



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

Gabriel Antônio Pereira Avelino

INFLUÊNCIA DO MÉTODO DO EMPACOTAMENTO NAS PROPRIEDADES E NA OTIMIZAÇÃO DA QUANTIDADE DE AGLOMERANTES DOS CONCRETOS AUTO ADENSÁVEIS

Palmas – TO

2019

Gabriel Antônio Pereira Avelino

INFLUÊNCIA DO MÉTODO DO EMPACOTAMENTO NAS PROPRIEDADES E
NA OTIMIZAÇÃO DA QUANTIDADE DE AGLOMERANTES DOS CONCRETOS
AUTO ADENSÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II
elaborado e apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil pelo Centro Universitário
Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. Dr. Fabio Henrique de Melo
Ribeiro.

Palmas – TO

2019

Gabriel Antônio Pereira Avelino

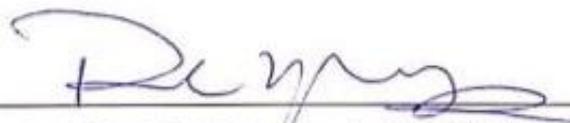
INFLUÊNCIA DO MÉTODO DO EMPACOTAMENTO NAS PROPRIEDADES E
NA OTIMIZAÇÃO DA QUANTIDADE DE AGLOMERANTES DOS CONCRETOS
AUTO ADENSÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II
elaborado e apresentado como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil pelo Centro Universitário
Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador: Prof. Dr. Fabio Henrique de Melo
Ribeiro.

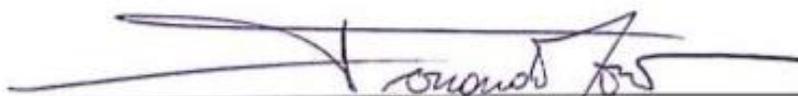
Aprovado em: 11 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

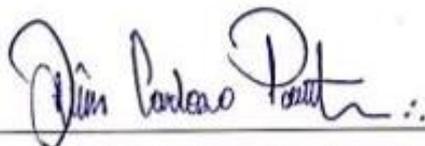


Prof. Dr. Fabio Henrique de Melo Ribeiro
Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. M.Sc. Fernando Moreno Suarte Júnior
Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. M.Sc. Denis Cardoso Parente
Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais Antônio (in memória) e Luzimary e a minha avó Joalice (in memória).

AGRADECIMENTOS

Aos meus agradecimentos, começo por agradecer a Deus por me propiciar a paz e a força necessária para concluir mais essa etapa da minha vida.

Agradeço a toda minha família que direta ou indiretamente me incentivou e me deu o apoio necessário para concretizar essa jornada, em especial aos meus pais Luzimary Avelino, por toda a garra e comprometimento e Antônio Avelino (in memoriam), que mesmo não estando aqui para me ver vencer essa árdua tarefa, me deu todo o apoio enquanto pôde, e trilhou o caminho para que fosse possível esse sonho se tornar realidade, e a minha avó Joalice Pereira (in memoriam) que após a partida do meu pai, se tornou toda a base que precisava naquele momento e me deu força para iniciar este caminhar.

Agradeço a minha namorada Lídia Guedes por me apoiar e me propiciar palavras e gestos de companheirismo, além de todo o carinho durante essa jornada.

Aos meus amigos agradeço pelo apoio e por acreditarem em minhas decisões e capacidade.

Agradeço ao José Carlos Leal, por me ajudar na escolha do tema e me fundamentar com as bibliografias necessárias para o estudo deste trabalho.

Ao meu Orientador professor Fabio Henrique de melo Ribeiro, agradeço por todo conhecimento compartilhado durante esta jornada, não somente para a realização deste trabalho, como também em toda a jornada acadêmica.

A empresa Concregell pelo fornecimento de parte dos materiais para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.” (Albert Einstein).

RESUMO

AVELINO, G. A. P. **Influência do método do empacotamento nas propriedades e na otimização da quantidade de aglomerantes dos concretos auto adensáveis**. 92 f. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil). Centro Universitário Luterano de Palmas.

Com a intenção de buscar um concreto com a otimização do consumo de cimento e com a extinção de adições minerais garantindo as características de um concreto auto adensável, este trabalho tem por objetivo realizar a utilização do método de empacotamento proposto por Alfred em comparação ao utilizado na dosagem de Tutikian (2007), que tem em sua composição adição mineral de sílica ativa, bem como analisar o arranjo granulométrico dos agregados utilizados, estudar as características do CAA no estado fresco e no estado endurecido e por fim analisar a relação custo/benefício dos traços de CAA. Para a dosagem dos traços de concreto auto adensáveis, foi adotado o método de dosagem proposto por Tutikian e Dal Molin (2007), utilizando agregados presentes na região. Os resultados mostram ser possível o emprego do método de empacotamento proposto por Alfred, para se obter um concreto auto adensável que extingue a necessidade de adições minerais e otimize o consumo de cimento.

Palavras chave: Concreto Auto Adensável. Composição granular. Dosagem. Empacotamento.

ABSTRACT

AVELINO, G. A. P. **Influence of the packing method on the properties and optimization of the amount of self-compacting concrete binders.** 92 f. 2019. Course conclusion work (Civil Engineering). Lutheran University Center of Palmas.

With the intention of seeking a concrete with the optimization of cement consumption and the extinction of mineral additions guaranteeing the characteristics of a self-compacting concrete, this work aims to use the packing method proposed by Alfred compared to the one used in Tutikian (2007), which has in its composition active silica mineral addition, as well as to analyze the granulometric arrangement of the aggregates used, to study the characteristics of the fresh and hardened CAA and, finally, to analyze the cost / benefit ratio of the CAA traces. For the measurement of self-compacting concrete traces, the dosage method proposed by Tutikian and Dal Molin (2007) was adopted, using aggregates present in the region. The results show that it is possible to use Alfred 's packing method to obtain a self - compacting concrete that eliminates the need for mineral additions and optimizes cement consumption.

Keywords: Self-compacting concrete. Granular composition. Dosage. Packaging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Ponte Akashi-Kaikyo.....	21
Figura 2 - Slump flow test - Mistura sem segregação.	29
Figura 3- Ensaio com o slump flow test e slump flow T 50cm test.	30
Figura 4- Ensaio do anel J.....	31
Figura 5- Funil V.	32
Figura 6 – Coluna de segregação.....	32
Figura 7- Caixa L.....	33
Figura 8 – Modelo de Andreasen: distribuição granulométrica.	37
Figura 9 - Representação do modelo de Furnas.	38
Figura 10- Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas.....	39
Figura 11- Fluxograma método de Tukikian e Dal Molin.....	42
Figura 12 – Determinação da massa unitária do agregado graúdo.....	46
Figura 13 – Determinação da massa específica do agregado miúdo.....	47
Figura 14 – Ensaio de granulometria.....	47
Figura 15 – Ensaio do teor de materiais pulverulentos.	48
Figura 16 – Material separado de acordo com a peneira que ficou retido.....	50
Figura 17 – Ensaio de compactidade.....	51
Figura 18 – Adição de areia empacotada para obter um teor de 57% de argamassa.....	54
Figura 19 – Ensaio de massa específica do concreto no estado plástico.....	58
Figura 20 – Ensaio de Slump flow e Slump flow T50 test.....	58
Figura 21 – Ensaio de J-ring test.	59
Figura 22 – Ensaio de resistência a compressão axial.....	60
Figura 23 – Ensaio de modulo de elasticidade.	61
Figura 24 – Ensaio de tração por compressão diametral.	62
Figura 25 – Slump Flow test traço intermediário de Alfred.....	73
Figura 26 – Slump Flow test traço pobre de Alfred para 0,7% de aditivo.....	73
Figura 27 – Slump Flow test traço pobre de Alfred para 0,8% de aditivo.....	74
Figura 28 – Slump Flow test traço intermediário de Tutikian.....	75
Figura 29 – Diagrama de dosagem do traço de CAA empacotado pelo método de Alfred.	82
Figura 30 – Diagrama de dosagem do traço de CAA empacotado pelo método de Tutikian.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland	22
Tabela 2 – Emprego do método teórico de Alfred com o coeficiente igual à 0,23 para os agregados disponíveis na produção do CAA.....	49
Tabela 3 – Determinação da massa unitária compactada da brita e areia.	51
Tabela 4 – Determinação da massa específica da mistura.....	52
Tabela 5 – Quantitativo de corpos de prova para cada traço.....	53
Tabela 6 – Traço unitário método de empacotamento de Alfred.	55
Tabela 7 – Composição dos traços unitários método de empacotamento de Alfred.	55
Tabela 8 – Composição do empacotamento de Alfred por material real retido nas peneiras.	56
Tabela 9 – Traço unitário método de empacotamento da dosagem de Tutikian.	56
Tabela 10 – Composição dos traços unitários método de empacotamento proposto na dosagem de Tutikian.....	57
Tabela 11 – Ensaio de massa unitária e massa específica dos agregados.....	63
Tabela 12 – Ensaio de material pulverulento dos agregados.	64
Tabela 13 – Análise da granulometria da areia fina.	65
Tabela 14 – Análise da granulometria da areia média.....	67
Tabela 15 – Análise da granulometria da brita.....	68
Tabela 16 – Análise da curva granulométrica dos agregados empacotados.....	70
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de massa específica do concreto no estado fluido. 72	
Tabela 18 – Resultados dos ensaios no estado fluido no traço empacotado pelo método de Alfred.....	72
Tabela 19 – Resultados dos ensaios no estado fluido no traço empacotado pelo método de Tutikian.....	74
Tabela 20 – Preços unitários dos materiais utilizados para a produção dos traços estudados.	84
Tabela 21 – Custo unitário de produção dos concretos analisados na idade de 28 dias. 85	

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia fina.	66
Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia média.	67
Gráfico 3 – Curva granulométrica da brita.	69
Gráfico 4 – Curva granulométrica do modelo matemático de Alfred.	71
Gráfico 5 – Comparação dos resultados dos ensaios de slump flow test.	75
Gráfico 6 – Comparação dos resultados dos ensaios de T500.	76
Gráfico 7 – Comparação dos resultados dos ensaios de G-ring test.	76
Gráfico 8 – Resultados dos ensaios a compressão axial dos traços.	77
Gráfico 9 – Resultados das resistências a tração por compressão diametral.	78
Gráfico 10 – Resultados dos módulos de elasticidade teórico.	79
Gráfico 11 – Resultados dos módulos de elasticidade ensaio.	79
Gráfico 12 – Resultados dos ensaios de absorção de água.	80
Gráfico 13 – Resultados dos ensaios de índice de vazios.	80
Gráfico 14 – Comparativo do custo total para a produção dos traços.	86
Gráfico 15 – Comparativo do custo total para a produção dos traços com resistências de 30 e 40 MPa.	86

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	36
Equação 2.....	38
Equação 3.....	38
Equação 4.....	39
Equação 5.....	40
Equação 6.....	40
Equação 7.....	40
Equação 8.....	40
Equação 9.....	40
Equação 10.....	40
Equação 11.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnica

Ar: teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm^3/m^3 ;

\$a: custo do kg do agregado miúdo;

\$ag: custo do litro da água potável;

\$c: custo do kg do cimento;

\$p: custo do kg do agregado graúdo;

A: consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

a: relação agregado miúdo seco / cimento em massa, em kg/kg

a/c: Relação água cimento

C: consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

CAA: Concreto Auto Adensável

CCV: Concreto Convencional

CEULP: Centro Universitário Luterano de Palmas

CP's: Corpos de Prova

CPFT: Porcentagem acumulada passante de finos;

Cu: custo do concreto por metro cúbico;

DI: Diâmetro da maior partícula do empacotamento;

Dp: Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

F_{cj}: resistência à compressão axial, à idade j, em MPa;

F_{ck}: Resistência à compressão

L: Litros

M³: Metro Cúbico

mm: Milímetro

Mpa: Mega pascal

NBR: Norma Brasileira

p: relação agregado graúdo seco / cimento em massa, em kg/kg

q: Coeficiente de empacotamento.

SP: Superplastificantes

ULBRA: Universidade Luterana do Brasil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 JUSTIFICATIVA	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL	21
2.1.1 Histórico	21
2.1.2 Definição	21
2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES	22
2.2.1 Cimento Portland	22
2.2.2 Agregados	23
2.2.2.1 Agregado miúdo	23
2.2.2.2 Agregado graúdo	23
2.2.3 Água	24
2.2.4 Aditivos	24
2.2.4.1 Superplastificantes e Hiperplastificantes	24
2.2.4.2 Modificadores de viscosidade	25
2.2.5 Adições minerais	25
2.2.5.1 Quimicamente ativas	26
2.2.5.1.1 Sílica ativa	26
2.2.5.2 Efeito filer	26
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO	27
2.3.1 Concreto auto adensável no estado fresco	27
2.3.1.1 Trabalhabilidade	27
2.3.1.2 Coesão	27
2.3.1.3 Consistência	28
2.3.1.4 Segregação	28
2.3.1.4 Exsudação	28
2.3.1.5 Ensaios no estado fresco	29
3.3.1.5.1 Slump flow	29
3.3.1.5.2 Slump flow T50 test.	30

3.3.1.5.3 <i>J-ring test</i>	30
3.3.1.5.4 <i>Funil V</i>	31
3.3.1.5.5 <i>Método da coluna de segregação</i>	32
3.3.1.5.6 <i>L- Box Test</i>	33
2.3.2 Concreto auto adensável no estado endurecido	33
2.3.2.1 Resistência à compressão	33
2.3.2.2 Modulo de elasticidade	34
2.3.2.3 Durabilidade	34
2.3.2.4 Permeabilidade	35
2.3.2.5 Absorção de água	35
2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS	36
2.4.1 Modelo de Alfred	36
2.5 MÉTODO DE DOSAGEM	39
2.5.1 Método de dosagem IPT/EPUSP	39
2.5.2 Método de Tutikian e Dal Molin	41
3 METODOLOGIA	45
3.1 ESCOLHA DOS MATERIAIS	45
3.1.1 Cimento	45
3.1.2 Agregado graúdo	45
3.1.3 Agregado miúdo	45
3.1.4 Adição mineral	45
3.1.5 Água	46
3.1.6 Aditivo	46
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	46
3.2.1 Determinação da massa unitária	46
3.2.2 Determinação da massa específica	46
3.2.3 Análise granulométrica	47
3.2.4 Determinação do teor de materiais pulverulentos	47
3.3 MODELOS DE EMPACOTAMENTO EMPREGADOS	48
3.3.1 Modelo de Alfred	48
3.3.1.1 Peneiramento	49
3.3.2 Modelo de empacotamento proposto na dosagem de Tutikian	50
3.4 MÉTODO DE DOSAGEM EMPREGADO	52
3.6 ENSAIOS UTILIZADOS	57

3.6.1	Ensaio no estado fluido	57
3.6.1.1	Teor de ar incorporado e massa específica	57
3.6.1.2	<i>Slump flow e Slump flow T50 test.</i>	58
3.6.1.3	<i>J-ring test</i>	59
3.6.2	Ensaio no estado endurecido	59
3.6.2.1	Resistência a compressão axial	59
3.6.2.2	Absorção de água	60
3.6.2.3	Modulo de elasticidade	60
3.6.2.4	Tração por compressão diametral	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	63
4.1.1	Massa unitária e massa específica	63
4.1.2	Material pulverulento	64
4.1.3	Análise do ensaio de granulometria	65
4.1.4	Análise da curva granulométrica do empacotamento no modelo de Alfred..	70
4.2	ENSAIOS NO ESTADO FLUIDO DO CONCRETO	72
4.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO	77
4.3.1	Ensaio de compressão	77
4.3.2	Ensaio de resistência a tração por compressão diametral	78
4.3.3	Ensaio do módulo de elasticidade	79
4.3.4	Ensaio de absorção de água e índice de vazios	80
4.4	DIAGRAMAS DE DOSAGENS	81
4.5	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONOMICA DO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO PROPOSTO	84
5	CONCLUSÃO	88
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
6	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil existem algumas obras que exigem um grau de distinção, como pontes, obras com a imposição de um acabamento para concreto aparente, paredes de concreto, dentre outras. A elevada taxa de armadura presente em algumas dessas obras, torna o uso do concreto convencional (CVV) de difícil aplicação, visto a dificuldade em efetuar a vibração e o acabamento que o mesmo necessita. Para tanto, em 1986 no Japão, foi concebido o primeiro concreto auto adensável (CAA), material com característica fluídica, coesa e homogênea, que dispensa seja qual for o tipo de vibração e compactação, o que possibilita a sua aplicação em obras que apresentem características citadas acima.

No Brasil o CAA tem cada vez mais afeição para obras especiais e na indústria de pré-moldado, sua aplicação exclui a necessidade de vibração e garante um melhor acabamento frente ao CCV, o que otimiza a duração de execução e torna-o viável para obras com características industriais. Os estudos realizados nessa área estão voltados para as características mecânicas do concreto e para a utilização de materiais locais como adição em sua composição, por sua vez, a dosagem é tratada de forma secundária, isto faz com que características importantes do CAA, como coesão, trabalhabilidade, e outras, sejam prejudicadas (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Para o alcance do CAA, são utilizados materiais que se diferem do CVV, pois o mesmo necessita de grande parcela de finos (fíler ou adições minerais) e aditivos que modifiquem a viscosidade e deem plasticidade. Para tanto, busca-se uma harmonia entre o custo benefício e a competitividade de mercado (MENDES, 2018).

Segundo Tutikian (2007), a definição dos materiais finos para assegurar a coesão do CAA deve ser minuciosamente estabelecida, os mesmos podem ser pozolânicos como cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz dentre outros, ou materiais não pozolânicos, como a areia fina, fíler calcário e outros, exercendo funções de substituição do cimento no caso dos pozolânicos e do agregado miúdo no caso dos não pozolânicos, sempre feita a substituição em massa.

Os agregados têm grande influência no concreto, deste o ato da mistura, o consumo de água ideal proporcionará a trabalhabilidade e a sua compacidade, que são

definidas através da forma dos grãos, da sua textura e por sua granulometria (LEAL, 2009).

O concreto é um composto granular, que por sua vez sofre a influência em suas características físicas quando leva-se em consideração a densidade de empacotamento. A mistura com alta densidade de empacotamento é considerada ideal, pois em teoria, a máxima densidade de empacotamento, permitiria a exclusão dos vazios. Entretanto esta condição é quase improvável, devido à irregularidade na morfologia (o formato das partículas não é perfeitamente esférico), dificultando o máximo empacotamento teórico através da distribuição granulométrica. No entanto, pode-se obter uma boa densidade de empacotamento para melhorar as propriedades do concreto (BARBOSA, 2008).

Ao se tratar de estudos da curva de distribuição granulométrica, o que mais demonstra relevância é o modelo de Alfred. O mesmo aborda a ideia de que os agregados que apresentam distribuição granulométrica contínua, melhoram as propriedades dos concretos e argamassas. A partir de estudos empíricos, os pesquisadores concluíram que para um mesmo percentual de cimento presente em um determinado volume de concreto existia uma certa disposição no tamanho dos grãos do agregado, disposição essa que proporcionava uma melhor trabalhabilidade e uma maior resistência à ruptura (SOTOMAIOR, 2017).

