

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

CHRYSYTIAN TAVARES NATO

**DOSAGEM DE CONCRETOS PELA TEORIA DO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS E MÉTODO IPT-EPUSP**

Cajazeiras-PB
2023

CHRYSYTIAN TAVARES NATO

**DOSAGEM DE CONCRETOS PELA TEORIA DO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS E MÉTODO IPT-EPUSP**

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. Dr. Robson Arruda dos Santos.

Cajazeiras-PB
2023

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

N279d	<p>Nato, Chrystian Tavares. Dosagem de concretos pela teoria do empacotamento de partículas e método IPT-EPUSP / Chrystian Tavares Nato. - 2023.</p> <p>55f. : il.</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.</p> <p>Orientador(a): Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.</p> <p>1. Construção civil. 2. Concreto alternativo. 3. Sustentabilidade. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.</p>
-------	---

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

DOSAGEM DE CONCRETOS PELA TEORIA DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS E MÉTODO IPT-EPUSP

CHRYSYTIAN TAVARES NATO
chrystiantavares@hotmail.com
ROBSON ARRUDA DOS SANTOS
robson.santos@ifpb.edu.br

RESUMO

A evolução dos métodos construtivos e a alta demanda na área da construção civil têm impactos socioeconômicos e de infraestrutura em escala global. O concreto de cimento Portland se destaca como um dos materiais mais utilizados, influenciando questões energéticas e ambientais, por possuir uma alta emissão de CO₂. Métodos de dosagem por empacotamento de partículas podem reduzir esses impactos, ajustando a proporção dos materiais utilizados na produção do concreto. Foi realizado o estudo em três grupos de concreto: concretos de referência, concretos com empacotamento e variação do teor de pasta e concretos com empacotamento e variação do teor de argamassa. Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias e analisada a eficiência do ligante pelo indicador proposto por Daminieli (2010). Os resultados mostraram que para obter um concreto viável economicamente, resistente e com menor impacto ambiental, a adaptação do método IPT-EPUSP com o estudo do empacotamento pode aprimorar a análise do modelo de Andreassen modificado em agregados, permitindo resultados mais precisos. A variação do parâmetro brita/areia possibilita ajustar o empacotamento de acordo com a trabalhabilidade e eficiência do ligante. Isso foi evidenciado no concreto TE - Arg. 10%, que apresentou resultados superiores aos concretos com 20% e 30% de adição de argamassa. Ao comparar apenas o parâmetro de resistência mecânica pode-se observar que não há uma análise tão detalhada dos resultados, sendo necessário então a inclusão dos dados de índice de ligantes, para obter a mistura ideal com menor emissão de CO₂.

Palavras-Chave: Empacotamento, Sustentabilidade, Dosagem de concreto, Modelo de Andreassen.

ABSTRACT

The evolution of construction methods and the high demand in the field of civil construction have socioeconomic and infrastructure impacts on a global scale. Portland cement concrete stands out as one of the most used materials, influencing energy and environmental issues, as it has a high CO₂ emission. Particle packing dosing methods can reduce these impacts by adjusting the proportion of materials used in the production of concrete. The study was carried out on three groups of concrete: reference concrete, concrete with packing and variation in paste content, and concrete with packing and variation in mortar content. Compressive strength tests were performed at 7 and 28 days and the binder efficiency was analyzed by the indicator proposed by Daminieli (2010). The results showed that to obtain an economically viable concrete, resistant and with less environmental impact, the adaptation of the IPT-EPUSP method with the study of packing can improve the analysis of the modified Andreassen model in aggregates, allowing more accurate results. The variation of the gravel/sand parameter makes it possible to adjust the packing according to the workability and efficiency of the binder. This was evidenced in the TE - Arg concrete. 10%, which showed better results than concrete with 20% and 30% mortar addition. When comparing only the mechanical resistance parameter, it can be seen that there is not such a detailed analysis of the results, so it is necessary to include the binder index data, to obtain the ideal mixture with lower CO₂ emissions.

Keywords: Packing, Sustainability, Concrete dosage, Andreassen Model.

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos métodos construtivos e a grande demanda pela área da construção civil impacta diretamente no aspecto socioeconômico e de infraestrutura numa escala mundial, dentre essas tecnologias e materiais de construção, o concreto de cimento Portland se destaca como um dos insumos mais utilizados em obras, responsável por movimentar esferas relacionadas a questões energéticas e de meio ambiente.

De acordo com Callister Jr. e Rethwisch (2012), a obtenção do concreto de cimento Portland (CP) provém do endurecimento de uma mistura produzida a partir de um aglomerante hidráulico CP, um agregado miúdo na maioria das vezes utilizado a areia, um agregado graúdo a brita e água. Este processo passa por um tempo de cura onde o cimento cria uma aderência com os agregados e assim resulta numa mistura resistente e com uma trabalhabilidade boa, o que abre um leque de possibilidades quanto a sua aplicação, tais como pontes, lajes, edificações, estruturas de fundações e contenções.

Na grande maioria dos casos a maior parcela da proporção do concreto é preenchida pelos agregados, mas o composto que traz as características de resistência mecânica e trabalhabilidade é o cimento, que apesar de muitos benefícios para a mistura do concreto, tem características negativas quanto ao aspecto ambiental, pela sua alta emissão de CO₂. Um processo que pode reduzir esses aspectos são os métodos de dosagem por empacotamento de partículas, que interferem diretamente na proporção de cada material utilizado para produção do concreto, pois com a redução dos vazios intergranulares a demanda por pasta de cimento será reduzida (Damineli et. al., 2017).

Para a obtenção de um concreto economicamente viável, com resistência mecânica, boa trabalhabilidade e com impactos ambientais moderados, necessita-se de uma forma de contornar os aspectos negativos do uso de cimento Portland na mistura do concreto e, também, a otimização dos agregados. Segundo Rebmann (2016) a redução da quantidade de água na mistura do concreto é um dos fatores principais para a redução do consumo de cimento no concreto, com isso ocasiona alterações na reologia, onde é preciso adicionar aditivos químicos para que sejam adquiridas as características necessárias para o uso.

Sobre a redução do uso de cimento Portland nas misturas para produção de concreto, Lopes (2019) afirma que:

A redução do consumo de cimento em concretos propicia algumas vantagens técnicas, como a redução do calor de hidratação, da retração e de fissuração. Para tanto, tem-se empregado materiais cimentícios suplementares, como filer calcário, pozolanas e escória, possibilitando um melhor empacotamento da mistura, além de melhorar consideravelmente a microestrutura do concreto nas primeiras idades. Em relação a sustentabilidade do material, essa prática torna-se relevante, visto que possibilita a obtenção de concretos com menor teor de cimento incorporado sem prejuízos para suas propriedades. (LOPES, 2019, p.21)

Os métodos de dosagem com empacotamento de partículas em concretos estão relacionados a uma etapa importante na produção, no que diz respeito a qualidade do material produzido, propriedades de resistência mecânica, durabilidade, trabalhabilidade e o custo benefício. As técnicas mais utilizadas no cenário são a IPT desenvolvida pela EPUSP e a feita pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que possuem características distintas relacionadas a metodologia de avaliação dos resultados obtidos.

De acordo com Lopes (2019), as metodologias utilizadas atualmente no Brasil têm como principal objetivo uma melhor distribuição granulométrica para que os agregados tenham um maior custo benefício, mas não é apenas necessário ter um baixo consumo de cimento, precisa ser um material trabalhável, aplicável, durável e resistir a esforços mecânicos, fazendo com que o empacotamento e partículas traga não só uma otimização técnica do concreto, como também sustentabilidade.

