar o concreto, incluindo massa específica, porosidade, granulometria, forma, textura superficial e teor de umidade.

3.1.3.2.2. Empacotamento das partículas

O empacotamento de partículas é o processo de preencher os espaços vazios deixados por partículas de maior tamanho com partículas de menor tamanho. Esses espaços entre as partículas menores são então preenchidos por partículas ainda menores, seguindo esse padrão de preenchimento sucessivo. A maneira como as partículas estão distribuídas em termos de tamanho, a forma ou morfologia dos grãos e o método de compactação utilizado são os principais fatores que exercem influência sobre o processo de empacotamento de partículas (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Andolfato (2002) lembra que, geralmente, na produção de concreto, são empregados agregados com curvas granulométricas que se enquadram em faixas ideais especificadas. Os traços de concreto obtidos com esses agregados são conhecidos como granulometria contínua, uma vez que os agregados têm frações retidas em todas as peneiras da série normal. Os concretos com granulometria contínua são vantajosos devido à sua boa trabalhabilidade e à reduzida probabilidade de segregação, motivo pelo qual são prescritos pelas normas.

Contudo, Neville (2010) argumenta que não se pode definir uma curva granulométrica ideal de forma universal. Em vez disso, ele enfatiza a importância de buscar soluções que harmonizem requisitos físicos com considerações econômicas, fazendo uso dos agregados disponíveis. Isso implica que não é apropriado impor limites rígidos na determinação de uma curva granulométrica ideal, uma vez que essa abordagem não é eficaz em todos os casos. O autor faz um paralelo prático que ilustra a complexidade de estabelecer uma curva granulométrica ideal. Ele observa que agregados de diferentes origens, mesmo que tenham nominalmente a mesma granulometria, podem apresentar variações significativas na

distribuição dos tamanhos de partículas dentro da mesma fração, bem como em outras propriedades, como a forma e a textura das partículas.

Buttler (2007) conclui dizendo que, compreender o empacotamento dos agregados é uma etapa fundamental no processo de dosagem de concretos. A redução do espaço vazio entre os agregados resulta em uma mistura mais compacta e essa compactação está diretamente relacionada com a resistência mecânica à compressão axial e a durabilidade do concreto. Portanto, o estudo do empacotamento dos agregados desempenha um papel crucial na obtenção de concretos com propriedades desejadas.

Neville (2010) enumera que, entre os benefícios do empacotamento de agregados em concretos, destacam-se: o aumento da resistência mecânica, do módulo de elasticidade, a redução da exsudação, da fluência, da retração e o aumento da durabilidade. Quanto a isso, Mehta e Monteiro (2008) indica a massa específica, a porosidade, a granulometria, a forma e a textura superficial como fatores a serem tratados como prioridade antes de dosar um concreto, pois influenciam diretamente no arranjo e empacotamento das partículas.

Mehta e Monteiro (2008) ressalta que a composição granulométrica se refere à distribuição das dimensões das partículas em um material granular, geralmente expressa como a porcentagem acumulada maior ou menor que cada uma das aberturas de uma série de peneiras. Também pode ser representada como a porcentagem dentro de uma faixa específica de aberturas das peneiras.

Nessa linha, temos que as distribuições de partículas se subdividem em: distribuição granulométrica uniforme na qual todas as partículas pertencem a apenas uma faixa granulométrica; distribuição granulométrica contínua: na qual o tamanho das partículas aumenta continuamente e de forma proporcional e; distribuição granulométrica descontínua: na qual ocorre a ausência de determinado tamanho de partículas. No geral, a inclusão de partículas cada vez menores ou a elevação do diâmetro máximo das partículas, favorece o empacotamento (NEVILLE; BROOKS, 2013).

3.1.3.3. Massa específica e massa unitária dos agregados

A massa específica dos agregados é uma propriedade física fundamental na construção e engenharia civil. Ela se refere à quantidade de massa por unidade de volume de um agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A massa específica pode variar significativamente entre diferentes tipos de agregados, como areia, pedra britada, cascalho e pedra calcária, devido às diferenças em sua composição

mineralógica e porosidade. Essa propriedade exerce influência direta na densidade do concreto, uma vez que agregados mais leves resultam em concretos menos densos, enquanto agregados mais pesados levam a concretos mais densos (HELENE; ANDRADE, 2010).

O dimensionamento dos agregados em uma mistura de concreto é ajustado com base na massa específica para obter a densidade desejada. Além disso, a porosidade dos agregados, que está relacionada à massa específica, influencia sua capacidade de absorção de água. Agregados com massa específica mais baixa tendem a ser mais porosos e, portanto, absorvem mais água, o que afeta a quantidade de água necessária na mistura de concreto (ANGULO, 2000).

Mehta e Monteiro (2008) indicam que a escolha dos agregados com a massa específica adequada é crucial para garantir a resistência e a durabilidade do concreto. Agregados mais densos geralmente contribuem para concretos mais resistentes. Portanto, a análise e o controle da massa específica dos agregados desempenham um papel crítico na formulação de misturas de concreto de alta qualidade, assegurando que o material final atenda aos requisitos de resistência, durabilidade e desempenho desejados em aplicações de construção.

3.1.3.4. Porosidade nos agregados

A porosidade dos agregados afeta diretamente a qualidade e o desempenho de materiais como o concreto e a argamassa. Ela se refere à quantidade de espaços vazios, chamados poros, dentro de um agregado em relação ao seu volume total. Esses poros podem conter ar ou, em alguns casos, água. Agregados porosos têm maior capacidade de absorção de água, o que impacta a quantidade de água necessária na mistura, a trabalhabilidade do material e até a durabilidade da estrutura, uma vez que podem permitir a entrada de agentes agressivos. Existe uma correlação entre resistência e durabilidade, onde baixa resistência está associada a alta porosidade e alta permeabilidade. Consequentemente, os concretos permeáveis são, naturalmente, menos resistentes e duráveis (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Em contrapartida, agregados menos porosos tendem a ter maior densidade e peso específico aparente, o que pode ser vantajoso em situações que demandam materiais mais densos, como em estruturas convencionais.

3.2. Propriedades do concreto no estado fresco

Segundo Helene e Andrade (2010), o concreto é composto por duas fases bem definidas. A primeira fase, conhecida como "concreto fresco," abrange um período relativamente curto, geralmente variando de 1 a 5 horas. Essa fase compreende o intervalo de tempo necessário para a mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto.

3.2.1. Trabalhabilidade e consistência

Uma das características fundamentais do concreto, que influencia sua facilidade de manuseio, é a consistência. Na tecnologia do concreto, consistência se refere à capacidade do material de se deformar sob seu próprio peso (HELENE; ANDRADE, 2010). Nesse mesmo pensamento Neville e Brooks (2013) acrescentam que, a consistência, em termos gerais, refere-se à capacidade de uma substância de manter sua forma ou fluir facilmente. No contexto do concreto, a consistência é determinada, principalmente, pelo teor de água presente.

A consistência do concreto reflete as características intrínsecas da mistura fresca, relacionando-se com a mobilidade da massa e a coesão entre seus componentes. Isso é fundamental para garantir uniformidade e compacidade durante as operações de transporte, lançamento e adensamento. A trabalhabilidade não se limita apenas às propriedades do concreto em si, mas também considera a natureza da obra em questão e os métodos de execução empregados (ALMEIDA, 2002). Para Mehta e Monteiro (2008), a trabalhabilidade é uma característica que envolve pelo menos dois componentes principais: a fluidez, que se refere à facilidade de mobilidade, e a coesão, relacionada à resistência contra exsudação e segregação.

3.2.2. Coesão e segregação

Segregação é o processo de separação dos componentes de uma mistura heterogênea de concreto no estado fresco, resultando em uma distribuição não uniforme desses componentes (NEVILLE; BROOKS, 2013). Para Isaia (2011), a segregação é uma tendência natural do concreto, principalmente nas etapas de transporte, lançamento e adensamento.

A presença de segregação é prejudicial para a obtenção da adequada compacidade da mistura. A segregação envolve a separação dos componentes da mistura, que pode ser, inclusive, provocada por uma vibração excessiva, comprometendo a uniformidade do concreto resultando em um concreto com menor resistência.

3.3. Propriedades no estado endurecido

Ainda de acordo com Helene e Andrade (2010), a segunda etapa, conhecida como concreto endurecido, começa com a hidratação do cimento, levando ao endurecimento gradual do concreto, e permanece ao longo de toda a vida útil da estrutura.

3.3.1. Resistência a compressão axial

Pode ser definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper, sendo identificado pelas fissuras que surgem. No concreto, entretanto, o corpo de prova é considerado rompido mesmo não havendo fratura externa, porque o corpo de prova não suportará uma carga maior devido às fraturas internas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A compressão axial é a forma de ensaio mais usual, onde o concreto é inserido em uma prensa hidráulica e a carga à compressão é elevada gradualmente até o rompimento do corpo de prova conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), há diversos fatores que afetam a resistência mecânica do concreto, como: propriedades dos materiais constituintes no concreto; proporcionamento dos materiais, ou seja, relação água/aglomerante e relação agregado/aglomerante; condições de cura e idade. Além disso, os autores mencionam que, considerando o princípio do método de empacotamento de partículas para reduzir os vazios no interior do concreto, podemos estimar um aumento na resistência à compressão dos corpos de prova nos quais esse procedimento foi aplicado. Isso ocorre devido à transferência mais eficaz de tensões, resultante do aumento da densidade da mistura.

3.3.2. Ensaio de ultrassom em concreto

Dentre os métodos de Ensaios Não Destrutivos disponíveis, o Ensaio de Propagação Ultrassônica de Ondas (UPV) merece destaque especial, pois oferece a capacidade de examinar a homogeneidade do material, simplificando a detecção de defeitos e possibilitando o controle das condições de conservação das estruturas durante sua vida útil. Esse ensaio é considerado um dos mais promissores para a avaliação de estruturas de concreto. Através da utilização do UPV, é possível monitorar e controlar variações na compacidade da estrutura, as quais podem estar associadas a mudanças em suas propriedades ao longo do tempo. (LORENZI et al., 2009).

Segundo Lorenzi et al. (2006), O ensaio por ultrassom possibilita a avaliação das condições iniciais do material, permitindo o monitoramento das mudanças em suas propriedades ao longo do tempo e até mesmo a estimativa de sua resistência. Esse método é amplamente empregado na detecção de imperfeições em materiais homogêneos, pois a existência de espaços vazios resulta no atraso da propagação das ondas, devido à menor velocidade do som no ar. A análise se fundamenta na ideia de que o tempo necessário para a propagação dos impulsos ultrassônicos está relacionado com a densidade do material (LORENZI et al., 2009).

A velocidade de propagação ultrassônica está diretamente relacionada à densidade e às propriedades elásticas do material em análise. Dado que a qualidade de diversos materiais de construção está associada à sua rigidez, a medição da velocidade pode ser aplicada tanto para avaliar a qualidade de estruturas de concreto como para estimar suas características mecânicas, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade (MENEGUETTI, 1999). Lorenzi et al. (2007) destaca que, um dos materiais que influenciam diretamente a velocidade de propagação de onda é o agregado graúdo, por isso é fundamental conhecer a influência de variáveis que afetam as características do concreto.

A análise dos resultados dos ensaios de velocidade de propagação de onda em diferentes tipos de concreto foi categorizada em intervalos. A Tabela 1 apresenta a relação entre a VPU (Velocidade de Propagação Ultrassônica) e a classificação referente à qualidade do concreto.