Para este trabalho, o desenvolvimento buscou a dosagem de um CAA que não necessitasse de adições minerais e que reduzisse potencialmente o consumo de cimento Portland, por meio do método de empacotamento que trabalha com a composição granulométrica de agregados que foram encontrados na região de Palmas-TO no ano de 2019. Com isso é possível ter um CAA competitivo e de fácil fabricação, tendo uma grande relevância de custo benefício em relação ao CCV.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Apesar de ser uma excelente alternativa e contribuir para o avanço da construção civil, o CAA enfrenta a desconfiança, pelo desconhecimento do mesmo, a alta exigência de controle tecnológico e principalmente o preço de seus insumos. Além de exigir um alto consumo de cimento para manter suas propriedades em relação ao CCV, também tem a carência de um percentual elevado de finos para manter a sua coesão e trabalhabilidade. Este trabalho pretende obter um CAA com redução no seu preço e de fácil produção

utilizando o método do empacotamento, é possível desenvolver um CAA que mantenha suas propriedades, com baixo consumo de cimento e sem o uso de adições minerais, utilizando agregados encontrados na região de Palmas-TO?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência da utilização dos métodos de empacotamento proposto por Alfred e o utilizado na dosagem de Tutikian nas propriedades do CAA, bem como a otimização da utilização dos materiais aglomerantes, sendo o segundo método citado com adição de sílica ativa no traço e o outro sem a utilização da mesma.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o arranjo granulométrico de duas areias naturais e uma brita granítica comumente utilizadas em obras no município de Palmas-TO para a composição de um CAA.
- Avaliar as características do CAA submetidos aos métodos de empacotamento no estado plástico, como: coesão, fluidez, habilidade passante, teor de ar aprisionado e estabilidade dimensional.
- Avaliar as características do CAA submetido aos métodos de empacotamento no estado endurecido: resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e tração por compressão diametral.
- Comparar por meio de dosagem a relação custo/benefício de um traço de CAA que utilizará o método de empacotamento proposto por Alfred com um traço de CAA que utilizará o método de empacotamento utilizado na dosagem de Tutikian.

1.3 JUSTIFICATIVA

A ideia da utilização do empacotamento em grandes densidades, é algo que está sendo reexposto como um preceito chave para o alcance de materiais cimentícios de alto desempenho. Portanto, é de extrema importância que tenha um estudo aprofundado da distribuição granulométrica para a dosagem correta e a otimização dos constituintes do concreto (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

O método do empacotamento visa resolver problemas existentes com a dosagem do CAA, visto que, a partir de ensaios simples que determinem a composição granulométrica dos agregados, possa se obter um baixo índice de vazios no concreto, diminuindo assim o consumo de cimento na mistura (TUTIKIAN, 2007).

Ao se avaliar as propriedades do concreto como coesão, fluidez segregação e resistência, e ao se levar em consideração o fator de empacotamento, observa-se que estão diretamente ligadas, e pode ser obtida através de modelos matemáticos empíricos (SOTOMAIOR, 2017).

Na questão ambiental é relevante o fato de o cimento ter em sua composição materiais como o calcário com 75-80% (LIMA, 2011). Principal matéria prima do cimento Portland, o calcário pode ser encontrado em jazidas na natureza, e por esse motivo trata-se de um material não renovável que em algum momento se tornará escasso, isso mostra a importância de buscar redução em sua extração. O processo de fabricação do cimento também exige muita energia, que libera em excesso dióxido de carbono (CO₂), poluente que está diretamente ligado ao efeito estufa. Segundo a agência de fundação de amparo à pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), a produção global de cimento produz cerca de 5% das emissões de CO₂ no mundo. Portanto a redução deste aglomerante no concreto, que é o material mais utilizado na construção civil, teria um impacto ambiental extremamente positivo.

Do ponto de vista econômico, a opção por não utilizar adições minerais como a sílica ativa para dar coesão a mistura do CAA, que segundo artigo publicado pela UNESP (2007), possui um consumo ótimo baseado em 10% do consumo de cimento, trabalhar com o método do empacotamento com areais facilmente encontradas na região, assim como baixar o consumo de cimento devido ao preenchimento dos vazios, reduz significativamente o custo final do metro cúbico do concreto. Apesar de ser uma boa opção para reduzir o impacto ambiental, muitas das adições minerais que podem ser incorporadas à mistura do concreto, como materiais pozolânicos, sílica ativa, fíler calcário, dentre outros, não são facilmente acessadas, ou possuem elevado custo de mercado. Por isso, o não uso de adições minerais no CAA, deixa-o com um melhor custo-benefício.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL

2.1.1 Histórico

O CAA foi uma solução encontrada no Japão, com estudos iniciados em 1986 por Hajime Okamura, com o propósito de resolver problemas de durabilidade das estruturas em concreto armado devido à baixa qualidade de mão de obra japonesa, que afetava a execução nos processos de lançamento do concreto no estado fresco, como a ineficiência na compactação do mesmo, Okamura buscou por adaptar concretos submersos a estruturas convencionais (COUTINHO, 2017).

A primeira obra a utilizar o CAA foi a ponte Akashi-Kaikyo, representada na figura 1, localizada no estreito de Akashi entre as cidades de Kobe e Awaji, no Japão, com uma extensão total de 3.911m de vão central e suas ancoragens possuindo 290.000m³ de CAA, essa utilização propiciou uma redução no prazo da obra de 30 para 24 meses (GOMES e BARROS, 2009).

Figura 1- Ponte Akashi-Kaikyo.



Fonte: Brown, D. J. Bridges, Mitchell Beazley. London, 1996 (Pag. 161).

No Brasil, o CAA era utilizado até meados dos anos 70 apenas em concretagens submersas, como foi o caso da ponte Rio Niterói, se difundindo no início deste século para obras que apresentavam altas taxas de armadura e em fundações com difícil acesso para a execução de vibrações. A aplicação em edifícios iniciou a partir de 2004 em cidades como Goiânia, Porto Alegre, Belo Horizonte e Florianópolis (ARAÚJO, 2007).

2.1.2 Definição

Apenas será considerado Auto Adensável, um concreto que garanta propriedades básicas, são elas: coesão para que a mistura se mantenha estável e garanta a passagem

entre as barras de aço, resistência a segregação que é a capacidade da mistura em se manter coesa sem que haja segregação e fluidez, capacidade que o CAA tem de escoar e preencher todos os vazios dentro da forma (LEAL, 2009).

A ABNT NBR 15823-1:2017 contempla o concreto auto adensável como um material fluídico que possui a capacidade de preencher os espaços sem nenhuma intervenção mecânica e com coesão satisfatória para o preenchimento desses espaços sem que haja segregação dos seus elementos constituintes.

O vocábulo CCA, significa um tipo de material cimentício de moldagem prática em fôrmas sem ter necessidade de qualquer tipo de compactação ou vibração externa, com capacidade de preencher vazios através tão somente por seu peso próprio, com o envolvimento das barras de aço e qualquer outro tipo de atribulação, estabelecendo-se através da força da gravidade, conservando a sua homogeneidade (TUTIKIAN, 2007).

2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

2.2.1 Cimento Portland

Aglomerante hidráulico, o cimento é obtido através da moagem de clínquer, que compreende principalmente em silicatos de cálcio hidratados, comumente com adições de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O cimento Portland dispõe de quatro compostos que possuem diferentes reações no seu processo de hidratação: o C3S compete ao Silicato tricálcico; o C2S ao Silicato dicálcico; o C3A ao Aluminato dicálcico e o C4AF ao Ferro Aluminato tetracálcico.

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland

NOME DO COMPOSTO	COMPOSIÇÃO EM ÓXIDOS	ABREV
Silicato tricálcico (Alita)	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico (Belita)	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico (Fasel)	3CaO.AL ₂ O ₃	C ₃ SA
Ferro aluminato tetracálcico	4CaO. Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C4AF

Fonte: (NEVILLE, 1998)

Quanto ao tipo de cimento para o CAA, não existem impedimentos, teoricamente as mesmas variedades que são usadas na produção do CCV podem ser usadas no CAA, todavia cimentos de maior finura são mais adequados para se obter um produto de resistência elevada (NBR 5733/91).

Para a escolha apropriada do tipo de cimento deve-se atender as exigências específicas de cada aplicação. Entretanto, o tipo de cimento a ser utilizado e a finura do mesmo influenciam na quantidade de aditivo e nas propriedades do concreto no estado fresco (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

O cimento comumente empregado para a produção de CAA, é o cimento de alta resistência inicial (CPV ARI), por possuir alto teor de finos e proporcionar maiores resistências nas primeiras idades. Porém este tipo de cimento pode apresentar fissuras causadas pelo alto calor liberado na hidratação do mesmo. Outro tipo de cimento que apresenta alto teor de finos é o cimento o CP II-F-40, apresentando grande resistência tanto inicial como final, maior compatibilidade com aditivos e baixo consumo de água.

2.2.2 Agregados

A definição dos agregados a serem utilizados na composição do CAA, é de extrema importância, pois o mesmo irá influenciar no custo, na trabalhabilidade, na resistência e na durabilidade do material (LEAL, 2009).

2.2.2.1 Agregado miúdo

Agregado miúdo são areias de origem natural ou consequente do procedimento de britagem, ou a mistura de ambas, onde os grãos passantes pela peneira de abertura 4,8 mm e retidos na peneira de abertura 0,075 mm atendendo os requisitos da ABNT NBR 7211-1983.

Para a produção do CAA, deve-se dá preferência para a escolha de agregados miúdos que possuam forma arredondadas e lisas, pois tem grande influência na fluidez e coesão do mesmo. A quantidade de água demandada ao concreto, está diretamente ligada a forma e textura do agregado miúdo (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

O CAA necessita de um grande teor de finos, para tanto, é valoroso considerar que quanto menor o módulo de finura do agregado miúdo, mais coeso será o concreto a ser elaborado (COUTINHO, 2017).

2.2.2.2 Agregado graúdo

Para o agregado graúdo é preconizado que possua um coeficiente de forma perto de 1 (um), para que minimize os vazios da pasta, visando reduzir o consumo de argamassa entre as partículas (TUTIKIAN, 2004).

A granulométrica do agregado é importante para o conceito do empacotamento dos grãos. De acordo com a sua forma, suas propriedades podem variar, de forma que as partículas arredondadas diminuem a quantidade de vazios e aumentam a fluidez da mistura, já agregados de forma angulosa ou alongada necessitam de um maior percentual de pasta para manter suas características de trabalhabilidade, gerando um custo elevado para o CAA (GOMES; BARROS, 2009).

A mistura do CAA solicita uma atenuação na quantidade do agregado graúdo, afim de evitar a tendência à segregação e aumentar a habilidade passante da mistura pelos obstáculos. É utilizado um diâmetro máximo característico dos agregados entre 12,5 e 19 mm, evitando-se diâmetros maiores por consumirem uma porção elevada de pasta (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

2.2.3 Água

Componente fundamental para a mistura do concreto, a água possui duas funções de exima importância, sendo elas físicas: no qual se estabelecem algumas características reológicas ao concreto para sua utilização e química: ligada a gerar as reações de hidratação da pasta (LEAL, 2009).

Para a produção do CAA, a água a ser utilizada é a mesma empregada para o CVV, a ser mesurada a partir das características da mistura, quanto a parcela de material seco e a fração de finos de acordo com as recomendações da ABNT NBR 15900-1-2009.

2.2.4 Aditivos

2.2.4.1 Superplastificantes e Hiperplastificantes

Os aditivos químicos comumente adicionados ao CAA são os superplastificantes (SP) ou hiperplastificantes, responsáveis por promover fluidez e viscosidade necessárias ao concreto (COUTINHO, 2017).

Os hiperplastificantes são qualificados como aditivos que promovem a diminuição de água, e diferem dos SP apenas pela nomenclatura, pois se tratam de superplastificantes com maior capacidade em reter a água da pasta e ampliar a fluidez e o abatimento.

Com um complexo processo de polimerização, os SP, são polímeros orgânicos hidrossolúveis, sintetizados e otimizados para um mínimo de entrelaçamento necessário para viabilizar a aplicação do produto (NEVILLE, 1997).

No concreto os aditivos SP agem como produtos que aumentam o índice de consistência, possibilitando que a água de amassamento permaneça de forma constante ou que reduzem a quantidade da mesma em no mínimo de 12% para elaboração de um concreto com uma dada consistência (LEAL, 2009).

É inevitável o uso de aditivos SP em CAA, pois para que se consiga atingir alta fluidez, que é uma das suas características principais, sem o uso do mesmo seria impossível, são inúmeros os tipos e as marcas existentes no mercado e novos tipos estão surgindo com cada vez mais frequência e direcionados especificamente ao CAA (GOMES E BARROS, 2009).

2.2.4.2 Modificadores de viscosidade

Incorporados ao concreto para dar coesão, retendo a água proveniente da exsudação e impossibilitando a segregação, os aditivos modificadores de viscosidade (VMA) com origem de polissacarídeos com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base inorgânica, podem amenizar as implicações inconvenientes causados pela ausência de uniformidade na quantidade de água e da granulometria dos agregados utilizados para a dosagem (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Ainda segundo Tutikian e Dal Molin (2008), O VMA supre os fins necessários para o concreto. Desta forma, a necessidade de finos na mistura é reduzida, ocasionando em uma menor área superficial da substância, e por consequência o teor de água a ser incorporado. E mesmo sendo dispensável para o emprego em CAA, se forem utilizados em conjuntura com os SP de última geração, pode garantir a estabilidade e fluidez a mistura.

2.2.5 Adições minerais

As adições minerais podem ser classificadas como insumos moídos finamente, comumente incorporado em grandes quantidades ao concreto, afim de reduzir os custos, melhorar a resistência à fissuração térmica, ao ataque por sulfatos e à reação álcali-agregado, além de melhorar a trabalhabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Adições minerais são substâncias finamente moídas a serem incorporadas ao concreto afim de trazer benefícios como o econômico, com a substituição parcial do cimento, de forma a reduzir o consumo de cimento, e tecnológico, pois traz melhora para as propriedades do concreto nos estado fresco como sua trabalhabilidade, com relação à fluidez, quantidade de água e no estado endurecido pela melhora nas propriedades

mecânicas, tais como: resistência, permeabilidade e durabilidade, provocada pelo aumento da quantidade de finos e do refinamento dos poros. (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Para aumentar a coesão da mistura e evitar a segregação do agregado graúdo em CAA, normalmente são utilizadas adições minerais. O CAA deve possuir elevada resistência à segregação, apesar da alta fluidez e deformabilidade no estado fresco (COUTINHO, 2017).

2.2.5.1 Quimicamente ativas

As adições minerais quimicamente ativas são substâncias pozolânicos ou materiais com características cimentantes. Definido pela NBR 12653/1992 o material pozolânico é um produto que reage quimicamente com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O material cimentante dispõe, em sua constituição, hidróxido de cálcio e não necessitando do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado ao longo da hidratação do cimento Portland para gerar o C-S-H (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Ainda segundo Tutikian e Dal Molin (2008), dá mesma forma como no CCV, pode-se obter um CAA com as adições cimentantes e pozolânicas, como por exemplo a cinza volante e a escória de alto-forno. Porém, as adições pozolânicas com alto teor de finos, como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, apresentam melhores resultados por apresentarem maior coesão do CAA, além contribuir para a durabilidade e na ampliação da resistência.

2.2.5.1.1 Sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro silício e do silício metálico dispõem de forma esférica e textura lisa, o uso dessa substância é bastante recomendado para a produção de CAA, adicionando diversos efeitos tanto no estado fresco como no endurecido (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

2.2.5.2 Efeito fíler

Adição mineral sem atividade química e finamente moída, o material fíler tem ação como um efeito físico de empacotamento granular e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. É adicionado ao CAA de forma a substituir o agregado miúdo, por possuir maior finura, melhora a compacidade granular e gera maior

coesão a mistura. Podem ser encontrados como substâncias naturais ou materiais processados de origem inorgânica (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO

2.3.1 Concreto auto adensável no estado fresco

2.3.1.1 Trabalhabilidade

Conforme a ABNT NBR 15823-1 (2010) - Concreto auto adensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco, existem vários conjuntos de equipamentos específicos para avaliação da trabalhabilidade do CAA.

Pode-se definir trabalhabilidade como uma propriedade do concreto no estado fresco que aponta sua maior ou menor capacidade para ser aplicado com determinada finalidade, sem perda de sua homogeneidade, nos processos de transporte e lançamento (LEAL, 2009).

A trabalhabilidade é uma propriedade constituída de pelo menos dois elementos fundamentais, fluidez, que representa a capacidade de movimento do concreto fresco; e a coesão, que retrata a resistência à exsudação ou à segregação. (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A facilidade que uma mistura de concreto venha a possuir para ser manuseada, garante que não exista segregação adversa, desta forma, a trabalhabilidade influencia na capacidade de bombeamento e na construtibilidade (MEHTA, 2008).

2.3.1.2 Coesão

A coesão é a propriedade que assegura a plenitude da massa do concreto, garantindo a homogeneidade da mistura e sua integridade durante o transporte quanto a resistência à segregação e exsudação (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Quando um concreto apresentar um teor de argamassa suficiente para envolver os grãos do agregado graúdo e a massa da mistura se manter sem desagregar, pode ser considerado um concreto coeso. A aptidão à segregação do concreto pode ser influenciada pelos seguintes aspectos: diferenças de tamanho das partículas que compõe a sua mistura, diferenças de massas específicas dos agregados miúdo e graúdo e vibração exagerada aplicada no processo de transporte e adensamento (LEAL, 2009).

No CAA pode ser verificada a coesão de forma visual, notando se a argamassa do concreto envolve todos os grãos do agregado graúdo, conservando-se como um material homogêneo, que resiste a segregação e a exsudação (TUKIKIAN e DAL MOLIN,2008).

2.3.1.3 Consistência

A consistência do concreto no estado fresco classifica-se como a capacidade da mistura de manter sua forma ou facilidade de fluir, essa propriedade está ligada ao teor de umidade, de modo que, para uma determinada quantidade de água, resultará em uma determinada trabalhabilidade. A determinação da consistência pode ser feita através do ensaio de abatimento do tronco de cone, conhecido como *Slump Test* conforme a NBR 12665 (ABNT, 2015) método rápido fácil de usar em laboratórios e canteiros de obras (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.3.1.4 Segregação

Pode ser caracterizada como a competência do CAA de evitar a separação de seus elementos, como a fragmentação do agregado graúdo dos demais componentes do concreto. Essa propriedade melhora a uniformidade da mistura durante o transporte, o lançamento e a consolidação sendo o mecanismo que governa essa propriedade é a viscosidade e a coesão da mistura (GOMES e BARROS, 2009).

A segregação pode ocorrer de duas formas, uma quando a mistura apresenta excesso de água, ocorrendo a separação de pasta de cimento, a outra quando as partículas maiores propendem a se separar, de forma a deslizar em superfícies inclinadas ou assentam mais que as partículas finas (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.3.1.4 Exsudação

Entende-se como exsudação a incapacidade dos materiais constituintes da mistura do concreto em reter a água de amassamento, e os agregados mais pesados se assentarem no fundo de onde o material for lançado, uma forma de segregação que acontece antes que o concreto tenha início de pega, em que a água tende a deslocar-se para a superfície da mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Evidencia-se que as razões mais comuns para que ocorra a exsudação são o agregado graúdo em excesso, a carência de finos, a consistência inapropriada e o adensamento ineficaz (ISAIA, 2011).

