



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



CLARO ALVINO SEGUNDO FILHO

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Cajazeiras-PB, 2020

CLARO ALVINO SEGUNDO FILHO

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES DO
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-
Campus Cajazeiras, como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Me.
Cicero Joelson Vieira Silva

Cajazeiras-PB, 2020

Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

S456i

Segundo Filho, Claro Alvino

Influência da granulometria nas propriedades do concreto / Claro Alvino Segundo Filho; orientador Cicero Joelson Vieira Silva.-2020.
63 f.: il.

Orientador: Cicero Joelson Vieira Silva.
TCC (Bacharelado em Eng. Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

1 Concreto - Propriedades 2 Empacotamento dos grãos 3
Granulometria I. Título.

691.3(0.067)

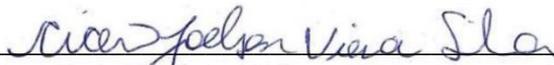
CLARO ALVINO SEGUNDO FILHO

INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

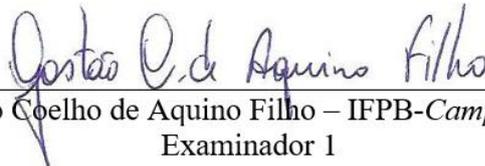
Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Me. Cicero Joelson Vieira Silva.

Aprovado em 15 de dezembro de 2020.

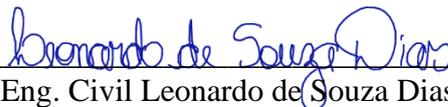
BANCA EXAMINADORA



Me. Cicero Joelson Vieira Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador



M Sc. Gastão Coelho de Aquino Filho – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1



Eng. Civil Leonardo de Souza Dias
Examinador 2

Em especial, à minha mãe Irany Alvino, por ter sido a minha base e ter me dado todo o apoio em todos os momentos difíceis desta árdua jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por estar sempre iluminando o meu caminho e por não me deixar desistir em meio a tantos percalços e empecilhos.

À minha Mãe, Irany Alvino, por ter sido o meu sustento e a minha certeza de que eu nunca estaria sozinho.

Ao meu Pai (in memoriam), que durante toda minha trajetória de vida tem sido minha maior fonte de inspiração. Carrego comigo sempre todos os seus ensinamentos.

Aos meus irmãos, que me deram total apoio e foram fundamentais para que eu conseguisse concretizar esse sonho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – *Campus Cajazeiras* pela oportunidade de ingressar no Curso de Engenharia Civil e por ter cedido toda a estrutura capaz de formar a minha vida profissional e por viabilizar, não somente esta, mas inúmeras outras pesquisas.

Ao meu orientador e professor, Cicero Joelson Vieira Silva, por ser sempre prestativo e se manter disposto a ajudar em qualquer dificuldade, e por não medir esforços em repassar seu conhecimento.

A todos os professores desta instituição, em especial ao Prof. Gastão Coelho de Aquino Filho, que desde a minha chegada me acolheu de braços abertos e contribuiu de maneira significativa com minha formação, sempre dedicado e atencioso durante toda a minha graduação.

Aos colegas de curso que sempre se fizeram presente em todos os momentos dessa árdua jornada, sempre dispostos a sanar as minhas dúvidas, colaborando de maneira coletiva para um crescimento pessoal e profissional.

A Construtora Dois A Engenharia, em nome dos Engenheiros Civis Flávio Rêgo e Nielsen Paulinelli Gomes da Silva, por ter cedido toda a estrutura de laboratório para a realização desta pesquisa.

Aos técnicos de laboratório Ediel, Edivaldo e Valber, que mesmo após vários dias de trabalho exaustivos, não mediram esforços para colaborar com o andamento da minha pesquisa, repassando seus conhecimentos de muitos anos de prática laboratorial.

RESUMO

A indústria da construção civil está sempre em constante evolução devido à grande exigência do mercado, entre elas podemos destacar a busca por materiais mais eficientes e de maior durabilidade. Por se tratar do material de maior produção no setor construtivo, nesse contexto, destaca-se o concreto e seu controle tecnológico. No intuito de potencializar as propriedades deste produto, surge uma proposta conhecida como empacotamento das partículas, que consiste em utilizar uma mistura com granulometria mais contínua para a produção do concreto, a fim de se obter um material com massa, estrutura mais densa, com menor índice de vazios e melhor desempenho de suas propriedades mecânicas, proporcionando uma redução do consumo de componentes altamente poluentes a exemplo do cimento. Diante do exposto, buscou-se através do presente trabalho estudar a influência da variação granulométrica nas propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido. Para isso foram produzidos quatro traços de concreto, em massa, com uso de agregados de diferentes tamanhos mantendo-se constante o fator água/cimento. Posteriormente, foram realizados ensaios para verificar suas características, tais como: resistência à compressão, tração, absorção e trabalhabilidade, seguindo os procedimentos das normas vigentes. Os resultados obtidos demonstraram redução nas propriedades do concreto com as variações de granulometria, apesar dos ensaios de massa unitária dos agregados terem demonstrado que o empacotamento dos grãos foi realizado. Por fim, pode-se concluir que a granulometria dos agregados tem grande influência nas propriedades do concreto influenciando no desempenho do produto.

Palavras-Chave: Granulometria. Empacotamento dos grãos. Propriedades. Concreto.

ABSTRACT

The civil construction industry is always in constant evolution due to the great demand of the market, among which we can highlight the search for more efficient and more durable materials. As this is the material with the highest production in the construction sector, in this context, concrete and its technological control stand out. In order to enhance the properties of this product, a proposal emerges known as particle packaging, which consists of using a mixture with more continuous granulometry for the production of concrete, in order to obtain a material with mass, more dense structure, that is, , lower voids index and better performance of its mechanical properties, providing a reduction in the consumption of highly polluting components such as cement. Given the above, it was sought through the present work to study the influence of the granulometric variation on the properties of the concrete in its fresh and hardened state. For this, four concrete mixes were produced, in mass, with the use of aggregates of different sizes, keeping the water / cement factor constant. Subsequently, tests were carried out to verify its characteristics, such as: resistance to compression, traction, absorption and workability, following the procedures of the current regulations. The results obtained demonstrated a reduction in the properties of the concrete with the variations of granulometry, despite the tests of unit mass of the aggregates have demonstrated that the packing of the grains was carried out. Finally, it can be concluded that the granulometry of the aggregates has a great influence on the properties of the concrete influencing the performance of the product.

Keywords: Granulometry. Grain packaging. Properties. Concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ensaio de Granulometria dos Agregados.....	26
Figura 2 - Ensaio de Massa Unitária dos Agregados.....	27
Figura 3 - Ensaio de Massa Específica do Agregado Graúdo.....	28
Figura 4 - Ensaio de Massa Específica do Agregado Miúdo.....	29
Figura 5 - Moldagem de Corpos de Prova de Concreto.....	30
Figura 6 - Ensaio de Massa Específica do Concreto no Estado Fresco.....	32
Figura 7 - Ensaio de Consistência do Concreto - <i>Slump Test</i>	33
Figura 8 - Ensaio de Resistência à Compressão do Concreto.....	33
Figura 9 - Ensaio de Resistência à Tração do Concreto.....	34
Figura 10 - Ensaio de Absorção e Massa Específica do Concreto no Estado Endurecido.....	35
Figura 11 - Curvas Granulométricas dos Agregados.....	36
Figura 12 - Curvas Granulométricas das Misturas.....	37
Figura 13 - Resultado das Massa Unitárias (a) e Compactada (b) dos Agregados.....	38
Figura 14 - Resultado do Volume de Vazios dos Agregados no Estado Solto (a) e Compactado (b).....	39
Figura 15 - Resultado das Massa Unitárias Solta (a) e Compactada (b) das Misturas.....	40
Figura 16 - Resultado da Consistência do Concreto.....	42
Figura 17 - Resultado da Massa Específica (a) e Teor de Ar (b) do Concreto no Estado Fresco.....	43
Figura 18 - Resultado da Absorção de Água (a), Massa Específica (b) e Índice de Vazios (c) do Concreto no Estado Endurecido.....	44
Figura 19 - Resultado da Resistência à Compressão do Concreto.....	46
Figura 20 - Resultado da Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto.....	46
Figura 21 - Resultado do Módulo de Elasticidade do Concreto.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporção Granulométrica dos Traços	30
Tabela 2 - Resultado da Massa Unitária no Estado Solto e Volume de Vazios dos Agregados.....	37
Tabela 3 - Resultado da Massa Unitária no Estado Compactado e Volume de Vazios dos Agregados.....	38
Tabela 4 - Resultado das Massa Unitárias Solto e Compactado das Misturas.....	40
Tabela 5 - Resultado da Consistência do Concreto.....	41
Tabela 6 - Resultado da Massa Específica e Teor de Ar do Concreto no Estado Fresco.....	42
Tabela 7 - Resultado da Absorção de Água, Massa Específica e Índice de Vazios do Concreto no Estado Endurecido.....	44
Tabela 8 - Resultado da Resistência à Compressão, Tração por Compressão Diametral e Módulo de Elasticidade do Concreto.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ensaio dos Agregados.....	26
Quadro 2 - Ensaio das Propriedades do Concreto no Estado Fresco.....	31
Quadro 3 - Ensaio das Propriedades do Concreto no Estado Endurecido.....	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	CONCRETO.....	17
2.1.1	Propriedades no Estado Fresco.....	17
2.1.2	Propriedades no Estado Endurecido.....	18
2.2	AGREGADOS.....	19
2.2.1	Classificação.....	20
2.2.2	Índices Físicos.....	20
2.2.2.1	<i>Massa específica e Massa unitária.....</i>	21
2.2.2.2	<i>Composição granulométrica.....</i>	21
2.2.2.3	<i>Teor de umidade.....</i>	22
2.2.2.4	<i>Forma e Textura Superficial.....</i>	22
2.2.2.5	<i>Porosidade e índice de vazios.....</i>	23
2.3	EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS.....	24
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	LEVANTAMENTO TEÓRICO E CONCEITUAL.....	25
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA MISTURA.....	25
3.2.1	Caracterização dos Agregados.....	26
3.2.1.1	<i>Composição Granulométrica.....</i>	26
3.2.1.2	<i>Massa Unitária.....</i>	27
3.2.1.3	<i>Massa Específica.....</i>	27
3.3	PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	29
3.4	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES.....	31
3.4.1	No estado fresco.....	32
3.4.1.1	<i>Massa Específica.....</i>	32
3.4.1.2	<i>Consistência.....</i>	32
3.4.2	No estado endurecido.....	33

3.4.2.1	<i>Resistência à Compressão</i>	33
3.4.2.2	<i>Resistência à Tração</i>	34
3.4.2.3	<i>Absorção e Massa Específica</i>	34
3.4.2.4	<i>Módulo de Elasticidade</i>	35
4	RESULTADOS E ANÁLISES	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	36
4.1.1	Análise Granulométrica	36
4.1.2	Massa Unitária e Volume de Vazios	37
4.1.3	Massa Específica	41
4.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO	41
4.2.1	Propriedades do Concreto Fresco	41
4.2.1.1	<i>Consistência</i>	41
4.2.1.2	<i>Massa Específica e Teor de Ar</i>	42
4.2.2	Propriedades do Concreto Endurecido	43
4.2.2.1	<i>Absorção de Água, Massa Específica e Índice de Vazios</i>	43
4.2.2.2	<i>Resistência Mecânica</i>	45
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um ramo que está em constante evolução devido à crescente demanda por construções residenciais, industriais, estradas etc. Esse crescimento está totalmente ligado ao crescimento socioeconômico do país, apresentando como principal insumo a produção de concreto. Esse produto, segundo Mehta e Monteiro (2014), é considerado o material de construção mais consumido no mundo, ficando apenas atrás da água. Sua alta demanda e procura em relação a outros produtos de construção justifica-se pelo fato de o material ser versátil e apresentar, após endurecer, boa resistência mecânica, iguais as rochas naturais, e ser economicamente viável. Contudo, é possível observar a aplicação desse material em diversos tipos de construções que vão desde obras mais simples como edificações e obras mais arrojadas como pontes, usinas hidrelétricas, túneis, estruturas de contenção etc.