Tabela 1 - Relação entre velocidade ultrassônica e qualidade do concreto.

Velocidade da onda ultrassônica (m/s) Qualidade do concreto

V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

Fonte: Whitehurst (1966).

4. METODOLOGIA

A moldagem, cura e ensaio de ruptura dos corpos de prova foram conduzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEMAT), localizado no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) em Mossoró, Rio Grande do Norte.

As etapas necessárias para confecção do trabalho, estão descritas a seguir:

4.1. Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados neste trabalho e sua caracterização, são as seguintes:

4.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado na formulação do concreto investigado foi o CP IV-32 RS, conforme especificações da ABNT NBR 16697/2018 - Cimento Portland - Requisitos. Com base nas informações contidas nas Tabelas 4 e 5 desta norma, foram obtidos os seguintes parâmetros:

- Módulo de finura igual ou inferior a 8,0%.
- Tempo de início e fim de pega de 60 minutos e 12 horas, respectivamente.
- Resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias.

A opção por esse tipo de cimento, se deu devido a facilidade de obtenção do material em vários depósitos e lojas de materiais de construção da cidade de Mossoró. O aglomerante foi adquirido em um estabelecimento de materiais de construção, cujo estava armazenado em um ambiente seco, coberto e fechado, protegido da exposição a níveis elevados de umidade e afastado do contato direto com o piso e das paredes externas.

4.1.2. Agregado graúdo

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada a brita granítica, em três tamanhos, apresentados na Figura 1 a seguir, classificada comercialmente em: brita Nº 0 – Também conhecida como pedrisco, com dimensão mínima de 4,75 mm e máxima de 9,50 mm, a Nº 1 – com dimensão mínima de 9,50 mm e máxima de 19,00 mm e a brita Nº 2 – com dimensão mínima de 19,00 mm e máxima de 25,00 mm, proveniente do processo de beneficiamento da rocha granítica.

Figura 1 - Graduação de britas N°0, N°1, N°2, respectivamente.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a caracterização de todos os agregados graúdos foram executados os seguintes ensaios:

4.1.2.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica do material se realizou conforme a ABNT NBR 17054/2022 – Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Para a determinação granulométrica desses agregados foram separadas amostras, conforme prevê a tabela 2 da NM 248/2001 - Agregados - Determinação da composição granulométrica, variando apenas o quantitativo de cada porção, uma vez que a norma expõe a necessidade de testagem de uma maior quantidade quanto maior for seu diâmetro máximo. Assim, foram ensaiados os quantitativos presentes na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Massa mínima, por amostra de ensaio.

Dimensión máxima nominal del agregado / Dimensão máxima nominal do agregado mm	Masa mínima de la muestra de ensayo / Massa mínima da amostra de ensaio kg
< 4,75	0,3*
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

(*) Después del secado. / Após secagem.

Fonte: Norma Mercosul 248 (2001).

Foram utilizadas para realização dos ensaios a sequência de peneiras: 31,50 mm, 25,00 mm; 19,00 mm; 12,50 mm; 9,50 mm; 6,30 mm e 4,75 mm, sendo as de abertura iguais a 19,00 mm, 9,50 mm e 4,75 mm pertencentes a série normal, e as demais pertencentes à série intermediária, todas obedecendo a ABNT NBR MN-ISO 3310-1/2010 – Peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação – parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico, empilhadas de maneira a formar uma série de peneiras com aberturas em ordem crescente, da base para o topo. As amostras, então, foram colocadas na peneira superior ao conjunto e agitada manualmente.

Após a agitação das amostras, procedeu-se à pesagem das frações retidas em cada peneira, tanto da série normal quanto da série intermediária.

4.1.2.2. Índice de forma dos grãos

A determinação do índice de forma dos grãos, regido pela ABNT NBR 7809/2019 – Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio, foi realizada logo após terem sido caracterizados os agregados graúdos pelo método de peneiramento descrito anteriormente, foi realizado a redução da amostra conforme trata a NBR 16915/2021 – Agregados – Amostragem, a fim de se obter a quantidade necessária que a NBR 7809 (ABNT, 2019) exige para que seja possível determinar o índice de forma por esse método. Para isso, foi feita uma proporção levando em conta a massa retida em cada malha no processo de peneiramento, desconsiderando as frações passantes da malha 9,5 mm, assim como o quantitativo retido que não somassem 5% em massa.

Em posse dessa quantidade, que totalizou 200 unidades, necessária para realização do ensaio, foram medidos o comprimento e a espessura, conforme Figura 2, de cada unidade de agregado. Obtendo como resultado o índice de forma dos materiais.

Figura 2 - Determinação de índice de forma pelo método do paquímetro.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1.2.3. Massa unitária

A determinação de massa unitária, conforme a ABNT NBR 16972/2021 – Agregados – Determinação da massa unitária e índice de vazios, é importante para a dosagem e controle de qualidade do concreto, pois influencia diretamente suas propriedades mecânicas e sua resistência. Para tanto, seguindo as instruções detalhadas na NBR 16972 (ABNT, 2021), foi separado uma amostra representativa dos agregados graúdos e vertido, com auxílio de pá e colher de pedreiro, em um recipiente de volume característico de 15 dm³, previamente pesado, formando um leve excesso na parte superior, em seguida, utilizando uma régua, foi retirado todo o excesso com intuito de deixar o material preenchendo todo o espaço da cuba, formando uma superfície plana e uniforme, sendo novamente levado até a balança e pesado para se obter toda a massa do conjunto.

O cálculo da massa unitária (γ) é feito pela diferença entre a massa do recipiente com agregados (m_{ar}) e a massa do recipiente vazio (m_r), dividida pelo volume da cubagem (V), conforme Equação 1:

Equação 1 - Determinação de massa unitária

$$\gamma = \frac{m_{ar} - m_r}{V}$$

Fonte: NBR 16972 (ABNT, 2021)

4.1.3. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado neste ensaio trata-se de uma areia de rio, também conhecida como areia lavada, proveniente do processo de extração no leito do rio Apodi-Mossoró no município de Governador Dix-Sept Rosado/RN, adquirida em loja de materiais de construção, localizada no bairro Alto do Sumaré, Mossoró/RN.

Para a caracterização do agregado miúdo foram executados os seguintes ensaios:

4.1.3.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica do material se realizou conforme a ABNT NBR 17054/2022 – Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio, cujo métodos de ensaios são os mesmos aqueles aplicados aos agregados graúdos. Para realização dos ensaios, em respeito ao que rege a ABNT NBR 16915/2021 – Agregados – Amostragem, foram coletados e reduzidas amostras de 500g do agregado miúdo. Para tanto, foram utilizadas a seguinte sequência de peneiras: 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm e 0,15 mm, sendo essas pertencentes a série normal e em conformidade com a ABNT NBR MN-ISO 3310-1/2010 – Peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação – parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.

4.1.3.2. Massa unitária

A determinação de massa unitária, conforme a ABNT NBR 16972/2021 – Agregados – Determinação da massa unitária e índice de vazios, foi realizada nos mesmos procedimentos já expostos para o agregado graúdo.

4.1.3.3. Massa específica

A determinação da massa específica, conforme a ABNT NBR 9776/1987 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, é um procedimento importante na caracterização dos materiais de construção. Para o presente estudo foi pesado o frasco vazio e seco, anotando sua massa, em seguida, colocou-se água no frasco até marca de 200 cm³ acrescentando, logo em seguida, uma amostra de 500g de agregado miúdo previamente seco. Todo o conjunto foi agitado, cuidadosamente, com o objetivo de eliminar

toda a presença de ar que pudesse haver no sistema. Logo após, foi realizada a leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indicando seu volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo. A massa específica (ou densidade) do agregado miúdo pode ser calculada pela razão do peso de agregado adicionado ao frasco (500 g) pela diferença entre os dois níveis medidos no início e fim do ensaio ($L - 200$). De acordo com a Equação 2, a seguir:

Equação 2 - Determinação de massa específica

$$\gamma = \frac{500}{L - 200}$$

Fonte: NBR 16972 (ABNT, 2021)

4.1.4. Água de emassamento

A água utilizada na preparação do concreto foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Mossoró/RN, fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos Do Rio Grande do Norte (CAERN).

4.2. Preparação do concreto

O traço adotado neste estudo foi selecionado com base na pesquisa em fontes especializadas, representando uma proporção comumente empregada em construções de menor porte, o que o torna relevante como ponto de referência para análises posteriores. Dessa forma, a proporção escolhida foi de 1:2:3;0,61 em massa, ou seja, 1 parte de cimento, 2 partes de agregado miúdo e 3 partes de agregado graúdo, com uma relação água/cimento de 0,61, definindo assim a composição do concreto em questão (BARBOZA, 2008). Afim de moldar-se 12 corpos de prova e realizar o teste de abatimento, foi preparado o traço, sempre levando em consideração as proporções prefixadas, seguinte: 8 kg de cimento, 16 kg de agregado miúdo (areia), 24 kg de agregado graúdo (brita) e 4,88 kg de água, para a confecção de cada traço (Tabela 3). Foram caracterizados cinco tipos de traços, cujo as quantidades e o tipo de cimento, areia e água foram os mesmos, alterando-se apenas a participação dos agregados graúdos, sendo o primeiro traço contendo apenas a brita N°0 (B0), o segundo envolvendo apenas a brita N°1 (B1), o terceiro com brita N°2 (B2), o quarto, visando substituir a brita N°1, com uma mistura percentual de britas N°0 e N°1 (B0B1) e, por último, uma mistura percentual de britas N°1 e N°2 (B1B2), pretendendo substituir a brita N°2.

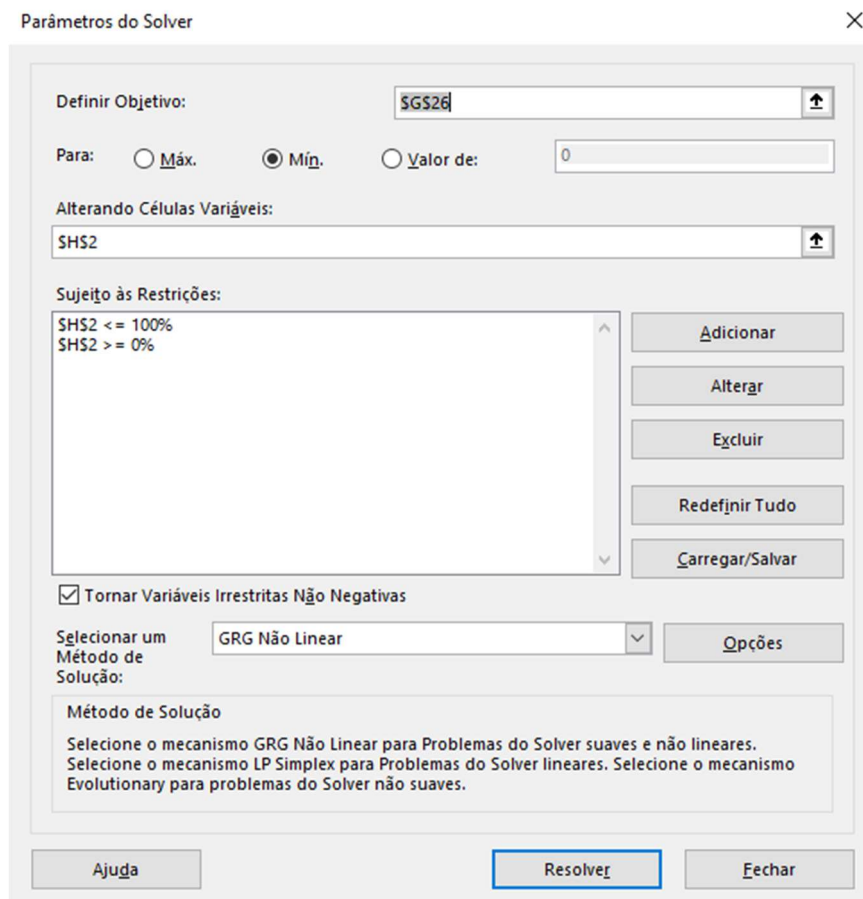
Tabela 3 – Determinação do traço

Traço base utilizado (em massa, kg)		
	Unitário	Produzido
Cimento	1,00	8,00
Agregado miúdo	2,00	16,00
Agregado graúdo	3,00	24,00
Água	0,61	4,88

Fonte: Autoria própria (2023).