2.3.1.5 Ensaio no estado fresco

3.3.1.5.1 Slump flow

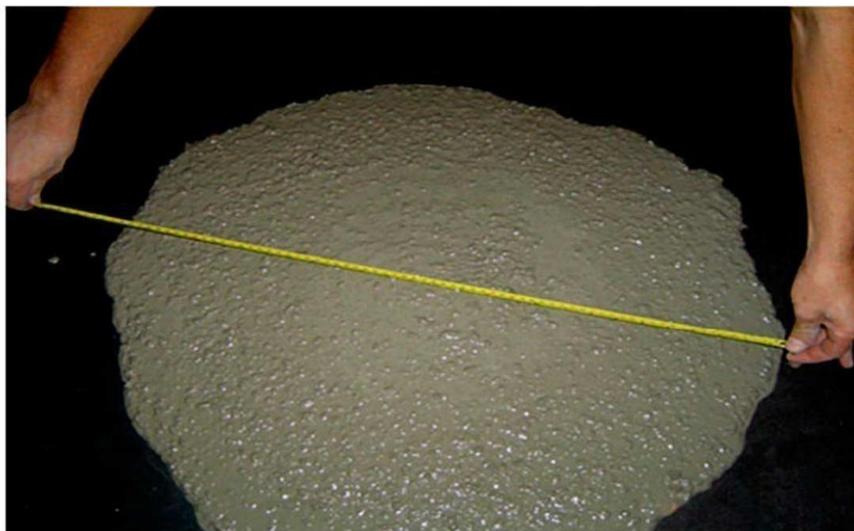
Esse ensaio é realizado segundo a NBR 15823-2/20010- Concreto auto adensável -determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – método de Abrams. *O slump flow test* é utilizado para medir a eficiência do CAA de fluir livremente sem segregar. A medida de fluidez a ser alcançada do CAA é o diâmetro do círculo formado pelo concreto. Também permite que seja visualizado a olho nu, se o concreto está segregando ou não.

Utiliza-se esses equipamentos para a realização do ensaio:

- Uma base quadrada reta, lisa e de material sólido que não solte material, com dimensões de, no mínimo, 90 cm.
- Cone de Abrams (diâmetro superior de 10 cm e inferior de 20 cm, com altura de 30 cm).
- Tronco de cone invertido.
- Urna colher do tipo concha ou um balde.
- Uma trena ou uma régua de, no mínimo, 90 cm.

A figura 2, apresentada uma mistura ensaiada no *Slump flow test* sem apresentar segregação.

Figura 2 - *Slump flow test* - Mistura sem segregação.



Fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008.

3.3.1.5.2 Slump flow T50 test.

O *slump flow T50 cm test* é uma versão modificada do *slump flow*, onde os métodos e os equipamentos são os mesmos seguindo NBR 15823-2/20010, tendo como diferença a marcação de um círculo de 500 mm de diâmetro centrado na base, e o uso de um cronômetro para que se complete o ensaio. O ensaio é realizado simultaneamente com o *slump flow test*, assim que o cone for erguido verticalmente, deve acionar o cronômetro e marcar o tempo em que o concreto alcança a marca de 500 mm (TUKIKIAN,2004). A figura 3, apresenta o ensaio *slump flow T 50cm test* realizado.

Figura 3- Ensaio com o *slump flow test* e *slump flow T 50cm test*.



Fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008.

3.3.1.5.3 J-ring test.

Conforme a NBR 15823-3/2010 será realizado o ensaio *j-ring test* para aferir a resistência a segregação do CAA. O ensaio que representa a situação real que o CAA deve enfrentar com as armaduras de uma estrutura. O instrumento é constituído por um anel com 16 barras de aço espaçadas de 25 a 50 milímetros. Comumente a abertura do anel é de 300 mm, a altura é de 100 mm.

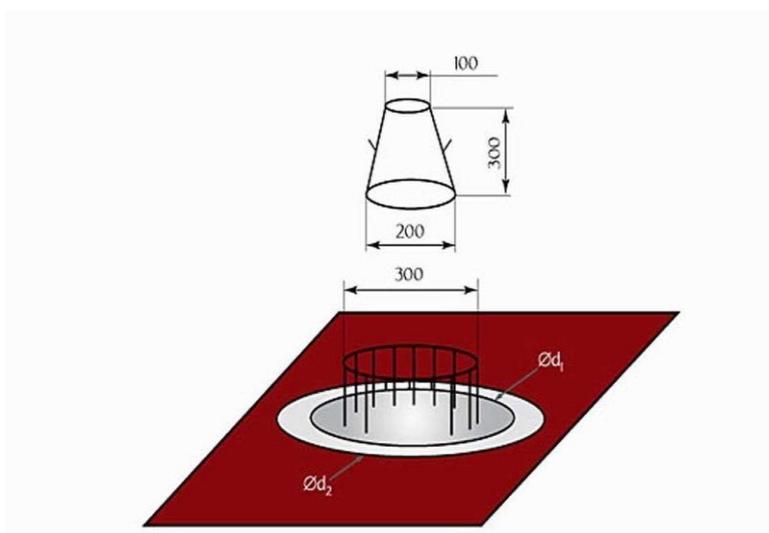
Para a realização do ensaio é essencial dois operadores, o anel metálico, o tronco de cone e base do *Slump flow test*, um cronômetro, uma trena, uma concha côncava e uma espátula.

- Materiais utilizados:
- Anel metálico;
- Tronco de cone;

- Base do *slump flow*;
- Cronômetro;
- Trena;
- Concha côncava

Deve se umedecer os equipamentos e colocá-los no chão firme, preenchendo o concreto até o topo do tronco de cone, sem compactação externa ou vibração. Levanta-se o molde verticalmente e cronometra, até alcançar o círculo de 500 mm, medimos o espalhamento as duas dimensões. O esquema do ensaio está representado na figura 4.

Figura 4- Ensaio do anel J.

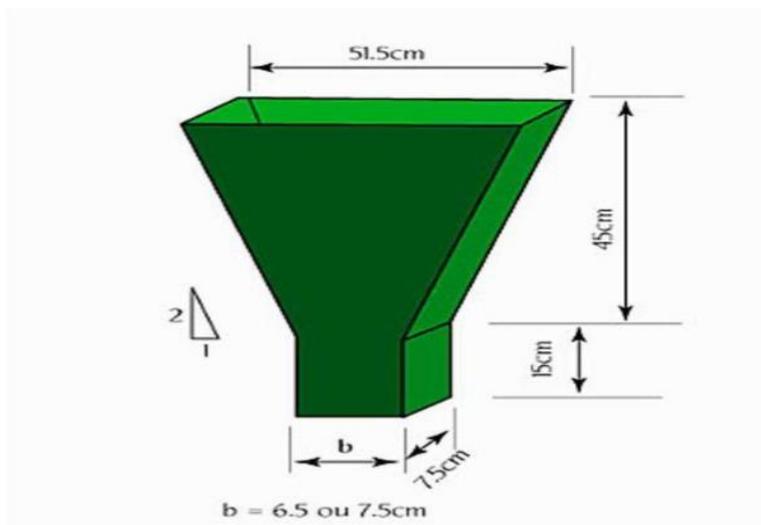


Fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008.

3.3.1.5.4 Funil V.

Este ensaio foi desenvolvido no Japão por Ozawa, e no Brasil e normalizado pela ABNT NBR 15823-5 (2010) - Determinação da viscosidade – Método do funil V. e um ensaio para determinação da viscosidade do CAA, pela medida do tempo de escoamento de uma massa de concreto através do funil V. Este ensaio se aplica a CAA preparado com agregado graúdo de dimensão máxima característica menor ou igual a 20 mm. A figura 5 mostra um modelo de Funil V.

Figura 5- Funil V.

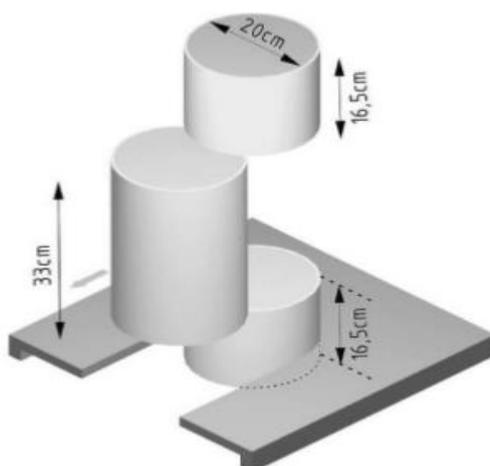


Fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008.

3.3.1.5.5 Método da coluna de segregação.

Ensaio normalizado pela ABNT NBR 15823-6 (2010) - Determinação da resistência a segregação – Método da coluna desagregação. Prescreve o ensaio para determinação da resistência a segregação do CAA, pela diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação. Este método de ensaio não é aplicável a CAA contendo agregado leve ou fibras. A figura 6, apresenta o esquema de coluna de segregação.

Figura 6 – Coluna de segregação.

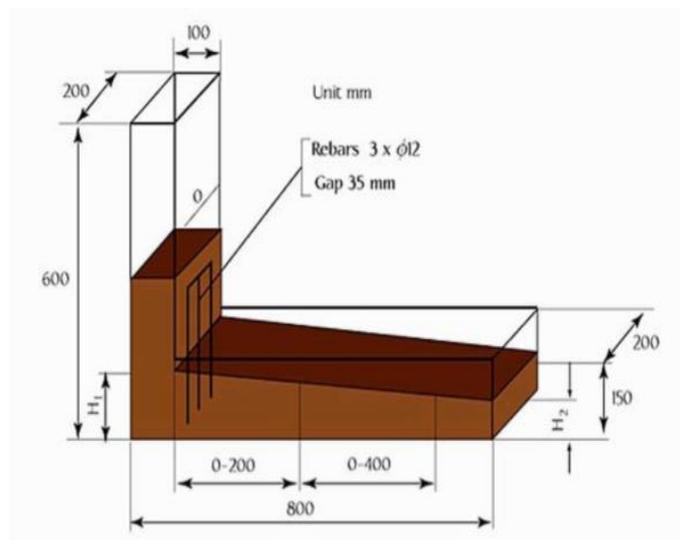


Fonte: Alencar, 2008.

3.3.1.5.6 L- Box Test.

O ensaio é normalizado pela ABNT NBR 15823-4 (2010)- Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. prescreve o ensaio para a determinação da habilidade passante em fluxo confinado do CAA e é realizado, preenchendo-se a parte vertical da caixa com a amostra de concreto, após a abertura da porta da caixa, são medidos parâmetros de tempo para alcançar o comprimento horizontal de 20cm, 40 cm e faz-se a relação final entre as duas alturas do concreto no trecho horizontal e a altura do concreto restante no parte vertical. A caixa L está representada na figura 7.

Figura 7- Caixa L.



Fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008.

2.3.2 Concreto auto adensável no estado endurecido

2.3.2.1 Resistência à compressão

Pode ser considerada a principal característica do concreto no estado endurecido a ser analisada para medir a qualidade do mesmo, sua resistência permite conjecturar a predisposição da estrutura referente aos produtos resultantes da hidratação do cimento e do conjunto pasta-agregado para atender as exigências de desempenho requeridas (LEAL, 2009).

A resistência a compressão no CAA consiste em ser definida por meio da dosagem e da mistura dos materiais, possibilitando maiores ou menores resistências ao longo das idades, de modo que o CAA arriscar-se-á ter fissuração de secagem e alto calor de hidratação quando dosado com elevado teor de cimento (TUKIKIAN e DAL MOLIN,2008).

Alguns fatores podem afetar a resistência mecânica do concreto, entre eles a proporção dos materiais da mistura, as condições de moldagem e cura, além das propriedades dos materiais constituintes no concreto (METHA e MONTEIRO, 2008).

Preconiza-se que o ensaios de compressão sejam realizados de acordo com a NBR 5739 de 2007, com corpos-de-prova cilíndricos com dimensões padronizadas de diâmetro 10 e 15cm, e alturas de 20 e 30cm, sendo garantida a cura úmida após moldagem e o rompimento em idades predefinidas, usualmente determinada aos 03, 07, 14 e 28 dias sendo possível sua ruptura em qualquer idade, de acordo com a necessidade.

2.3.2.2 Modulo de elasticidade

Define-se como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea sofrida pelo concreto, no estado endurecido, o módulo de deformação dependente das características dos materiais constituintes, bem como da dosagem da mistura (METHA e MONTEIRO, 1994).

Diversos fatores podem interferir na definição prática do módulo de elasticidade do concreto, tais como a forma e a geometria dos corpos de prova, a metodologia de ensaio, as tensões limites de elasticidade, o nível de saturação do concreto e alguns outros fatores.

Segundo a NBR 6118, o módulo de elasticidade (E_{ci}) deverá ser alcançado conforme o método de ensaio constituído na ABNT NBR 8522, de forma a ser respeitado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade.

O módulo de elasticidade do concreto pode ser utilizado como critério de aceitação de uma obra em concreto, a avaliação desta medida deve ser feita por laboratórios competentes de forma a fazer a tomada de medidas através da deformação do concreto direto na geratriz do corpo de prova, conforme o preconizado pela ABNT NBR 8522:2008.

2.3.2.3 Durabilidade

O termo durabilidade pode ser estabelecido no concreto como a disposição de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou outro processo de deterioração. Um concreto para ser considerado durável precisa preservar suas propriedades originais, como qualidade e capacidade de utilização em meio a agentes agressivos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A durabilidade submete-se ao tipo de dosagem a ser empregada e aos materiais utilizados na sua mistura, podendo gerar uma alta ou baixa durabilidade, no CAA segue-se as mesmas características da resistência a compressão, de modo que dependendo do tipo de dosagem a ser utilizada e dos materiais utilizados na sua mistura, tem-se uma alta ou baixa durabilidade do CAA (TUKIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Como efeito de interações ambientais, a microestrutura e suas características modificam com o tempo, desta forma nenhum material é propriamente durável. Um material alcança o fim de sua vida útil quando suas propriedades, sob algumas condições de uso, apresentarem algum tipo de deterioração de maneira que o prolongamento de sua utilização se torna insegura e antieconômica (LEAL, 2009).

2.3.2.4 Permeabilidade

A permeabilidade é definida como a capacidade de que a água tem em percolar no material, preenchendo os vazios originados pelo ar incorporado à mistura e pela água de amassamento em excesso que foi evaporada. Desta forma, torna-se uma propriedade admirável para concretos que estão sujeitos a infortúnios (AMBROZEWICZ, 2012).

A água no concreto deve ser analisada de forma adequada, ela é como um ingrediente necessário para que ocorra a hidratação do cimento e favorece a mistura dos componentes do concreto. Grande parte dessa água é evaporada acarretando em poros caracterizados com vazios que promoveram a permeabilidade no concreto (METHA; MONTEIRO, 2008)

2.3.2.5 Absorção de água

Conforme a NBR 9778/05 a absorção de água por imersão é o procedimento que induz a água a se dirigir para os poros permeáveis de determinado corpo poroso com o intuito de preenchê-los.

A absorção de água é um processo físico onde o concreto retém água nos poros e condutos capilares. Pode-se executar um ensaio simples de imersão em água até a saturação dos poros, e por diferença de peso seco e peso saturado obtém-se a quantidade de água absorvida (PETRUCCI, 1998).

A permeabilidade está diretamente proporcional à absorção de água, significa dizer que quanto mais um concreto for permeável, mais água ele irá absorver. A água absorvida pelo concreto evaporará no período de cura do produto, ocasionando em vazios

que acarretará em porosidade ao concreto, diminuindo consideravelmente sua resistência à compressão axial e diametral (LEAL, 2009).

2.4 EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS

O empacotamento de partículas constitui-se em ocupar os espaços vazios gerados por partículas de maior diâmetro com partículas de menor diâmetro. De forma a gerar um vicioso tendo a preencher os espaços vazios deixados por essas partículas de menor diâmetro com partículas ainda menores e, assim, continuamente (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Os fatores de maior relevância que levam ao empacotamento de partículas são a forma ou morfologia dos grãos, a distribuição granulométrica de partículas e o método de compactação utilizado (DE LARRARD, 1999).

2.4.1 Modelo de Alfred

O modelo de Alfred é intitulado como Modelo de Andreasen Modificado. Funk e Dinger (1992) elaboraram vários estudos nos modelos de empacotamento, comprovando que os modelos de Furnas e Andreasen tendem para uma única equação chamada de modelo de Alfred.

Para o modelo de Andreasen a distribuição de partículas é discutida como distribuições contínuas, pois todos os diâmetros podem ser encontrados em distribuições reais de partículas.

Para Andreasen o empacotamento ideal de partículas possui circunstâncias de semelhança em torno de duas partículas com tamanhos muito diferentes. Essa circunstância de correspondência determina a distribuição de tamanho de partículas em forma de uma lei de potências representada pela equação 1.

$$CPFT = 100 \left(\frac{Dp}{Dl} \right)^q \quad (\text{eq. 1})$$

Sendo:

CPFT = Porcentagem acumulada passante de finos;

D_p = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

D_l = Diâmetro da maior partícula do empacotamento;

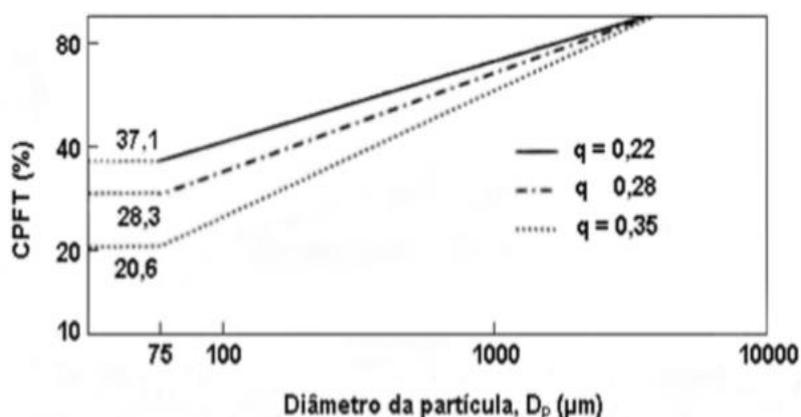
q = Coeficiente de empacotamento.

Neste modelo, o coeficiente q com o valor de 0,37 proporciona máximo empacotamento teoricamente possível, entretanto isso só é possível se o diâmetro da

menor partícula do empacotamento for zero, por isso, na prática, não ocorre. Assim, deve-se utilizar o menor diâmetro possível para maximizar o empacotamento em realizações reais.

Define-se o coeficiente de distribuição (q) em razão do tipo de concreto que se almeja obter. O modelo proposto por Alfred relativiza um coeficiente de 0,37, o qual não favorece a obtenção de um concreto com grande capacidade fluídica, devido a proximidade em que se encontram os agregados, o que pode ocasionar em interferências entre os mesmos. Para se obter concretos que possuam boa fluidez e recomendável a utilização do coeficiente com valor abaixo de 0,30, tal qual ainda se faz necessário algum tipo de compactação e vibração, já para concretos auto adensáveis é recomendado valores no intervalo de 0,20 a 0,25. De tal forma que quanto menor o valor do coeficiente, maior será a proporção de finos na mistura. Conforme mostra a figura 8.

Figura 8 – Modelo de Andreasen: distribuição granulométrica.



Fonte: Oliveira (2013).

O modelo de Furnas, ao contrário do modelo de Andreasen, a distribuição de partículas é considerada como discreta e o empacotamento máximo acontece quando as partículas menores envolvem totalmente os vazios presentes entre as partículas maiores (OLIVEIRA, 2013).