O concreto comum é um produto produzido pelo enrijecimento da mistura do cimento (aglomerante), agregados miúdo e graúdo (areia e brita, respectivamente) e água (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012). O fato de o concreto possuir diversas aplicações, está relacionado diferentes propriedades, no estado fresco esse compósito apresenta características como consistência e trabalhabilidade, podendo adequar-se aos mais diversos formatos e o estado endurecido, apresenta resistência mecânica, resistência às intempéries e ação da água, e durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os agregados, geralmente, ocupam o maior volume, podendo chegar a três quartos, da mistura de concreto. Sendo, o cimento responsável pelo desenvolvimento das principais propriedades do material, como a resistência mecânica. Da mistura do concreto, esse ligante é considerado o componente que causa maior impacto ambiental devido a emissão de dióxido de carbono, além do elevado consumo de energia consumido durante seu processo de produção. O processo de fabricação de cimento manteve-se considerável nos últimos anos mesmo com a crise econômica de grandes potências mundiais (CEMBUREAU, 2015). No Brasil, a produção em 2014 foi de cimento foi de 71,7 milhões de toneladas (SNIC, 2014). Porém em 2018, devido à crise econômica que assolou o país, que refletiu diretamente no mercado construtivo, houve uma queda nessa produção, sendo produzido 52,7 milhões de toneladas (SNIC, 2018).

Devido o crescimento e desenvolvimento da indústria da construção civil e a alta exigência deste mercado, os profissionais da área, construtores, engenheiros civis, pesquisadores, estudiosos, vêm estudando novos métodos, metodologias para aperfeiçoar as propriedades e o controle tecnológico do concreto.

Nesse contexto, surge o empacotamento das partículas, com o intuito de produzir produtos com desempenho elevado, esse é termo aplicado em diversos ramos da engenharia, principalmente, naquelas que de mandam maior grau tecnológico. Diversos autores desenvolveram métodos e metodologias de empacotamento capazes de melhorar a eficiência do concreto, porém atualmente ainda há pouca ou quase nenhum estudo acerca da interação entre o conceito de empacotamento dos grãos e outras características do concreto como a reologia e desempenho mecânico, possibilitando a execução em diversos tamanhos e formas e um melhor desempenho (GRAZIA *et al.*, 2018).

O conceito de empacotamento de partículas, no mercado construtivo, é aplicado principalmente para concretos de resistência elevada. Nos concretos comuns, tradicionais, essa técnica é menos estudada, mesmo sendo possível obter as mesmas vantagens, ainda que seja em uma proporção inferior, dos concretos especiais.

Conforme Riva (2010) *apud* Oliveira (2013), em 1611 após de se aprofundar em vários campos de estudos, Kepler realizou os primeiros estudos sobre empacotamento de partículas, despertando o interesse em diversas áreas da engenharia. Segundo Castro e Pandolfelli (2009), o empacotamento de partículas é uma técnica na qual os espaços vazios deixados por partículas de maior diâmetro, são preenchidos por partículas de diâmetro inferior, que são preenchidas por partículas ainda menores e, assim, sucessivamente.

De acordo com Larrard (1999), os fatores que influenciam na distribuição das partículas são: a distribuição granulométrica das partículas, a forma ou morfologia dos grãos e o método de compactação utilizado. A distribuição granulométrica dos agregados que compõem os concretos pode ser composta de diferentes composições, duas ou mais, que irão proporcionar um produto com alta densidade a partir do empacotamento das partículas, refletindo diretamente nas melhorias de suas propriedades físicas e mecânicas, uma vez que os espaços entre as partículas maiores são preenchidos pela classe de partículas menores obtendo um material com menor índice de vazios. Tendo em vista que 75% do volume do concreto são de materiais granulares (agregados) e o efeito da granulometria destes está totalmente ligado à compactidade dos grãos, se faz necessário um estudo detalhado da sua distribuição, para que ocorra de uma maneira mais efetiva a dosagem do concreto e otimização de seus constituintes.

Segundo Pereira (2008), o controle tecnológico deve ocorrer levando em consideração os procedimentos tomados na obra e todos os parâmetros relacionados ao processo de produção, manuseio, transporte e ensaios laboratoriais. O controle tecnológico de materiais possui um papel importante para certificação do desempenho das estruturas, garantindo longevidade e a

qualidade estabelecida pelo projeto e normas técnicas. Com este controle é possível prever ou detectar vícios, falhas, não conformidades, viabilizando, caso necessário, intervenções corretivas nas estruturas em questão (VIA TÉCNICA, 2014).

Devido ao contínuo desenvolvimento da tecnologia do concreto, é necessário e importante realizar pesquisas sobre a influência dos agregados no seu desempenho, principalmente no acondicionamento de grãos, a fim de melhorar a durabilidade da estrutura e reduzir o consumo de cimento, considerando os detalhes técnicos. Baseando-se nisso, elaborou-se um estudo sobre a influência da granulometria nas propriedades do concreto.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da granulometria nas propriedades do concreto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente os agregados;
- Produzir concretos com diferentes granulometrias, com o intuito de melhorar o empacotamento dos grãos.
- Analisar as propriedades do concreto com diferentes densidades de empacotamento;
- Comparar as características do concreto tradicional, sem variações em sua composição, com os concretos que sofreram alteração na compactação de seus componentes.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos. O primeiro trata-se da introdução, onde foi feita a delimitação e contextualização do tema abordado, além dos objetivos, justificativa e apresentação do problema acerca da pesquisa.

O segundo capítulo é revisão da literatura que aborda os assuntos mais importantes que serão tratados no trabalho, e servirão como base para uma melhor compressão do leitor sobre o assunto apresentado.

No capítulo três é descrita a metodologia adota através do programa experimental, apresentando os materiais e técnicas utilizadas para o desenvolvimento do estudo.

O quarto capítulo são apresentados os resultados e análises obtidas através dos experimentos realizados.

O trabalho finaliza-se com o capítulo cinco que apresenta as conclusões, considerações finais a partir dos objetivos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é apresentado a fundamentação teórica necessária para a compreensão do trabalho desenvolvido.

2.1 CONCRETO

O concreto é um material heterogêneo utilizado na construção civil, constituído pela mistura de agregados, aglomerante hidráulico e água. Em alguns casos, podem ser adicionados aditivos modificando suas características físicas e químicas.

Para obter um concreto adequado para a sua utilização deve-se analisar as propriedades dos materiais que o compõe, o proporcionalmente correto, assim como, a execução da mistura e o controle do concreto durante o estado fresco e endurecido. As propriedades do concreto possuem fundamental importância em sua durabilidade, resistência e adequação quanto à utilização. O estudo das propriedades do concreto se divide em propriedades no estado fresco e no estado endurecido sendo analisadas as características necessárias para obter o concreto mais adequado à utilização (AMBROZEWICZ, 2012).

2.1.1 Propriedades no Estado Fresco

Para Neville e Brooks (2013), o concreto no estado fresco é caracterizado pelo intervalo entre sua produção até o seu lançamento nas formas. O concreto neste estado, deve apresentar uma mistura com uma consistência em que se possa promover seu adensamento durante a sua aplicação, como também apresentar uma trabalhabilidade adequada para ao fim que se destina, ou seja, deve possuir coesão, mobilidade, suficiente para ser transportado e lançado nas formas sem sofrer segregação. As principais características do concreto no estado fresco são consistência, coesão e homogeneidade. A combinação dessas características é denominada trabalhabilidade.

A trabalhabilidade é definida pela norma da *American Society for Testing and Materials* - *ASTM C 125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates* (2013 *apud* Mehta e Monteiro, 2014) como a propriedade que determina a maior ou menor facilidade de manipular uma quantidade de concreto, isto é, o esforço exigido para lançar, adensar, e dar

acabamento, com perda mínima de homogeneidade. A consistência é o parâmetro físico mais importante da trabalhabilidade, quando aplicada ao concreto, associa-se a propriedades intrínsecas da mistura fresca como a mobilidade e a coesão entre os elementos constituintes, visando sua uniformidade, compacidade e o bom rendimento da execução.

A consistência é a medida obtida através do ensaio de abatimento de tronco de cone ou pelo aparelho de Vebe, usada como parâmetro da mobilidade ou fluidez do concreto no estado fresco (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Consoante Ambrozewicz (2012), a consistência e a trabalhabilidade são índices que dependem das seguintes características: composição do concreto, da quantidade de água e cimento, da granulometria dos agregados e da presença de aditivos.

2.1.2 Propriedades no Estado Endurecido

O principal requisito do concreto no estado endurecido é a resistência a compressão adequada (NEVILLE; BROOKS, 2013). Isso porque a resistência é uma propriedade facilmente mensurável e é uma forma fácil de certificar que o concreto utilizado na obra atende às especificações do contrato. No entanto, a preocupação com a resistência à compressão do concreto depois de endurecido é ainda maior, pois várias outras características estão diretamente relacionadas a ele, tais como: permeabilidade, durabilidade, resistência à tração entre outros.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a resistência é a tensão necessária para que haja a ruptura do material. Resistência característica à compressão é um valor de referência, usado como base de cálculo, a qual está associada a um nível de confiança de 95% (ISAIA, 2007).

O concreto resiste muito bem aos esforços de compressão, porém resiste muito pouco aos de tração. Às resistências de tração e flexão são de ordem, respectivamente, de 10 a 15% da compressão.

O módulo de elasticidade segundo Mehta e Monteiro (2014), é definido como a razão entre a tensão e a deformação reversível. Esse parâmetro representa a tensão máxima permitida antes de o material sofrer deformação permanente, influenciando na rigidez do projeto.

A massa específica influi no peso próprio das estruturas e varia conforme com o processo de execução (adensamento, tipo de agregado e quantidade de vazios). Para concretos usuais varia de 2,3 t/m³ a 2,5 t/m³ (AMBROZEWICZ, 2012).

A permeabilidade do concreto à água e a outros líquidos se exprime pela quantidade de água que atravessa uma superfície unitária em uma espessura unitária durante a unidade de tempo, e sob a pressão unitária (litro/m²h). Por se tratar de um material, cheio de vazios interligados, isto é, poroso, a durabilidade do concreto é ameaçada pela ação de diversos agentes agressivos, dependendo do grau da permeabilidade do material (BAUER, 2019).