O cálculo percentual foi realizado através de uma otimização utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel, que é empregada para testar diferentes cenários e encontrar o valor ideal que influencia um determinado resultado, respeitando as restrições estabelecidas (ver Figura 3).

Figura 3 - Ferramenta Solver do Microsoft Excel.



Fonte: Autoria própria (2023).

No contexto deste trabalho, o Solver foi utilizado com o objetivo de minimizar a soma dos erros percentuais quadráticos quando relacionado a distribuição granulométrica

experimental com a curva granulométrica padrão, a qual é definida como a média entre o limite inferior e superior, conforme estipulado pela NBR 7211 (ABNT, 2022) para as britas N°1 e N°2. Vale salientar que o erro referido anteriormente, foi calculado pelo método do erro quadrático médio (*mean squared error* – MSE), conforme descrito por Wilks (2006), cuja formula é demonstrada na Equação 3 abaixo. Consistindo basicamente no quadrado da diferença entre as duas curvas utilizadas, onde (PO) é percentual ótimo de B1 e B2, (PE) é o percentual experimental obtido nos ensaios e (n) a quantidade de peneiras utilizadas no ensaio.

Equação 3 - cálculo do erro quadrático médio

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (PO - PE)^2$$

Fonte: Wilks (2006)

Isso permitiu um percentual de substituição máximo, minimizando a diferença, entre o que seria um material ideal, de acordo com a norma, e o material utilizado para o trabalho. As Tabelas 4 e 5 demonstram o cálculo feito para obtenção desses percentuais:

Tabela 4 - Determinação do teor de brita N°0 e N°1.

Abertura das peneiras (mm)	Brita N°0	Brita N°1	Percentual Ótimo (Brita N°1)	Percentual teórico (%)	Percentual teórico acumulado (%)	Erro
	Percentual retido (%)	Percentual retido (%)				
25,00	0,00	0,00	2,50%	0,00%	0,00%	0,06%
19,00	0,00	4,17	8,50%	0,41%	0,41%	0,65%
12,50	0,12	72,61	52,50%	7,23%	7,64%	20,49%
9,50	23,76	19,94	90,00%	23,38%	31,03%	44,38%
6,30	62,58	2,99	96,00%	56,73%	87,76%	15,42%
4,75	8,14	0,15	97,50%	7,36%	95,11%	81,26%
2,40	0,00	0,00	100,00%	0,00%	95,11%	100,00%
Erro médio quadrático						27,04%
Teor brita N°0 = 90,18%			Teor brita N°1 = 9,82%			

Fonte: Autoria própria (2023).

A substituição desses agregados, usados como referências, pelos agregados imediatamente inferiores em diâmetro máximo, ou seja, a brita N°0 e a brita N°1, visou agrupar as partículas de agregados de forma mais compacta, aumentando, assim, a densidade e, teoricamente, a resistência do elemento.

Tabela 5 - Determinação do teor de brita N°1 e N°2.

Abertura das peneiras (mm)	Brita N°1 Percentual retido (%)	Brita N°2 Percentual retido (%)	Percentual Ótimo (Brita N°2)	Percentual teórico (%)	Percentual teórico acumulado (%)	Erro
31,50	0,00	0,00	2,50%	0,00%	0,00%	0,06%
25,00	0,00	15,15	15,00%	3,77%	3,77%	1,26%
19,00	4,17	64,17	80,00%	19,11%	22,88%	37,07%
12,50	72,61	20,09	96,00%	59,53%	82,42%	13,30%
9,50	19,94	0,46	97,50%	15,09%	97,51%	67,92%
6,30	2,99	0,03	100,00%	2,25%	99,76%	95,54%
4,75	0,15	0,00	100,00%	0,11%	99,87%	99,78%
2,40	0,00	0,00	100,00%	0,00%	99,87%	100,00%
Erro médio quadrático						44,99%
Teor brita N°1 = 75,10%			Teor brita N°2 = 24,90%			

Fonte: Autoria própria (2023).

Assim, as formulações das misturas produzidas, acrescidos ao quantitativo de cimento, 8 kg, e de agregado miúdo, 16 kg, que são comuns e constante para todos os traços, estão detalhadas na Tabela 6, a seguir:

Tabela 6 - Proporções de traços produzidos.

		Teor de brita N° 0 (Tb0)	Teor de brita N° 1 (Tb1)	Teor de brita N° 2 (Tb2)
Traço (B0)	Percentual	100,00%	-	-
	Em massa (kg)	24,00	-	-
Traço (B1)	Percentual	-	100,00%	-
	Em massa (kg)	-	24,00	-
Traço (B2)	Percentual	-	-	100,00%
	Em massa (kg)	-	-	24,00
Traço (B0B1)	Percentual	90,18%	9,82%	-
	Em massa (kg)	21,64	2,36	-
Traço (B1B2)	Percentual	-	75,10%	24,90%
	Em massa (kg)	-	18,02	5,98

Fonte: Autoria própria (2023).

A mistura foi preparada de forma mecânica, utilizando uma betoneira de 150 litros fabricada pela GMEG Betoneiras. Com o equipamento em funcionamento, primeiramente, foi adicionado 50% da quantidade de água e o quantitativo de agregado graúdo, deixando revirar durante um minuto. Logo após, foi adicionado todo o quantitativo de cimento, deixando por mais um minuto para que o aglomerante envolvesse toda a brita e, posteriormente, o total de

agregado miúdo (areia). Por fim, o restante da água de amassamento, deixando a mistura homogeneizar por cerca de dois minutos. Foi realizado a mistura do material durante, aproximadamente, 6 minutos. O procedimento mencionado foi executado de forma idêntica para todos os traços experimentais.

Para a verificação da consistência do concreto foi utilizado o teste do abatimento do tronco de cone, também conhecido como *slump test*, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 16889/2020 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Este ensaio tem como objetivo verificar a uniformidade do abatimento entre uma remessa e outra de concreto. Aplica-se a concretos cuja consistência seja plástica, com abatimento igual ou superior a 10 mm. O ensaio conta com uma chapa metálica quadrada 50 cm x 50 cm, que serve de apoio para o molde padrão, medindo $300\text{ mm} \pm 2$ de altura, $200\text{ mm} \pm 2$ de diâmetro de base inferior e $100\text{ mm} \pm 2$ de diâmetro de base superior, ambos previamente umedecidos. Sendo preenchido o molde com o concreto fresco em três camadas iguais, compactando, com auxílio de uma haste metálica cilíndrica de $16\text{ mm} \pm 2$ de diâmetro e comprimento de 600 mm, cada faixa com 25 golpes, distribuídos, uniformemente e cuidadosamente para evitar segregação do material, em toda a superfície da camada. Em seguida, foi removido o excesso de concreto acumulado na parte superior do molde e retirado o molde com um movimento vertical de maneira uniforme, deixando o concreto se expandir lateralmente. Logo após, foi medido o abatimento a partir da parte superior do molde até a superfície do concreto usando uma régua. O procedimento é exemplificado nas Figuras 4 e 5, a seguir:

Figura 4 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 5 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.2.1. Moldagem

Após a elaboração do concreto e a avaliação de sua consistência por meio do teste de abatimento, procedeu-se à moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, destinados aos ensaios de resistência à compressão axial. Este processo seguiu as diretrizes estabelecidas na norma NBR 5738 (ABNT, 2015), que regula as práticas relacionadas à moldagem e cura desses corpos de prova.

Os moldes utilizados foram cilíndricos e confeccionados em aço estanque, possuindo um diâmetro de 10 centímetros e altura de 20 centímetros. Antes de depositar o concreto nos moldes, procedeu-se à aplicação de uma fina camada de desmoldante em sua parte interna, garantindo uma desmoldagem eficiente posteriormente.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao processo de adensamento mecânico, conforme as diretrizes previstas na norma técnica. Essa etapa assegurou a eliminação de possíveis vazios e a obtenção de uma mistura compacta e homogênea. A totalidade dos recipientes de concreto foi preenchida e, em seguida, foi nivelado a superfície com auxílio de espátula.

A cura inicial dos corpos de prova foi realizada em condições ambientais, sem proteção especial, durante as primeiras 24 horas após a moldagem (ver Figura 6). Após esse período, os corpos de prova foram cuidadosamente identificados e posteriormente imersos em água para o processo de cura final (ver Figura 7), que antecedeu os ensaios de resistência à compressão axial. Este processo foi aplicado na moldagem de um total de 60 corpos de prova, sendo 12 unidades de cada traço específico.

Figura 6 - Cura inicial dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 7 - Cura final dos corpos de prova por imersão em água.



Fonte: Autoria própria (2023).

Uma vez completado o tempo de cura necessário, visando à coleta de dados representativos e à realização dos ensaios subsequentes de resistência à compressão axial aos 7, 14, 21 e 28 dias, os corpos de prova foram retirados da água e submetidos ao processo de capeamento.

4.2.2. Massa específica aparente do concreto

A determinação da massa específica aparente do concreto fresco seguiu as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 9833/2008 - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Esse ensaio desempenha um papel importante ao permitir uma avaliação indireta da densidade de empacotamento dos agregados presentes no concreto no estado fresco. Dessa forma, ele oferece uma indicação sobre a compactidade da mistura de materiais granulares, sugerindo que composições com maior densidade de empacotamento tendem a resultar em uma estrutura global mais resistente.

O ensaio começou com a preparação do concreto fresco, cujo método de fabricação já foi exposto anteriormente. Em seguida, preencheu-se um recipiente previamente pesado, no presente estudo foi utilizado o próprio molde de corpos de prova para essa aferição, cujo volume ficou em torno dos 1.570,80 cm³, conforme mostrado na Figura 8 e, em seguida, houve o adensamento mecânico e posterior regularização da superfície com auxílio de colher de pedreiro, sendo pesado logo em seguida para obtenção do peso total do conjunto.

Figura 8 - Determinação da massa específica aparente.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.3. Resistência a compressão axial

Após o período de cura de 7, 14, 21 e 28 dias, foram selecionados três corpos de prova para cada idade de cura, os quais foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial. Os ensaios foram conduzidos seguindo as diretrizes estabelecidas na norma ABNT NBR 5739/2018 - Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEMAT).