Para Damineli (2013), das alternativas para serem desenvolvidas uma delas é o aumento da eficiência do uso de ligantes, materiais que sofrem alterações térmicas na sua produção e emitem CO₂, estes que ajudam na formação da resistência mecânica do material por processos de hidratação ou reações pozolônicas, como exemplo tem-se o clínquer, cinzas volantes, filer, entre outros, este aumento da eficiência do uso de ligantes está atrelado diretamente a fatores como a minimização do teor de água, que resulta em uma maior resistência mecânica do concreto com o reduzido teor de ligantes.

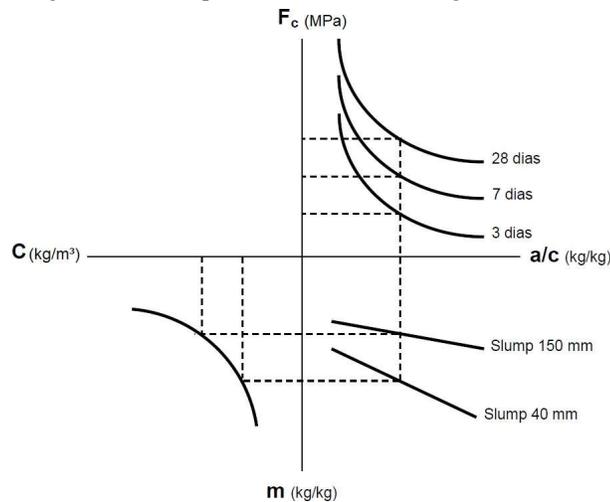
A dosagem por empacotamento de partículas é um processo de grande importância para a otimização de misturas de concreto, dadas as características necessárias para atender os requisitos técnicos e que sejam sustentáveis. Mesmo não sendo um conceito novo na construção civil, existe pouca aplicação para dosagem de concretos de todas as classes de resistência, tal teoria é mais empregada em concretos de alto desempenho, com emprego de materiais distante da realidade das obras de pequeno e médio porte. Assim, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de dosagem com uma teoria de empacotamento de partículas (modelo de Andreassen Modificado) ao método de dosagem IPT-EPUSP para obtenção de concretos com maior eficiência de ligante utilizando materiais de fácil acesso em todas as regiões do país.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MÉTODO DE DOSAGEM IPT/EPUSP

A metodologia desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) é bastante utilizado no Brasil, pela sua facilidade de execução sem a dependência de uma caracterização laboratorial tão detalhada dos agregados do concreto (ALVES, 2020). A execução do método consiste em uma padronização de agregados utilizados na mistura do concreto produzido, então é definido uma curva de comportamento de acordo com a resistência obtida, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Diagrama obtido a partir do método de dosagem tradicional IPT/EPUSP.



Fonte: Adaptado de Alencar (2008).

O método desenvolvido pelo IPT-EPUSP assume que a melhor relação entre os agregados utilizados no concreto é aquela que minimiza a quantidade de água necessária para atingir o abatimento desejado (TUTIKIAN; HELENE, 2011). Para testar em laboratório, recomenda-se que sejam pelo menos três misturas diferentes na matéria seca do cimento: agregado, uma mistura é intermediária, uma mistura rica em cimento e uma mistura pobre. Então, em cada mistura varia-se a porcentagem de argamassa até obter a consistência desejada (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

O método prevê um ajuste experimental das proporções entre os materiais constituintes do concreto, baseado na busca do teor ideal da argamassa seca. Esta etapa é considerada a mais importante, pois a falta de argamassa pode levar ao aumento da porosidade do concreto e ao fracasso do processo de concretagem. Por outro lado, o excesso de argamassa apresenta um concreto de boa aparência, entretanto aumenta o custo por metro cúbico, além de aumentar o risco de fissuras por fontes de calor e retração por secagem, então o teor de argamassa ideal deve ser o mínimo necessário para não aumentar a porosidade do concreto (RICCI; PEREIRA; AKASAKI, 2017).

Após a definição de uma proporção ideal de argamassa, é executado um traço de concreto para referência de estudo para determinação dos parâmetros iniciais da pesquisa, como a relação do traço

com o seu consumo de cimento por m^3 , a sua massa específica no estado fresco e a relação de água/cimento, após a execução e moldagem são realizados ensaios, a exemplo o de compressão de acordo com as idades de interesse, a fim da construção de uma curva de resistência de um diagrama de dosagem (LOPES, 2019)

A quantidade mínima de três tipos de traço de concreto proporciona ajustes de relação de dosagem, possibilitando a análise do diagrama de dosagem por regressão linear, podendo assim lograr para qualquer resistência que seja desejada dentro do intervalo de estudo para misturas de um mesmo traço de concreto (LOPES, 2019).

2.2 MÉTODO DE DOSAGEM ABCP

A metodologia de dosagem de concreto desenvolvida pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), foi desenvolvida pelo Engenheiro Públio Penna Firme Rodrigues, de acordo com um estudo técnico sobre “Parâmetros de Dosagem de Concreto” (BOGGIO, 2000).

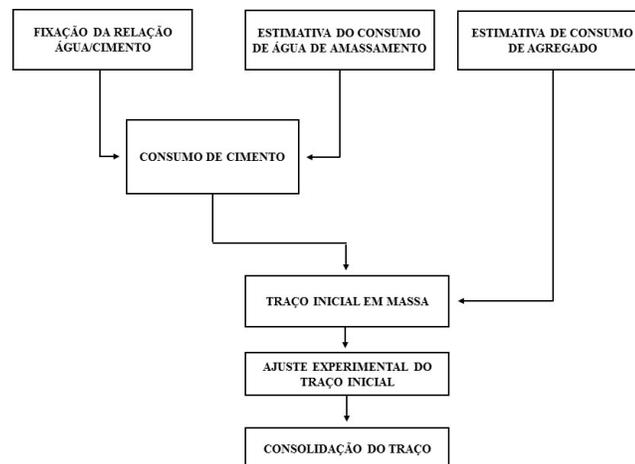
A dosagem ABCP é feita para obter diferentes propriedades de concreto que podem ser usadas para definir concretos com diferentes propriedades, por exemplo, concreto com consistência mais mole significando mais água em sua composição e consistência mais dura significando que há muito pouca água na mistura. Para a dosagem de concreto utilizando o método ABCP, é necessário conhecer algumas definições, como resistência à compressão, desvio padrão, relação água-cimento, peso específico real e peso específico aparente do concreto. Para tais processos, são necessários um teste granulométrico e de massa específica dos agregados (SANTO, 2017).

O método consiste em obter uma trabalhabilidade ideal do concreto relacionada com o menor índice de vazios do concreto, se faz necessário uma distribuição ideal dos agregados na mistura, afim de obter o maior volume de agregados seco na mistura do concreto, medido em m^3 , também caracteriza o estudo a resistência à compressão do concreto com 28 dias de cura, apresentando o intervalo de 15MPa a 40MPa e relação de água/cimento de 0,39 a 0,79 (LOPES, 2019).

A trabalhabilidade do concreto é influenciada por diversos elementos, como os componentes dos materiais, as condições de execução e compactação, e as dimensões da estrutura em questão. Para obter resultados satisfatórios com o método utilizado, é recomendado que a consistência do concreto fresco seja de plástica a fluida, para isso o processo de dosagem foi desenvolvido especificamente para misturas com características plásticas, visando obter um teor reduzido de areia, a fim de alcançar uma dosagem mais econômica. Caso seja necessário ajustar a proporção dos ingredientes da mistura, devido a uma consistência insuficiente da argamassa, é recomendado adicionar uma maior quantidade de areia à mistura, mantendo constante a relação água/cimento (BOGGIO, 2000).