De acordo com o American Concrete Institute - ACI CT/13: Concrete Terminology (2013 *apud* Mehta e Monteiro, 2014), a durabilidade do concreto de cimento Portland está relacionada com sua capacidade de resistir às ações de intempéries, ataque químico, abrasão e outras condições em serviço. A redução de vazios da massa é um fator determinante para diminuição da permeabilidade, dificultando a penetração de substâncias agressivas e portanto, aumentando a durabilidade do concreto.

2.2 AGREGADOS

De acordo com Petrucci (1998) o agregado pode ser definido como um material granular, geralmente inerte, sem forma ou volume definido, cujas propriedades são adequadas para os seus mais diversos fins na engenharia. Bauer (2019) complementa esta definição dizendo que é um material sem coesão, de tamanhos ou granulometrias variados e reafirma que o agregado não faz parte das reações químicas na mistura de concretos e agregados, ou seja, sua influência química é praticamente nula.

Os agregados são materiais de custo relativamente baixo, nas misturas de concreto compõem aproximadamente três quartos do seu volume total, por isso, estudar suas características e verificar sua qualidade é muito importante (AMBROZEWICZ, 2012).

Para Mehta e Monteiro (2014), os agregados não sofrem reações químicas com a água, sendo considerados como material de enchimento, inerte, no concreto. Por ocuparem de 60 a 80% do seu volume e possuírem baixo custo, têm finalidade econômica. Graças a um melhor entendimento do desempenho dos agregados nas propriedades do concreto, estes podem exercer grande influência sobre a sua resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade, demonstrando assim, sua importante finalidade técnica.

2.2.1 Classificação

De acordo com Grubba (2016), os agregados podem ser classificados quanto à:

- Origem:
 - Naturais: encontrados na natureza. Exemplo: areia e pedregulhos;
 - Artificiais: processados industrialmente. Exemplo: argila expandida, escória de alto-forno e cinza volante.
- Massa Específica:
 - Leves: agregados com massa específica menor que 2.000 kg/m³. Exemplo: argila expandida;
 - Médios: agregados com massa específica menor entre 2.000 kg/m³ e 3.000 kg/m³. Exemplo: areia naturais, pedras britadas e pedregulhos;
 - Pesados: agregados com massa específica maior que 3.000 kg/m³. Exemplo: barita, magnetita e hematita.
- Dimensão:
 - Agregados graúdos: brita ou pedregulho de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambos, cujos grãos de maiores tamanhos passam pela peneira de malha quadrada de abertura de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm;
 - Agregados miúdos: areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos de maiores tamanhos passam nas malhas da peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm.

2.2.2 Índices Físicos

Para se obter uma dosagem ideal de concreto hidráulicos é fundamental conhecer as características dos agregados, massa específica, composição granulométrica e teor de umidade etc. Estes índices são obtidos em ensaios laboratoriais normatizados, onde são estabelecidos limites de aceitação ou rejeição do material para determinada finalidade.

Características como, porosidade, massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial influenciam nas propriedades do concreto fresco. A porosidade e a composição mineralógica do agregado afetam sua resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade que, por sua vez influenciam diretamente propriedades do concreto endurecido que

contenha o agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A massa específica, porosidade e granulometria são características importantes para o empacotamento de partículas do concreto.

2.2.2.1 Massa Específica e Massa Unitária

Define-se massa específica como a relação entre a massa e o volume de um determinado material.

O volume das partículas pode ou não incluir os poros intragranulares. Quando se inclui determina-se o volume aparente das partículas, chamado massa unitária, quando se exclui esse volume de vazios, determina-se o volume real (BAUER, 2019).

Não é possível empacotar as partículas do agregado de forma a não deixar espaços, vazios, entre elas, esse fenômeno chama-se massa unitária surge porque não é possível empacotar as partículas do agregado juntas de forma a não deixar vazios entre elas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esse índice é utilizado para fins de dosagem, para se determinar o volume de ligantes a ser utilizado nas formulações de misturas cimentícias, (BAUER, 2019). O estudo de agregados de diferentes tamanhos, britas ou britas e areias, é realizado obtendo aqueles com maiores massa unitárias, que por sua vez proporcionam menores índices de vazios.

2.2.2.2 Composição Granulométrica

O estudo da distribuição dos diversos tamanhos de grãos numa massa de materiais granulares é chamado de análise granulométrica. A distribuição granulométrica fornece a proporção relativa em percentagem, às massas dos fragmentos com tamanhos em diferentes faixas granulométricas, em relação ao peso total da amostra (NUNES; MARQUES, 2007 *apud* SILVA; GEYER, 2018).

O resultado da análise granulométrica é mais facilmente interpretado com auxílio das *curvas granulométricas*.

A granulometria tem grande influência sobre a qualidade dos concretos agindo na compactidade e resistência (AMBROZEWICZ, 2012). Influencia também na trabalhabilidade do concreto, custo e no consumo final.

As distribuições granulométricas podem ser de um único tamanho, uniforme, ou de tamanhos variáveis (contínua), afetando o empacotamento do conjunto granular dentro de determinado volume e, conseqüentemente, o seu volume de vazios (LARRARD, 1999;

OLIVEIRA *et al.*, 2000; PCA, 2003 *apud* BAUER, 2019). A distribuição granulométrica uniforme resultará em um volume maior de vazios, se comparando à distribuição contínua (LARRARD, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2000 *apud* BAUER, 2019). Por outro lado, curvas granulométricas contínuas podem não ser mais fáceis de serem moldadas com concreto, uma vez que partículas com tamanho imediatamente inferior às maiores atrapalham a movimentação das partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2000 *apud* BAUER, 2019). Já as granulometrias descontínuas, com ausência de determinados tamanhos de partículas, facilitam a mobilidade do conjunto, implicando outros benefícios, como a redução de consumo de cimento e menor energia de compactação em materiais cimentícios (OLIVEIRA *et al.*, 2000; DAMINEI 2013 *apud* BAUER, 2019).

Para tornar o uso dos agregados adequado e economicamente viável, normas brasileiras e estrangeiras recomendam determinadas faixas granulométricas.

2.2.2.3 *Teor de Umidade*

Segundo Grubba (2016), a umidade consiste na relação entre a massa de água e a massa seca do agregado. Quando a areia está úmida, há a necessidade de corrigir a quantidade de água de amassamento empregada para produção do concreto, sob pena de redução de resistência e durabilidade do concreto endurecido.

A umidade quando presente na superfície dos agregados miúdos, provoca o afastamento dos grãos, alterando o seu volume aparente. A água na superfície dos grãos se interconecta em função da tensão superficial, acarretando maior afastamento entre as partículas – isso é chamado de inchamento, obtido entre o volume úmido e o volume seco (BAUER, 2019).

Dependendo do teor de umidade e da composição granulométrica do agregado pode ocorrer um aumento considerável do volume aparente da areia, o inchamento, que se não for considerado na hora da dosagem do concreto em volume, a proporção dos materiais será significadamente alterada, influenciando diretamente nas propriedades desse produto.

2.2.2.4 *Forma e Textura Superficial*

A forma dos agregados é definida como a sua geometria tridimensional. Como é difícil representar corpos tridimensionais regulares, é conveniente referir-se a certas características

geométricas destes corpos, tais como alongamento, achatamento, cubicidade, esfericidade angulosidade etc (NUNES; MARQUES, 2007 *apud* SILVA; GEYER, 2018).

Os agregados devem ser relativamente livres de partículas lamelares e alongadas. A textura superficial do agregado depende da dureza, tamanho do grão, porosidade da rocha matriz e sua subsequente exposição a forças de atrito (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com (OLIVEIRA *et al.*, 2000; Mendes 2008 *apud* BAUER, 2019), a forma das partículas interfere no empacotamento dos grãos. Segundo Bauer (2019), para partículas de dimensões similares, quanto maior a esfericidade, arredondamento das partículas, maior será o empacotamento do conjunto. Já as partículas lamelares ou alongadas prejudicam o empacotamento do conjunto granular, criando vazios e tornando os concretos menos econômicos, em razão do maior volume de pasta de cimento necessário para preencher os vazios deixados pelos agregados.

Para partículas com formato semelhante, quanto menor a dimensão das partículas, maior será o índice de vazios resultante no conjunto granular (TRISTÃO, 2005 *apud* BAUER, 2019). Isso ocorre porque quanto menor a partícula, maior será a área superficial, que proporciona maior incidência de contatos e conseqüentemente, o afastamento das partículas.

2.2.2.5 Porosidade e Índice de Vazios

A quantidade relativa de vazios em um certo volume de agregados é medida pela porosidade ou pelo índice de vazios. A porosidade é a relação entre o volume ocupado pelos vazios e o volume ocupado por toda a amostra do agregado. Já o índice de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume ocupado apenas pelas partículas sólidas de agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A determinação da porosidade só pode ser feita por meio do conhecimento das massas específicas absolutas e aparentes do concreto.

De acordo com Bauer (2019), até mesmo os agregados mais densos, possuem alguma porosidade. Dessa forma, torna-se fundamental, em qualquer processo de qualidade dos agregados, o controle dessa característica.

Há várias propriedades dos materiais que são influenciadas pela porosidade, a saber: a resistência mecânica, absorção da água, permeabilidade, condutibilidade térmica, resistência ao congelamento e aos ácidos etc. (AMBROZEWICZ, 2012).

2.3 EMPACOTAMENTO DOS GRÃOS

Sabe-se que o concreto é um arranjo de partículas secas, agregados, cujos espaços vazios são preenchidos pela pasta de cimento. Essa matriz é mais cara, geralmente, menos resistente e durável do que a rocha natural, devido a isso há a estratégia básica de dosagem que é: projetar uma mistura granular prevendo uma porosidade mínima de agregados. Segundo Larrard e Roussel (2011), a composição da matriz pode ser fixada levando em conta a resistência e a durabilidade, sendo a relação água/cimento o parâmetro chave para desse processo.

Lopes (2019), descreve o empacotamento dos grãos como o problema da adequada seleção da proporção e do tamanho das partículas, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores, e assim por diante.

O empacotamento denso das partículas é muito importante para melhorar as propriedades do concreto fresco e endurecido. A dosagem deve proporcionar uma distribuição das partículas que compõe o material, proporcionando uma mistura com o menor número de vazios e com alta densidade. Para o aumento da densidade basta, somente, diminuir os espaços entre as partículas, preenchendo-os com partículas menores, procurando assim estabelecer um empacotamento (VANDERLEI, 2004).

De acordo com Funk e Dinger (2008 *apud* Lenz *et al.*, 2017), por meio do empacotamento de partículas pode-se melhorar o esqueleto granular que compõem os concretos, considerando tanto os agregados como os materiais finos componentes. Esta otimização do esqueleto granular traz várias vantagens como a redução do consumo de cimento Portland, minimizando a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a resistência mecânica e a durabilidade dos concretos.

3 METODOLOGIA

O trabalho trata-se de um estudo experimental de cunho quantitativo/comparativo. Todo o programa para realização da caracterização dos agregados, produção do concreto e análise de suas propriedades, foi realizado de acordo com as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e em laboratório específico de Solos e Concreto da construtora Dois A Engenharia.