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma prensa hidráulica fabricada pela empresa EMIC, modelo PC 200C, que atende às especificações da ABNT NBR ISO NM 7500-1, classificada como classe 1 e equipada com módulo eletrônico. Os corpos de prova foram posicionados de forma que o eixo central de cada um coincidissem com o eixo da máquina (Figura 9), garantindo que a resultante da força aplicada passasse pelo centro de cada corpo de prova.

Figura 9 - Determinação de resistência a compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após os devidos ajustes na prensa, o ensaio de compressão foi conduzido de maneira contínua, ou seja, a aplicação da força foi gradual e constante, sem ocorrência de choques. O carregamento de força foi interrompido apenas quando se observou uma diminuição nas forças aplicadas, indicando a ocorrência da ruptura do corpo de prova. Ressalta-se que o procedimento foi uniformemente aplicado a todos os corpos de prova, garantindo a consistência dos resultados obtidos.

4.4. Velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto

O ensaio de propagação de ondas é geralmente realizado para avaliar a qualidade e integridade do concreto. Nesse estudo, o procedimento experimental foi realizado conforme explica a ABNT NBR 8802/2019 – Concreto endurecido – Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica. O ensaio iniciou-se com a limpeza da área onde haveria o contato do equipamento, para que não houvesse interferência e, conseqüentemente, perda de ondas até chegar ao receptor. Em seguida, usando um bloco de referência foi feita a calibração do equipamento, tornando padrão a frequência emitida pelo equipamento e garantindo os mesmos parâmetros para todos os corpos de provas. Em ato contínuo, conforme mostra a Figura 10, foi adicionado um acoplante em gel na área onde o transdutor seria colocado, com intuito de ajudar na transmissão das ondas entre o transdutor e o concreto. Posteriormente, os transdutores foram colocados em superfícies opostas, afim de formar uma transmissão direta, cujas ondas são emitidas e recebidas com maior facilidade, evitando distorções nos valores

medidos, iniciando o ensaio foi emitido um pulso ultrassônico, com frequência de 24KHz. Assim, com base no tempo que leva para as ondas viajarem e retornarem, o equipamento calcula a velocidade e o tempo de propagação das ondas no concreto.

Figura 10 - Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica.



Fonte: Autoria própria (2023)

As aferições feitas no ensaio foram comparadas aos valores disponíveis em literatura, que faz uma correlação entre a velocidade de onda media e a qualidade do concreto ensaiado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise granulométrica

5.1.1. Agregado miúdo

Foram conduzidos dois ensaios de análise granulométrica, nos quais as porcentagens retidas individualmente não apresentaram uma variação superior a 4% entre as peneiras com aberturas de malha semelhantes, em conformidade com o item 6.1.1 da NBR 17054 (ABNT, 2022). Os resultados de cada ensaio estão detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise granulométrica da Areia.

Abertura Das Peneiras (mm)	massa (g)		Percentual Retido (%)			Percentual Acumulado (%)		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	Média	Amostra 01	Amostra 02	Média
4,75	7,60	7,80	1,51	1,56	1,54	1,51	1,56	1,54
2,40	46,60	43,20	9,28	8,65	8,97	10,79	10,22	10,50
1,20	111,30	106,60	22,16	21,35	21,76	32,95	31,57	32,26
0,60	137,60	136,80	27,40	27,40	27,40	60,35	58,97	59,66
0,30	144,40	147,60	28,75	29,57	29,16	89,11	88,54	88,82
0,15	44,20	46,00	8,80	9,21	9,01	97,91	97,76	97,83
Resíduo	10,50	11,20	2,09	2,24	2,17	100,00	100,00	100,00
Total	502,20	499,20	100,00	100,00	100,00			

Fonte: Autoria própria (2023).

Através da análise granulométrica, do ensaio de massa específica e o de massa unitária foi possível determinar as propriedades físicas, descritas na Tabela 8:

Tabela 8 - Propriedades físicas da areia.

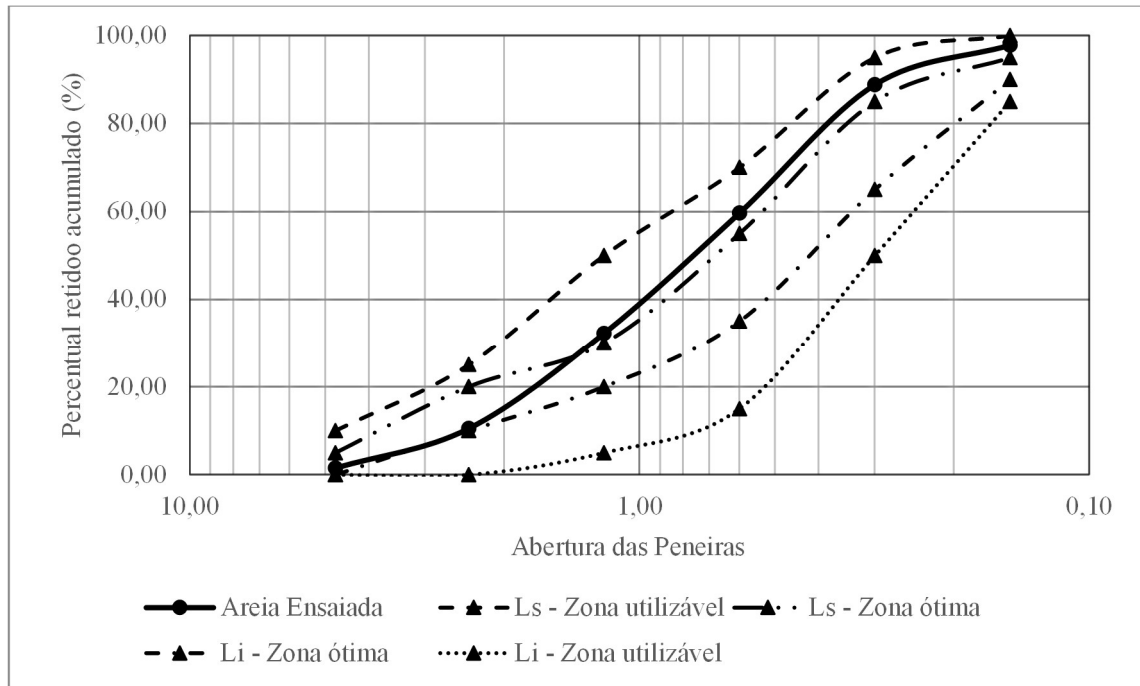
Diâmetro máximo (mm)	4,75	ABNT NBR 7211/2022
Massa unitária (kg/m ³)	1382,42	ABNT NBR 16972/2021
Modulo de Finura	2,91	ABNT NBR 7211/2022
Massa específica (g/cm ³)	2,60	ABNT NBR 9776:1987

Fonte: Autoria própria (2023).

O resultado do ensaio com a areia foi considerado satisfatório, uma vez que a curva granulométrica da areia se enquadrou dentro da zona utilizável de acordo com a Tabela 2 da

NBR 7211 (ABNT, 2022). Além disso, é possível observar que, conforme a mesma tabela citada anteriormente, o módulo de finura encontra-se na zona utilizável superior. Isso significa que a areia utilizada no ensaio pode ser empregada na concepção de concreto, conforme demonstrado no Gráfico 2:

Gráfico 2 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Autoria própria (2023).

5.1.2. Agregado graúdo

Para brita N°0 granítica, realizou-se dois ensaios de análise granulométrica. Os resultados obtidos em cada ensaio estão presentes na Tabela 9:

Fica evidente que os percentuais experimentais do ensaio com a brita N°0, não ficaram dentro da zona utilizável, previsto na tabela 6 da NBR 7211 (ABNT, 2022), logo tal agregado não poderia ser utilizado para a confecção do concreto. Porém, como o intuito do trabalho é justamente corrigir essa discrepância, que pode acontecer cotidianamente, foi dado continuidade e feito todos os cálculos para percentuais de substituição, levando em consideração esses valores reais.

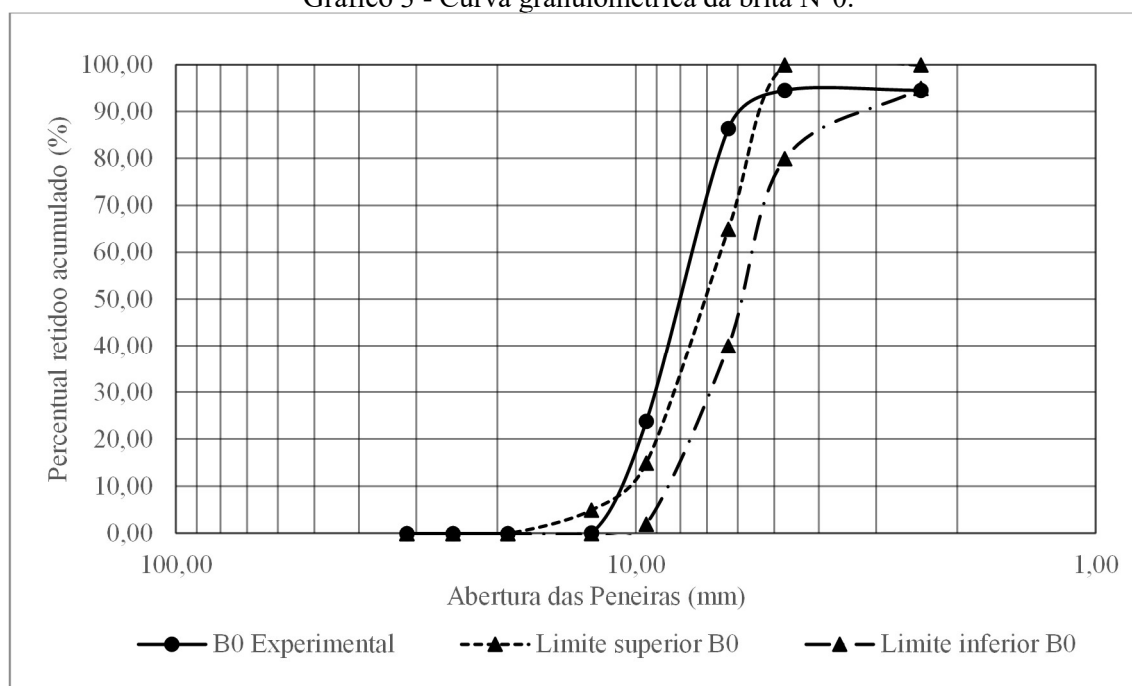
Tabela 9 - Análise granulométrica da brita N°0.

Abertura das peneiras (mm)	Massa (g)		Percentual Retido (%)			Percentual Acumulado (%)		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	Média	Amostra 01	Amostra 02	Média
31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12,50	4,60	0,00	0,23	0,00	0,12	0,23	0,00	0,12
9,50	582,40	368,00	29,12	18,40	23,76	29,35	18,40	23,88
6,30	1181,90	1321,40	59,10	66,07	62,58	88,45	84,47	86,46
4,75	147,80	177,80	7,39	8,89	8,14	95,84	93,36	94,60
2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	95,84	93,36	94,60
Resíduo	83,20	132,90	4,16	6,64	5,40	100,00	100,00	100,00
Total	1999,90	2000,10	100,00	100,00	100,00			

Fonte: Autoria própria (2023).