Furnas confirmou que a distribuição de máxima densidade de empacotamento de diversos tamanhos de partículas forma uma progressão geométrica. Assim, difundiu sua teoria para qualquer mistura com vários diâmetros discretos na equação 2 (OLIVEIRA, 2013).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_l^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo:

CPFT = Porcentagem acumulada passante de finos;

D_p = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

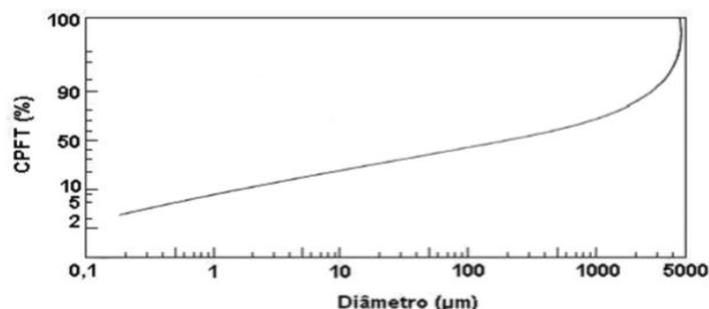
D_s = Diâmetro da menor partícula do empacotamento

D_l = Diâmetro da maior partícula do empacotamento;

r = Razão entre os volumes de partículas retidas em uma malha de peneira e o volume da malha imediatamente inferior;

A figura 9 apresenta graficamente o modelo de Furnas.

Figura 9 - Representação do modelo de Furnas.



Fonte: Watanabe, Ishikawa e Wakamatsu (1989 apud OLIVEIRA et al., 2000).

O modelo de Alfred é desenvolvido a partir da confrontação entre o modelo de Andreasen e o modelo de Furnas. Comprovando matematicamente a ligação dos dois modelos para uma única equação 3.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_l^q - D_s^q} \right) \quad (\text{eq. 3})$$

Sendo:

CPFT = Porcentagem acumulada de finos;

D_p = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

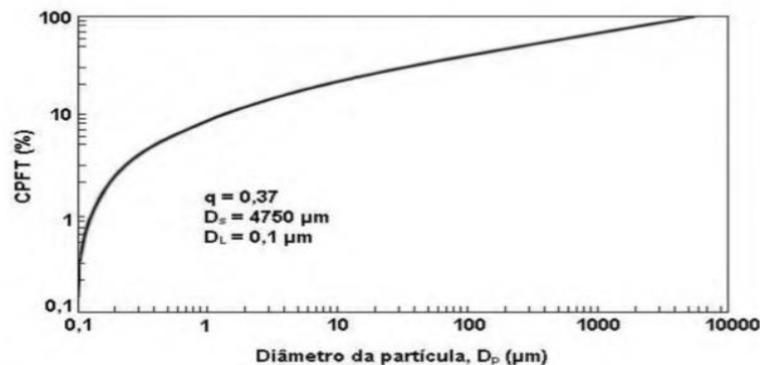
D_s = Diâmetro da menor partícula do empacotamento

D_l = Diâmetro da maior partícula do empacotamento;

q = Coeficiente de empacotamento.

A figura 10 apresenta graficamente a distribuição granulométrica das partículas pelo modelo de Alfred.

Figura 10- Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas.



Fonte: Oliveira et al. (2000 apud Oliveira, 2013).

O modelo de Alfred alcança resultados mais satisfatórios de empacotamento de partículas quando confrontado com o modelo de Furnas e o modelo de Andreasen (OLIVEIRA, 2013).

2.5 MÉTODO DE DOSAGEM

2.5.1 Método de dosagem IPT/EPUSP

O Método IPT/EPUSP predominantemente experimental foi elaborado com o intuito de viabilizar sua aplicação em qualquer região do país adaptando-se aos materiais locais. Este método busca o alcance de misturas trabalháveis e com baixo teor de argamassa que permita o preenchimento dos vazios do agregado graúdo e a lubrificação dos seus grãos. Ele proporciona o alcance, com mínimos recursos de laboratório e de forma bem ágil, resultados suficientemente adequados às necessidades de obra. No canteiro podem ser feitas pequenas variações devidas as características dos agregados disponíveis (LEAL, 2009).

Este método de dosagem de concreto constitui como resultado de sua aplicação, um diagrama de dosagem esboçado graficamente sobre três quadrantes onde são representadas “leis de comportamento” expressas por conexões que serão abordadas depois. O diagrama de dosagem que será desenhado é baseado em leis e correlações, obtidas ao longo dos anos por pesquisadores (Abrams, Lyse, Molinari e outros), descritas a seguir pelas equações (TUTIKIAN, 2004).

$$f_{cj} = \frac{k_1}{(k_2 * \frac{a}{c})} \quad (\text{eq. 4})$$

$$m = k_3 - k_4 * \frac{a}{c} \quad (\text{eq. 5})$$

$$c = \frac{1000}{(k_5 - k_6 * \frac{a}{c})} \quad (\text{eq. 6})$$

$$a = \frac{1-m}{1-p} \quad (\text{eq. 7})$$

$$m = a - p \quad (\text{eq. 8})$$

$$c = \frac{\gamma}{(1-\alpha-p-\frac{a}{c})} \quad (\text{eq. 9})$$

$$c = \frac{1000-ar}{(\frac{1}{\gamma c} - \frac{a}{\gamma c} - \frac{p}{\gamma p a} - \frac{a}{c})} \quad (\text{eq. 10})$$

Onde:

f_{cj} = resistência à compressão axial, à idade j , em MPa;

a/c = relação água / cimento em massa, em kg/kg

a = relação agregado miúdo seco / cimento em massa, em kg/kg

p = relação agregado graúdo seco / cimento em massa, em kg/kg

γ = teor de argamassa seca, deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ = constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimentos, agregados, aditivos);

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m³

γ_c = massa específica do cimento, em kg/m³

γ_a = massa específica do agregado miúdo, em kg/m³

γ_p = massa específica do agregado graúdo, em kg/m³

A_r = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm³/m³;

A = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

C_u = custo do concreto por metro cúbico;

$\$c$ = custo do kg do cimento;

$\$a$ = custo do kg do agregado miúdo;

$\$p$ = custo do kg do agregado graúdo;

$\$ag$ = custo do litro da água potável;

Feito o estudo dessas características, faz necessário o estudo experimental, onde são necessários alguns pontos para o desenho do modelo de comportamento, onde se relacionam, para uma trabalhabilidade estabelecida, resistência à compressão, relação a/c , proporção dos agregados e consumo de cimento. Esses pontos são classificados como pobre, intermediário e o rico, que respectivamente representam, o 1:5, o 1:6,5 e o 1:3,5, para os concretos convencionais compreendidos em uma faixa de resistência à compressão aproximada de 20 a 50 MPa. O primeiro traço a ser rodado é o 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) de onde se tiram informações importantes para os traços subsequentes (TUTIKIAN, 2004).

Segundo Tutikian (2004) logo após o rompimento dos corpos-de-prova nas idades de projeto, esboça-se o diagrama de dosagem e pode-se calcular qualquer traço intermediário para aquela família, lembrando que deve ser utilizado os materiais que foram feitos os estudos anteriormente. Vale destacar que a proporção de materiais de um determinado concreto feito em laboratório é sempre uma tentativa de se chegar o mais perto possível da realidade, apesar de que sempre se fará necessário algumas correções e ajustes posteriores, para a obtenção do traço final.

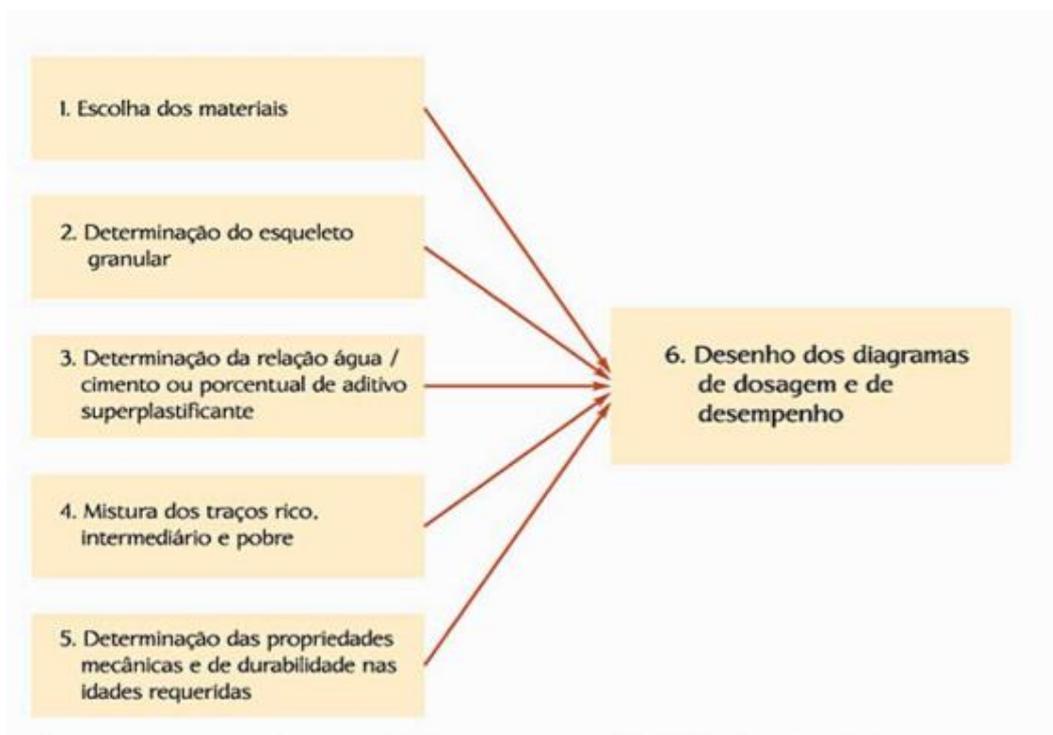
2.5.2 Método de Tutikian e Dal Molin

O método Tutikian e Dal Molin (2007) é uma aperfeiçoamento do método sugerido por Bernardo Fonseca Tutikian em sua dissertação de mestrado, em 2004, ajustado para dosagem de CAA fundamentado no método IPT/EPUSP (COUTINHO, 2017).

De acordo com Gomes e Barros(2009) o método em questão concentra as ideias de O'Reilly (1992) para definir o empacotamento granular máximo, os entendimentos de De Larrard (1999) para a seleção dos materiais, o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP origina os cálculos de qualquer CAA dentro da faixa avaliada da mesma família analisada, o acerto do teor de aditivo, a relação água/cimento e o procedimento básico de Tutikian (2004).

O método proposto por Tutikian e Dal Molin segue algumas fases para se alcançar a dosagem de traço de CAA, que serão expostos na figura 11 e nas etapas citadas a seguir:

Figura 11- Fluxograma método de Tukikian e Dal Molin.



Fonte: Tukikian e Dal Molin (2007).

A primeira fase é composta pela escolha dos materiais que possuam propriedades de constituir o concreto que para Tutikian (2004) são os mesmos do CCV, cimento, agregados miúdo e graúdo priorizar agregados arredondados, com menor diâmetro máximo possível e com faixas granulométricas contínuas e água, acrescentados de um material fino, de granulometria inferior à do agregado miúdo e aditivo superplastificante. As propriedades que carecem ser comparadas são os custos de cada componente, a disponibilidade da quantidade e distâncias aceitáveis, ainda se houver mais de uma opção para um dado item, sugestiona-se que se privilegie aqueles com que o responsável pela dosagem já tenha trabalhado (HELENE; TERZIAN, 1992).

A segunda fase é a execução do empacotamento dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro de partículas. Dá-se início com a brita, caso tenham dois tipos de agregado graúdo, esses são empacotados, e é escolhida a combinação com menor índice de vazios. Logo após essa mistura é empacotada com a areia média, na qual é encontrada a combinação, entre esses agregados, que resulte no menor índice de vazios. Finalmente, a mistura resultante é empacotada com o fino utilizado (areia fina, por exemplo) e, novamente, define-se a combinação com menor índice de vazios. O único material que não é empacotado é o cimento.

A terceira fase é realizada a estimativa da relação água /cimento e da quantidade de aditivo superplastificante para a realização do traço intermediário, segundo a experiência do responsável, antes da mistura dos materiais. Efetua-se a mistura do traço intermediário, tendo em vista a proporção entre os agregados que já foi definido na etapa anterior, e a quantidade de cimento para o traço intermediário é estipulada normalmente em torno da relação 1 : 4,5 (1 kg de cimento para 4,5 kg de agregados) e, assim, examinar a obrigação de ajustes da relação água/cimento e do teor de SP estimados. A quantidade de aditivo que é acrescentado em função da massa do cimento varia muito, devido à diversidade de cimentos existentes e, principalmente, e a alta variedade de aditivos. É aconselhado que se comece com pequenas quantidades, a partir de 0,30% da massa de cimento, e vá acrescentando a proporção, até chegar ao ponto ideal, cumprindo os limites dos fabricantes. Tutikian (2004) relata que o ponto ideal é alcançado visualmente, ocorrendo quando o concreto está fluido, não levando em consideração a separação dos agregados graúdos da argamassa. A proporção de aditivo permanecerá o mesmo para a realização do passo seguinte permitindo que os traços sejam considerados da mesma família.

Na quarta fase aceita-se no mínimo três traços bases para a construção do diagrama, um rico, um intermediário e um pobre, para fazer as curvas de dosagem para esta classe de materiais, e, podendo dosar qualquer concreto com estes materiais. Não deve se exceder esta curva. Sendo aconselhado o acrescentamento do número de pontos para se obter um grande intervalo de valores ou escolher pontos já próximos dos parâmetros finais, caso seja possível, para a caracterização das equações de comportamento e coeficientes de correlação, para a posterior ilustração da curva de dosagem.

Na quinta fase prepara-se os corpos de prova (CP's.) para o ensaio de ruptura à compressão nas idades requeridas. Os Cp's devem ser moldados sem utilização de vibração ou compactação interna, o CAA deve fluir para o interior das fôrmas. Consiste na necessidade da moldagem de no mínimo dois Cp's com dimensões 10x20 cm, para cada idade de ensaio, aceitando o material no interior das fôrmas no primeiro dia, coberto, e atingindo cura úmida até as idades escolhidas. Efetua-se o ensaio das propriedades mecânicas e de durabilidade do para a aquisição dos dados que faltavam para ilustrar o diagrama e para o cálculo das equações.

Na última fase com os elementos necessários, pode-se ilustrar o diagrama de dosagem e produzir as equações de comportamento, e a partir de qualquer condição inicial pode-se dosar o concreto com aqueles materiais escolhidos.

3 METODOLOGIA

A metodologia posta para realização deste trabalho, é qualificada como pesquisa exploratória, experimental e laboratorial, promovendo o emprego do método de empacotamento das partículas proposto por Alfred no CAA em comparação ao utilizado por Tutikian. Dispondo como sustentação para o estudo o método de dosagem de concreto auto adensável definido por Tutikian e Dal Molin (2007), fundamentado nos parâmetros do método do IPT/EPUSP.

3.1 ESCOLHA DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a confecção do concreto no traço foi o CP-II F 40, devido à sua polivalência e inúmeras possibilidades de aplicações, realça-se por seu alto teor de finura com alta resistência em todas as idades.

3.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 1 de origem granítica e proveniente da região de Palmas/TO. Seguindo recomendação de Tutikian e Dal Molin a dimensão máxima utilizada não deverá ultrapassar 19 mm. A caracterização do material seguiu as recomendações da ABNT NBR 7211/2009.

3.1.3 Agregado miúdo

Os agregados miúdos que foram utilizados foi a areia natural média e a areia natural fina, comumente encontradas na região de Palmas/TO, foi feito o empacotamento das partículas misturando-se porcentagens destas areias de acordo com a curva granulométrica obtida pelo método proposto de forma a conferir melhor desempenho ao CAA.

3.1.4 Adição mineral

Foi empregada a adição mineral sílica ativa, a fim apenas de comparação, sendo confeccionado um traço com adição de sílica com a utilização do método de empacotamento proposto por Tutikian, e outro sem a adição e com o método de empacotamento proposto por Alfred. No CAA a sílica ativa traz diversas vantagens, como elevado aumento da coesão, melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas e redução acentuada da exsudação e segregação.

3.1.5 Água

A água utilizada foi a do laboratório de engenharia civil do CEULP/ULBRA, com o fornecimento da empresa BRK que abastece a cidade.

3.1.6 Aditivo

O aditivo empregado foi um superplastificante de 3º geração, aditivo a base de policarboxilatos, isentos de cloretos. O emprego de tais aditivos é determinante para a obtenção do CAA, pois aumentam significativamente a fluidez do concreto mantendo a relação água/cimento.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Determinação da massa unitária

De acordo com ABNT NBR NM 45/2006 foi realizado o ensaio para estabelecer a determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos, grãos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto. Conforme mostra a figura 12.

Figura 12 – Determinação da massa unitária do agregado graúdo.

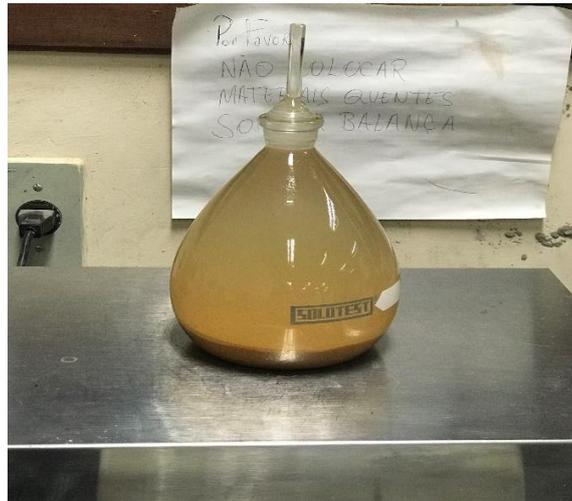


Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.2.2 Determinação da massa específica

Foi realizado referente a ABNT NBR 6508/1984 norma que estabelece o método de determinação da massa específica. Como mostra a figura 13.

Figura 13 – Determinação da massa específica do agregado miúdo.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.2.3 Análise granulométrica

Realizou-se a caracterização granulométrica dos agregados graúdos (britas até 19 mm) e agregado miúdo, de acordo com ABNT NBR NM 248:2003. Conforme representado na figura 14.

Figura 14 – Ensaio de granulometria.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.2.4 Determinação do teor de materiais pulverulentos

O ensaio ocorreu segundo a ABNT NBR NM 46/ 2003, que estabelece o método para a determinação por lavagem, em agregados, da quantidade de material mais fino que

a abertura de malha da peneira de 75 µm. As partículas de argila e outros materiais que se dispersam por lavagem, assim como materiais solúveis em água, foram removidos do agregado durante o ensaio. A figura 15, mostra os equipamentos para a realização do ensaio.

Figura 15 – Ensaio do teor de materiais pulverulentos.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.3 MODELOS DE EMPACOTAMENTO EMPREGADOS

Após a caracterização dos agregados foram realizados os empacotamentos para os dois modelos antes da realização de cada dosagem.

3.3.1 Modelo de Alfred

A formulação matemática utilizada no modelo de Alfred é dada pela equação 3.

$$CPFT = 100 \left(\frac{Dp^q - Ds^q}{Dl^q - Ds^q} \right) \quad (\text{eq. 3})$$

Sendo:

CPFT = Porcentagem acumulada passante de finos;

Dp = Diâmetro da partícula analisada no empacotamento;

Ds = Diâmetro da menor partícula do empacotamento

Dl = Diâmetro da maior partícula do empacotamento;

q = Coeficiente de empacotamento.

Esta equação foi empregada para cada um dos diâmetros constatados na curva granulométrica dos agregados constituindo valores hipotéticos de empacotamento das partículas, adotando-se um valor de 0,23 para o coeficiente de empacotamento que está dentro do intervalo aconselhável pela literatura para concretos auto adensáveis, onde na prática se fez necessário o peneiramento para a obtenção da quantidade necessária de agregados retidos em cada série normal de peneiras, desta forma foi realizado o

empacotamento pelo modelo de Alfred utilizando a mistura com os agregados disponíveis no município de Palmas, constituída de brita 1 e areias média e fina, sendo levado em consideração adaptações que se fez necessário realizar para os modelos reais em cada proporção teórica.