Para Malta (2012), o método consiste no conhecimento dos materiais usados na mistura do concreto, sendo realizados ensaios de caracterização de granulometria dos agregados e de massa específica, além de serem definidas as características que o concreto deve apresentar após o estado fresco e endurecido.

Figura 2 - Fluxograma simplificado do método de dosagem ABCP.



De acordo com Lopes (2019), autores como Boggio (2000), Assunção (2002) e Malta (2012) descrevem o método em uma sequência lógica de etapas, descritas a seguir.

2.2.1 Fixação da relação água/cimento

A etapa inicial do processo envolve a determinação de uma consistência adequada para o concreto fresco, a qual é determinada pelo tipo de elemento estrutural a ser construído e pelos métodos de lançamento utilizados. Nesse sentido, é estabelecida uma relação específica entre água e cimento, levando em consideração critérios de durabilidade (capacidade do concreto de resistir a processos de deterioração ao longo do tempo) e resistência mecânica necessária em diferentes idades do concreto. O valor dessa relação água/cimento pode ser estimado com base na curva de Abrams, que é construída considerando o tipo de cimento e os materiais a serem utilizados. Portanto, uma baixa relação água/cimento, combinada com o uso de cimentos especiais, possibilita a redução da porosidade e da permeabilidade da pasta de concreto, contribuindo para obter um desempenho superior em termos de durabilidade (LOPES, 2019).

2.2.2 Estimativa do consumo de água de amassamento em função da dimensão máxima do agregado e abatimento do concreto

É obtida a quantidade de água necessária para que a mistura apresente uma consistência adequada, medida pelo abatimento do tronco de cone, totalmente relacionada a granulometria do material utilizado, e da quantidade total de agregados na mistura. (LOPES, 2019).

2.2.3 Estimativa do consumo de cimento

Após realizar a estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto e estabelecer a relação água/cimento, é feita a estimativa do consumo de cimento. Essa estimativa é diretamente influenciada pelo consumo de água e pela relação água/cimento adotada (LOPES, 2019).

2.2.4 Estimativa do consumo de agregados

É selecionada a dimensão máxima característica do agregado graúdo que seja economicamente viável e compatível com os materiais disponíveis. Em caso de uso de múltiplos agregados graúdos, é recomendado adotar uma proporção que minimize o volume de vazios, obtendo-se a máxima massa unitária por meio de uma compactação adequada. O consumo de agregado miúdo é determinado utilizando o método do volume absoluto. Para obter as proporções de materiais por metro cúbico de concreto com uma relação em massa de materiais secos, é possível utilizar um traço unitário teórico (LOPES, 2019)

Através de testes experimentais, ajustes são feitos para obter um concreto que atenda aos requisitos de trabalhabilidade e desempenho exigidos. Ao finalizar o traço do concreto, é recomendado tomar cuidados e realizar correções, tais como adicionar areia em caso de falta de argamassa (mantendo a relação água/cimento constante), acrescentar agregado graúdo em caso de excesso de argamassa (mantendo a relação água/cimento constante) e ajustar o consumo de água levando em consideração a absorção de água pelos agregados com alta taxa de absorção (LOPES, 2019).

2.3 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

A definição do empacotamento de partículas envolve a seleção adequada da proporção e tamanho das partículas, de modo a preencher os vazios maiores com partículas menores, e então preencher esses vazios menores com partículas ainda menores, e assim por diante. Um empacotamento denso de partículas é fundamental na produção de concretos, pois melhora as propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido. No entanto, em casos de revestimentos isolantes térmicos, é desejado um empacotamento de baixa densidade, o qual resulta em um alto índice de vazios e, conseqüentemente, uma maior porosidade (OLIVEIRA et al., 2000).

A granulometria do agregado utilizado no concreto exerce um impacto significativo no seu desempenho durante o processo de dosagem. Para minimizar os vazios presentes no concreto é necessário que o volume de pasta de cimento seja maior do que o volume das lacunas entre as partículas do esqueleto granular. A utilização de uma mistura com apenas um tamanho de partículas (distribuição

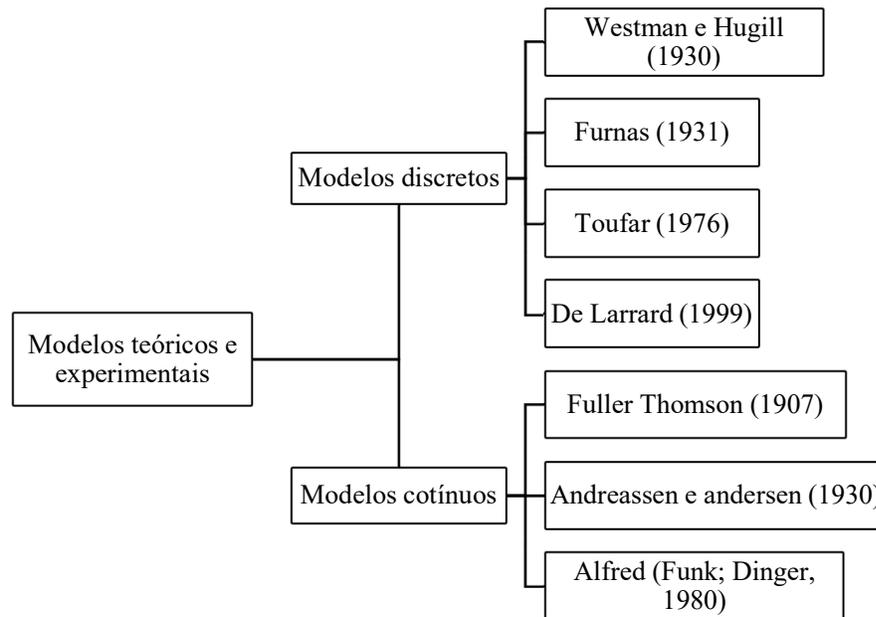
uniforme) geralmente resulta em um consumo maior de pasta. Portanto, a distribuição do tamanho das partículas influencia diretamente na densidade do empacotamento do agregado, o que, por sua vez, determina o volume de vazios a ser preenchido pela pasta, o que proporciona uma melhor trabalhabilidade (KWAN; NG; HUEN, 2014).

Torna-se viável, portanto, a redução da relação água/cimento, com o objetivo de aumentar a resistência e a durabilidade do concreto, ou então a diminuição do volume de pasta de cimento, resultando uma melhoria na estabilidade dimensional do concreto. Em resumo, a densidade do empacotamento de todas as partículas do sistema deve ser considerada como um parâmetro fundamental que influencia diretamente o desempenho do concreto (LI; KWAN, 2013).

2.3.1 Modelos de empacotamento de partículas

As abordagens teóricas relacionadas ao empacotamento de partículas sintetizam-se em dois tipos: uma discreta, que considera as partículas individualmente, representado nos modelos de Furnas (1931) e Westman e Hugill (1930), e outra contínua, que aborda as partículas como distribuições contínuas (ANDREASSEN e ANDERSEN, 1930). A Figura 3 apresenta as principais teorias de empacotamento.

Figura 3 - Principais teorias de empacotamento.



Fonte: Santos (2022).

De acordo com a teoria de empacotamento de partículas, o uso de frações de partículas de tamanhos diferentes, onde os espaços vazios deixados pelas partículas maiores são preenchidos pelos finos, gera uma mistura com significativa diluição de vazios, comparada a uma mistura com agregados de graduação aberta (DAMINELI et al, 2017).