Representação do ensaio no Gráfico 3, a seguir:

Gráfico 3 - Curva granulométrica da brita N°0.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para brita N°1 granítica, realizou-se dois ensaios de análise granulométrica. Os resultados obtidos em cada ensaio estão presentes nas Tabela 10:

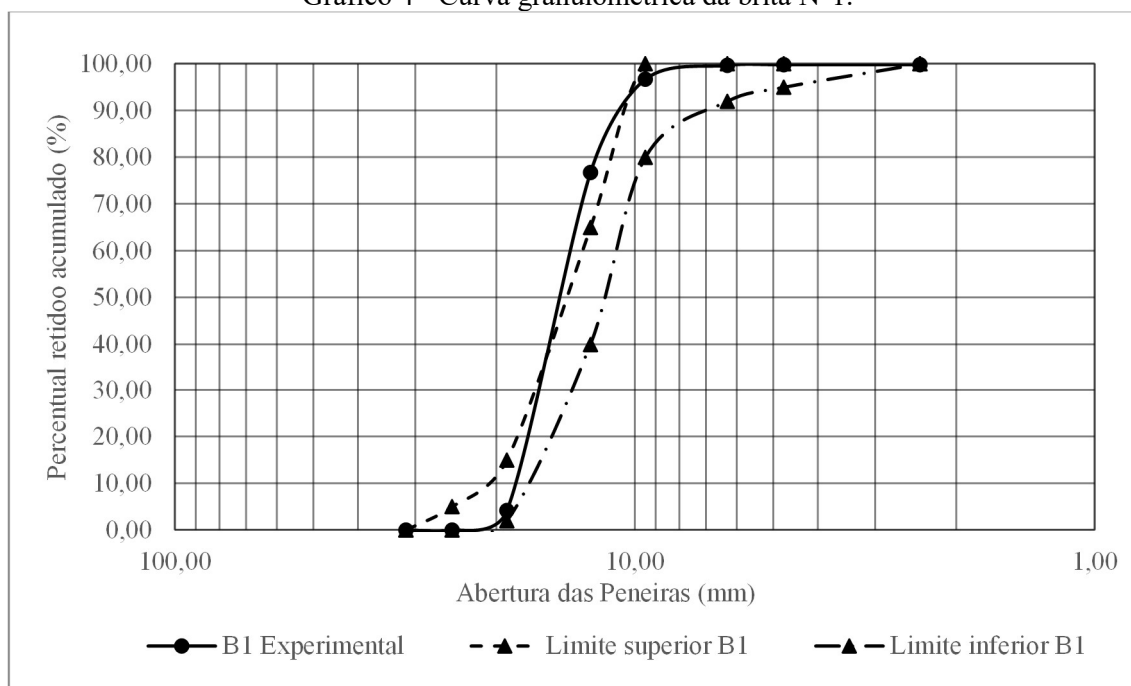
Tabela 10 - Análise granulométrica da brita N°1.

Abertura das peneiras (mm)	Massa (g)		Percentual Retido (%)			Percentual Acumulado (%)		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	Média	Amostra 01	Amostra 02	Média
31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,00	247,80	169,30	4,96	3,39	4,17	4,96	3,39	4,17
12,50	3500,80	3758,70	70,03	75,19	72,61	74,99	78,57	76,78
9,50	1068,10	925,40	21,37	18,51	19,94	96,36	97,09	96,72
6,30	171,50	127,40	3,43	2,55	2,99	99,79	99,63	99,71
4,75	4,80	9,90	0,10	0,20	0,15	99,88	99,83	99,86
2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,88	99,83	99,86
Resíduo	5,90	8,40	0,12	0,17	0,14	100,00	100,00	100,00
Total	4998,90	4999,10	100,00	100,00	100,00			

Fonte: Autoria própria (2023).

Fica evidente que os percentuais experimentais ensaio com a brita N°1, não ficaram dentro da zona utilizável, previsto na tabela 6 na NBR 7211 (ABNT, 2022), logo tal agregado não poderia ser utilizado para a confecção do concreto. Porém, como o intuito do trabalho é justamente corrigir essa discrepância, que pode acontecer cotidianamente, foi dado continuidade e feito todos os cálculos para percentuais de substituição, levando em consideração esses valores reais. Representação do ensaio a seguir no Gráfico 4:

Gráfico 4 - Curva granulométrica da brita N°1.



Fonte: Autoria própria (2023).

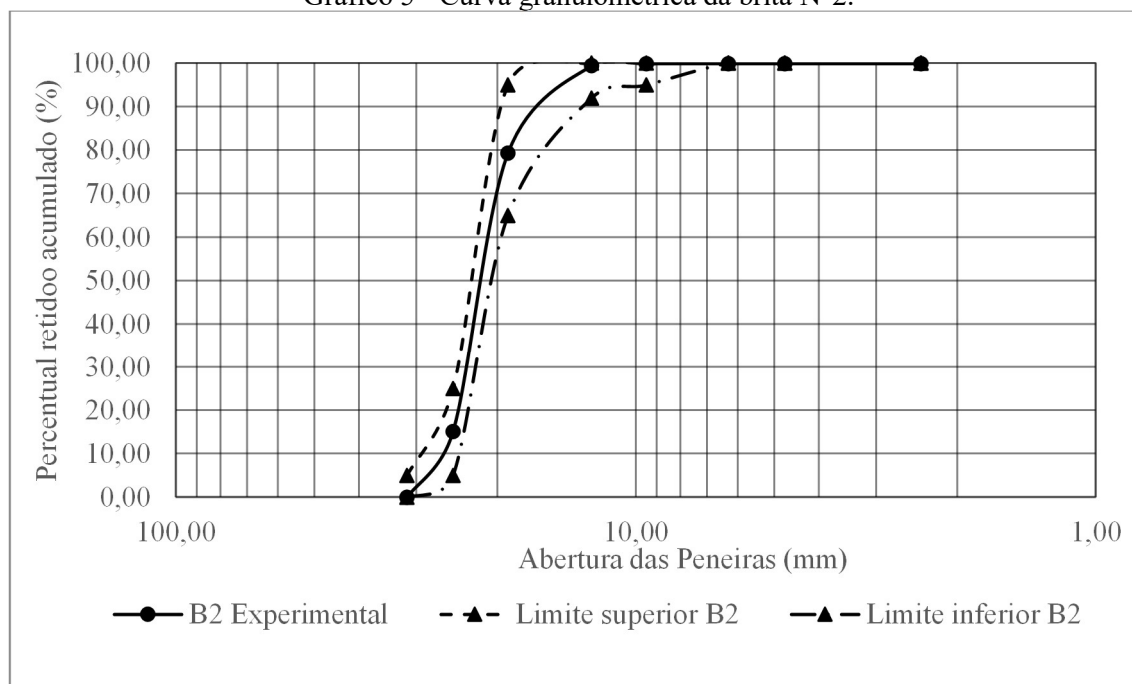
Para brita N°2 foram conduzidos dois ensaios de análise granulométrica, nos quais as porcentagens retidas individualmente não apresentaram uma variação superior a 4% entre as peneiras com aberturas de malha semelhantes, em conformidade com o item 6.1.1 da NBR 17054 (ABNT, 2022). Os resultados de cada ensaio estão detalhados na Tabela 11 e representado no Gráfico 5:

Tabela 11 - Análise granulométrica da brita N°2.

Abertura das peneiras (mm)	Massa (g)		Percentual Retido (%)			Percentual Acumulado (%)		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	Média	Amostra 01	Amostra 02	Média
31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,00	1538,70	1496,10	15,34	14,96	15,15	15,34	14,96	15,15
19,00	6170,50	6684,60	61,50	66,86	64,18	76,83	81,82	79,33
12,50	2261,60	1763,40	22,54	17,64	20,09	99,37	99,46	99,42
9,50	53,50	38,50	0,53	0,39	0,46	99,91	99,85	99,88
6,30	3,00	3,90	0,03	0,04	0,03	99,94	99,88	99,91
4,75	0,00	0,90	0,00	0,01	0,00	99,94	99,89	99,91
2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,94	99,89	99,91
Resíduo	6,50	10,60	0,06	0,11	0,09	100,00	100,00	100,00
Total	10033,80	9998,00	100,00	100,00	100,00			

Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 5 - Curva granulométrica da brita N°2.



Fonte: Autoria própria (2023).

O resultado do ensaio com a brita N°2 foi considerado satisfatório, uma vez que a curva granulométrica da areia se enquadrou dentro da zona utilizável de acordo com a Tabela 6 da NBR 7211 (ABNT, 2022). Isso significa que a areia utilizada no ensaio pode ser empregada na concepção de concreto

Através da análise granulométrica, do ensaio de massa específica e o de massa unitária foi possível determinar as propriedades físicas, descritas na Tabela 12:

Tabela 12 - Propriedades físicas das britas N°0, N°1 e N°2.				
	Brita N°0	Brita N°1	Brita N°2	Norma
Diâmetro máximo (mm)	12,50	19,00	31,50	ABNT NBR 7211/2022
Massa unitária (kg/m³)	1561,44	1422,21	1379,11	ABNT NBR 16972/2021
Módulo de Finura	5,91	7,00	7,79	ABNT NBR 7211/2022
Índice de Forma	N/A	2,26	2,08	ABNT NBR 7809/2019

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados dos ensaios com todos os tamanhos de britas foram considerados satisfatórios excetuando-se o percentual granulométrico das partículas de brita N°0 e N°1, que ficaram fora dos limites previstos em norma, que não influenciam no teor do trabalho, pois terão seu percentual corrigido, conforme otimização utilizada. Além disso, é possível observar que, conforme a tabela 6 da NBR 7211 (ABNT, 2022), os módulos de finura encontram-se dentro dos limites especificados. Isso significa que todos os agregados que foram testados podem ser empregados na concepção de concreto.