Logo em seguida pôde-se obter o percentual de cada agregado fazendo-se porcentagens sobre porcentagens em cima do percentual retido, tendo como base as peneiras e os resultados obtidos de cada agregado em sua disposição granulométrica, onde nas peneiras de 19 a 6,3 mm ficou caracterizada como agregado graúdo, da 4,8 a 0,15 mm como agregado miúdo e o fundo como filer. Como mostra a tabela 2.

Tabela 2 – Emprego do método teórico de Alfred com o coeficiente igual à 0,23 para os agregados disponíveis na produção do CAA.

PENEIRA	PASSANTE - CPFT (%)	RETIDA (%)	RET. ACUM. TEÓRICO (%)	AGREGADO (%)	AGREGADO
19	100	0,00	0,00	0,00	GRAÚDO
12,5	87	12,80	12,80	40,95	
9,5	80	7,70	20,50	24,78	
6,3	69	10,70	31,10	34,28	
4,8	62	6,50	37,70	9,49	MIÚDO
2,4	47	14,90	52,60	21,66	
1,2	35	12,70	65,30	18,47	
0,6	24	10,80	76,20	15,75	
0,3	17	9,20	85,40	13,43	
0,15	7	7,90	93,30	11,45	
FUNDO	0	6,70	100,00	9,76	FILER

Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.3.1.1 Peneiramento

Foi realizado o peneiramento dos agregados com as peneiras disponíveis no laboratório de engenharia civil. Logo em seguida separou-se os materiais retidos em sacos com identificação do tamanho e a distribuição dos grãos. Como mostra a figura 16.

Figura 16 – Material separado de acordo com a peneira que ficou retido.



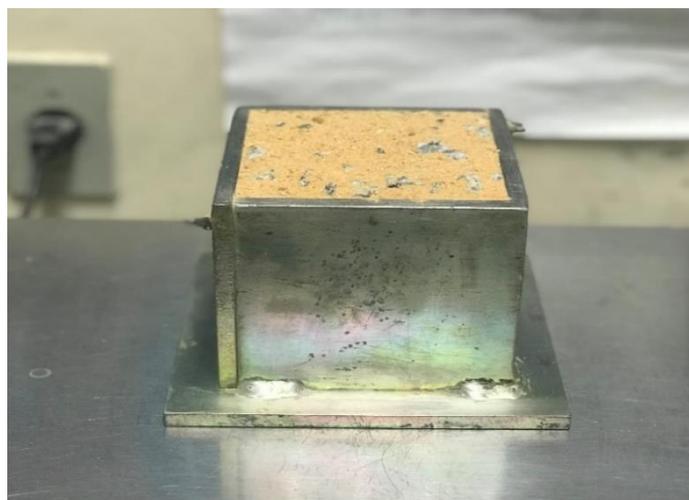
Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.3.2 Modelo de empacotamento proposto na dosagem de Tutikian

Tutikian ressalta que se deve definir a melhor parcela entre dois agregados para que se resulte em um menor índice de vazios. Para tanto o empacotamento ocorreu com agregados que compõem a mistura do concreto dois a dois, prevalecendo o começo por partículas que possuíam o maior diâmetro característico, no caso a brita 1 e a areia média, em seguida empacotou-se essa mistura com a areia fina, frisando que o cimento não foi empacotado.

As tabelas a seguir mostram os agregados sendo empacotados dois a dois, partindo dos que possuem maior diâmetro. As misturas foram testadas para proporções de 95% para a brita e 5% para a areia média, e diminuído este percentual de 10 em 10% para a brita e aumentando na mesma medida para areia média, até chegar na mistura com menor índice de vazios. O mesmo procedimento foi refeito para a mistura entre brita com areia média e a areia fina. A figura 17, mostra a realização do ensaio de compacidade.

Figura 17 – Ensaio de compactação.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

A figura acima apresenta o ensaio de compactação feito entre a brita e a areia para a determinação do menor índice de vazios para a mistura. Já a tabela 3 apresenta os valores da massa unitária compactada.

Tabela 3 – Determinação da massa unitária compactada da brita e areia.

Mistura da brita 1 + areia				
BRITA 1 (MATERIAL A) (%)	AREIA (MATERIAL B) (%)	MASSA DA MISTURA (Kg)	VOLUME DO RECIPIENTE (dm ³)	MASSA UNITÁRIA COMPACTADA (Kg/m ³)
95	5	2,23	1	2230
85	15	2,30	1	2300
75	25	2,47	1	2470
65	35	2,51	1	2510
55	45	2,63	1	2630
45	55	2,60	1	2600
35	65	2,50	1	2500
25	75	2,44	1	2440
15	85	2,29	1	2290
5	95	2,22	1	2220

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Em seguida calculou-se a massa específica da mistura, fazendo a multiplicação da porção de cada material por suas massas específicas e dividindo por 100. Obtendo-se um valor hipotético de massa específica para a mistura. Como representado na tabela 4. Depois calcula-se o índice de vazios para cada proporção.

Tabela 4 – Determinação da massa específica da mistura.

Mistura de brita 1 + areia				
MATERIAL A (%)	MATERIAL B (%)	MASSA ESPECÍFICA DO MATERIAL A (Kg/m ³)	MASSA ESPECÍFICA DO MATERIAL B (Kg/m ³)	MASSA ESPECÍFICA DA MISTURA (Kg/m ³)
95	5	2640	2680	2642
85	15	2640	2680	2646
75	25	2640	2680	2650
65	35	2640	2680	2654
55	45	2640	2680	2658
45	55	2640	2680	2662
35	65	2640	2680	2666
25	75	2640	2680	2670
15	85	2640	2680	2674
5	95	2640	2680	2678

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Após calcular o índice de vazios para cada proporção, o menor índice se deu para 55% brita 1 e 45% areia, proporcionando um índice de vazios de 1,1%. Em seguida sendo ajustado o traço para obter um teor de argamassa de 57%.

3.4 MÉTODO DE DOSAGEM EMPREGADO

Este trabalho está fundamentado pelo método de dosagem de concreto auto adensável definido por Tutikian e Dal Molin (2007), baseado nos parâmetros do método do IPT/EPUSP.

Foram confeccionados 72 corpos de prova (CP's) de dimensões de 10x20 de CAA com classe de espalhamento SF2 de 600 mm a 750 mm com idades predefinidas em 3,7 e 28 dias no laboratório do CEULP/ULBRA, para a realização de todos os ensaios

necessários foram produzidos 2 traços com F_{ck} de 30 MPa para análise proposta. O quantitativo de corpos de prova está presente na tabela 5.

Tabela 5 – Quantitativo de corpos de prova para cada traço.

Traços de CAA	Número de CP's para cada ensaio				
	Ensaio de compressão	Ensaio de tração	Ensaio de absorção	Ensaio de módulo de elasticidade	Total para cada traço
Traço empacotado pelo método de Alfred	18	6	6	6	36
Traço empacotado pelo método de Tutikian	18	6	6	6	36
Total	36	12	12	12	72

Fonte: Próprio Autor, 2019.

O primeiro traço foi dosado utilizando-se o método de empacotamento proposto por Alfred com concreto auto adensável produzido com areia natural sem qualquer tipo de adição natural, dividindo-se em traço empacotado pelo método de Alfred pobre, traço empacotado pelo método de Alfred intermediário e traço empacotado pelo método de Alfred rico.

Neste primeiro traço começou-se pelo traço experimental empacotado pelo método de Alfred intermediário com teor de argamassa resultando em 55%, que visualmente não proporcionou um cobrimento total das britas, optando-se por aumentar este teor para 57% que possibilitou visualmente uma melhor trabalhabilidade. Como apresenta a figura 18.

Figura 18 – Adição de areia empacotada para obter um teor de 57% de argamassa.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

A quantidade de água e o percentual de aditivo, foram obtidos experimentalmente, que no caso da água foi adicionado até chegar em uma trabalhabilidade com abatimento de 80mm +/-10mm resultando na relação água/cimento 0,54 para o traço intermediário. Já para o aditivo superplastificante, o seu teor foi estipulado em 0,5% sugerido como valor inicial pelo fabricante e aumentando em porcentagens de 0,1% até chegar em 0,7% da massa de cimento, atingindo uma fluidez ideal.

Já o segundo traço para um CAA com adição de sílica ativa utilizando os preceitos de empacotamento propostos no método de dosagem de Tutikian, dividindo-se em traço empacotado pelo método de Tutikian pobre, traço empacotado pelo método de Tutikian intermediário e traço empacotado pelo método de Tutikian rico .

Neste traço foram mantidas as relações água/cimento, o teor argamassa e o teor de aditivo do primeiro traço, se diferenciando no método de empacotamento adotado, que agora utilizará o proposto nas dosagens de Tutikian, além de adicionar sílica ativa em substituição da massa de cimento no teor de 12% determinada através de estudos ao artigo publicado pelo instituto brasileiro de concreto (IBRACON) “viabilidade técnica e econômica da produção do concreto auto adensável na cidade de Palmas-TO (RIBEIRO E LEAL,2011) ” que define este teor variando entre 10 e 12%.

O CAA produzido passou por ensaios no estado fresco e endurecido dispendo de 2 CP's para cada ensaio neste último estado, para que assim pudesse ser realizado um trabalho estatístico analisando e discutindo os resultados desse estudo. As tabelas 6 e 7

apresentam os traços unitários e suas composições obtidos nas dosagens pelo método de empacotamento de Alfred e as tabelas 9 e 10 no da dosagem de Tutikian.

Tabela 6 – Traço unitário método de empacotamento de Alfred.

Traço	Traço Unitário			Teor de Argamassa	a/c	Aditivo (%)	Sílica (%)
	Cimento	Areia	Brita				
Pobre	1	3,22	3,28	57	0,60	0,7	-
Intermediário	1	2,42	2,58	57	0,54	0,7	-
Rico	1	1,56	1,94	57	0,50	0,7	-

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 7 – Composição dos traços unitários método de empacotamento de Alfred.

COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS			
Empacotamento pelo método de Alfred	Traços		
	Pobre	Intermediário	Rico
Teor de Argamassa (%)	57	57	57
Consumo de Brita (kg)	20,00	20,00	20,00
Consumo de Areia (kg)	19,63	18,76	16,08
Consumo de Cimento (kg)	6,10	7,75	10,31
Consumo de Água (L)	3,65	4,20	5,15
Relação Água/Cimento	0,60	0,54	0,50
Consumo de Aditivo Superplastificante 0,7 % (g)	42,70	54,25	72,17

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A tabela 8 apresenta os traços com os valores das massas retidas em cada peneira, obtidas através de percentuais encontrados no modelo matemático de empacotamento.

Tabela 8 – Composição do empacotamento de Alfred por material real retido nas peneiras.

AGREGADO	PENEIRA	TRAÇOS (Kg)		
		POBRE	INTERM.	RICO
		1:3,22:3,28	1:2,42:2,58	1:1,56:1,94
GRAÚDO	12,5	8,19	8,19	8,19
	9,5	4,96	4,96	4,96
	6,3	6,86	6,86	6,86
MIÚDO	4,8	1,93	1,78	1,53
	2,4	4,25	4,06	3,48
	1,2	3,63	3,46	2,97
	0,6	3,09	2,95	2,53
	0,3	2,64	2,52	2,16
	0,15	2,25	2,15	1,84
FILER	FUNDO	1,92	1,83	1,57
	TOTAL	39,70	38,76	36,08

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 9 – Traço unitário método de empacotamento da dosagem de Tutikian.

Traço	Traço Unitário			Teor de Argamassa	a/c	Aditivo (%)	Sílica (%)
	Cimento	Areia	Brita				
Pobre	1	3,22	3,28	57	0,60	0,7	12
Intermediário	1	2,42	2,58	57	0,54	0,7	12
Rico	1	1,56	1,94	57	0,50	0,7	12

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Tabela 10 – Composição dos traços unitários método de empacotamento proposto na dosagem de Tutikian.

COMPOSIÇÃO DOS TRAÇOS			
Empacotamento pelo método de Tutikian	Traços		
	Pobre	Intermediário	Rico
Teor de Argamassa (%)	57	57	57
Consumo de Brita (kg)	20,00	20,00	20,00
Consumo de Areia fina (kg)	5,89	5,63	4,82
Consumo de Areia Média (kg)	13,74	13,13	11,26
Consumo de Cimento (kg)	5,36	6,82	9,07
Consumo de Água (L)	3,22	3,68	4,54
Relação Água/Cimento	0,60	0,54	0,50
Relação Água/Aglomerante	0,53	0,47	0,44
Consumo de Aditivo Superplastificante 0,7 % (g)	42,70	54,25	72,17
Consumo de Sílica Ativa 12% (g)	734,40	930,00	1237,20

Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.6 ENSAIOS UTILIZADOS

Foram realizados ensaios no laboratório de engenharia civil do CEULP/ULBRA, para determinar as características do CAA com o emprego do método de empacotamento proposto por Alfred em comparação ao utilizado por Tutikian com os efeitos da adição de sílica ativa.

3.6.1 Ensaios no estado fluido

Baseando-se nas normas pertinentes para cada ensaio, foram realizados ensaios após a produção do CAA no estado fresco para verificar as propriedades de autoadensabilidade dos traços do mesmo.

3.6.1.1 Teor de ar incorporado e massa específica

Foi executado o ensaio de massa específica do concreto no estado plástico e o teor de ar incorporado pelo método gravimétrico segundo a NBR 9833/87. Como mostra a figura 19.

Figura 19 – Ensaio de massa específica do concreto no estado plástico.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.6.1.2 Slump flow e Slump flow T50 test.

Ensaio fundamentado pela NBR 15823-2/20010- Concreto auto adensável - determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – método de Abrams. O *slump flow test* é utilizado para medir a eficiência do CAA de fluir livremente sem segregar. A medida de fluidez a ser alcançada do CAA é o diâmetro do círculo formado pelo concreto. Também permite que seja visualizado a olho nu, se o concreto está segregando ou não. O *slump flow T50 cm test* é uma versão modificada do *slump flow*, onde os métodos e os equipamentos são os mesmos. Para realização dos ensaios foram utilizados o tronco de cone, base do *slump flow*, cronometro, trena, concha côncava e espátula.

Neste trabalho foi utilizado como referência a classe SF2 para o *slump flow test*, onde seu diâmetro mínimo deverá ser de 660 milímetros segundo a NBR15823/2010, proporcionando maior fluidez para o CAA. A figura 20, apresenta o ensaio de *Slump Flow Test*.

Figura 20 – Ensaio de *Slump flow* e *Slump flow T50 test*.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.6.1.3 J-ring test

Foi realizado o ensaio *j-ring test* conforme a NBR 15823-3/2010 para medir a resistência a segregação do CAA. O instrumento é constituído por um anel com 16 barras de aço espaçadas de 25 a 50 milímetros. Comumente a abertura do anel é de 300 mm, a altura é de 100 mm.

Se fez necessário para a realização do ensaio acessórios como o tronco de cone e base do *Slump flow test*, anel metálico, além de um cronômetro, uma trena, uma espátula e uma concha côncava.

Após umedecer os equipamentos e coloca-los sobre uma base firme, levantou-se o tronco de cone verticalmente e cronometrou, até alcançar o círculo de 500 mm, medimos o espalhamento nas duas dimensões.

Figura 21 – Ensaio de *J-ring test*.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

3.6.2 Ensaio no estado endurecido

3.6.2.1 Resistência a compressão axial

2 corpos de provas (CP's) de dimensões 10x20 que foram moldados para cada idade e traço e submetidos a ensaios de resistência a compressão axial nas idades de 3,7 e 28 dias, conforme a NBR 5739/2007 ensaio de compressão a corpos de prova cilíndrico. Conforme mostra a figura 22.

Figura 22 – Ensaio de resistência a compressão axial.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

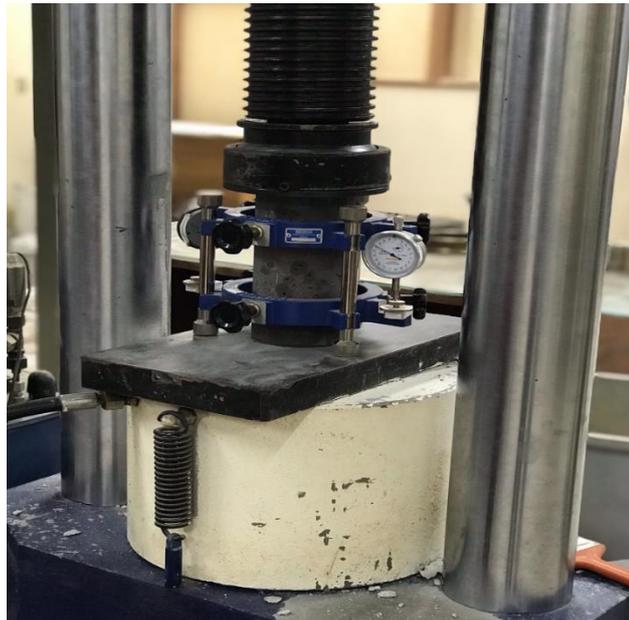
3.6.2.2 Absorção de água.

Foi realizado o ensaio de absorção de água segundo a NBR 9778/2009- Argamassas e concretos endurecidos -determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, o ensaio será realizado com a idade de 45 dias com 2 CP's, com a função de medir a porcentagem de absorção de água no concreto.

3.6.2.3 Modulo de elasticidade

O procedimento deste ensaio foi realizado segundo a NBR 8522/2008- Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação, sendo realizado na sua última idade de 28 dias com 2 CP's para cada traço. Conforme o representado na figura 23.

Figura 23 – Ensaio de modulo de elasticidade.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Após a realização dos ensaios práticos foram obtidos os valores teóricos de acordo com ABNT NBR 6118/2014, através da equação 11.

$$E_{ci} = \alpha E * 5600 \sqrt{Fck} \quad (\text{eq. 11})$$

Sendo:

E_{ci} = módulo de elasticidade;

αE = 1 para agregado graúdo granito;

Fck = resistência a compressão axial aos 28 dias.

3.6.2.4 Tração por compressão diametral

Foram confeccionados 2 corpos de prova cilíndricos para cada traço com dimensões de 15cm x 30 cm seguindo a NBR 7222/2011, onde verificou-se a resistência à tração dos concretos. Os ensaios para a determinação das resistências foram realizados no laboratório de engenharia civil do CEULP/ULBRA, em prensa na idade de 28 dias, a partir da moldagem. Conforme o representado na figura 24.

Figura 24 – Ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a produção dos traços de concreto foram necessárias as caracterizações dos agregados empregados, além da obtenção dos resultados do concreto em seu estado fluido e endurecido, todos os resultados obtidos serão discriminados a seguir.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os agregados caracterizados foram a brita 1 e areias naturais fina e grossa, que passaram por todos os ensaios de caracterização pertinentes as normas vigentes e a este trabalho.

4.1.1 Massa unitária e massa específica

Os resultados dos ensaios de massa unitária e massa específica estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Ensaios de massa unitária e massa específica dos agregados.

Agregados	Massa específica (kg/m ³)	Massa unitária (Kg/m ³)
Areia fina	2695	1480
Areia média	2680	1670
Brita 1	2640	1430

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Diante os valores obtidos nos ensaios as duas areias apresentam massas específicas próximas, mas com massa unitária da areia média sendo superior à da areia fina, que resulta em um menor índice de vazios na areia média em relação a fina, resultado que apontou uma melhor distribuição dos grãos para a areia média que foi utilizada em maior quantidade.