A investigação e os procedimentos experimentais se dividiram em quatro etapas:

- Levantamento teórico e conceitual;
- Caracterização dos componentes da mistura do concreto (cimento, agregado miúdo e graúdo);
- Produção do concreto;
- Caracterização das propriedades do concreto.

3.1 LEVANTAMENTO TEÓRICO E CONCEITUAL

A primeira etapa do trabalho trata-se de um levantamento bibliográfico por meio de livros e manuais técnicos, além de consultas de monografias, artigos científicos, dissertações, teses etc., na base de dados do Google Acadêmico e do Portal de Periódicos da CAPES.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA MISTURA

Os agregados utilizados para fabricação do concreto foram: areia grossa e média, brita granítica de 19 mm e 9,5 mm, estes insumos foram coletados no canteiro de obra situado no complexo eólico Chafariz, instalada no município de Santa Luzia – PB e passaram por um processo de triagem. O material foi colhido e utilizado sem qualquer separação, passando somente por um período de secagem natural e depois por 24 h em estufa a uma temperatura de 105° favorecendo sua desagregação e posteriormente seu peneiramento.

O ligante utilizado foi CP II F 32, esse tipo de cimento é bastante utilizado devido suas diversas possibilidades de aplicação, suas características atendem desde estruturas em concreto armado, protendido, até argamassas de assentamento e revestimento.

3.2.1 Caracterização dos Agregados

Os agregados foram analisados fisicamente segundo o Quadro 1.

Quadro 1 - Ensaio dos Agregados.

Parâmetros	Norma	Amostragem
Análise Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003).	2 Determinações
Massa Unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006).	2 Determinações
Massa Específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009). NBR NM 53 (ABNT, 2009).	2 Determinações

Fonte: Própria, 2020.

3.2.1.1 Composição Granulométrica

A granulometria, Figura 1, foi realizada utilizando 300 g de agregado miúdo (areia grossa e média) e para o agregado graúdo a amostra utilizada foi de 1 kg para a brita de 9.5 mm e 5 kg para a brita de 19 mm.

Conforme as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003), as amostras passaram por um processo de secagem em estufa a 105 °C por um período de 24 h, logo após foram esfriadas à temperatura ambiente e vertidas no conjunto de peneiras com aberturas de 4.75 mm a 150 µm, para os agregados miúdos e para os agregados graúdos 25 mm a 150 µm, para agitação mecânica que durou 15 minutos, tempo necessário para permitir a separação e classificação dos diferentes tamanhos de grãos das amostras. Por fim o material retido em cada peneira foi determinado a massa, para determinação do módulo de finura, dimensão máxima característica e curva granulométrica.

Figura 1 - Ensaio de Granulometria dos Agregados.



Fonte: Própria, 2020.

3.2.1.2 Massa Unitária

O ensaio de massa unitária, Figura 2, foi executado utilizando o método A – Determinação da massa unitária no estado compactado; e o método C – Determinação da massa unitária no estado solto, descritos na NBR NM 45 (ABNT, 45). Foi utilizada uma amostra equivalente a 150% do volume do recipiente de ensaio que possuía 10 dm³. O material passou por um período de secagem, 24 h, em estufa a uma temperatura de 105 °C.

No método A, foi determinada a massa do recipiente vazio, que logo após foi preenchido por três camadas de material, sendo cada uma adensada com 25 golpes, com auxílio de uma haste. Em seguida foi feito o nivelamento da superfície com uma régua metálica e foi pesado o conjunto.

No método C, o recipiente foi pesado e com uma concha foi preenchido com material até transbordar. O procedimento foi feito com bastante cuidado para não haver a segregação do agregado, para isso o material foi lançado a uma altura de 5 cm. Feito isso, foi realizado o nivelamento da superfície com uma régua metálica e foi determinada a massa do conjunto.

Com os resultados obtidos, foram calculados a massa unitária e o volume dos vazios.

Figura 2 - Ensaio de Massa Unitária dos Agregados.



Fonte: Própria, 2020.

3.2.1.3 Massa Específica

A determinação da massa específica do agregado graúdo, norma, Figura 3, foi realizada utilizando, respectivamente, 1 kg e 3 kg de amostra para as britas de 9.5 mm e 19 mm. A amostra foi preparada eliminando todo o material passante pela peneira de 4.75 por via seca, em seguida

ela foi lavada para remoção do pó ou outro material da superfície e colocada em uma estufa para secagem a uma temperatura de 105 °C, até massa constante.

Após a preparação da amostra, segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009), o material foi pesado e submergido em água à temperatura ambiente por um período de 24 h. Passado esse período a amostra foi retirada da água e envolvida com pano absorvente até que toda a água visível fosse eliminada. Imediatamente após ser enxuto, o material foi pesado. Em seguida a amostra foi colocada no recipiente e submergida em água mantida a 23 °C e pesada em água.

Por fim, o material foi seco a 105 °C até massa constante e determinada a sua massa. Com os resultados obtidos foram calculadas a massa específica e absorção de água.

Figura 3 - Ensaio de Massa Específica do Agregado Graúdo.



Fonte: Própria, 2020.

Os procedimentos para a determinação da massa específica do agregado miúdo, Figura 4, iniciou-se com a preparação da amostra, constituída por 1 kg de material, obtido por quarteamto, conforme indicado pela NBR NM 52 (ABNT, 2009). A amostra foi colocada em um recipiente e coberta com água por um período de 24 h. Após esse tempo o material foi retirado e estendido sobre uma superfície plana, submetido à ação de uma suave corrente de ar, revolvendo a amostra para assegurar uma secagem uniforme. Esse processo foi feito até que os grãos de agregado miúdo não ficassem fortemente aderidos entre si. Em seguida o agregado miúdo foi colocado em um molde tronco-cônico, sem ser comprimido, foi compactado sua superfície suavemente com 25 golpes de haste de socamento, por fim o molde foi levantado para verificar se o material atingiu a condição de saturada superfície seca, que ocorre quando o cone se desmorona. Caso esse fenômeno não ocorra, essa etapa deve ser repetida até que a agregado adquira a condição supracitada.

Amostra pronta, determinou-se uma massa de 500g de material que foi vertida em um frasco e registrado a massa do conjunto. Logo após, o frasco foi enchido com água até próxima da marca de 500 ml e agitado de forma a eliminar as bolhas de ar e depois colocado em um banho mantido a temperatura constante de 21 °C. Após 1 h, o frasco foi completado com água até a marca de 500 cm³ e determinada a massa. Para finalizar o ensaio, o agregado miúdo foi retirado do frasco, levado para secagem a uma temperatura 105 °C até massa constante e determinada sua massa. Com os resultados obtidos foi determinada a massa específica.

Figura 4 - Ensaio de Massa Específica do Agregado Miúdo.



Fonte: Própria, 2020.

3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Para a realização da pesquisa foram adotados quatro traços de concreto: TR, TI, TII e TIII, em massa. O traço de referência (TR) foi obtido pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, obtendo-se a seguinte proporção: 1:2,11:2,25:0,51, cimento, areia grossa, brita 19 mm e água.

Os demais traços (TI, TII e TIII), foram elaborados com o intuito de melhorar o empacotamento das partículas, utilizando outras faixas granulométricas em sua composição, conforme a Tabela 1.

Vale ressaltar que foram mantidas as proporções do cimento e o fator água/cimento, sendo alterado somente a granulometria dos agregados.

Tabela 1 - Proporção Granulométrica dos Traços.

Traço	Proporções dos Agregados
TR 1:2,11:2,20:0,51 Cimento, areia grossa, brita 19 mm e água.	-
TI 1:1,58:0,53:1,65:0,55:0,51 Cimento, areia grossa, areia média, brita 19 mm, brita 9,5 mm e água.	75% Areia grossa, 25% Areia média, 75% Brita 19 mm e 25% Brita 9,50 mm.
TII 1:1,055:1,055:1,10:1,10:0,51 Cimento, areia grossa, areia média, brita 19 mm, brita 9,50 mm e água.	50% Areia grossa, 50% Areia média, 50% Brita 19 mm e 50% Brita 9,50 mm.
TIII 1:0,53:1,58:0,55:1,65:0,51 Cimento, areia grossa, areia média, brita 19 mm, brita 9,50 mm e água.	25% Areia grossa, 75% Areia média, 25% Brita 19 mm e 75% Brita 9,5 mm.

Fonte: Própria, 2020.

O concreto foi produzido de forma mecânica com a utilização de uma betoneira, seguindo a seguinte sequência: com a betoneira ligada foi vertida a brita junto com a metade da água definida no traço deixando girar por um minuto; logo após foi colocado aos poucos a quantidade de cimento determinada para a quantidade de concreto prevista; e por fim adicionada a areia incluindo, ao mesmo tempo, a segunda metade da quantidade de água, deixando girar por 3 ou 4 minutos.

Os corpos de prova foram moldados segundo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015), Figura 5. A moldagem foi feita com corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e seguiu as seguintes etapas: os moldes e suas bases foram revestidos internamente com uma camada fina de óleo mineral; antes de ser lançada nos moldes, a amostra passou por um processo de remistura para garantir sua uniformidade; foi introduzido duas camadas de concreto de volume igual, sendo cada uma adensada com 12 golpes, de forma manual, por uma haste. Teve-se o cuidado de bater levemente na face do molde para obter o fechamento de eventuais vazios.

Figura 5 - Moldagem de Corpos de Prova de Concreto.



Fonte: Própria, 2020.

Após o adensamento da última camada, foi feito o rasamento da superfície com a borda do molde, empregando uma régua metálica ou uma colher de pedreiro adequada.

Em seguida, os moldes foram colocados sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que pudesse perturbar o concreto, onde ficaram por um período de 24 h, cura inicial, todos eles foram armazenados em local protegido de intempéries, devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar perda de água do concreto.

Após cumprido o período de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados e identificados e foram submetidos a cura, por imersão, em um tanque saturado com cal, por um período de 28 dias para rompimento. Antes de ensaiar o corpo de prova, suas bases passaram por um processo chamado de retificação, para tornar suas superfícies lisas, planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES

O desempenho do concreto depende de suas características tanto no estado fresco como no endurecido, portanto, estudar suas propriedades é fundamental. Os Quadros 2 e 3 listam respectivamente os ensaios realizados para caracterização do concreto em relação as suas propriedades.

Quadro 2 -Ensaio das Propriedades do Concreto no Estado Fresco.

Parâmetros	Norma	Amostragem
Massa Específica	NBR 9833 (ABNT, 2008)	2 Determinações
Consistência (<i>Slump Test</i>)	NBR NM 67 (ABNT, 1998)	2 Determinações

Fonte: Própria, 2020.

Quadro 3 - Ensaio das Propriedades do Concreto no Estado Endurecido.

Parâmetros	Norma	Amostragem
Resistência à Compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)	5 Corpos de prova
Resistência à Tração	NBR 7222 (ABNT, 2011)	5 Corpos de prova
Absorção e Massa Específica	NBR 9778 (ABNT, 2005)	5 Corpos de prova
Módulo de Elasticidade	NBR 6118 (ABNT, 2014)	-

Fonte: Própria, 2020.