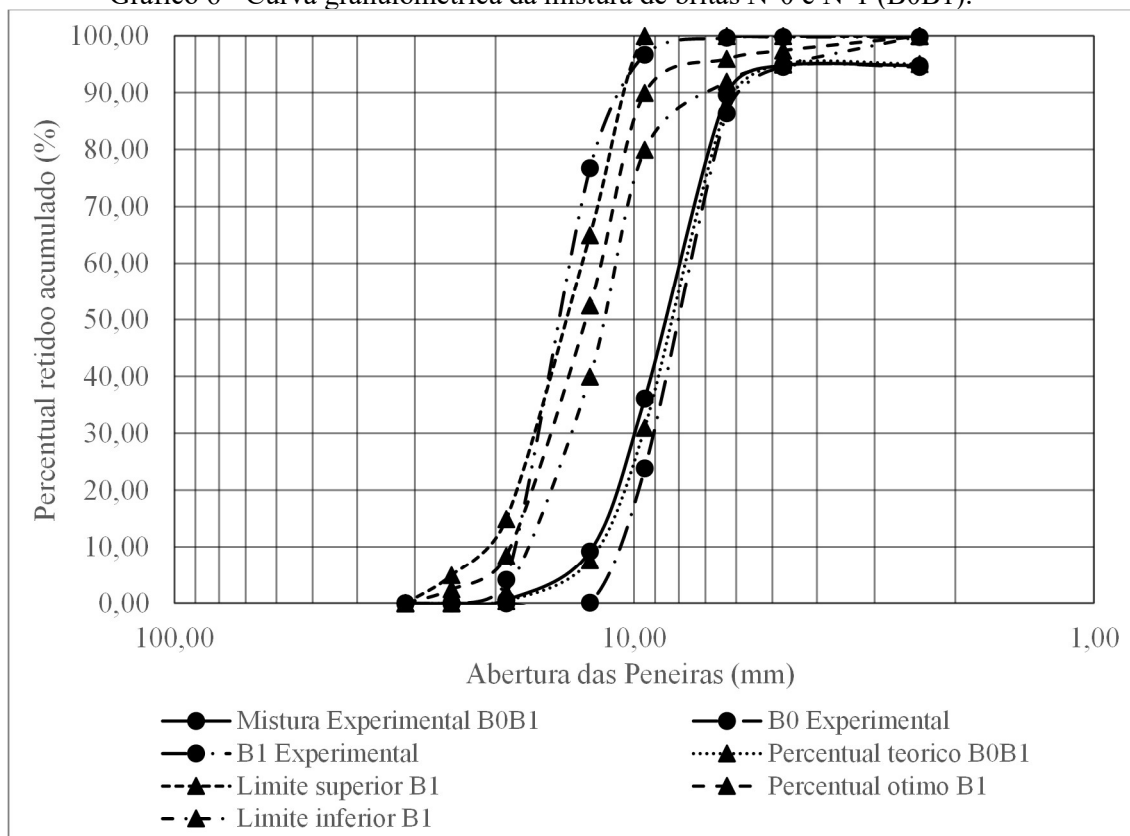
A partir dos resultados da análise granulométrica das britas N°0 e N°1, foi conduzida uma otimização por meio de *software*, resultando em um teor de substituição de 90,18% para a brita N°1 (B1). Isso implica que teoricamente, sem prejudicar a mistura e a resistência final à compressão do concreto, é possível substituir 90,18% da brita N°1 (B1) pela brita N°0 (B0). Após a combinação dos agregados nas proporções teóricas determinadas, realizou-se uma segunda análise granulométrica das partículas em duas amostras, nos quais as porcentagens retidas individualmente não apresentaram uma variação superior a 4% entre as peneiras com aberturas de malhas semelhantes, em conformidade com o item 6.1.1 da NBR 17054 (ABNT, 2022). Os resultados de cada ensaio estão detalhados na Tabela 13 e representado através do Gráfico 6:

Tabela 13 - Análise granulométrica da mistura de britas N°0 e N°1 (B0B1).

Abertura das peneiras (mm)	Massa (g)		Percentual Retido (%)			Percentual Acumulado (%)		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	Média	Amostra 01	Amostra 02	Média
31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,00	14,80	44,10	0,30	0,88	0,59	0,30	0,88	0,59
12,50	474,50	392,90	9,50	7,86	8,68	9,79	8,74	9,27
9,50	1354,60	1330,80	27,11	26,63	26,87	36,91	35,37	36,14
6,30	2623,20	2729,90	52,50	54,62	53,56	89,41	89,99	89,70
4,75	256,60	257,40	5,14	5,15	5,14	94,55	95,14	94,84
2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,55	95,14	94,84
Resíduo	272,40	242,90	5,45	4,86	5,16	100,00	100,00	100,00
Total	4996,10	4998,00	100,00	100,00	100,00			

Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 6 - Curva granulométrica da mistura de britas N°0 e N°1 (B0B1).



Fonte: Autoria própria (2023).

Além da curva experimental praticamente se sobrepor à curva teórica, os resultados obtidos no ensaio granulométrico da mistura dos agregados graúdos foram satisfatórios. Embora a curva esteja localizada fora da zona ótima, delimitada entre os limites superior e

inferior, tomados como base, da brita N°1 (B1), ela se encontra a uma distância máxima em relação à curva ótima. Essa discrepância em relação aos limites de composição da B1 era esperada, uma vez que estamos combinando agregados com tamanhos característicos diferentes. Portanto, houve uma tendência de aproximação da curva granulométrica àquela do material que possui maior porcentagem significativa. Nesse caso, houve uma aproximação da curva da brita N°0 (B0). Assim, a mistura dos agregados mostrou-se adequada para a produção do concreto.

A partir dos resultados da análise granulométrica das britas N°1 e N°2, foi conduzida uma otimização por meio de *software*, resultando em um teor de substituição de 75,10% para a brita N°2 (B2). Isso implica que teoricamente, sem prejudicar a mistura e a resistência final à compressão do concreto, é possível substituir 75,10% da brita N°2 (B2) pela brita N°1 (B1). Após a combinação dos agregados nas proporções teóricas determinadas, realizou-se uma segunda análise granulométrica das partículas em duas amostras, nos quais as porcentagens retidas individualmente não apresentaram uma variação superior a 4% entre as peneiras com aberturas de malha semelhantes, em conformidade com o item 6.1.1 da NBR 17054 (ABNT, 2022). Os resultados de cada ensaio estão detalhados na Tabela 14:

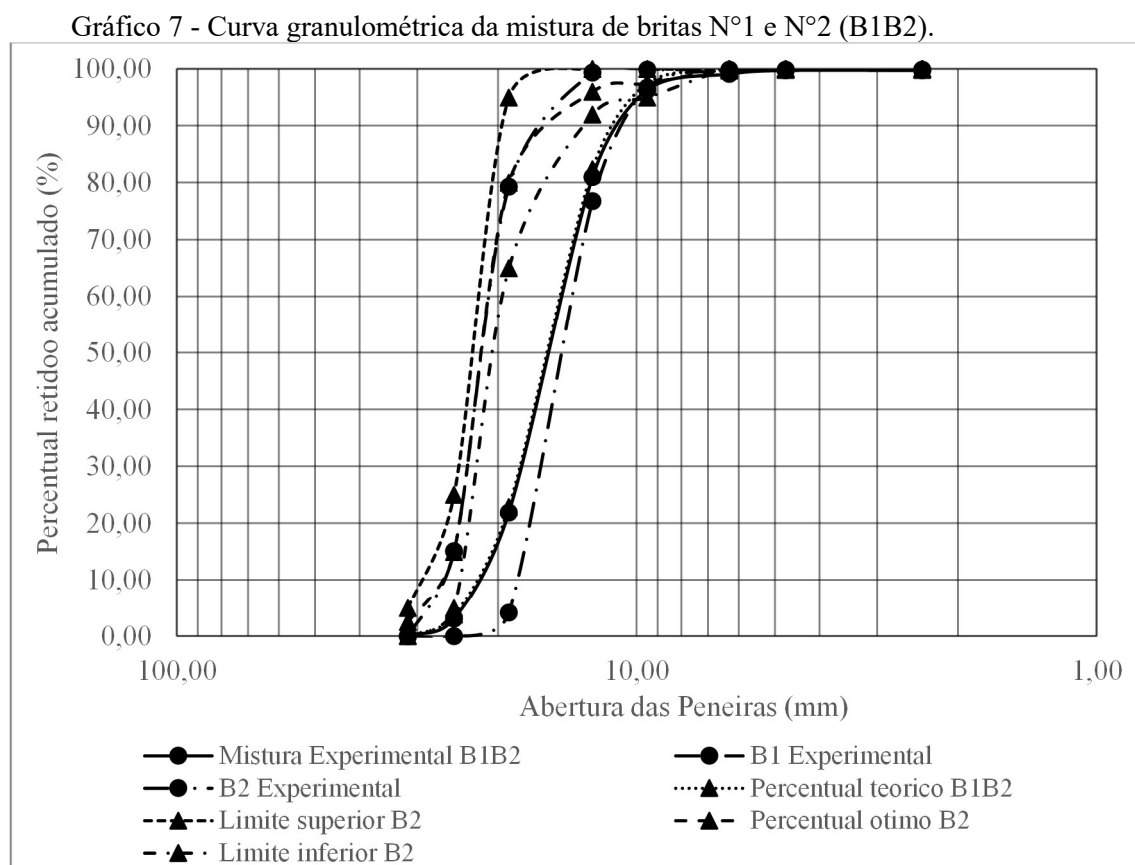
Tabela 14 - Análise granulométrica da mistura de britas N°1 e N°2 (B1B2)

Abertura das peneiras (mm)	Massa (g)		Percentual Retido (%)			Percentual Acumulado (%)		
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	Média	Amostra 01	Amostra 02	Média
25,00	264,50	359,70	2,65	3,60	3,12	2,65	3,60	3,12
19,00	1829,10	1931,50	18,30	19,32	18,81	20,94	22,92	21,93
12,50	5971,50	5841,80	59,74	58,43	59,08	80,68	81,35	81,01
9,50	1520,20	1550,40	15,21	15,51	15,36	95,89	96,86	96,37
6,30	285,50	271,40	2,86	2,71	2,79	98,74	99,57	99,16
4,75	93,10	30,80	0,93	0,31	0,62	99,67	99,88	99,78
2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,67	99,88	99,78
Resíduo	32,50	12,20	0,33	0,12	0,22	100,00	100,00	100,00
Total	9996,40	9997,80	100,00	100,00	100,00			

Fonte: Autoria própria (2023)

Além da curva experimental praticamente se sobrepor à curva teórica, os resultados obtidos no ensaio granulométrico da mistura dos agregados graúdos foram satisfatórios. Embora a curva esteja localizada fora da zona ótima, delimitada entre os limites superior e inferior da brita N°2 (B2), ela se encontra a uma distância máxima em relação à curva ótima. Essa discrepância em relação aos limites de composição da B2 era esperada, uma vez que estamos combinando agregados com tamanhos característicos diferentes. Portanto, houve uma

tendência de aproximação da curva granulométrica àquela do material que possui maior porcentagem significativa. Nesse caso, houve uma aproximação da curva da brita N°1 (B1). Assim, a mistura dos agregados mostrou-se adequada para a produção do concreto, conforme demonstrado no Gráfico 7:



Fonte: Autoria própria (2023)

Através da análise granulométrica, do ensaio de índice de forma e o de massa unitária foi possível determinar as propriedades físicas, descritas na Tabela 15:

Tabela 15 - Propriedades físicas da mistura de britas N°0 e N°1 (B0B1) e N°1 e N°2 (B1B2).

	(B0B1)	(B1B2)	Norma
Diâmetro máximo (mm)	19,00	25,00	ABNT NBR 7211/2022
Massa unitária (kg/m³)	1528,29	1405,63	ABNT NBR 16972/2021
Módulo de Finura	6,06	7,17	ABNT NBR 7211/2022
Índice de Forma	2,28	2,25	ABNT NBR 7809/2019

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados dos ensaios com todos os tamanhos de britas foram considerados satisfatórios. Além disso, é possível observar que, conforme a tabela 6 da NBR 7211 (ABNT, 2022), o módulo de finura da mistura B0B1 encontra-se dentro dos limites especificados para brita B0, cujo tem maior percentual na mistura e consequentemente acaba diminuindo o módulo de finura, quando comparado a brita B1, que foi tomada como referencial. Para brita B1B2 o valor do módulo de finura encontra-se levemente acima do limite máximo para a brita B1, cujo tem maior percentual na mistura e consequentemente acaba diminuindo o módulo de finura, quando comparado a brita B1, que foi tomada como referencial, levando em consideração a diferença de resultado, podemos considerar que está dentro do esperado. Com relação ao índice de forma, as misturas apresentaram valores abaixo de 3, neste caso, estão de acordo com a norma 7809/2019 para definir que possuem um formato regular. Isso significa que todos os agregados que foram testados podem ser empregados na concepção de concreto.