De maneira mais simplificada, pode-se verificar o empacotamento das partículas através da medida de massa unitária da mistura dos agregados, por exemplo. Contudo, as teorias de empacotamento de partículas, muitas delas baseadas em cálculos matemáticos, conferem ao trabalho maior precisão e controle. Estas teorias propõem-se calcular o volume de vazios determinado para um dado conjunto de partículas com dimensões conhecidas (DAMINELLI et al., 2017).

O modelo de empacotamento proposto por Furnas (1931) leva em consideração a distribuição dos grãos em três classes de tamanhos, grossos (L), médios (m) e finos (S), em que a eficiência de empacotamento máxima ($PE_{m\acute{a}x}$) depende das eficiências de empacotamento das partículas de cada

classe, $PE_L(\text{grossa})$, $PE_m(\text{média})$ e $PE_s(\text{fina})$. A equação (1) apresenta a formulação do empacotamento máximo de Furnas (FURNAS, 1931).

$$PE_{m\acute{a}x} = PE_L + (1 - PE_L) \times PE_m + (1 - PE_L) \times (1 - PE_m) \times PE_s \quad (1)$$

A extrapolação da equação (1) para uma mistura com infinitas classes discretas de tamanhos, descreverá a eficiência de empacotamento de uma distribuição contínua, apresentada na equação (2) (SILVA et al, 2004).

$$CPFT = \frac{R^{\log D} - R^{\log D_s}}{R^{\log D_L} - R^{\log D_s}} \quad (2)$$

Onde:

D é o tamanho da partícula;

$CPFT$ (Cumulative Percent Finer Than) é a percentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a D ;

D_L é o tamanho da maior partícula na distribuição;

D_s é o tamanho da menor partícula na distribuição;

e R é a razão entre os volumes de partículas em classes de tamanhos adjacentes.

Fuller e Thompson (1907) apresentam uma lei de potência para descrever o empacotamento das partículas, descrita na equação (3).

$$CPFT = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q \times 100 \quad (3)$$

Na equação (3), a potência q é uma constante, módulo da distribuição granulométrica. O valor do q na equação de Fuller é igual a 0,5 (TALBOT et al, 1923).

Com a mesma formulação matemática da curva de Fuller, Andreassen e Andersen (1930) propuseram o uso do expoente q no intervalo de 0,33 a 0,50, determinado experimentalmente, com resultado dependente das características das partículas.

A equação de Andreassen não contempla um tamanho mínimo da partícula na mistura. Levando em consideração que em distribuições granulométricas reais apresentam-se um tamanho mínimo, Funk; Dinger (1980) introduziram, na equação de Fuller/Andreassen, um tamanho mínimo de partícula, que resultou no modelo conhecido como Alfred ou Andreassen Modificado, apresentado em (4).

$$CPFT = \frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \times 100 \quad (4)$$

A adoção da potência q para o empacotamento máximo de partículas não esféricas não é unanimidade nas pesquisas de dosagem de concreto, visto as hipóteses do modelo, que considera a distribuição de partículas esféricas. Contudo, utilizando simulação numérica, Funk e Dinger (1994) demonstraram que o expoente $q=0,37$ otimiza a distribuição granulométrica.

2.3.2 Otimização do empacotamento

De acordo com Pereira e Libório (2011) existem duas possibilidades para obtenção de uma curva granulométrica otimizada, com o objetivo de minimizar os vazios na mistura dos agregados, que resulta na porosidade do concreto:

Método das misturas sucessivas: uma determinada composição de agregados é misturada e através da massa unitária compactada da mistura e da massa específica de cada agregado calcula-se o teor de vazios, assim, escolhe-se a mistura que obtiver o menor teor de vazios. O processo consiste na mistura do agregado de maior dimensão com o agregado de diâmetro intermediário, obtendo-se a melhor mistura entre esses dois materiais, que resulta em um “novo agregado” que é combinado com o agregado imediatamente menor, onde o processo se repete até a obtenção da mistura final com o agregado de menor dimensão. Este método é indicado por diversos autores, que pesquisaram concretos convencionais e auto adensáveis (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Resolução numérica: o método dos mínimos quadrados pode ser utilizado para verificar a mistura com o menor desvio em relação a mistura ideal (modelos como Andreassen e Fuller). Essa distância é medida pela soma dos quadrados dos desvios em cada peneira.

Na Tabela 1 apresenta-se a solução matemática para o caso de uma mistura com m agregados e n peneiras ou diâmetros.

Tabela 1 - Mistura de m agregados.

Φ	$pe(\%)$	$pa_1(\%)$	$pa_2(\%)$	...	$pa_m(\%)$	$pc(\%)$	Δ
Φ_1	pe_1	$pa_{1,1}$	$pa_{2,1}$	...	$pa_{m,1}$	pc_1	$\Delta_1 = pc_1 - pe_1$
Φ_2	pe_2	$pa_{1,2}$	$pa_{2,2}$	...	$pa_{m,2}$	pc_2	$\Delta_2 = pc_2 - pe_2$
...	
Φ_n	pe_n	$pa_{1,n}$	$pa_{2,n}$	...	$pa_{m,n}$	pc_n	$\Delta_n = pc_n - pe_n$
RSS							$\sum \Delta_i^2$

Fonte: (Santos, 2021).

Onde:

pe_i – porcentagem retida acumulada especificada para a peneira “i”;

$pa_{j,i}$ – porcentagem retida acumulada na peneira “i” para o agregado a_j ;

pc_i – porcentagem retida acumulada na peneira “i” para uma combinação de agregados;

Δ_i – desvio da mistura em relação à especificação na peneira “i”;

β_j – percentual do agregado a_j na combinação;

RSS – desvio máximo, soma dos quadrados dos desvios individuais. Onde: i varia de 1 a n e j varia de 1 a m .

A equação (5) complementa a Tabela 1.

$$pc_1 = \sum_j^m \beta_j pa_{j,i} \quad (5)$$

A otimização consiste em variar os coeficientes β_j até encontrar o menor valor do desvio RSS.

3 MÉTODO DA PESQUISA

Primeiramente foi realizado um estudo comparativo entre os principais métodos utilizados no Brasil ABCP e IPT/EPUSP, e os conceitos de dosagem de concreto por empacotamento de partículas, feito por pesquisas em teses, dissertações e literatura disponível, a fim de se realizar uma análise e produzir uma metodologia de desenvolvimento de traços de concreto com as propriedades pré-estabelecidas.

Toda a pesquisa e ensaios foram desenvolvidos no Instituto Federal da Paraíba – Campus Cajazeiras, com a utilização de laboratórios de Estruturas, de Técnicas Construtivas e Geotecnia, onde foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados, tais como o de massa específica, granulometria e a preparação destes para a utilização na dosagem de concreto proposta.

Após escolha e caracterização dos materiais a serem usados na pesquisa, os dados foram inseridos no software Q-Mix, que tem como finalidade calcular traços de acordo com as metodologias de empacotamento de partículas. Desenvolvidos os traços com diferentes proporções no teor de argamassa e de pasta, foi feita a pesagem de cada componente do concreto como os agregados, aglomerantes e aditivo.

Foram classificados concretos em três grupos: concretos de referência baseados na dosagem IPT-EPUSP, sem empacotamento; concretos dosados com empacotamento dos agregados com variação do teor de pasta; concretos dosados com empacotamento dos agregados com variação do teor de argamassa. A divisão destes grupos foi realizada com o objetivo de verificar qual parâmetro é mais significativo na resistência mecânica dos concretos.