3.4.1 No Estado Fresco

3.4.1.1 Massa Específica

O concreto foi colocado em um recipiente cilíndrico em três camadas de igual altura, cada uma foi adensada de forma manual, com 25 golpes, com auxílio de uma haste, Figura 6. Em seguida as paredes do recipiente foram golpeadas suavemente com o martelo várias vezes na altura correspondente a cada camada adensada, até que não fossem observadas, na superfície do concreto, marcas deixadas pela haste de adensamento, com o intuito de eliminar os vazios da amostra, como solicitado na NBR 9833 (ABNT, 2008). Finalizado o adensamento a superfície do concreto foi rasada com uma placa de calibração e o recipiente foi limpo, para determinação de sua massa.

Figura 6 - Ensaio de Massa Específica do Concreto no Estado Fresco.



Fonte: Própria, 2020.

3.4.1.2 Consistência

O ensaio iniciou-se posicionando o molde de tronco de cone sobre a placa de base, ambos umedecidos, de acordo com NBR 67 (ABNT, 1998). Em seguida, o molde foi preenchido com três camadas de concreto, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde, sendo cada uma compactada manualmente, com 25 golpes com uma haste de socamento, Figura 7. Após a compactação, foi feito o rasamento da superfície do concreto com uma desempenadeira. A placa de base foi limpa e o molde foi levantado cuidadosamente na vertical, em um período de até 10 s. Imediatamente após a retirada do molde foi feita a medição

do abatimento do concreto, determinando a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova, que corresponde à altura média do corpo de prova desmoldado.

Figura 7 - Ensaio de Consistência do Concreto – *Slump Test*.



Fonte: Própria, 2020.

3.4.2 No Estado Endurecido

3.4.2.1 Resistência à Compressão

Para a realização do ensaio de resistência à compressão foram medidos o diâmetro para o cálculo da seção transversal e a altura dos corpos de prova cilíndricos sobre seu eixo longitudinal. Em seguida, as faces dos pratos e dos corpos de prova foram limpas e secos, e colocados cuidadosamente centralizado no prato inferior da prensa. Por fim o carregamento foi aplicado continuamente até ruptura, Figura 8. Vale salientar que para realização desse ensaio as faces dos corpos de provas devem estar preparadas, capeadas ou retificadas, como indica a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Figura 8 - Ensaio de Resistência à Compressão do Concreto.



Fonte: Própria, 2020.

3.4.2.2 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à tração, do mesmo modo que o de compressão, iniciou-se com a mensuração do diâmetro para o cálculo da área da seção transversal e a altura do corpo de prova sobre seu eixo longitudinal. Em seguida, em cada extremidade do corpo de prova cilíndrico foi traçado, uma linha reta diametral, de modo em que as duas linhas resultantes fiquem contidas no mesmo plano axial. Logo após, o corpo de prova foi colocado de forma que o plano axial definido coincidissem com o eixo de aplicação da carga. Por fim, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011) entre os pratos e o corpo de prova foram colocadas duas chapa de madeira rígidas e foram feitos os ajustes nos pratos até que houvesse uma compressão capaz de manter em posição do corpo de prova, para aplicação do carregamento até ruptura, Figura 9.

Figura 9 - Ensaio de Resistência à Tração do Concreto.



Fonte: Própria, 2020.

3.4.2.3 Absorção e Massa Específica

Os corpos de prova para o ensaio de absorção e massa específica, Figura 10, foram colocados em estufa, à temperatura de 105 °C, por um período de 72 h e em seguida foram determinadas as suas massas. Logo após, a amostra foi imersa em água, à temperatura de 23°C, durante 72 h. Completada a etapa de saturação, o material foi colocado em um recipiente cheio de água e foi levado a ebulição por um período de 5 h. Em seguida foi determinada a massa com auxílio de uma balança hidrostática. Para finalizar, o corpo de prova foi retirado da água, enxugado e determinado a sua massa, segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005).

Figura 10 - Ensaio de Absorção e Massa Específica do Concreto no Estado Endurecido.



Fonte: Própria, 2020.

3.4.2.4 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) uma vez que a norma permite estimar o valor do módulo de elasticidade inicial, quando não forem feitos ensaios, usando a expressão $E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}$, para concretos de F_{ck} de 20 MPa a 50 MPa.

Sendo α_E , um coeficiente que leva em consideração a origem do agregado utilizado e sua rigidez, adotando os seguintes valores:

- $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;
- $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;
- $\alpha_E = 0,9$ para calcário;
- $\alpha_E = 0,7$ para arenito.

Para o referido trabalho foi utilizado $\alpha_E = 1,0$ por se tratar de um agregado de origem granítica.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Para melhor compreensão e esquematização das considerações acerca dos resultados, essa seção será dividida em duas partes: caracterização dos agregados e análise das propriedades do concreto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1 Análise Granulométrica

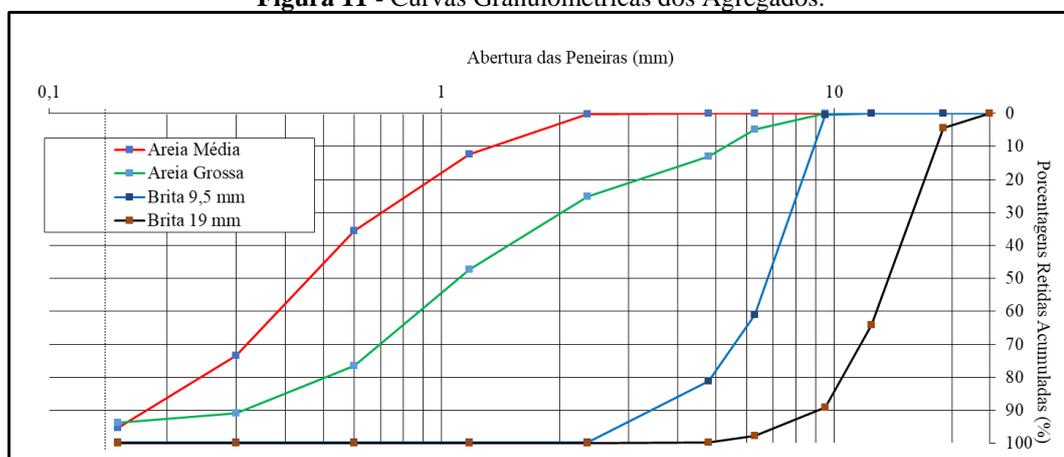
Os agregados, areia média, areia grossa, brita 9,5 mm e 19 mm, utilizados na mistura do concreto possuem módulo de finura, respectivamente, de 2,17, 3,47, 5,80 e 6,93. Já o diâmetro máximo característico é da ordem de 2,36 mm, 6,30 mm, 9,50 mm e 19 mm, respectivamente.

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), os dois tipos de areias utilizadas atendem aos limites de distribuição granulométrica especificada pela norma, uma vez que, a areia média possui módulo de finura entre 1,55 e 2,20 pertencendo a Zona Utilizável Inferior, e a areia grossa possui módulo de finura entre 2,90 e 3,50 se enquadrando na Zona Utilizável Superior.

As britas também atendem aos limites indicados pela norma supracitada, aonde a brita de 9,50 mm pertence a Zona Granulométrica 4,75/12,5 mm por possui um 61% de massa retida acumulada na peneira de 6,30 mm, e a brita 19 mm se enquadra na Zona Granulométrica de 9,5/25 mm por possui 64% de massa retida acumulada na peneira de 12,50 mm.

A Figura 11, apresenta as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo, determinadas após ensaio.

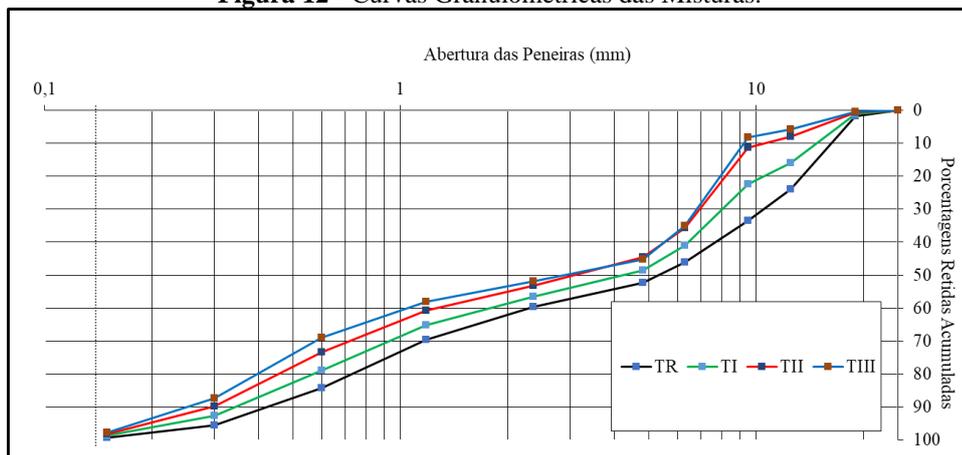
Figura 11 - Curvas Granulométricas dos Agregados.



Em relação às misturas realizadas com variações na composição granulométricas, TR, TI, TII e TIII, os resultados em relação ao módulo de finura foram respectivamente: 4,96, 4,64, 4,32 e 4,18. Pode-se observar que há uma diminuição no módulo de finura, em relação ao traço de referência, na medida em que a proporção granulométrica vai sendo alterada. Esse fato pode ser justificado pela inserção de materiais mais finos na mistura, foram adicionados um teor de 25%, 50% e 75% de areia média e brita 9,50 mm, que correspondem aos demais traços. Todas as composições obtiveram diâmetro máximo característico iguais de 19 mm, por possuírem na sua mistura brita cuja maior dimensão está relacionada a esse diâmetro.

Um fato a se destacar, é que as demais curvas granulométricas em relação de referência, tenderam a ficar mais uniforme, bem graduada, fato este justificado pela inserção de outras faixas granulométricas, com diâmetros intermediários, como demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Curvas Granulométricas das Misturas.



Fonte: Própria, 2020.

4.1.2 Massa Unitária e Volume de Vazios

Os resultados obtidos no ensaio de massa unitária no estado solto e compactado e índice de vazios, estão apresentados nas Tabelas 2 e 3 e nas Figuras 13 e 14.

Tabela 2 - Resultado da Massa Unitária no Estado Solto e Volume de Vazios dos Agregados.