4.1.2 Material pulverulento

Os resultados dos ensaios de material pulverulento estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Ensaio de material pulverulento dos agregados.

Agregados	Pulverulento (%)	Matéria orgânica
Areia fina	1,05	Mais clara
Areia média	0,90	Mais clara
Brita 1	0,75	Mais clara

Fonte: Próprio Autor, 2019.

Os resultados obtidos de material pulverulento dos agregados resultaram em 1,05% para a areia fina, em 0,90% para a areia média e em 0,75% para a brita, o qual está dentro do limite determinado pela norma NBR 7211 e NBR NM 46. Areia fina por possuir maior quantidade de material pulverulento, contribuiu para a obtenção do fíler necessário para o empacotamento dos agregados.

4.1.3 Análise do ensaio de granulometria

As tabelas 13 a 15 mostram as análises granulométricas dos agregados estudados e os gráficos de 1 a 3 mostram as disposições das granulometrias dos mesmos.

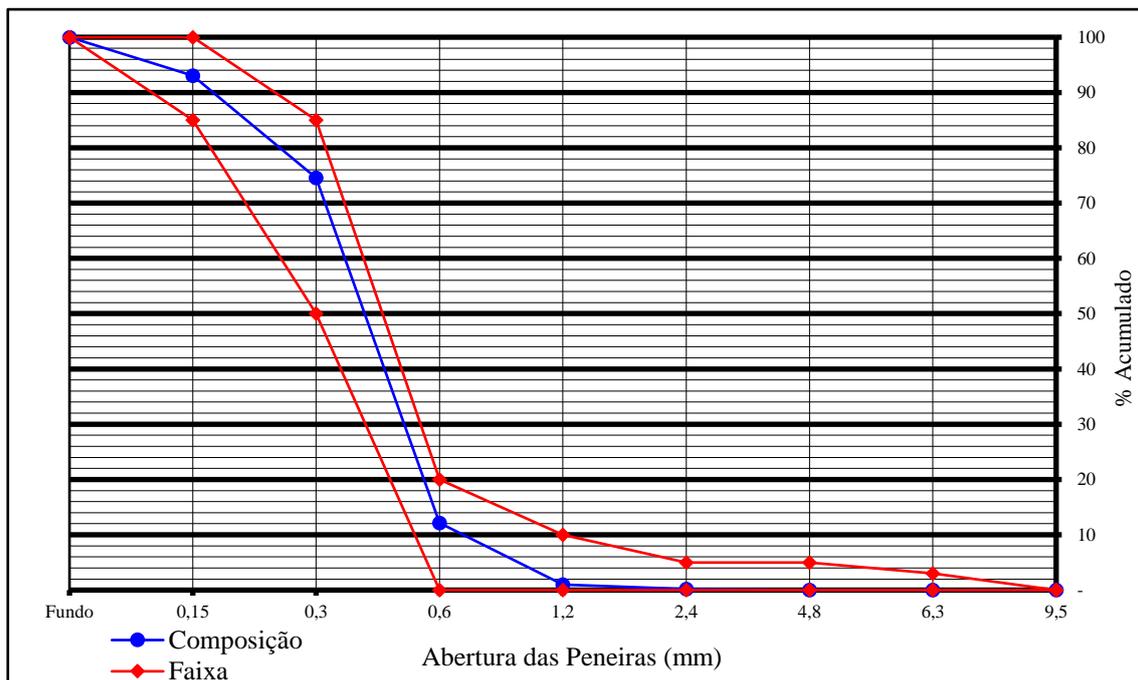
Tabela 13 – Análise da granulometria da areia fina.

GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO - AREIA FINA								
	1º Amostra			2º Amostra			Média	
Peneira	Peso retido (g)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)	Peso Retido (g)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)
4,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,36	1,0	0,2	0,2	1,1	0,2	0,2	0,2	0,2
1,16	4,4	0,9	1,1	3,5	0,7	0,9	0,8	1,0
0,600	55,2	11,0	12,1	56,0	11,2	12,1	11,1	12,1
0,300	314,3	62,9	75,0	310,4	62,1	74,2	62,5	74,6
0,150	91,3	18,3	93,2	93,0	18,6	92,8	18,4	93,0
Fundo	33,8	6,8	100,0	36,0	7,2	100,0	7,0	100,0
Total	500,0	100,0	75,0	500,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Diâmetro Máximo = 1,2mm					Módulo de Finura = 1,81			

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A areia fina apresentou um módulo de finura igual a 1,81 e diâmetro máximo característico igual a 1,2 mm, o resultado apontou a areia fina como a mais ideal para compor o empacotamento para as partículas de menor dimensão.

Gráfico 1 – Curva granulométrica da areia fina.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Nota-se que a areia fina comumente disponível no município de Palmas, utilizada para a confecção dos traços, se enquadra perfeitamente na faixa de zona utilizável. O que mostra uma areia bem graduada para sua categoria.

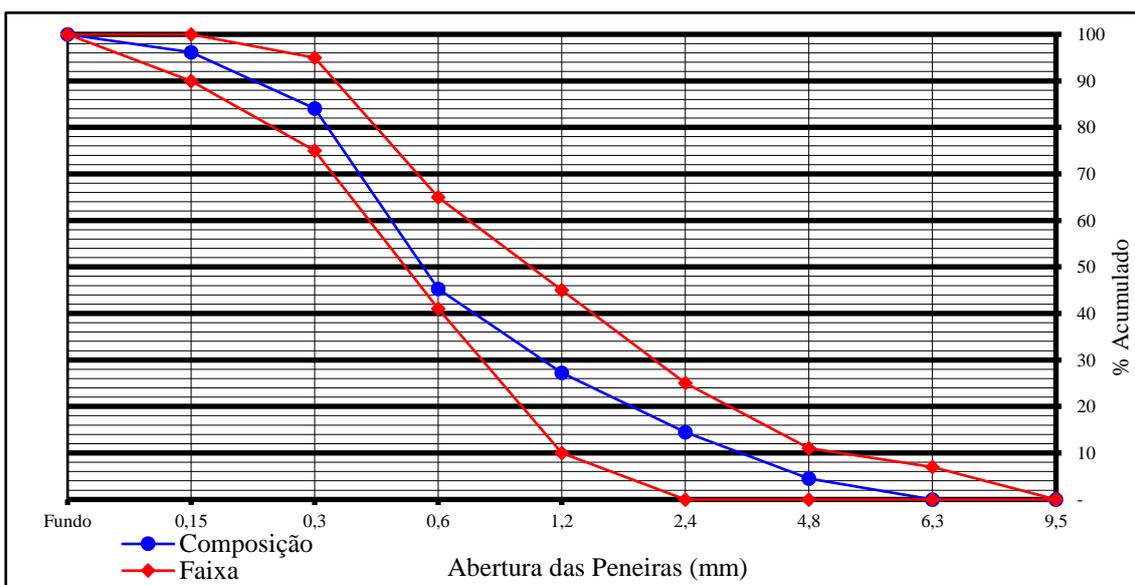
Tabela 14 – Análise da granulometria da areia média.

GRANULOMETRIA AGREGADO MIÚDO - AREIA MÉDIA								
Peneira	1º Amostra			2º Amostra			Média	
	Peso retido (g)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)	Peso retido (g)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)
4,75	24,2	4,8	4,8	20,9	4,2	4,2	4,5	4,5
2,36	51,8	10,4	15,2	48,0	9,6	13,8	10,0	14,5
1,16	65,9	13,2	28,4	61,2	12,2	26,0	12,7	27,2
0,600	91,5	18,3	46,7	89,1	17,8	43,8	18,1	45,3
0,300	192,0	38,4	85,1	196,0	39,2	83,0	38,8	84,1
0,150	57,5	11,5	96,6	63,1	12,6	95,7	12,1	96,1
Fundo	17,1	3,4	100,0	21,7	4,3	100,0	3,9	100,0
Total	500,0	100,0	100,0	500,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Diâmetro Máximo = 4,8mm				Módulo de Finura = 2,72				

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A areia média apresentou um módulo de finura igual a 2,72 e diâmetro máximo característico igual a 4,8 mm, resultado que mostra a areia média como a ponte de ligação entre os agregados de maior dimensão com os de menor no empacotamento das partículas.

Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia média.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Percebe-se que a areia média também comumente encontrada no município de Palmas, empregada para a confecção dos traços, igualmente se enquadra dentro da faixa de zona utilizável, e se mostra bem graduada.

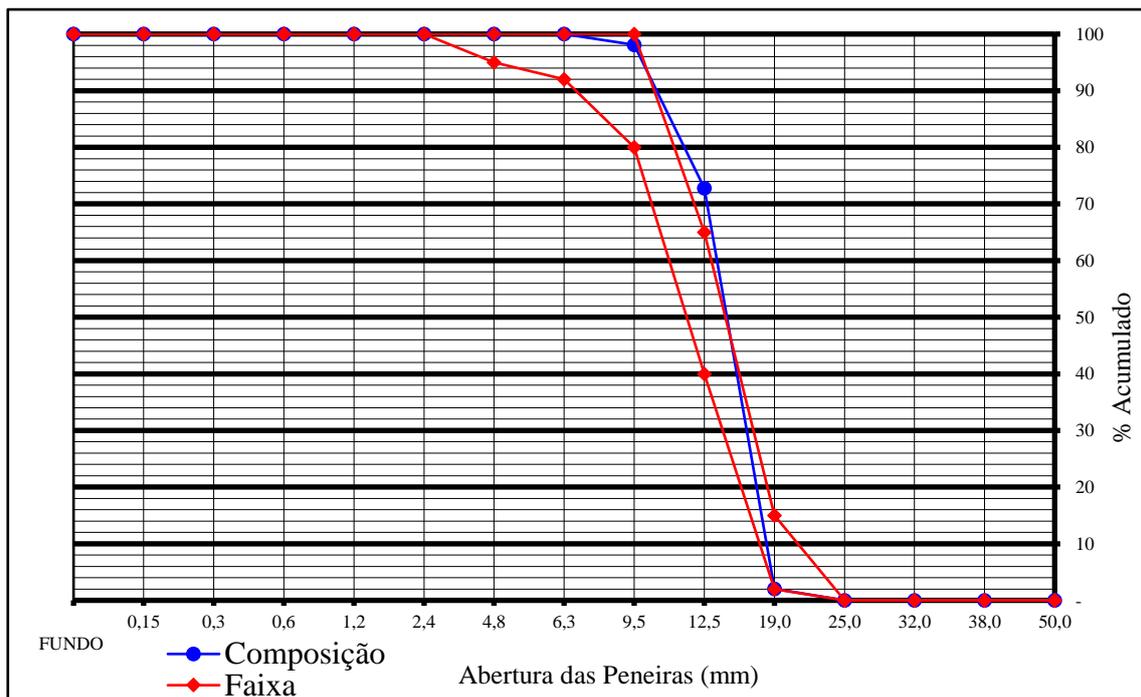
Tabela 15 – Análise da granulometria da brita.

GRANULOMETRIA AGREGADO GRAÚDO - BRITA								
	1º Amostra			2º Amostra			Média	
Peneira	Peso retido (g)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)	Peso retido (g)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)	Retida simples (%)	Retida acum. (%)
19	60,0	2,0	2,0	63,0	2,1	2,1	2,1	2,1
12,5	2127,0	70,9	72,9	2119,0	70,6	72,7	70,8	72,8
9,5	747,0	24,9	97,8	770,0	25,7	98,4	25,3	98,1
6,3	66,0	2,2	100,0	48,0	1,6	100,0	1,9	100,0
4,75	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0
2,36	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0
1,16	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0
0,6	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0
0,3	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Total	3000,0	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Diâmetro Máximo = 19mm					Módulo de Finura = 8,73			

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A brita apresentou um diâmetro máximo característico igual a 19 mm e um módulo de finura igual a 8,73, que se enquadra nas características recomendadas por Tutikian para compor o CAA.

Gráfico 3 – Curva granulométrica da brita.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

O agregado graúdo empregado para a confecção dos traços, foge em um ponto da faixa de zona utilizável, o que representa uma pequena descontinuidade em sua granulometria, o que não afetará no método de empacotamento de Alfred, devido a sua metodologia de separação dos grãos, mas podendo afetar o proposto por Tutikian, apesar de apresentar as características sugeridas pelo mesmo.

4.1.4 Análise da curva granulométrica do empacotamento no modelo de Alfred

A tabela 16 e o gráfico 4, apresentam resultados do modelo matemático de empacotamento de Alfred com dos dados teóricos e os reais encontrados.

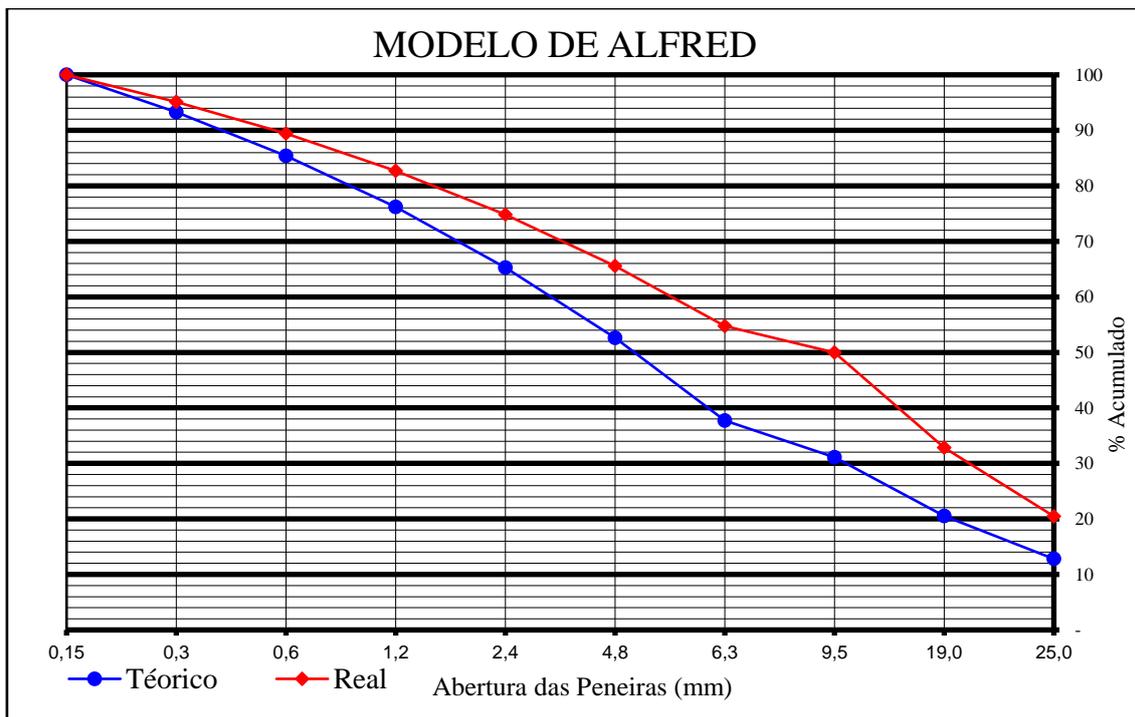
Tabela 16 – Análise da curva granulométrica dos agregados empacotados.

PENEIRA	RET. TEÓRICO (%)	RET. ACUM. TEÓRICO (%)	AGREGADO (%)	RET. REAL (%)	RET. ACUM. REAL (%)
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12,5	12,80	12,80	40,95	20,47	20,47
9,5	7,70	20,50	24,78	12,39	32,86
6,3	10,70	31,10	34,28	17,14	50,00
4,8	6,50	37,70	9,49	4,74	54,74
2,4	14,90	52,60	21,66	10,83	65,57
1,2	12,70	65,30	18,47	9,23	74,81
0,6	10,80	76,20	15,75	7,87	82,68
0,3	9,20	85,40	13,43	6,71	89,40
0,15	7,90	93,30	11,45	5,72	95,12
FUNDO	6,70	100,00	9,76	4,88	100,00

Fonte: Próprio Autor, 2019.

O modelo de Alfred levou em consideração um arranjo dos grãos teórico, já na prática os resultados geraram percentuais que variaram, decorrente dos ajustes que tiveram que ser feitos na aplicação do empacotamento através dos percentuais nos agregados disponíveis.

Gráfico 4 – Curva granulométrica do modelo matemático de Alfred.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

O gráfico acima apresenta as curvas granulométricas do modelo de Alfred, a curva teórica que seria a ideal, proporciona a melhor distribuição granulométrica teórica dos agregados, ocasionando em um menor índice de vazios para a mistura do CAA. Já a curva real se aproxima da teórica, mostrando uma distribuição contínua dos agregados, variando devido as características dos agregados disponíveis.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO FLUIDO DO CONCRETO

As tabelas 17 a 19 apresentam os resultados obtidos para os traços dosados com o método de empacotamento proposto por Alfred e o utilizado por Tutikian no estado fresco.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de massa específica do concreto no estado fluido.

Massa específica do concreto (kg/dm ³)		
Traços	Alfred	Tutikian
Pobre	2,15	2,10
Intermediário	2,24	2,18
Rico	2,37	2,30

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A tabela 17 mostra os resultados da massa específica de cada traço, e pode-se observar que os traços que utilizam o método de empacotamento de Alfred são mais densos, devido a sua composição granular ser melhor distribuída e proporcionar um menor índice de vazios, ocasionando em maiores valores de massa específica. Assim como os traços que possuem maior quantidade de cimento em sua composição.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios no estado fluido no traço empacotado pelo método de Alfred.

Empacotado pelo método de Alfred				
Traços	Ensaio no estado fluido			
	Auto adensável?	<i>Slump flow test</i> (mm)	T500 (s)	<i>J Ring Test</i> (mm)
Pobre	Sim	630	3,8	530
Intermediário	Sim	665	4,1	550
Rico	Sim	680	4,9	590

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A tabela 18 apresenta os resultados para os traços executados pelo método de empacotamento de Alfred, que tiveram resultados satisfatórios, dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1/2010, No ensaio de *slump flow test* o traço pobre foi classificado de acordo com a classe de espalhamento para CAA como SF1 (espalhamento entre 550 a 650 mm), e os traços intermediário e rico sendo classificados como SF2 (espalhamento entre 660 a 750 mm). Todos os traços se classificam no ensaio T500 como VS2 (maior que 2 segundos) e no ensaio *G-ring test* se classificam como

classe PL2 (armaduras com espaçamentos entre 60 e 80 mm). A figura 25, mostra o ensaio realizado no traço intermediário de Alfred.

Figura 25 – *Slump Flow test* traço intermediário de Alfred.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

O traço composto pelo empacotamento de Alfred se mostrou bem coeso e com boa trabalhabilidade, se aproximando dos resultados obtidos para o traço com sílica ativa em sua composição, o que demonstrou que o empacotamento proposto por Alfred, permitiu a obtenção de um CAA, sem que houvesse a necessidade de adição de finos.

A figura 26, apresenta o ensaio realizado para o traço pobre de Alfred com o percentual de aditivo de 0,7%.

Figura 26 – *Slump Flow test* traço pobre de Alfred para 0,7% de aditivo.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

No decorrer da produção do traço pobre, apresentou-se a necessidade de aumentar o teor de aditivo em 0,1% devido à não ter se atingido o status de autoadensabilidade para este traço, em virtude da grande quantidade de agregado miúdo empacotado, aumentado

a porcentagem de finos para o mesmo, por não ser possível obter os resultados satisfatórios obedecendo os padrões dos traços anteriores, o teor de aditivo foi elevado para 0,8% para poder se alcançar o espalhamento de um CAA. Conforme representa a figura 27.