5.2. Ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*)

O teste de abatimento do tronco de cone (*slump test*) foi conduzido com o propósito de avaliar a consistência e a trabalhabilidade de cada traço individualmente, conforme apresentado na Tabela 16:

Tabela 16 - Resultado do ensaio de consistência.

Abatimento (mm)	
Traço (B0)	35
Traço (B1)	115
Traço (B2)	135
Traço (B0B1)	100
Traço (B1B2)	125

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme classificação exposta por Andolfato (2002), o traço B0 pode ser categorizado como concreto de consistência firme, enquanto os traços B1 e B0B1 podem ser descritos como concretos de consistência média, já os traços B2 e B1B2 podem ser classificados como de consistência mole. Levando em consideração a superfície específica de cada agregado, era esperado que agregado menores tivesse um abatimento menor, uma vez que a área superficial é maior quando comparada com a área superficial dos agregados com $D_{máx}$ maior, como as britas B1 e B2. Portanto, neste caso, a utilização do método do empacotamento implica

na diminuição da trabalhabilidade do concreto. Como forma de adequar esse abatimento poderia ser modificado a quantidade de água de cada traço, diminuindo a quantidade, conforme aumentasse o tamanho do agregado.

5.3. Peso específico aparente

O peso específico aparente tende a aumentar quando os vazios são reduzidos, o que pode contribuir para melhorias na resistência mecânica e na durabilidade do concreto, isso ocorre porque a redução dos vazios implica em uma maior compactação dos materiais na mistura, resultando em uma maior densidade (ASATO, 2018). O resultado do peso específico aparente das misturas no estado fresco, estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultado do peso específico aparente.

Peso específico aparente (kg/m ³)	
Traço (B0)	2398,15
Traço (B1)	2445,32
Traço (B2)	2422,34
Traço (B0B1)	2412,66
Traço (B1B2)	2409,54

Fonte: Autoria própria (2023).

Com base nos resultados do ensaio, podemos concluir que todos os traços confeccionados obtiveram um bom resultado, uma vez que o peso específico está coerente com o peso específico médio para concreto simples, em torno de 2400 kg/m³ (Mehta; Monteiro, 2008). Vale salientar que, numa comparação dos traços referenciais (B0 e B1) com as misturas (B0B1 e B1B2) não houve variações significativas nos resultados, o que nos faz concluir que, apesar de aumentarmos a compactação do concreto, substituindo as partículas maiores por menores, essa modificação não foi suficiente para tornar o peso do concreto maior.

5.4. Resistência à compressão

No estado endurecido, comparou-se a resistência à compressão do traço de referência B0, B1 e B2 com as resistências dos traços em análise B0B1 e B1B2 obtidas após 7, 14, 21 e

28 dias de cura. Os resultados dos ensaios de ruptura dos corpos de prova são apresentados na Tabela 18 e nos Gráficos de 8 a 11, a seguir:

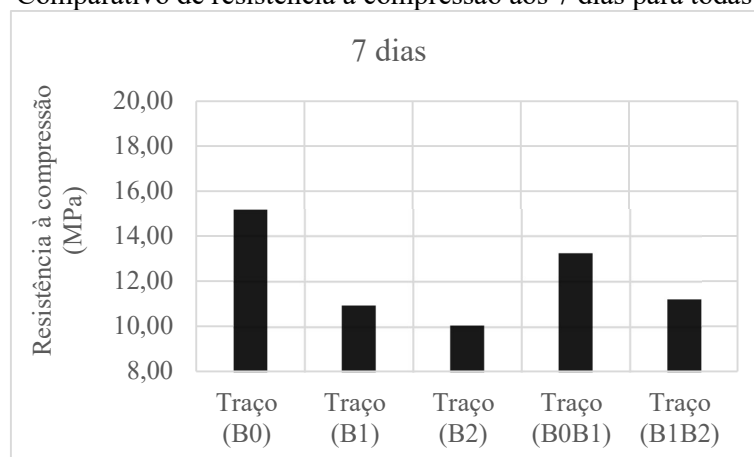
É possível verificar que, comparando o traço de referência B1 com o traço experimental B0B1, assim como comparando B2 com B1B2, os traços experimentais tiveram um ganho considerável na resistência em todas as idades. O ganho de resistência do traço de mistura B0B1 em relação ao traço B1, após 28 dias de cura, foi de 28,50%, enquanto que no traço B1B2, o aumento foi de 14,12% em relação ao traço B2. Isso evidencia os benefícios da mistura, que promoveu uma maior compacidade dos agregados, resultando em um aumento significativo da resistência do concreto.

Tabela 18 - Resultado da resistência à compressão axial.

Média de resistência a compressão axial (MPa)					
Idade	Traço (B0)	Traço (B1)	Traço (B2)	Traço (B0B1)	Traço (B1B2)
7 dias	15,16	10,94	10,06	13,23	11,20
14 dias	15,34	11,81	9,90	16,45	14,30
21 dias	17,90	14,12	12,62	17,30	15,30
28 dias	18,89	14,21	13,62	18,26	15,55

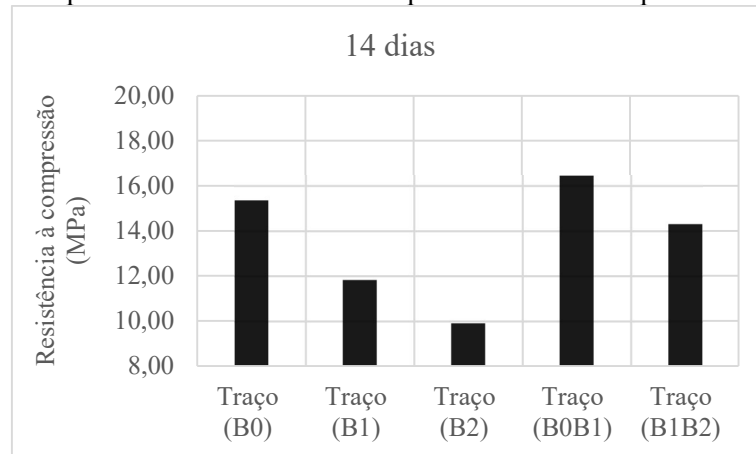
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 8 - Comparativo de resistência à compressão aos 7 dias para todas as misturas.



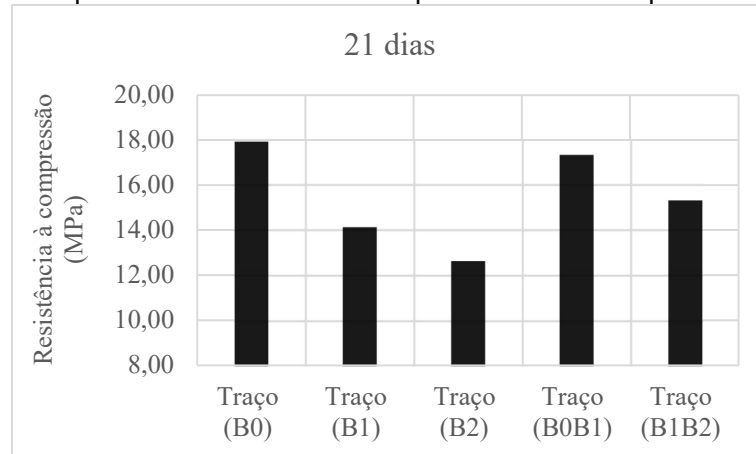
Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 9 - Comparativo de resistência à compressão aos 14 dias para todas as misturas.



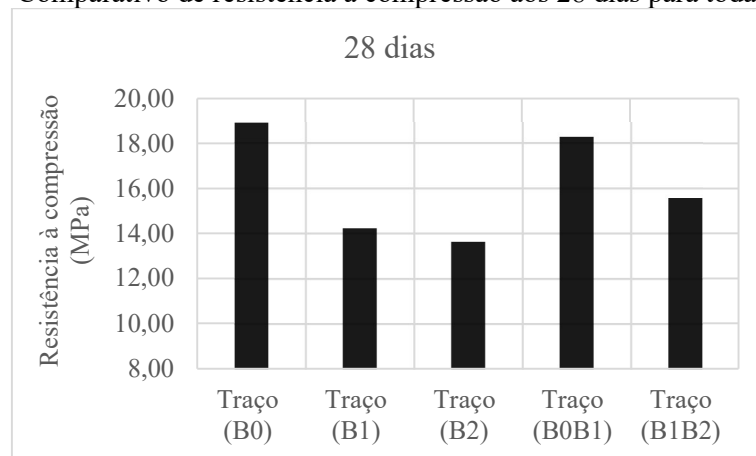
Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 10 - Comparativo de resistência à compressão aos 21 dias para todas as misturas.



Fonte: Autoria própria (2023).

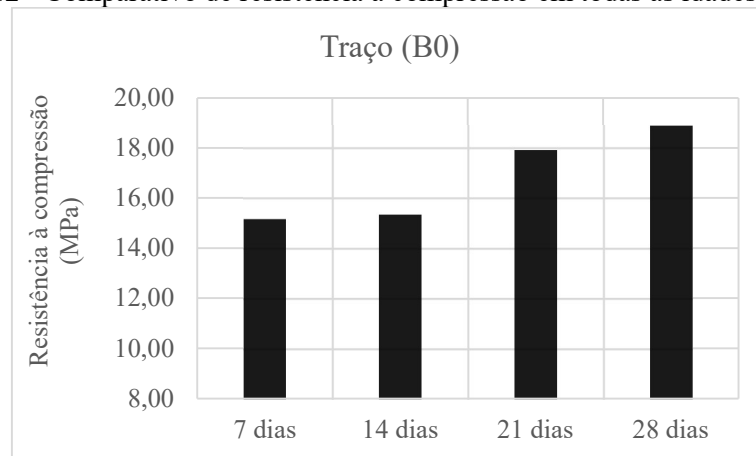
Gráfico 11 - Comparativo de resistência à compressão aos 28 dias para todas as misturas.



Fonte: Autoria própria (2023).

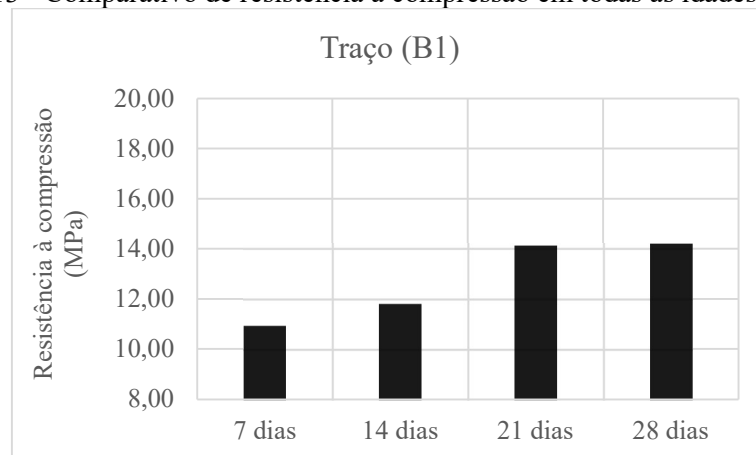
Os resultados comparativos das resistências à compressão de cada traço com sua evolução ao longo dos períodos de cura, são apresentados nos Gráficos 12 a 16. Percebe-se que para todos os traços houve um aumento progressivo da resistência em todas as idades, exceto o traço B2 para 14 dias, que pode estar relacionado a um erro de execução na moldagem desses corpos de prova, que por se tratar de um trabalho experimental, pode ocorrer. Esses aumentos na resistência são esperados devido às reações de hidratação do cimento que geram produtos que contribuem para o aumento da resistência com o tempo, como por exemplo: Alite, etringite, Portlandite, entre outros.