	Massa Unitária no Estado	
	Solto - ρ_{ap} (kg/m ³)	
	Índice de Vazios - E_v (%)	
Areia Média	1500	42,31
Areia Grossa	1480	43,51
Brita 9,5 mm	1450	45,28
Brita 19 mm	1420	46,82

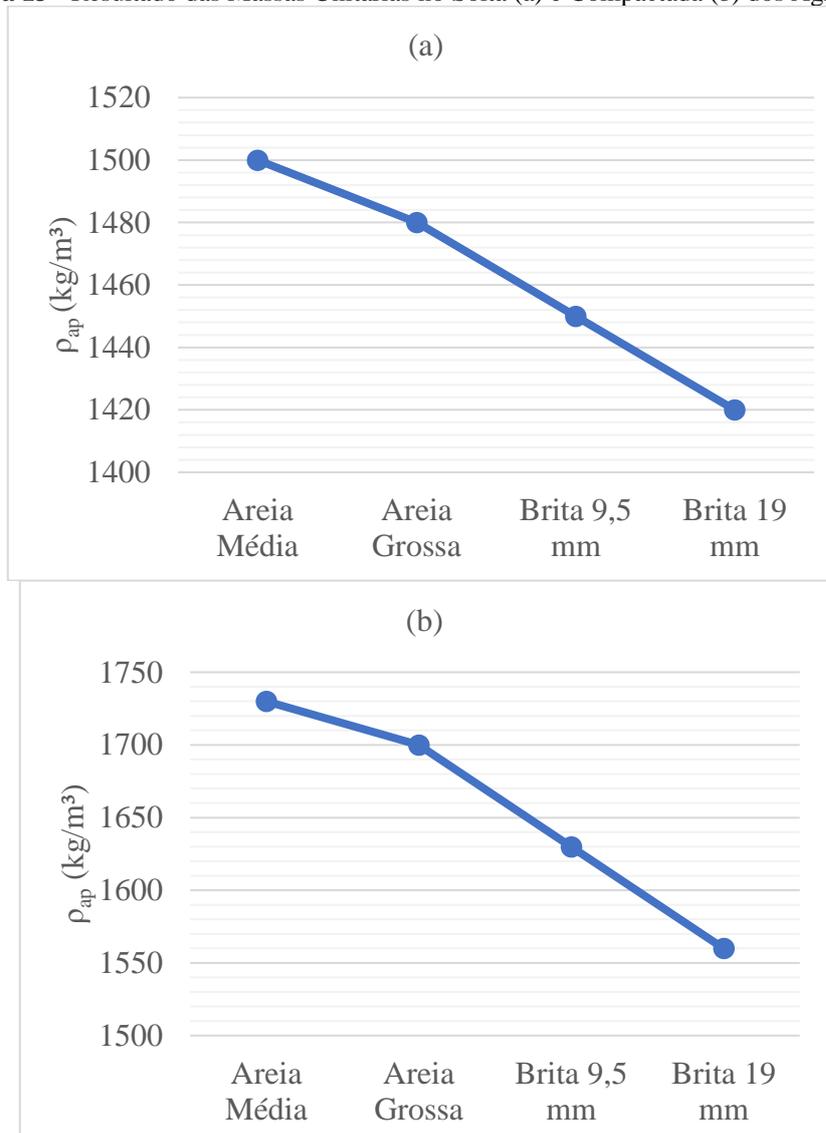
Fonte: Própria, 2020.

Tabela 3 - Resultado da Massa Unitária no Estado Compactado e Volume de Vazios dos Agregados.

	Massa Unitária no Estado Compactado - ρ_{ap} (kg/m³)	Índice de Vazios - E_v (%)
Areia Média	1730	33,46
Areia Grossa	1700	35,11
Brita 9,5 mm	1630	38,49
Brita 19 mm	1560	41,57

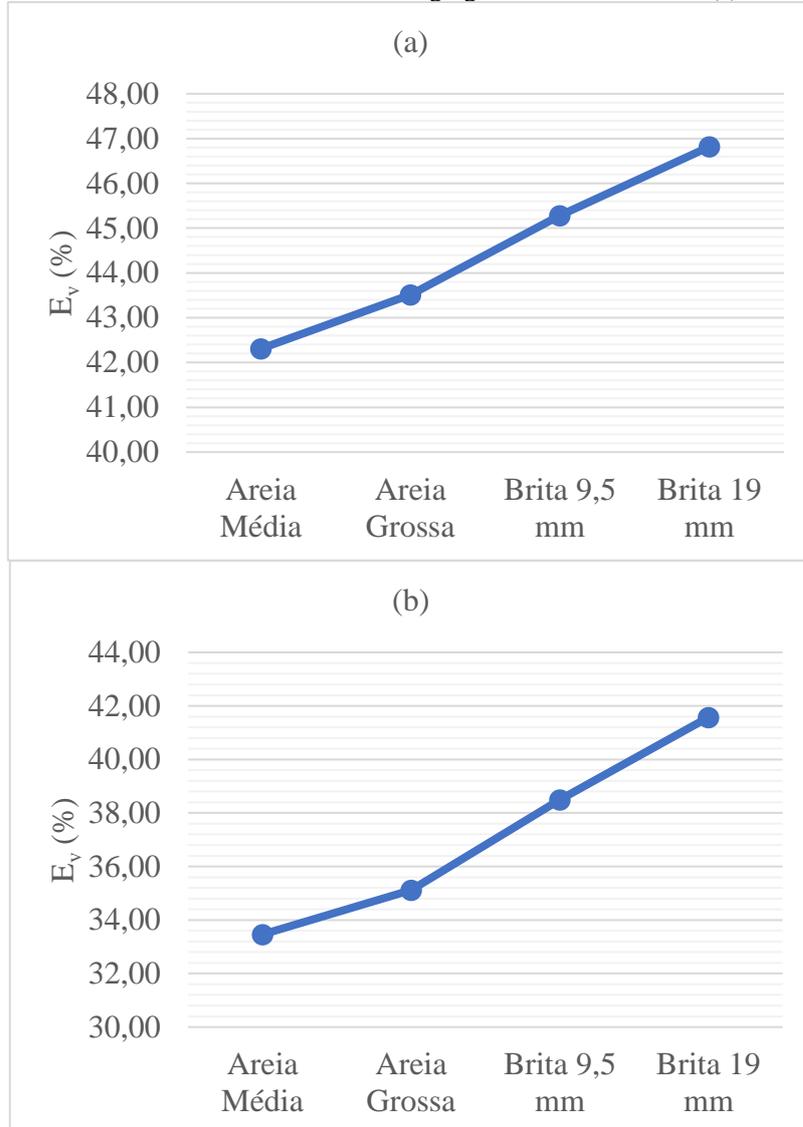
Autor: Própria, 2020.

Como observado nas Figuras 13 e 14 o aumento da dimensão do agregado, provoca um aumento no volume de vazios que acarreta uma menor massa unitária. Isso já era esperado uma vez que, quanto maior for a partícula do agregado mais difícil será sua acomodação, maior será o espaço intergranular (vazios). Esse fato ocorre tanto para massa a unitária no estado solto como no estado compactado.

Figura 13 - Resultado das Massas Unitárias no Solta (a) e Compactada (b) dos Agregados.

Fonte: Própria, 2020.

Figura 14 - Resultado do Volume de Vazios dos Agregados no Estado Solto (a) e Compactado (b).



Fonte: Própria, 2020.

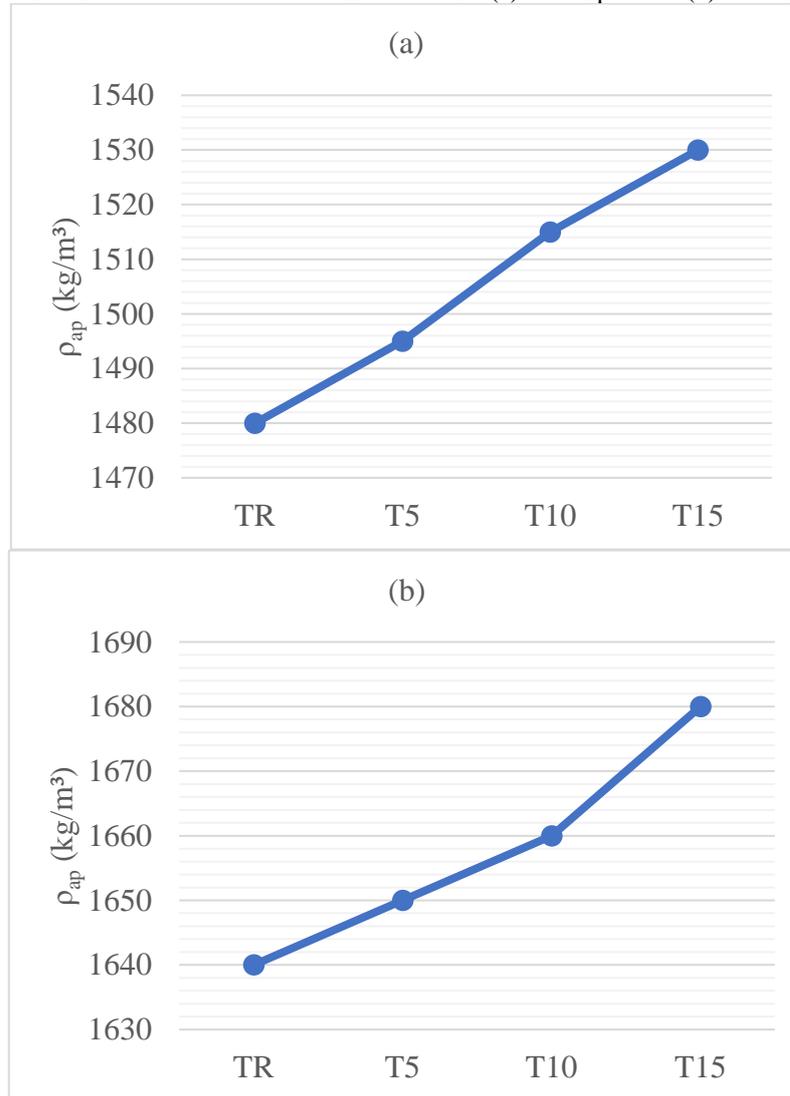
Nas misturas, TR, TI, TII e TIII, observa-se que houve crescimento nas massas unitárias, solta e compactada, em relação ao traço de referência, na medida em que a composição granulométrica destes varia, Tabela 4 e Figura 15.

Esse fenômeno pode ser justificado pela inserção, na mistura, de areias e britas de tamanhos diferentes, que ocasionou um menor volume de vazios e conseqüentemente aumento nas massas unitárias, o que sugere que houve o empacotamento das partículas.

Tabela 4 - Resultado das Massas Unitárias Solta e Compactada das Misturas.

Traço	Massa Unitária no Estado Solta - ρ_{ap} (kg/m ³)	Massa Unitária no Estado Compactada - ρ_{ap} (kg/m ³)
TR	1480	1640
TI	1495	1650
TII	1515	1660
TIII	1530	1680

Fonte: Própria, 2020.

Figura 15 - Resultado das Massas Unitárias Solta (a) e Compactada (b) das Misturas.

Fonte: Própria, 2020

4.1.3 Massa Específica

As areias, média e grossa, possuem massas específicas de $2,60 \text{ g/cm}^3$ e $2,62 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Já as britas 9,50 mm e 19 mm possuem $2,65 \text{ g/cm}^3$ e $2,67 \text{ g/cm}^3$. As massas específicas dos agregados influenciam diretamente nas propriedades do concreto fresco.