Para a realização de cada mistura, foi utilizado uma betoneira com capacidade de 150 litros, e adicionados os materiais previamente pesados e separados, seguindo uma sequência determinada para homogeneizar o traço e apresentar as características desejadas. Após a realização do traço, o concreto foi adicionado em corpos de prova cilíndricos, onde foi compactado e deixado em cura por 24 horas, após o tempo de cura foi feito o desmolde e imersão dos corpos de prova em um tanque que contém água e cal, para ser realizado o processo de cura úmida do concreto, em seguida, com os intervalos de 7

e 28 dias após a produção do concreto, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão axial.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a produção do concreto foi utilizado materiais como agregados miúdos e graúdos, aditivo e aglomerantes, para a brita foi utilizada a conhecida popularmente como cascalhinho, de dimensão máxima 9,5 mm, já a areia foi dividida em duas faixas, denominadas grossa e média, para análise de estudos e utilização no traço. Para o aglomerante foi escolhido o cimento CII-F 32, por ser o mais comum na região e de mais fácil acesso para o consumo; o aditivo químico utilizado foi o ADVA Flow 136, super plastificante, que é indicado para concretos em geral, fluidos ou auto adensáveis, proporcionando uma ótima manutenção de abatimento e uma redução no consumo de água da mistura.

Como agregado miúdo foram utilizadas areias em duas faixas, caracterizadas pela sua granulometria, utilizando uma peneira de obra comum para a retirada de pedregulhos e materiais indesejados, e a peneira de 1,2mm de abertura para a separação das duas faixas de areia, o material passante nessa peneira foi utilizado como areia média, e o que ficou retido, como areia grossa, para cada uma das duas faixas foi realizado o ensaio granulométrico de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2 DOSAGEM PELO Q-MIX

Para encontrar a adequada distribuição granulométrica e satisfazer a condição de empacotamento foi utilizado o modelo teórico de Andreassen Modificado (ou Alfred). A distribuição granulométrica virtual deveria apresentar um valor aproximado ao do sistema real, comprovado em simulações numéricas e misturas reais por Santos et. al. (2021).

Para garantir uma correta escolha da parcela e do diâmetro apropriado dos materiais particulados, de maneira que os vazios maiores sejam preenchidos pelos menores, utilizou-se o software Q-Mix, desenvolvido por Santos et. al. (2021). O referido programa contribui nos cálculos da proporção ótima, otimizando a mistura dos agregados, bem como compreende o modelo de empacotamento A&A Modificado.

Em seguida, será exibido o passo a passo para utilização do Q-Mix com o intuito de otimizar o empacotamento.

1º Passo: Anexação dos dados obtidos no ensaio de granulometria dos agregados.

É solicitado ao usuário que insira os valores obtidos através do ensaio de granulometria, e nomeie o respectivo agregado.

2º passo: Seleção dos parâmetros de entrada.

Para o cálculo das curvas granulométricas ideais por meio dos modelos de empacotamento, o software usa o método de Alfred. Para esse fim, cabe ao usuário selecionar o Diâmetro Mínimo (DS), o Diâmetro Máximo (DI) e o Módulo de Distribuição (q) a serem empregados.

3º passo: Rodar a mistura e adquirir as porcentagens otimizadas.

Após a escolha dos parâmetros de entrada e execução do algoritmo, aparecerá no canto inferior esquerdo da tela o modelo de Alfred. Deve-se agora, apenas clicar no comando “resolver” de acordo com a Figura (4).

Figura 4 - Cálculo de CPFT (modelo de Alfred).



Misturar

Agregados

- Areia Média EnsaioId: 2
- Areia Grossa EnsaioId: 3
- Brita 0 EnsaioId: 4
- Brita 1 EnsaioId: 5

Segure a tecla CTRL para selecionar vários agregados

Entradas

VALOR (mm)

q: 0,300

D1: 19,000

D5: 0,075

Areia Fina id.1

Areia Média id.2

Areia Grossa id.3

Resolver

$CPFT = [(D_1 - D_5^q) / (D_5^q - D_5^q)] \times 100$

Peneiras - Andressen		RESULTADO FINAL MISTURA				
mm (φ)	Andressen (CPFT)	mm (φ)	Passante	Mistura	Andressen	Dispersão (RSS)
50.000	100,00%					
38.100	100,00%					
25.000	100,00%					
19.000	100,00%					
12.500	98,43%					

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para a obtenção de resultados mais satisfatórios é importante que os agregados escolhidos sejam de boa qualidade, pois é através dos dados de entrada desses que a base de cálculo do software é construída.

3.3 PREPARO, MOLDAGEM E CURA DO CONCRETO

De posse de todos os materiais classificados, pesados e prontos, foram preparados os moldes para receber o concreto, procedimento feito de acordo com a NBR5738 (ABNT, 1993) intitulada Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Foi seguida uma sequência para uma melhor homogeneidade da mistura, onde seguia os passos de adição primeiramente de 100% brita, uma proporção de água e cimento. Após isso a adição das areias nas duas faixas granulométricas, atentando-se a adicionar a de maior granulometria primeiro, depois é inserido uma parcela do aditivo super plastificante, por fim o restante da água e do aditivo, intercalando sempre um intervalo de tempo entre a adição de um material e outro, para uma melhor eficiência de mistura da betoneira. Feito isso resulta na obtenção do concreto no estado fresco para a realização do ensaio de massa específica e moldagem dos corpos de prova.

A massa específica do concreto foi feita com a relação de massa e volume, com um recipiente de volume e massa conhecido foi adicionado o concreto, adensado com o vibrador e depois pesado, com esse valor obtido será subtraído o valor do recipiente vazio e após a divisão pelo volume do recipiente.

Para a redução de perdas, o concreto utilizado para o ensaio de massa específica volta para a betoneira para misturar novamente e homogeneizar o traço, para então ser adicionado nos corpos de prova cilíndricos, com medidas de (10×20) cm. O preenchimento dos corpos de prova foi feito manualmente e a sua compactação com o vibrador mecânico, com a finalidade de um melhor adensamento e a redução do índice de vazios nos moldes. Após a moldagem foi esperado um tempo de cura de 24 horas para o desmolde, em seguida os corpos de prova foram imersos em um tanque com água e cal.

3.4 ÍNDICE DE LIGANTES

A obtenção de um concreto de baixo impacto ambiental vai além da simples substituição do clínquer por adições minerais. Para produzir concretos mais eficientes em termos ambientais é necessário reduzir o consumo de ligantes ao mesmo tempo em que se aumenta ou mantém o desempenho mecânico. Com base nessa premissa, Daminieli *et al.* (2010) propuseram um indicador, denominado índice de Ligantes (IL), que avalia a eficiência dos concretos considerando a quantidade de ligante necessária para alcançar uma resistência mecânica de 1 MPa, medido em $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$. Assim, o Índice de Ligantes permite uma análise mais abrangente da eficiência dos concretos, levando em conta tanto o aspecto ambiental quanto o desempenho mecânico.

$$IL = \frac{C}{R} \quad (5)$$

Onde:

IL = índice de ligantes, em $\text{kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$;

C = consumo de cimento (kg/m^3);

R = resistência à compressão (MPa).

3.5 ENSAIOS

3.5.1 Compressão Axial

O ensaio de compressão foi realizado utilizando todas as recomendações da norma de ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos NBR 5739, nos intervalos de 7 e 28 dias de cura do concreto, para obtenção dos resultados e a realização do ensaio, foi utilizado a prensa hidráulica do laboratório de estruturas do IFPB – Campus Cajazeiras.