Figura 27 – *Slump Flow test* traço pobre de Alfred para 0,8% de aditivo.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Após o acréscimo de aditivo, o traço pobre conseguiu o espalhamento para ser considerado CAA e ser classificado como classe SF1, sendo possível utiliza-lo em estruturas com baixa taxa de armadura. Apesar de não ter se classificado como classe de espalhamento SF2, proposto para a realização deste trabalho, optou-se por não adicionar mais aditivo para que não fossem distorcidos os resultados, visto que se trata de um trabalho científico comparativo.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios no estado fluido no traço empacotado pelo método de Tutikian.

Empacotado pelo método de Tutikian				
Traços	Ensaio no estado fluido			
	Auto adensável?	<i>Slump flow test</i> (mm)	T500 (s)	<i>J Ring Test</i> (mm)
Pobre	Sim	660	3,2	560
Intermediário	Sim	670	3,7	575
Rico	Sim	685	4,3	600

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios no estado fluido dos traços executados pelo método de empacotamento utilizado por Tutikian, que também se enquadram nos limites estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1/2010, com todos os traços

sendo classificados como SF2 no *slump flow test*, VS2 no T500 e PL2 no *G-ring test*. A figura 28 mostra o ensaio realizado para o traço intermediário de Tutikian.

Figura 28 – *Slump Flow test* traço intermediário de Tutikian.

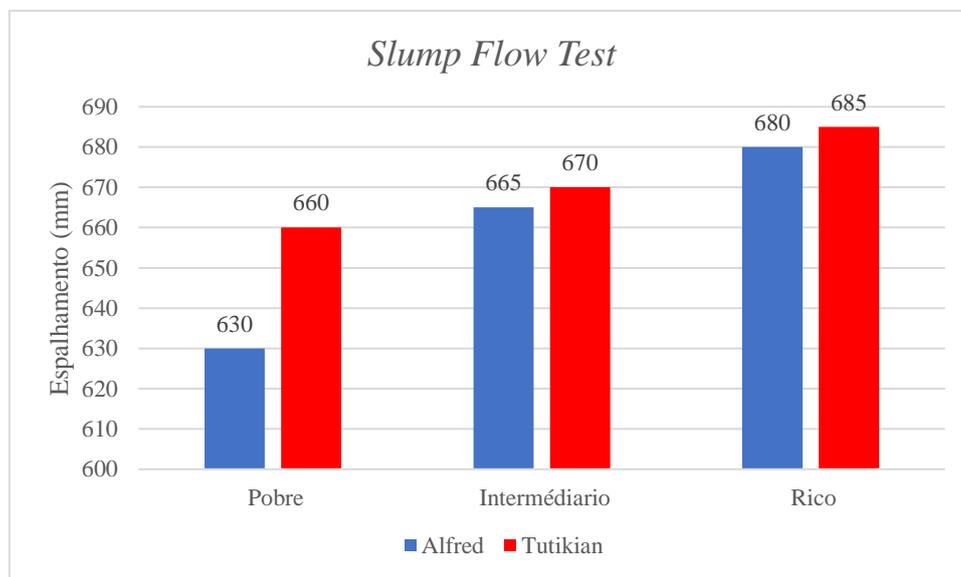


Fonte: Próprio Autor, 2019.

O traço com método de empacotamento utilizado por Tutikian, apresentou uma boa fluidez e devido a adição de sílica ativa se mostrou com ótima coesão e sem segregação, mantendo espalhamento com formato arredondado.

O gráfico 5 mostra os resultados dos espalhamentos dos traços empacotados pelos métodos de Alfred e Tutikian.

Gráfico 5 – Comparação dos resultados dos ensaios de *slump flow test*.

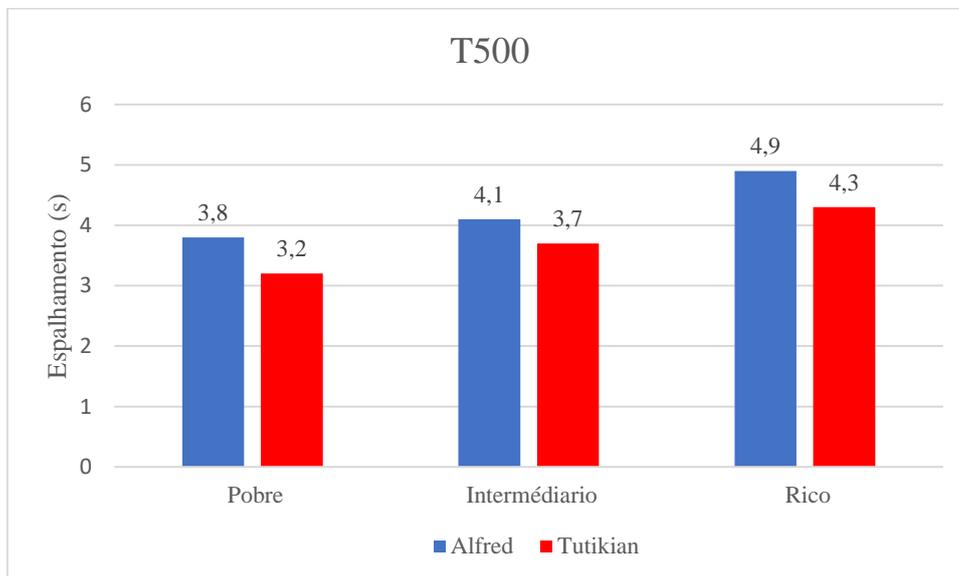


Fonte: Próprio Autor, 2019.

O gráfico 5 mostra que o de Alfred se mostrou mais coeso e com menor espalhamento, devido a uma maior concentração de finos em sua composição. Já o de Tutikian apresentou uma melhor fluidez.

No gráfico 6 são apresentados os resultados do ensaio T500 dos dois modelos de empacotamento.

Gráfico 6 – Comparação dos resultados dos ensaios de T500.

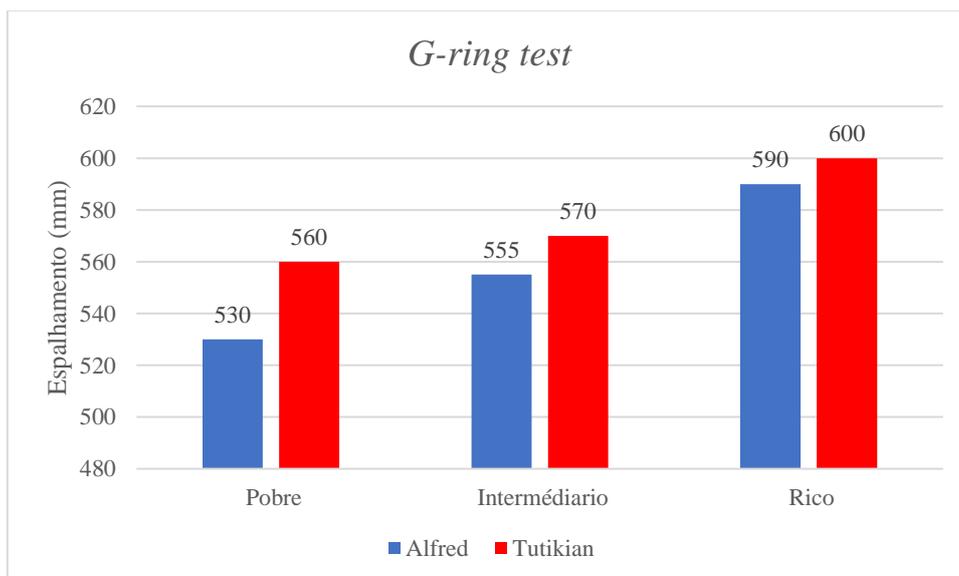


Fonte: Próprio Autor, 2019.

O gráfico 6 mostra que os traços empacotados pelo método de Alfred se apresentaram com um maior tempo de espalhamento, devido a sua estrutura granular mais compacta.

O gráfico 7 apresenta a comparação dos resultados dos ensaios do *G-ring test*.

Gráfico 7 – Comparação dos resultados dos ensaios de *G-ring test*.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Os resultados do gráfico 7, mostram como o abordado anteriormente, que os traços empacotados pelo método de Tutikian, apresentam uma melhor fluidez em comparação ao método de Alfred, que apresenta um esqueleto granular mais compacto.

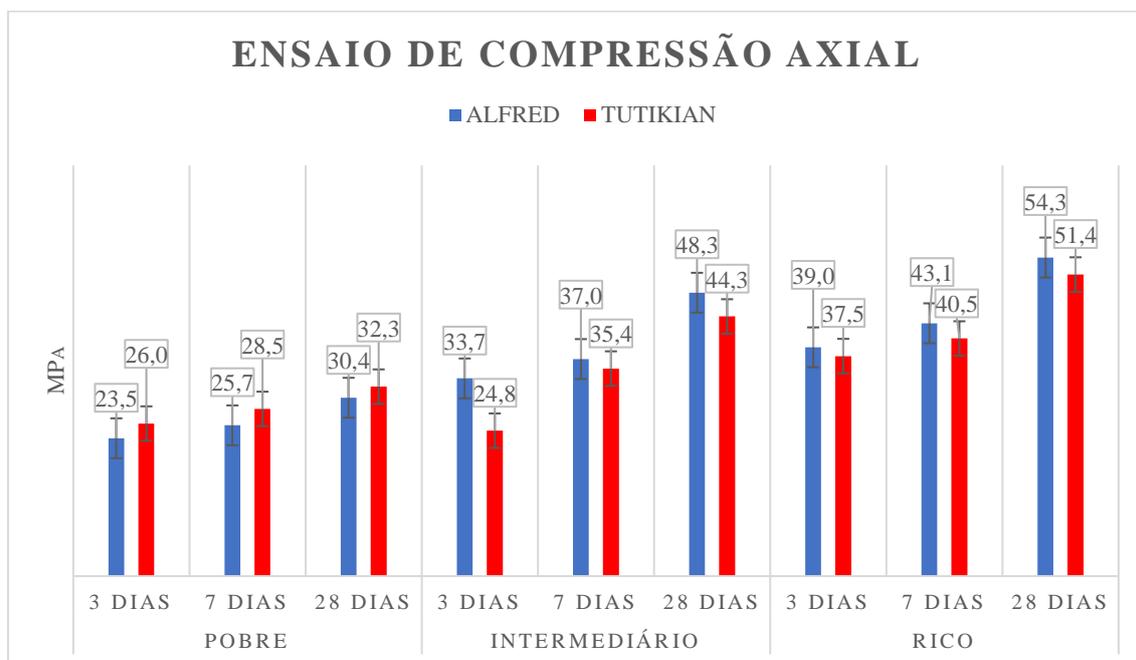
4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

Foram realizados os ensaios no estado endurecido do concreto para os traços dosados utilizando os dois modelos de empacotamento, conforme os tópicos a seguir.

4.3.1 Ensaio de compressão

Os resultados de resistência a compressão axial dos modelos de empacotamento realizados nos corpos de provas dos traços segundo a NBR 5739/2007, estão apresentados de forma comparativa no gráfico 8.

Gráfico 8 – Resultados dos ensaios a compressão axial dos traços.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

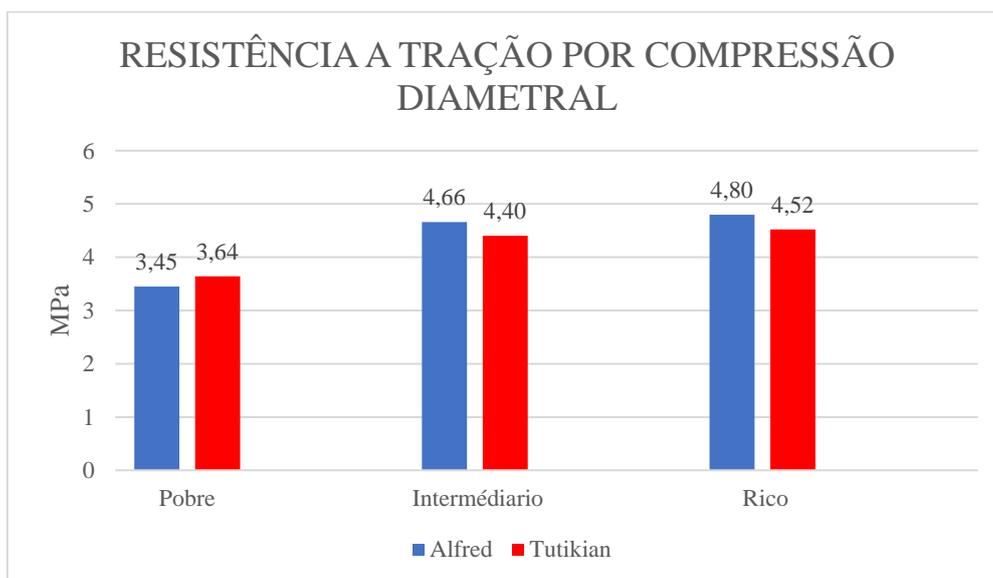
Diante dos resultados apresentados, percebe-se que para todos os traços, os dois modelos de empacotamento apresentaram valores de resistência a compressão axial próximos, com pequena superioridade do empacotado por Alfred, mesmo o de Tutikian tendo sido adicionado sílica em sua composição, que proporciona um maior ganho de resistência devido a suas propriedades pozolânicas. Nota-se que para o traço intermediário, há uma maior diferença entre as resistências para a idade de 3 dias, variando em 35,89%, que pode ter ocorrido devido a erros de moldagem ou erros na execução dos ensaios, visto que para as outras idades apresentam ganho de resistência

próximos ao outro modelo. Pode-se perceber também que para os traços pobres, a uma inversão, onde os traços empacotados pelo modelo de Tutikian apresentam uma pequena superioridade nos resultados dos ensaios de compressão axial. Como os traços pobres levam em sua composição maior quantidade de areia, ocasionou a alteração dos resultados, uma vez que os traços empacotados pelo método utilizado na dosagem de Tutikian obtiveram percentuais maiores para a utilização de areia fina, além de serem compostos com sílica ativa. De forma que para este modelo de empacotamento os traços pobres proporcionaram um menor índice de vazios e consequentemente valores superiores para suas resistências.

4.3.2 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral

Está apresentado no gráfico 9 os resultados dos ensaios de resistência de tração por compressão diametral comparando os dados obtidos pelos modelos de empacotamento de Alfred e Tutikian.

Gráfico 9 – Resultados das resistências a tração por compressão diametral.



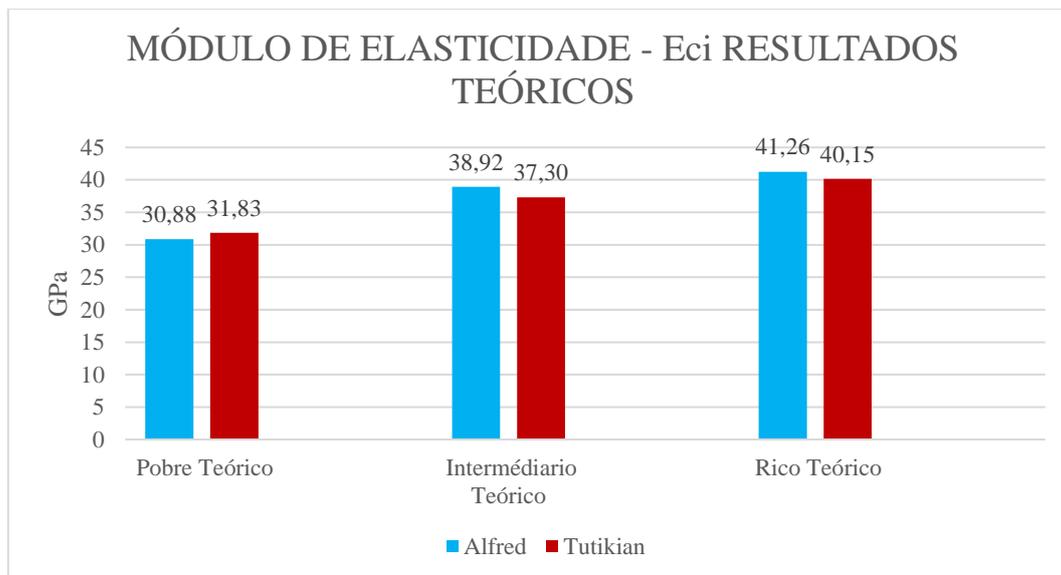
Fonte: Próprio Autor, 2019.

Os resultados obtidos mostram que traços seguem os mesmos padrões dos resultados dos ensaios de compressão axial onde os traços variam muito pouco entre suas resistências.

4.3.3 Ensaio do módulo de elasticidade

De acordo com ABNT NBR 6118/2014, foram obtidos resultados para os módulos de elasticidade teórico e os resultados reais encontrados nos ensaios. Conforme mostram os gráficos 10 e 11.

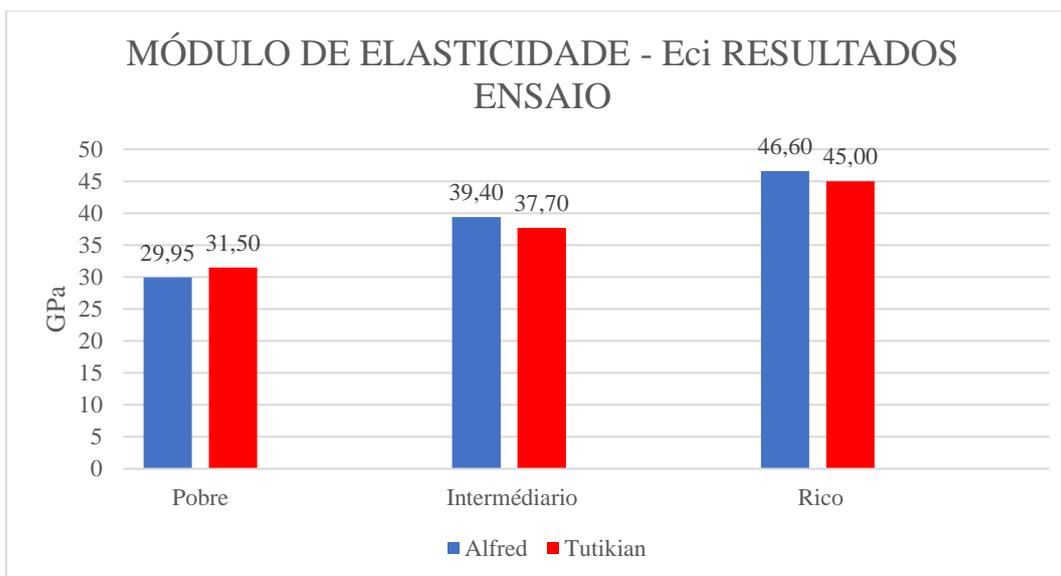
Gráfico 10 – Resultados dos módulos de elasticidade teórico.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Como os resultados teóricos levam em consideração o f_{ck} obtidos nos ensaios de compressão axial, os padrões seguem os mesmos efeitos.