4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

4.2.1 Propriedades do Concreto Fresco

4.2.1.1 Consistência

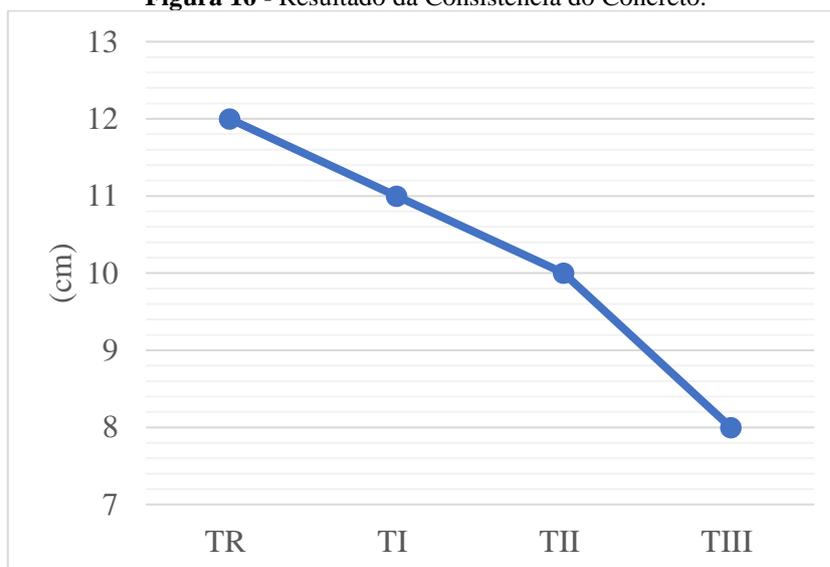
Segundo os resultados apresentados na Tabela 5 e Figura 16, houve uma redução da trabalhabilidade das misturas otimizadas, TI, TII e TIII, em relação à mistura de referência, TR, nas seguintes proporções, respectivamente: 8,33%, 16,66% e 33,33%.

Tabela 5 - Resultado da Consistência do Concreto.

Traços	Consistência (cm)
TR	12
TI	11
TII	10
TIII	8

Fonte: Própria, 2020.

Figura 16 - Resultado da Consistência do Concreto.



Fonte: Própria, 2020.

Esse fato ocorreu devido os traços TI, TII e TIII terem produzidos uma menor proporção de pasta necessária para envolver os grãos dos agregados e promover sua mobilidade. Devido a incorporação de materiais mais finos, a quantidade de pasta não foi suficiente para promover a coesão e fluidez dos agregados, dificultado seu adensamento, e portanto, provocando vazios, A justificativa do corrido pode ser comprovada, levando em consideração que o maior índice de redução foi para o TIII, com 33,33%, que continha o maior percentual de material fino, areia média, em sua composição. O ideal nesse caso seria a adição de aditivos ou aumento da proporção da pasta sem alterar o fator água/cimento (a/c).

4.2.1.2 Massa Específica e Teor de Ar

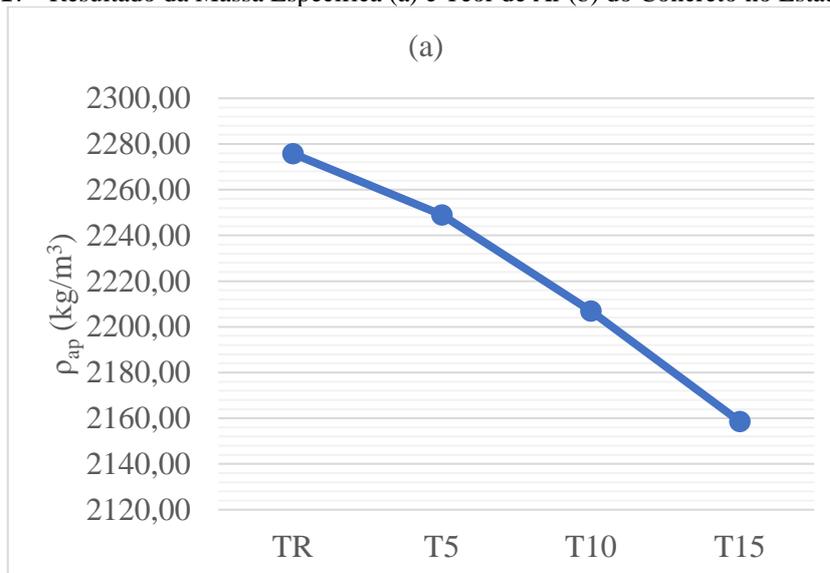
Houve um aumento no teor de ar do concreto nos traços TI de 32,14%, TII de 85,38% e TIII de 148% em relação ao TR, o que influenciou diretamente na redução da massa específica desses traços na ordem de 1,18%, 3,03% e 5,15% respectivamente (Tabela 6 e Figura 17).

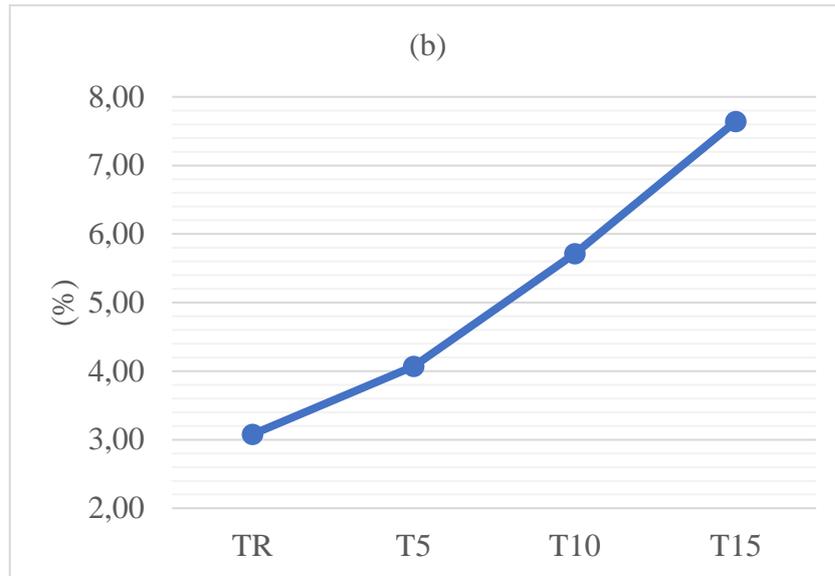
Tabela 6 - Resultado da Massa Específica e Teor de Ar do Concreto no Estado Fresco.

Traços	Massa Específica - ρ (kg/m ³)	Teor de Ar (%)
TR	2275,80	3,08
TI	2249,04	4,07
TII	2207,01	5,71
TIII	2158,60	7,64

Fonte: Autor, 2020.

Figura 17 - Resultado da Massa Específica (a) e Teor de Ar (b) do Concreto no Estado Fresco.





Fonte: Própria, 2020.

Isso deve-se a porosidade da mistura obtida pela falta de pasta de cimento necessária para obtenção da consistência ideal da pasta.

4.2.2 Propriedades do Concreto Endurecido

4.2.2.1 Absorção de Água, Massa Específica e Índice de Vazios

Conforme a Tabela 7 e a Figura 18, o índice de vazios aumentou nos demais traços TI, TII e TIII nas seguintes proporções: 3,53 %, 5,05% e 15,75%. O que influenciou na absorção de água que obteve aumento de 2,03%, 4,28% e 17,11% e na massa específica que reduziu seus índices para 0,88%, 1,76% e 3,54%.

Esse fenômeno ocorreu pelo aumento do teor incorporado ao concreto, decorrente da quantidade de pasta adequada.

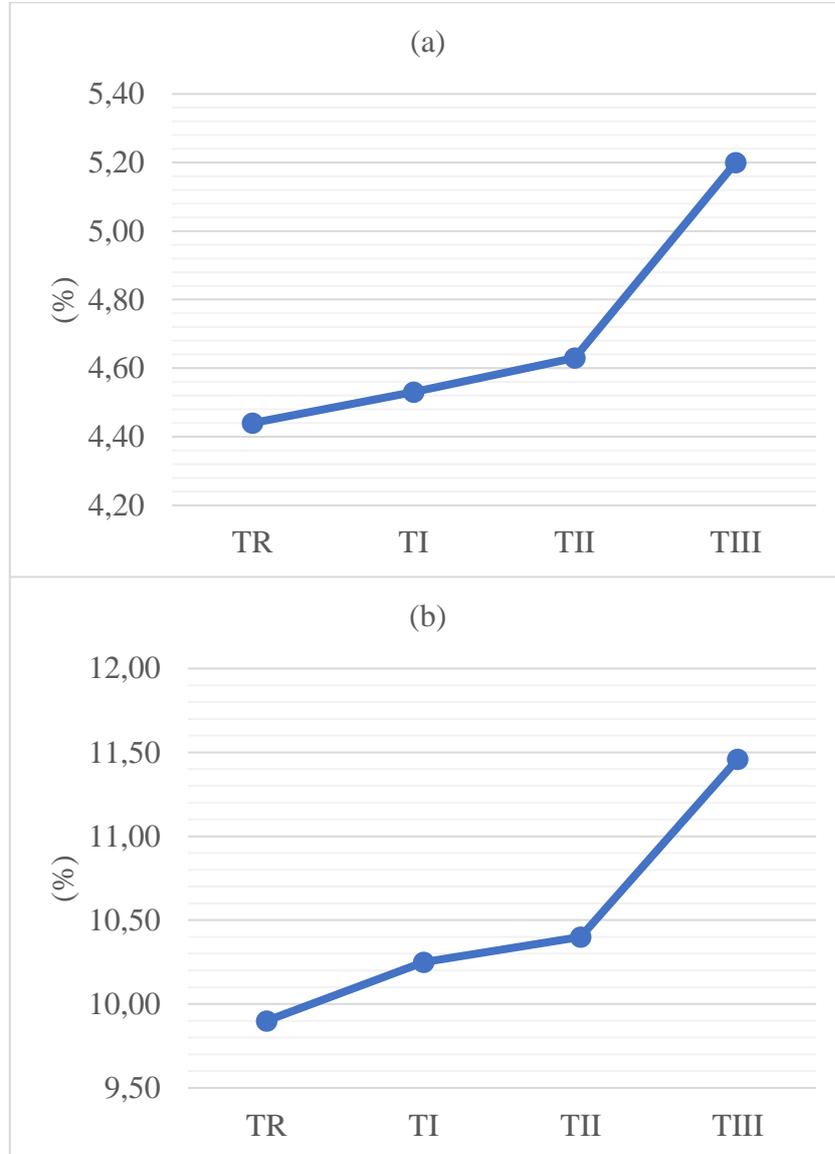
Tabela 7 - Resultado da Absorção de Água, Massa Específica e Índice de Vazios do Concreto no Estado Endurecido.