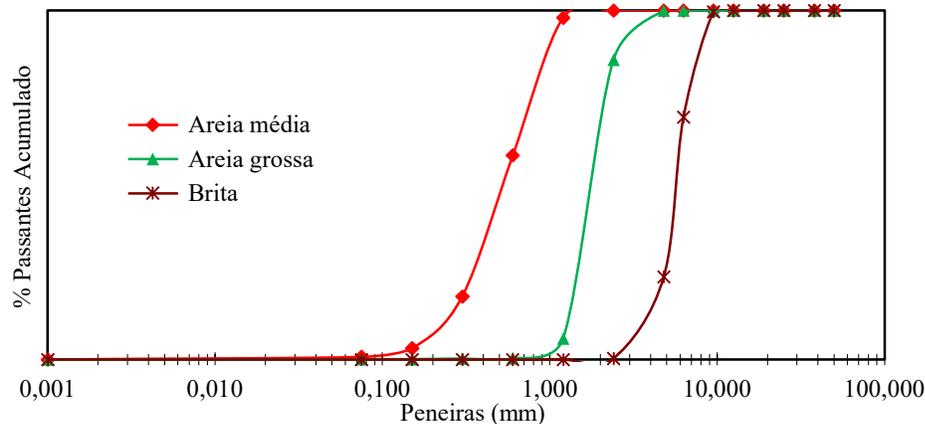
4 RESULTADOS DA PESQUISA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para conseguir um bom empacotamento de partículas, uma das principais características a se levar em consideração é a caracterização dos materiais utilizados na dosagem do concreto, levando em conta as propriedades granulométricas de cada material.

Os ensaios feitos de caracterização da areia são apresentados na Figura 5, nelas contidas a porcentagem acumulada passante de acordo com cada abertura de peneira determinadas pela NBR NM 248.

Figura 5 – Curvas granulométricas dos agregados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Pela curva granulométrica Figura 5, vê-se que os tamanhos das partículas são complementares, assim o vazio deixado pela brita serão ocupados pelas duas areias, também complementares.

Para cada material utilizado, também foi feito a sua caracterização quanto à sua massa específica Tabela 2, uma característica muito importante para a determinação do traço de concreto e para obtenção de propriedades do concreto.

Tabela 2 – Massas específicas dos agregados e cimento.

Massa específica (g/cm^3)			
Areia média	Areia Grossa	Brita	Cimento
2,63	2,646	2,63	2,94

Fonte: Autoria própria (2023).

4.2 OBTENÇÃO DO TRAÇO COM EMPACOTAMENTO

A Figuras 6 e 7 apresentam a tela do software Q-Mix, utilizado para o cálculo da porcentagem ótima dos agregados. Os parâmetros de entrada, $D_{máx}$, $D_{mín}$ e coeficiente de distribuição q , são editados pelo usuário, assim, escolheu-se o $d_{máx}$ da brita (9,5mm), o $d_{mín}$ das areias (0,075mm) e o coeficiente de distribuição q igual a 0,3, de acordo com os ensaios em agregados realizados por Santos et al. (2021).

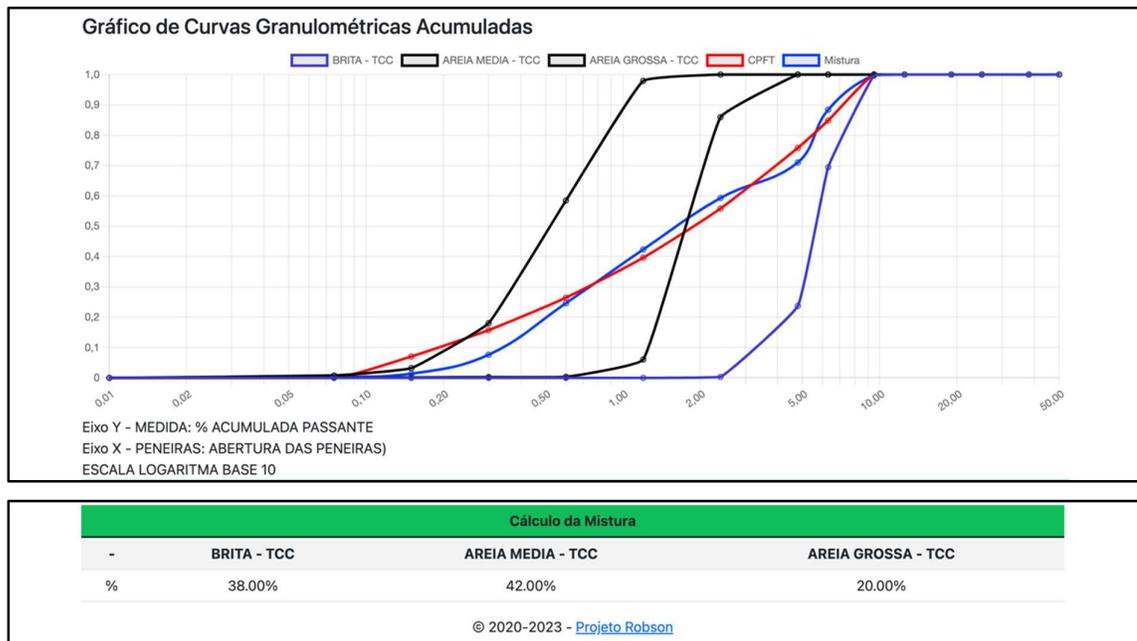
Figura 6 – Tela do software Q-Mix com os dados de entrada do cálculo da otimização dos agregados.



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 7 mostra as curvas dos agregados, do CPFT (curva do modelo matemático) e da mistura virtual realizada pelo software. Quanto mais próximas estiverem as curvas da mistura e do CPFT, melhor será o empacotamento, assim, o software simula inúmeros cenários até encontrar a proporção de agregados que satisfaça a menor dispersão entre as curvas.

Figura 7 – Tela do software Q-Mix com a resposta do cálculo da otimização dos agregados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Depois de clicar em “resolver” é exibido na tela o cálculo da mistura. Para os agregados estudados, a melhor mistura corresponde à 42% de areia, 20% de areia grossa e 38% de brita. Assim, tem-se o parâmetro de melhor proporção entre os agregados, sem a necessidade de realizar cálculo de massa unitária de misturas experimentais através de misturas sucessivas. Outros trabalhos, como o de Melo et. al. (2019), trabalharam algoritmos semelhante, contudo, o processo era o inverso, fizeram tentativas manuais de inserir as proporções dos agregados até encontrarem o menor desvio entre curvas, o algoritmo calculava apenas qual o coeficiente de distribuição granulométrica (q) correspondia àquela mistura.

A Tabela 3 apresenta todos os concretos estudados. Foram divididos em três categorias: Concretos de referência sem empacotamento, concretos com empacotamento e variação do teor de pasta, concretos com empacotamento e variação do teor de argamassa.

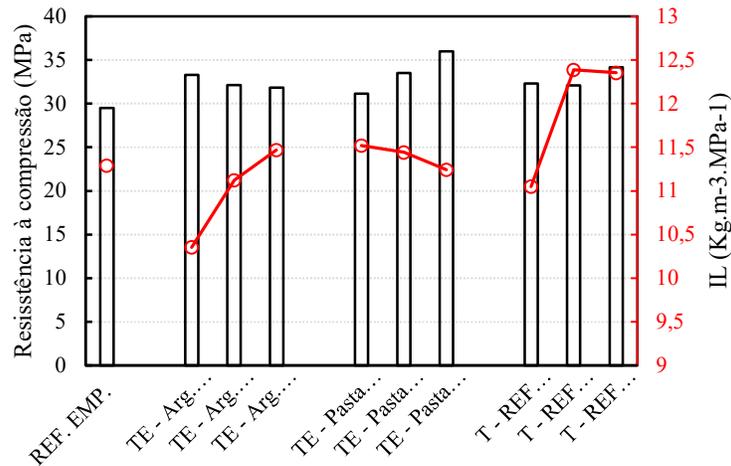
Tabela 3 – Relação do consumo de materiais nos concretos estudados.