Gráfico 12 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B0



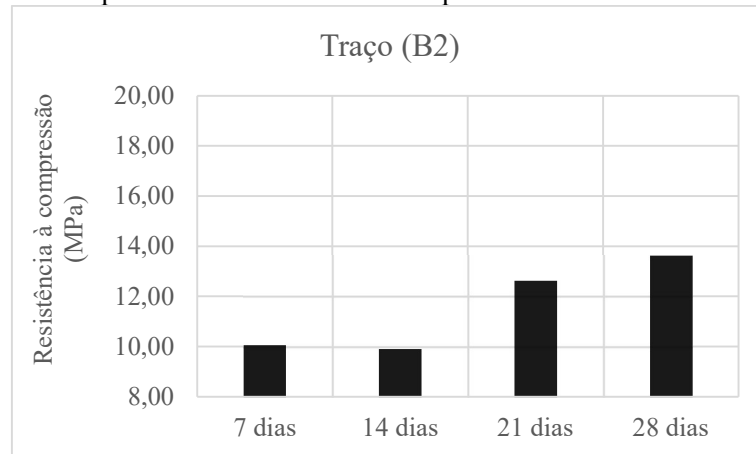
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 13 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B1



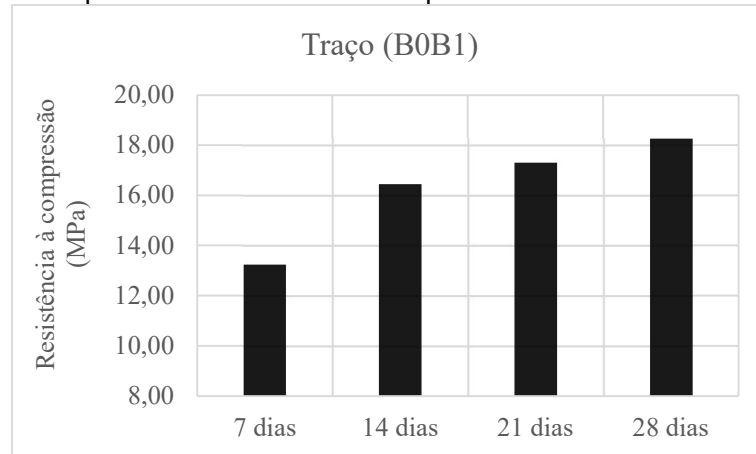
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 14 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B2



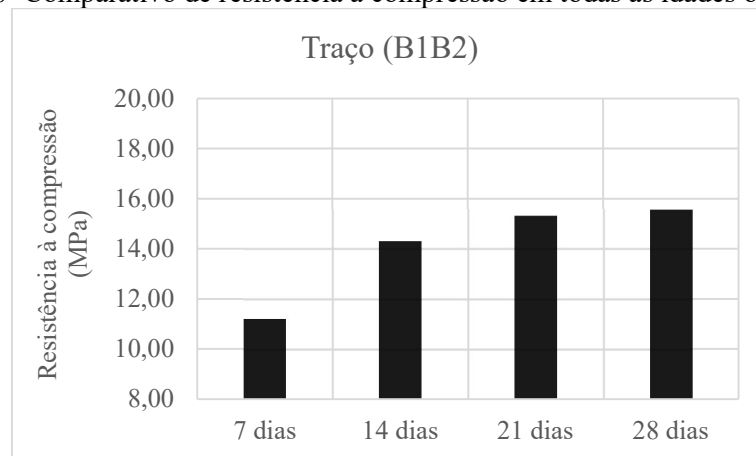
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 15 - Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B0B1



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 16- Comparativo de resistência à compressão em todas as idades o traço B1B2



Fonte: Autoria própria (2023)

5.5. Velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto

As aferições das velocidades de propagação foram feitas após um período de 28 dias de cura dos corpos de provas em três exemplares de cada tipo de traço. O objetivo deste ensaio foi analisar a propagação de ondas ultrassônicas no concreto com o propósito de avaliar sua integridade, identificar potenciais descontinuidades ou defeitos internos e determinar a velocidade do som no material. Os resultados médios do ensaio com as velocidades de propagação encontram-se na Tabela 19, a seguir:

Tabela 19 - Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 28 dias.

Velocidade de propagação (m/s)				
Traço (B0)	Traço (B1)	Traço (B2)	Traço (B0B1)	Traço (B1B2)
3797	3783	3853	3797	3741

Fonte: Autoria própria (2023)

Com base nos resultados do ensaio, pode-se concluir que todos os traços confeccionados obtiveram um bom resultado, sendo classificado, conforme Whitehurst (1966), como um concreto de ótima qualidade. Além disso, vale salientar que, numa comparação dos traços referenciais (B0 e B1) com as misturas (B0B1 E B1B2) não houve grandes variações nos resultados, o que nos faz concluir que, apesar de aumentarmos a compactação do concreto, substituindo as partículas maiores por menores, essa modificação não foi suficiente para tornar o meio mais favorável a propagação do som, que é maior quanto mais denso o ambiente. (LORENZI, 2007)

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar a influência que a variação da granulometria da brita traria, principalmente, para as propriedades no estado endurecido do concreto. Para isso, foi investigado, através da análise de propriedades físicas, os diversos aspectos que envolvem a dosagem e a influência dos agregados na qualidade do concreto, visando compreender qual o verdadeiro papel dos agregados na composição do concreto.

A utilização do *software* para encontrar o percentual de substituição se mostrou satisfatório para as duas possibilidades experimentais testada nesse trabalho, pois pôde-se obter uma curva granulométrica praticamente idêntica a curva teórica previsto. Portanto, o método pode ser aplicado a outros agregados, quer seja de mesma origem ou não, uma vez que os valores teóricos levam em consideração a individualidade de cada composição granulometria de cada agregado.

Inicialmente, foi previsto que, com a substituição de um agregado de diâmetro máximo maior por um percentual de material com diâmetro imediatamente inferior, o peso específico do concreto em estado fresco seria maior, porém essa hipótese não se concretizou, uma vez que os pesos específicos dos traços de referência em relação as misturas, foram praticamente iguais. Logo, a introdução de agregados menores na mistura, visando o aumento do empacotamento de partículas, resultou em um concreto mais denso, sendo comprovado pelo aumento das resistências dos corpos de prova com o passar das idades. Além disso, foi comprovada, através do ensaio de propagação de onda, a ótima qualidade do concreto moldado.

Os ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas demonstraram ser uma ferramenta valiosa na avaliação da qualidade da mistura e no monitoramento da evolução de suas propriedades ao longo do tempo. No entanto, é importante lembrar que o bom desempenho do concreto não é determinado apenas pela proporção dos agregados. Outros fatores, como a qualidade do cimento, a cura adequada e as condições de mistura, desempenham papéis cruciais na obtenção de um concreto de alta qualidade.

Com relação às outras propriedades estudadas, é nítido que o acréscimo partículas menores influenciam de imediato na trabalhabilidade da mistura, diminuindo e tornando mais coesa a composição.

Ainda em relação a substituição granulométrica, não é possível afirmar que existe um percentual padrão para cada tamanho de agregado, o que há é a possibilidade de adequar qualquer composição distributiva granulométrica a um percentual ótimo normativo, ou seja, é possível realizar uma adaptação do método para a correção de todos os tipos de agregados, inclusive aqueles que não correspondam ao que é adequado para produção de concreto segundo

a NBR 7211 (ABNT, 2022). Em resumo, o que foi proposto e foi verificado é que é possível completar lacunas granulométricas de agregados que normativamente são impróprios para aplicação em estruturas convencionais.

Por fim, é evidente o ganho de resistência à compressão em relação aos traços tomados como referência em todas as idades, tornando o resultado do estudo satisfatório. Esses ganhos, que variaram entre 14,12% a 28,50% aos 28 dias de cura, demonstram claramente o impacto positivo da otimização da granulometria e da compactação dos agregados no concreto.

Esses resultados não apenas confirmam as hipóteses iniciais, mas também reforçam a importância de considerar a granulometria e o empacotamento de partículas no processo de dosagem de concreto. Este estudo tem implicações práticas significativas para a engenharia civil e a indústria da construção, que por meio de uma abordagem mais criteriosa e otimizada na seleção dos agregados e na dosagem do concreto, pode continuar a aprimorar a qualidade das estruturas construídas e promover avanços no setor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Luiz Carlos de; DA DISCIPLINA, **Notas de Aula. Estruturas IV–Concreto Armado**. Campinas: Unicamp, 2002.

ANGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ASATO, Patrícia Bezerra. **Natureza Técnica dos Solos**. 2018.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809 – **Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972 – **Agregados – Determinação da massa unitária e índice de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16915 – **Agregados – Amostragem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776 – **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 – **Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833 – **Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802 – **Concreto endurecido – Determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251 – **Determinação da massa unitária do agregado em estado solto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3310-1 – **Peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação – parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BARBOZA, Marcos R.; BASTOS, Paulo Sérgio. **Traços de concreto para obras de pequeno porte**. Concreto e construção, v. 36, p. 32-36, 2008.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Unesp, 2006. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf>. Acesso em: 27 set. 2023.

BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2009. Disponível em: <https://abcp.org.br/cimento/historia/>. Acesso em: 08 out. 2023.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica, São Paulo, v. 55, n. 333, p. 18-32, 2009.

CASTRO, V. G. Cimento Portland. *In: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]*. Mossoró: EdUFERSA, 2021, pp. 13-21. ISBN: 978-65-87108-26-1. Disponível em: <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0002>. Acesso em: 27 set. 2023.

DE CASTRO, A. L.; LIBORIO, Jefferson Benedicto Libardi; PANDOLFELLI, Victor Carlos. **Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional**. Cerâmica, v. 55, p. 233-251, 2009.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de cimento Portland**. Isaia, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905-944, 2007.

ISAIA, G. C. A Evolução do Concreto Estrutural. *in* ISAIA G. C., **Concreto: ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 931 p.

LINHARES, T. J. S. **Influência da variação granulométrica do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto**. UFERSA, 2019.

LORENZI, Alexandre et al. **Análise de Estruturas de Concreto através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico**. Proceedings of Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 2006.

LORENZI, Alexandre et al. **Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico**. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), v. 51, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**, Ibracon, S. 2008.

MENEGHETTI, L. C.; PADARATZ, I. J.; STEIL, R. O. Use of Ultrasound to Evaluate Concrete Strength in the Early Ages, International Symposium on Nondestructive Testing Contribution to the Infrastructure Safety Systems in the 21st Century. Torres, UFSM, 1999.

NATO, Chrystian Tavares. **Dosagem de concretos pela teoria do empacotamento de partículas e método IPT-EPUSP**. Trabalho de Conclusão de Curso. IFPB. 2023.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

PINHEIRO, Libânio M. et al. **Estruturas de concreto—capítulo**. Março de, 2010. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/02%20Concreto.pdf>. Acesso em: 27 set. 2023.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para concreto**. In: ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. v.1, p. 323-343.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences International Geophysics Series**. 2a. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 91, 2006. 627 p.

WHITEHURST, Eldridge Augustus. **Evaluation of concrete properties from sonic tests**. American Concrete Institute Monograph, v. 2, p. 27, 1966.