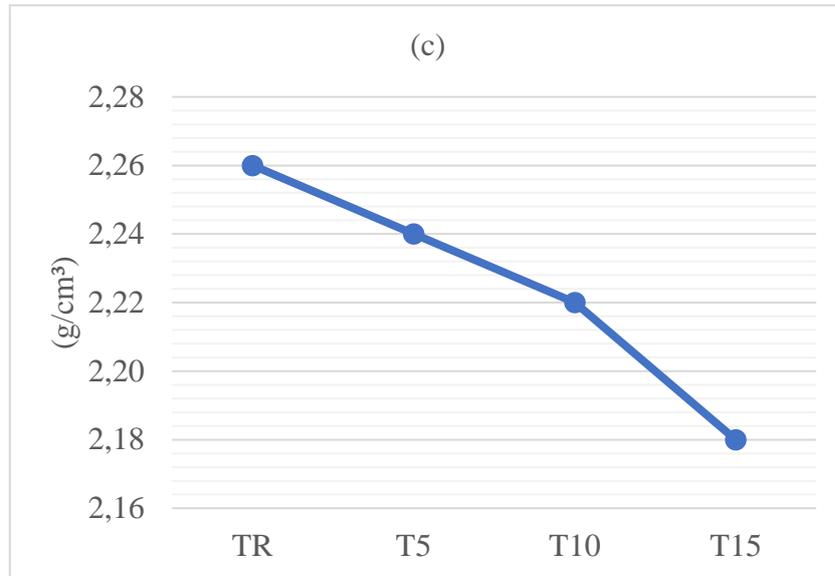
Traços	Absorção de Água (%)	Índice de Vazios (%)	Massa Específica (g/cm ³)
TR	4,44	9,90	2,26
TI	4,53	10,25	2,24
TII	4,63	10,40	2,22

TIII	5,20	11,46	2,18
-------------	------	-------	------

Fonte: Própria, 2020.

Figura 18 - Resultado da Absorção de Água (a), Massa Específica (b) e Índice de Vazios (c) do Concreto no Estado Endurecido.





Fonte: Própria, 2020.

4.2.2.2 Resistência Mecânica

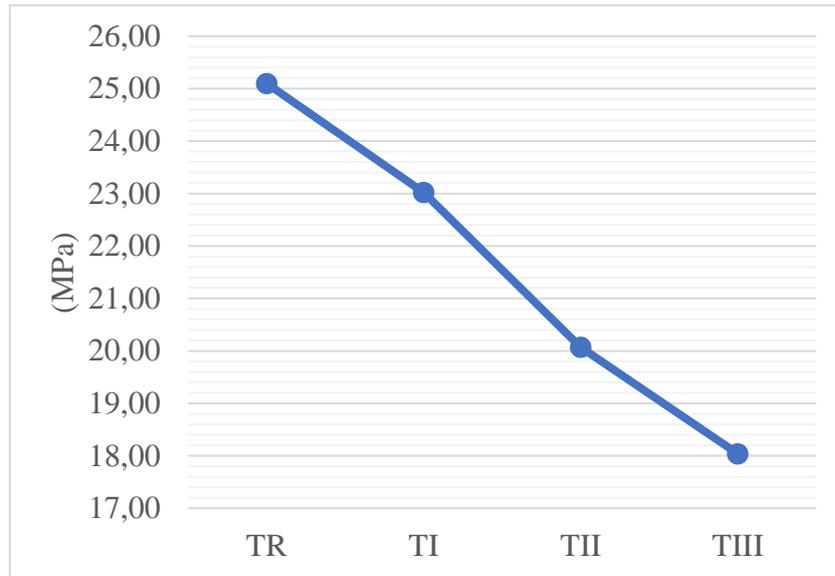
Em relação as características mecânicas, compressão, tração e módulo de elasticidade, houve um decréscimo nas suas resistências para os traços TI, TII e TIII em relação ao TR. A redução foi na ordem de 8,29%, 20,04% e 28,13% para a resistência à compressão; 9,26%, 20,63% e 29,89% para a resistência à tração por compressão diametral; e, 4,24%, 10,58% e 12,90% para o módulo de elasticidade. Vide Tabela 8, e Figuras 19, 20 e 21.

Tabela 8 - Resultado da Resistência à Compressão, Tração por Compressão Diametral e Módulo de elasticidade do Concreto.

Traços	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Módulo Elasticidade (GPa)
TR	25,10	3,78	28,06
TI	23,02	3,43	26,87
TII	20,07	3,02	25,09
TIII	18,04	2,65	24,44

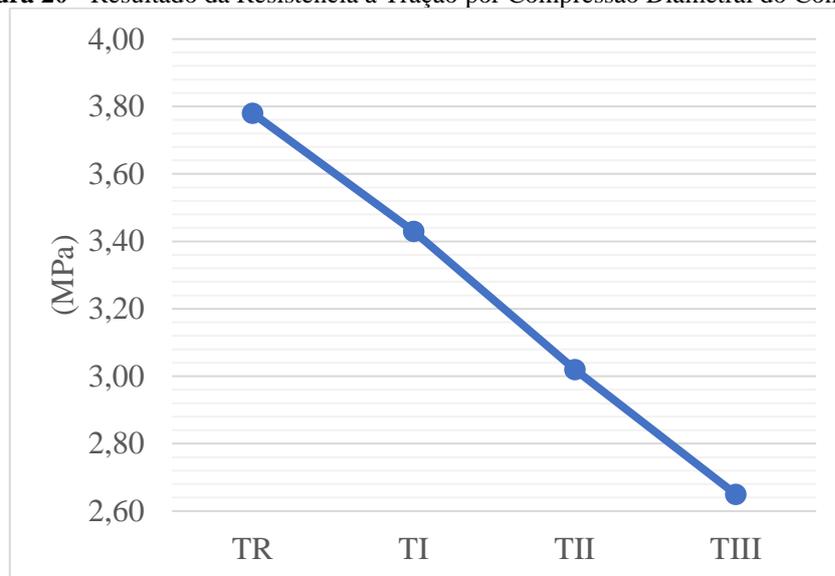
Fonte: Própria, 2020.

Figura 19 - Resultado da Resistência à Compressão do Concreto.



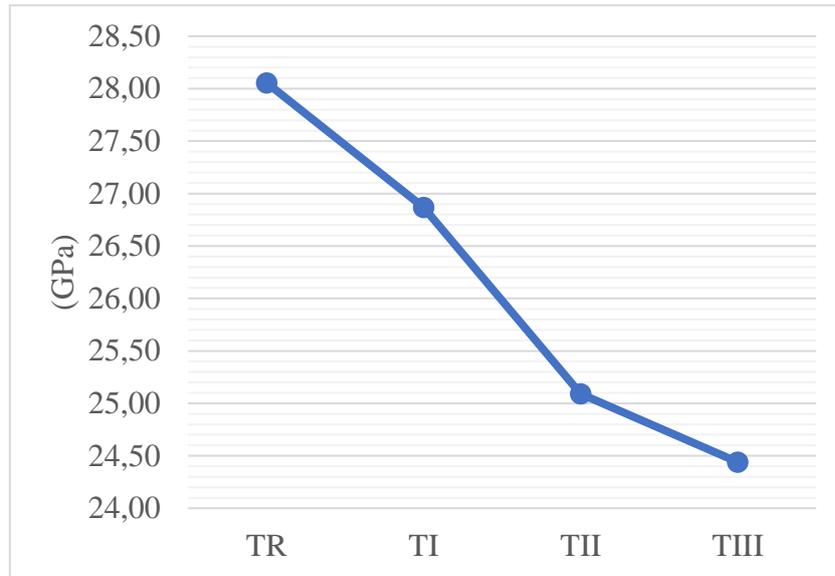
Fonte: Própria, 2020.

Figura 20 - Resultado da Resistência à Tração por Compressão Diametral do Concreto.



Fonte: Própria, 2020.

Figura 21 - Resultado do Módulo de Elasticidade do Concreto.



Fonte: Própria, 2020.

Esse fato não era esperado uma vez que houve, como comprovado, o empacotamento dos grãos das misturas, e quando isso acontece o que se espera é aumento das resistências mecânicas e durabilidade do concreto. O que aconteceu foi uma redução nas propriedades do concreto fresco que influenciam diretamente nas propriedades do concreto endurecido.

O aumento dos materiais finos na proporção no traço do concreto, principalmente no traço TIII, e a não utilização de aditivos, corroboraram para a produção de um concreto com teor de pasta inferior a necessária para promover a coesão dos agregados e a fluidez da mistura, provocando vazios e porosidade, acarretando aumento na permeabilidade e redução das densidades do concreto, tornando-o mais frágil, reduzindo suas características mecânicas.

5 CONCLUSÃO

A composição granulométrica de misturas cimentícias podem trazer diversos benefícios para seus produtos quando realizados com técnicas e metodologias bem definidas.

Através de experimentos e análises realizadas pode-se concluir que a granulometria influencia diretamente nas propriedades do concreto. Ao produzir concretos com quantidades padrões de cimento e água variando apenas as porcentagens de cada agregado, pode-se observar como as características e combinações dos mesmos podem resultar em diferentes valores e influenciar no desempenho do produto.

A caracterização dos agregados em relação a granulometria e massa unitária demonstrou que as misturas TI, TII e TIII sofreram o fenômeno de empacotamento das misturas, uma vez que, as curvas granulométricas de tais traços tenderam a ficar mais contínua, e as massas unitárias aumentaram, indicando que houve um aumento na redução dos vazios.

Os maiores valores de redução das características mecânicas foram encontrados no traço TIII com 75% de teor de areia média. Com o intuito de utilizar esse agregado miúdo em maiores quantidades visando preencher os vazios existentes na mistura e assim encontrar o máximo empacotamento das partículas, observou-se que o índice de vazios das misturas aumentou devido a pouca pasta de cimento produzida, o que provocou um concreto mais poroso, devido sua consistência mais seca e sem fluidez, dificultando o adensamento da mistura.

Sugere-se para trabalhos futuros, o desenvolvimento de pesquisas utilizando variações na composição granulométricas dos agregados, com uso de aditivos.

REFERÊNCIAS

- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção**: normas, especificações, aplicações e ensaios em laboratórios. São Paulo: Editora PINI, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e o volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- 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, 2009.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

CALLISTER JÚNIOR, W. D; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: An Introduction**. 9.ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

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.

CEMBUREAU. **Activity Report 2015**. Brussels, Belgium: CEMBUREAL, 2015.

GRUBBA, D. **Materiais de construção: para gostar e aprender**. 2 ed. Createspace, 2016.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2017.

LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. CRC Press, 1999.

LARRARD, F; ROUSSEL, N. Simulação de escoamento de concreto fresco sob uma máquina Slipform. **Materiais rodoviários e projeto de pavimentação**, v. 12, n. 3, pág. 547-566, 2011.

LENZ, L. A; LONDERO, C; KLEIN, N. S; MAZER, W; PEREIRA, D. A.. Avaliação da influência do empacotamento dos agregados na durabilidade de concretos através de Ensaio não destrutivos: resistividade elétrica e Propagação de ondas de ultrassom. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Curitiba, p.1-18,2017.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. São Carlos, 2019.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partícula**. 2013. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação Em engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia –UNESP –Ilha Solteira, 2013.

PEREIRA, M. S. **Controle da resistência do concreto: paradigmas e variabilidade - Estudo de caso**. 2008. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. Porto Alegre: Editora Globo, 1998.

SNIC, Sindicato Nacional da Industria de Cimento. **Consumo aparente de cimento por regiões e estados**, 2014.

SNIC, Sindicato Nacional da Industria de Cimento. **Vendas de cimento encerram em 2018 em queda de 1,2%**, 2018.

SILVA, D. A; GEYER, A. L. B. Análise e classificação da forma do agregado graúdo britado para concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v.5, p.18-28, 2018.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VIA TÉCNICA. Consultoria e Serviços Especiais de Engenharia. **Controle tecnológico**, 2014. Disponível em: <http://www.viatecnica.com.br/area-atuacao/controle-tecnologico>. Acesso em: 14 out. 2020.