Concretos	Consumos (kg/m ³)				
	Cimento	Areia média	Areia grossa	Brita	Água
REF. EMP.	332,80	674,36	324,04	613,05	159,74
<i>Variação do teor de argamassa</i>					
E. 10%A	344,60	693,30	303,58	574,33	165,41
E. 20% A	357,14	724,99	288,84	547,76	175,00
E. 30% A	364,87	740,69	272,28	516,29	182,44
<i>Variação do teor de pasta</i>					
E. 10% P	358,70	661,80	315,66	599,03	175,76
E. 20% P	383,10	646,48	311,27	587,58	176,23
E. 30% P	404,82	632,53	303,62	572,82	186,22
<i>Referência sem empacotamento</i>					
REF	357,00	714,00	-	1071,00	167,79
Ref Médio	397,60	675,92	-	914,48	194,82
Ref Rico	422,00	679,42	-	797,58	202,56

Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 8 apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos estudado, assim como os resultados do índice de eficiência de ligantes (IL). Não houve aumento de resistência mecânica considerável dentro do grupo de concretos de referência sem empacotamento, contudo, vê-se uma grande diferença na eficiência do cimento entre estes. O concreto com o parâmetro m igual a 5 apresentou o melhor desempenho em relação ao IL, a matriz de agregados apresentou um bom empacotamento, mesmo que não previsto ou escolhido na dosagem. Com relação aos outros grupos de concretos, com empacotamento, verifica-se que o grupo em que foi variado o teor de argamassa apresentou IL superior ao grupo com variação do teor de pasta.

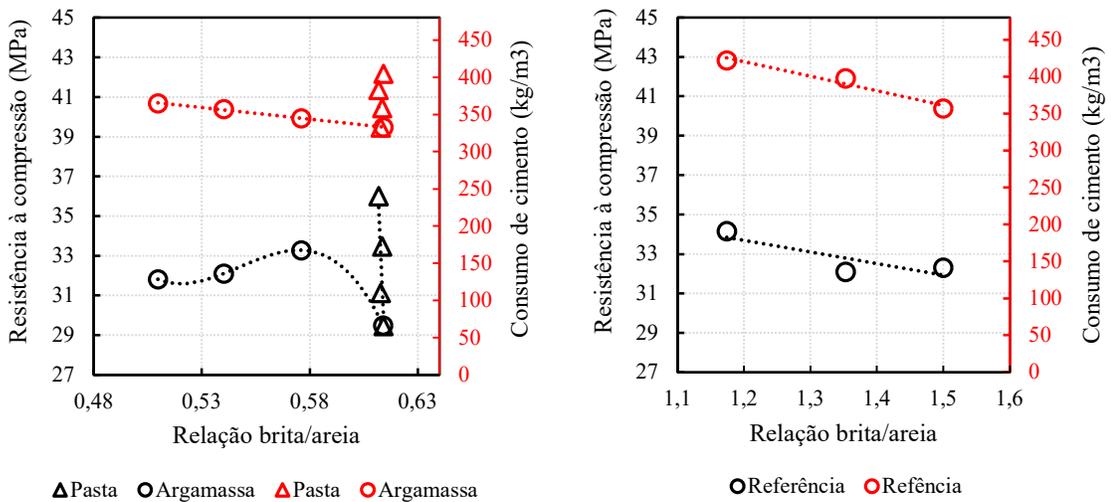
Figura 8 – Resultado do ensaio de compressão axial do concreto com relação ao índice de ligantes



Fonte: Autoria própria (2023).

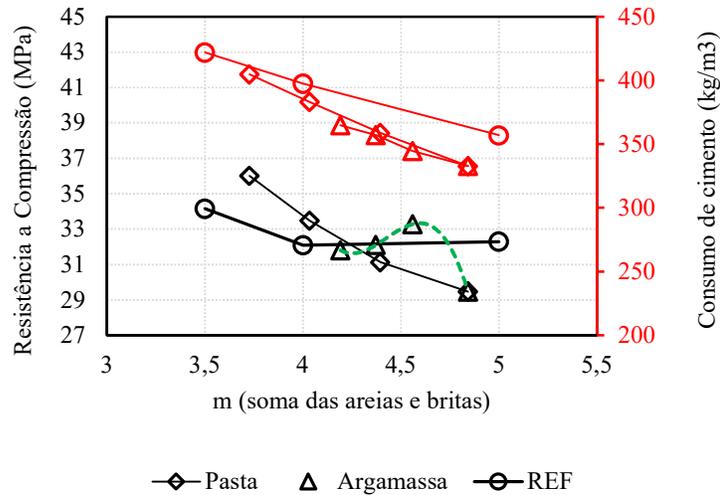
Para esclarecer porque o grupo dos concretos com variação do teor de argamassa apresentou melhor eficiência, foram realizadas algumas correlações entre a resistência mecânica, consumo de cimento, relação brita/areia e soma “m” dos agregados do traço unitário, apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Correlações entre a razão dos agregados, resistência mecânica e consumo de cimento



(a)

(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2023).

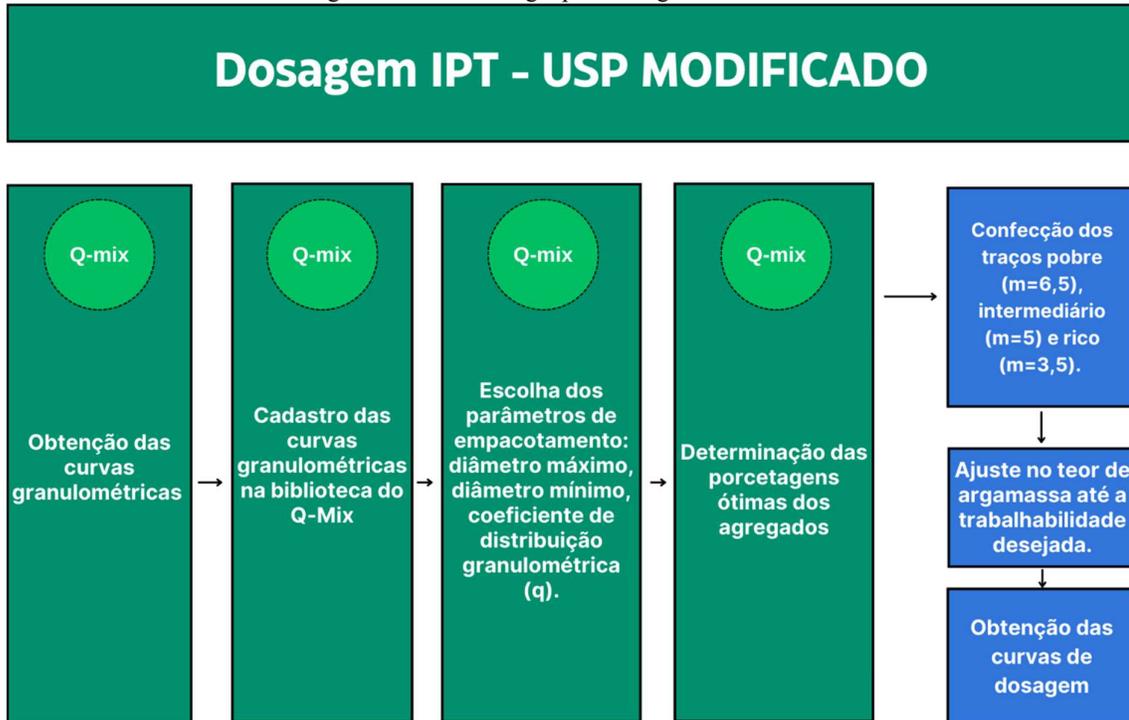
Um fator importante na dosagem de concretos é a razão entre agregado graúdo e miúdo (Melo et. al, 2021). Assim, na Figura 9 (a) e (b), vê que os concretos do grupo pasta apresentam praticamente o mesmo coeficiente brita/areia, pois, a adição foi realizada apenas em relação ao cimento, variável que atingiu maior amplitude. Os concretos do grupo argamassa, mais eficientes com relação ao ligante, mostram comportamento diferente de todos os grupos, é o único que não mostra comportamento linear nas respostas de resistência e consumo de cimento, indicando que na variação do teor de argamassa é possível encontrar um ponto máximo em que o empacotamento atinge o melhor desempenho.

O método IPT-EPUSP utiliza a soma dos agregados do traço unitário como parâmetro de dosagem, assim, ao plotar a correlação desse parâmetro com a resistência e consumo de cimento (Figura 9 (c)), tem-se resultado semelhante à do fator brita/areia. Assim, confirma a tendência de um ponto ótimo com a variação do teor de argamassa, para resultados além da trabalhabilidade.

Lopes et al. (2019) discorre sobre vantagens e desvantagens dos métodos de dosagem da ABCP e do IPT-EPUSP, dando enfoque à maior versatilidade e eficiência deste último. Contudo, o método IPT-EPUSP realiza a dosagem variando o parâmetro “m”, ao aplicar esse método o profissional se depara com a necessidade de decidir qual o percentual de areia e brita que irá trabalhar, recorrendo à porcentagens clássicas desenvolvidas em estudos de misturas sucessivas.

Buscando melhorar o desempenho dos concretos, para maximizar a eficiência do ligante, este trabalho propõe um estudo prévio do empacotamento dos agregados para determinar a quantidade de cada agregado na mistura, com a utilização do modelamento matemático do empacotamento dos grãos. Assim, adiciona-se ao método IPT-EPUSP a etapa de estudo do esqueleto granular pela ferramenta computacional Q-Mix. A Figura 10 apresenta a proposta de metodologia para dosagem de concretos.

Figura 10 – Metodologia para dosagem de concretos.



Fonte: Autoria própria (2023).

Essa proposta de metodologia abrange concretos de qualquer classe de resistência, agregados de qualquer origem, massa específica, sendo assim uma forma de elevar a qualidade das estruturas de obras de todos os portes e padrões.

5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto os resultados obtidos neste trabalho, destacam os seguintes pontos como conclusão do estudo sobre a dosagem de concretos:

- A adaptação do método IPT-EPUSP, com a inserção do estudo do empacotamento, pode melhorar a análise da aplicação do modelo de Andreassen Modificado em agregados, pois o modelo foi desenvolvido para esferas perfeitas. Com a variação do “m” é possível refinar os resultados do empacotamento de acordo com a trabalhabilidade e eficiência do ligante, como visto no ponto ótimo do concreto TE – Arg. 10%, que obteve resultado superior aos concretos com 20 e 30% de adição de argamassa.

- Utilizar a resistência mecânica, isoladamente, como parâmetro principal na comparação entre concretos dosados com diferentes métodos pode mascarar resultados, assim, o índice de ligante deve ser inserido nas análises para analisar a eficiência do aglomerante, principalmente quando se quer desenvolver um material com menor emissão de CO₂.

- A variação de argamassa na dosagem de concretos mostra-se mais eficiente que a variação do teor de pasta, visto que a variação da argamassa permitiu a variabilidade do fator de empacotamento e conseqüentemente o aumento da eficiência do ligante.

Sugere-se para trabalhos futuros a inserção de parâmetros de durabilidade nos diagramas de dosagem, como o coeficiente de migração de cloretos, ensaio rápido e com resultados consistentes para se comparar concretos de um mesmo grupo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR5738. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1993.
- ALVES, M. F. Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência. 2000. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- ALENCAR, R. S. A. Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré- fabricados. 2008. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- ANDREASEN, A.H.M. and ANDERSEN, J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). Colloid & Polymer Science, Vol. 50, 1930, pp. 217-228.
- BOGGIO, A. J. Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland. 2000. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817p.
- DAMINELI, B. L. Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. 2013. 237 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the ecoefficiency of cement use. Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 8, p. 555–562, set. 2010.
- FULLER, William B.; THOMPSON, Sanford E.. The Laws of Proportioning Concrete. Transactions Of The American Society Of Civil Engineers, [S.L.], v. 59, n. 2, p. 67-143, dez. 1907. American Society of Civil Engineers (ASCE). <http://dx.doi.org/10.1061/taceat.0001979>.
- FUNK, J.E. AND DINGER, D.R. Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions - Applied to Ceramic Manufacturing. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- FURNAS, C.C. Grading Aggregates; Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. Industrial and Engineering Chemistry. Vol. 23, 1931, pp. 1052-1058.
- KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. Construction And Building Materials, n. 61, p.270-277, abr. 2014.
- LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. Powder Technology, n. 253, p.514-521, dez. 2013.
- LOPES, H. M. T. Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland. 2019. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2019.

MALTA, J. O. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. 2012. 192 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

MELO, C.V.A., Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autoadensabilidade de concretos. Tese de D.Sc, UFAL, Maceió, Al, 2019.

MELO, C.V.A., GOMES, P.C.C., MORAES, K.A.M. Avaliação de composições de concreto autoadensável a partir da distribuição granulométrica e de parâmetros de graduação de agregados. Cerâmica, v. 65, n. 375, pp. 432-442, Aug. 04, 2021.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.

PEREIRA, T. A. C.; LIBORIO, J. B. L. Concreto auto-adensável de alta resistência com baixo consumo de aglomerantes e adição de fibras de poliamida ou lã-de-rocha. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 13, n. 60, p.1-16, 2011.

REBMANN, M. S. Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados. 2016. 252 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RICCI, B. O. L.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L. Estudo de Dosagens Visando Obter Concretos para Obras de Pequeno Porte. Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 13, p.182- 194, 2017.

SANTO, Laisa do Espírito. Dosagem ABCP no Concreto Convencional. 2017. 213 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unibrasil, Curitiba, 2017.

SANTOS, R. A. DOS . et al.. Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. Matéria (Rio J.), 2021.

SILVA, A. P. et al. Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. Cerâmica [online]. vol.50, n.316, pp.345-354, 2004.

TALBOT, A.N. AND RICHART, F.E. The strength of concrete in relation to the cement, aggregates and water. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin No. 137, 1923.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>. Acesso em 13 jun. 2023.

TUTIKIAN, BERNARDO FONSECA e MOLIN, DENISE CARPENA DAL. Concreto auto-adensável. São Paulo: Pini, 2008.

WESTMAN, A.E.R; HUGILL, H.R. The packing of particles. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 13, pp. 767-779. 1930.

CHRYSSTIAN TAVARES NATO

**DOSAGEM DE CONCRETOS PELA TEORIA DO EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS E MÉTODO IPT-EPUSP**

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, 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.

Aprovado em 09 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Dr. Robson Arruda dos Santos – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Documento assinado digitalmente
 FERNANDO CHAGAS DE FIGUEIREDO SOUS
Data: 12/08/2023 21:24:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Fernando Chagas de Figueirêdo Sousa – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 SEBASTIAO SIMAO DA SILVA
Data: 12/08/2023 12:19:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Sebastião Simão da Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Examinador 2

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto: Entrega de TCC - Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por: Chrystian Tavares
Tipo do Documento: Dissertação
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Chrystian Tavares Nato, ALUNO (201612200273) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 13/08/2023 10:42:26.

Este documento foi armazenado no SUAP em 13/08/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 906793
Código de Autenticação: 319fb52e71