Gráfico 11 – Resultados dos módulos de elasticidade ensaio.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

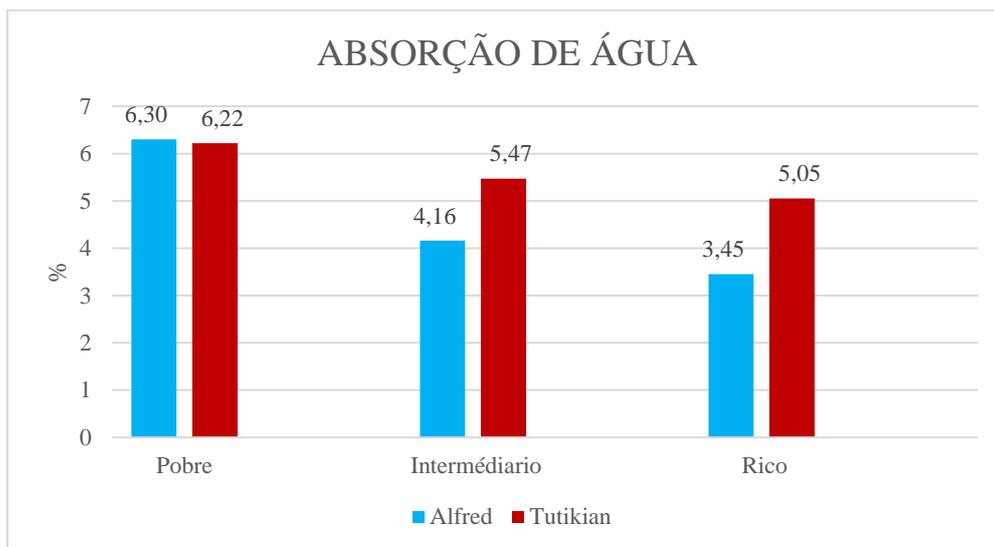
Os resultados obtidos mostram que os traços pobres são os únicos que apresentam valores abaixo dos sugeridos pela NBR6118/2014, já os demais se mostraram superiores,

o que aponta que o teor de cimento nos traços, está diretamente relacionado ao valor do módulo de elasticidade.

4.3.4 Ensaio de absorção de água e índice de vazios

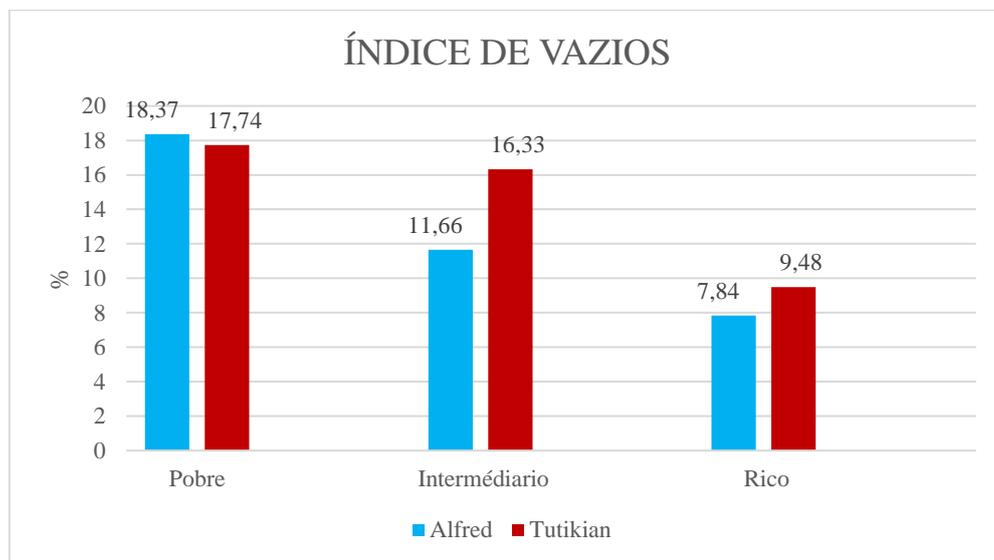
Conforme preconiza a NBR 9778/05, os gráficos 12 e 13 mostram os resultados da absorção de água por imersão e dos índices de vazios.

Gráfico 12 – Resultados dos ensaios de absorção de água.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Gráfico 13 – Resultados dos ensaios de índice de vazios.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Após a análise dos resultados, pode-se observar que os traços produzidos com o método de empacotamento proposto por Alfred, exceto para os traços pobres que reafirma a análise feita para os resultados de resistência a compressão axial, apresentaram menores

valores de absorções de água e conseqüentemente menores índices de vazios, devido a sua composição granular ser mais contínua e por possuir finos suficientes para compor o efeito fíler. Dentre os resultados nota-se também que para os traços como menores teores de cimento, os valores de absorção de água e o índice de vazios são maiores para os dois modelos de empacotamento, possuindo mais poros, e com resultados de teor de absorção maiores que 6,2% para os traços pobres, o que classifica como concretos deficientes segundo a NBR 9778/05.

4.4 DIAGRAMAS DE DOSAGENS

A partir dos resultados encontrados para cada método de empacotamento estudado, foi possível a elaboração dos diagramas de dosagem representados nas figuras 29 e 30, que constituem o desempenho dos traços estudados. Os traços foram efetuados de modo que os concretos fossem classificados como sendo da mesma família, possuindo as mesmas relações água/cimento e os mesmos teores de argamassa e aditivo.

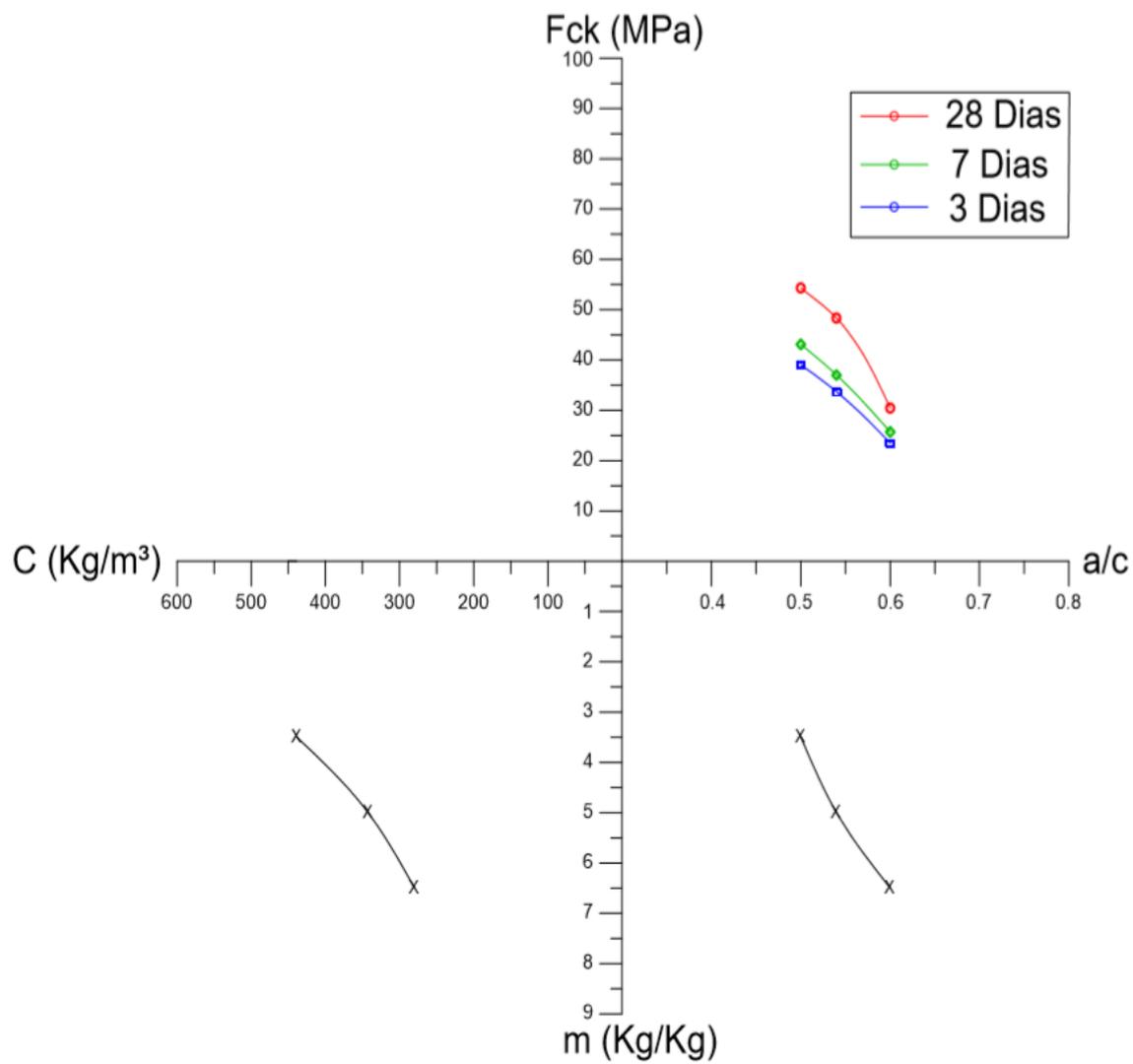
Por meio das leis de comportamento da tecnologia do concreto, os gráficos podem ser utilizados para a produção de um traço na resistência desejada. De forma que no primeiro quadrante utiliza-se a lei de Abrams, onde no eixo (y) se escolhe a resistência desejada para o intervalo estudado, e pela curva encontra-se a relação água cimento (a/c) no eixo (x).

De posse do valor obtido de a/c no eixo (x), pode-se partir para o segundo quadrante formulado pela lei de Lyse, que apresentará a porção de agregado (m) presente no eixo (y).

Já no terceiro quadrante formulado pela lei de Priskulik e Kirilos, com o valor de (m) encontrado no eixo (y), pode-se obter o consumo de cimento por m^3 (C) presente no eixo (x).

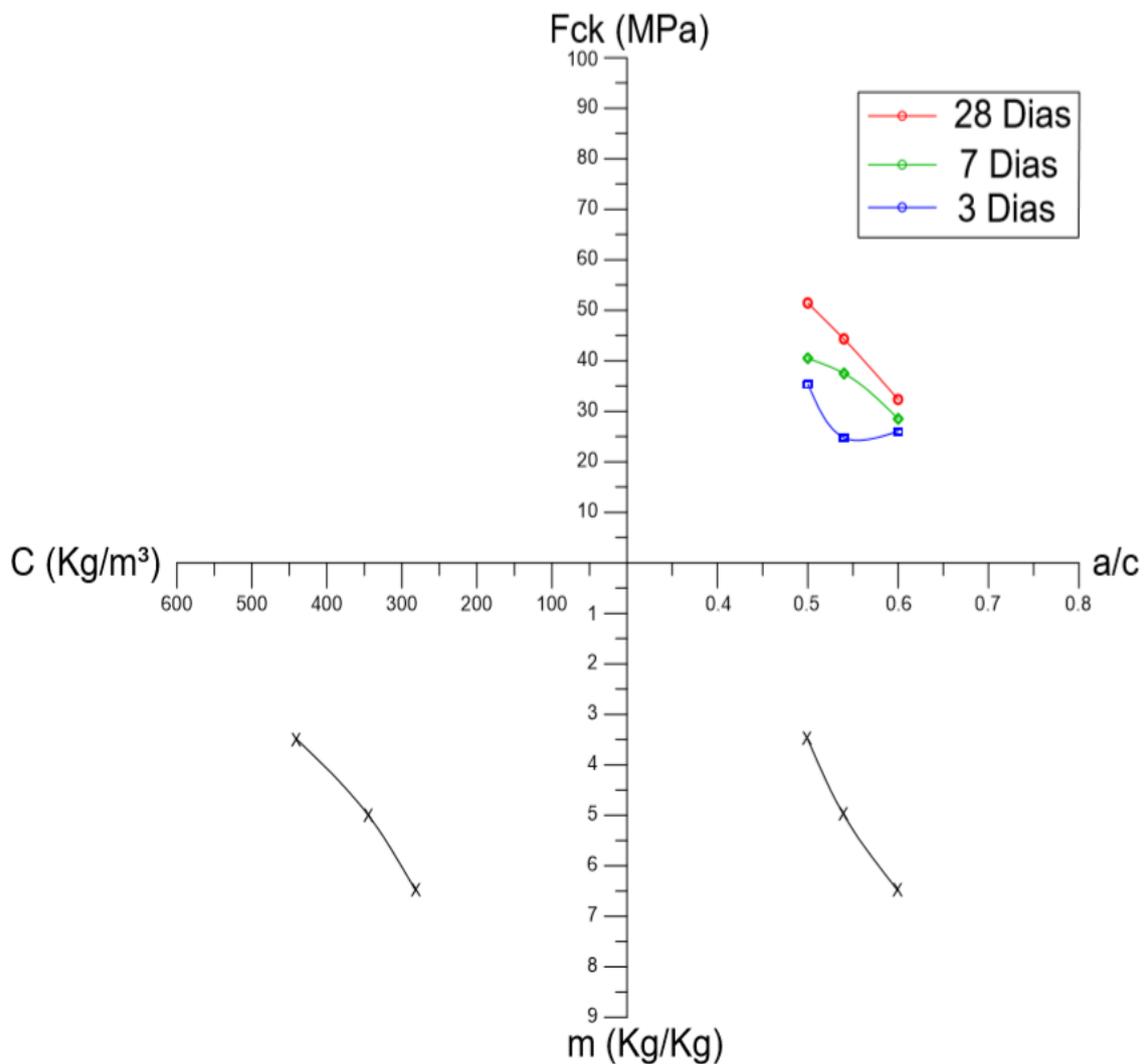
Com base nessas informações, é possível dosar concretos com a resistência pretendida com os materiais estudados presentes na região.

Figura 29 – Diagrama de dosagem do traço de CAA empacotado pelo método de Alfred.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Figura 30 – Diagrama de dosagem do traço de CAA empacotado pelo método de Tutikian.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Os diagramas de dosagem foram confeccionados e avaliados para CAA, sendo possível a partir deles dosar qualquer concreto com F_{ck} variando de 30 a 50 MPa.

4.5 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONOMICA DO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO PROPOSTO

O concreto auto adensável propicia vantagens para construção civil devido sua rapidez de execução, porém o seu custo elevado de produção, por ter um maior consumo de cimento e necessitar de adições de finos como a sílica ativa, dificulta sua maior difusão no mercado. Portanto, a busca por novos materiais, tecnologias e métodos, pode ocasionar na redução de seu custo, e com isso é possível existir competitividade e concorrência frente ao concreto convencional.

Para estabelecer a análise da viabilidade econômica do método de empacotamento proposto por Alfred através da redução do custo, otimizando o consumo de cimento e eliminando as adições minerais na produção do CAA, foi analisado por meio da produção de traços com o emprego do modelo de empacotamento do mesmo, quantificando os materiais utilizados em cada um deles e comparando-os com um traço referência de CAA que utilizou o modelo de empacotamento proposto nas dosagens de Tutikian com a adição de sílica ativa, para que assim fosse possível qualificar como positiva ou não o uso do método para o preço final do CAA. Os preços foram analisados tendo como referência a composição do banco de dados do SINAPI/2019, que estão representados na tabela 20.

Tabela 20 – Preços unitários dos materiais utilizados para a produção dos traços estudados.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	TIPO	REFERÊNCIA	UNIDADE	PREÇO
1379	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II	MATERIAL	09/2019	Kg	R\$ 0,56
4721	PEDRA BRITADA N. 1 (9,5 a 19 MM) POSTO PEDREIRA/FORNECEDOR, SEM FRETE	MATERIAL	09/2019	M ³	R\$ 70,82
366	AREIA FINA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	MATERIAL	09/2019	M ³	R\$ 70,00
370	AREIA FINA - POSTO JAZIDA/FORNECEDOR (RETIRADO NA JAZIDA, SEM TRANSPORTE)	MATERIAL	09/2019	M ³	R\$ 70,00
13408	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE DE PEGA NORMAL PARA CONCRETO	MATERIAL	09/2019	Kg	R\$ 13,09
26026	SÍLICA ATIVA PARA ADICAO EM CONCRETO E ARGAMASSA	MATERIAL	09/2019	Kg	R\$ 3,43

Fonte: SINAPI, 2019.

Segundo o banco de dados do SINAPI/2019, existe a composição de peneiramento de areia com peneira elétrica (AF_11/2015), no valor de R\$ 19,72 reais para cada m³. Para a real utilização do método de empacotamento proposto por Alfred, é necessário a troca de malhas das peneiras para atender todas as granulometrias, inclusive as da brita. O custo adicional dessas malhas e o tempo de mão de obra para troca das mesmas, não será levado em consideração para a composição de preços deste trabalho, visto que os custos seriam apenas esporádicos.

A partir dos dados obtidos foram calculados os custos de produção de cada traço para análise do custo/benefício da utilização do método de empacotamento proposto. Conforme mostram a tabela 21 e o gráfico 14.

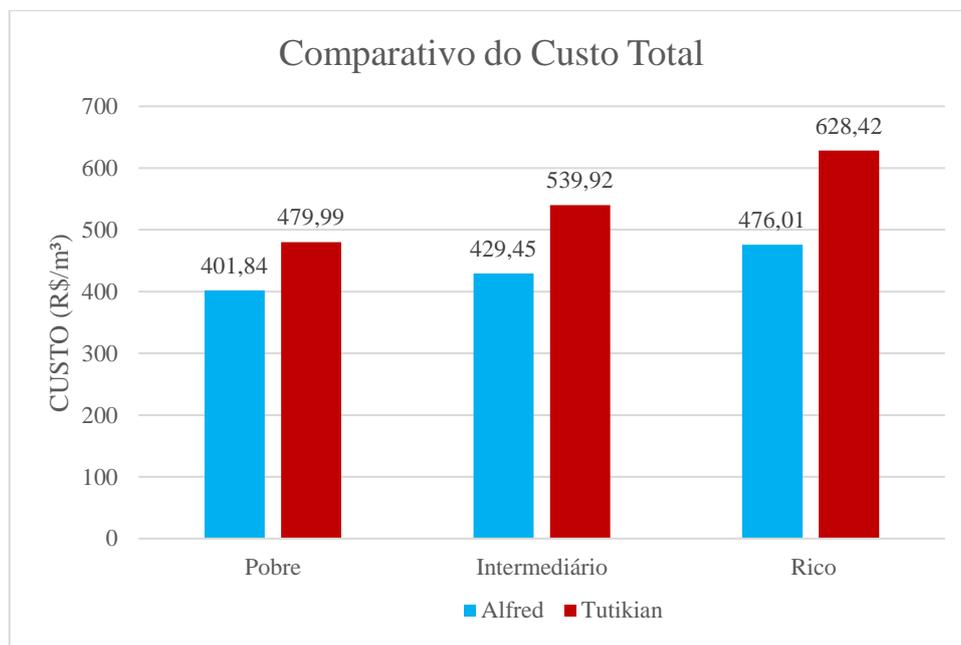
Tabela 21 – Custo unitário de produção dos concretos analisados na idade de 28 dias.

Traço	Fck (Mpa)	Consumo dos Materiais (Kg/m ³)						Custo Peneiramento (R\$/m ³)	Custo unitário do material (R\$/m ³)
		Aditivo	Cimento	Areia	Brita	Água	Sílica		
pobre Alfred	30,4	2,24	279,81	901,00	917,78	167,89	-	35,87	350,29
Interm. Alfred	48,3	2,40	342,46	828,75	883,54	184,93	-	33,77	377,90
Rico Alfred	54,3	3,07	438,35	683,83	850,41	219,18	-	30,26	424,46
pobre Tutikian	32,3	1,97	281,46	906,30	923,19	168,88	33,78	-	428,44
Interm. Tutikian	44,3	2,41	344,78	834,36	889,53	186,18	41,37	-	488,37
Rico Tutikian	51,4	3,08	440,07	686,50	853,73	220,03	52,81	-	576,87

Fonte: Próprio Autor, 2019.

A partir do custo unitário dos materiais para o metro cúbico (m³) do concreto, e com o valor da mão de obra obtido no valor de R\$ 51,55 reais para cada m³ segundo o SINAPI/2019, pode-se obter o custo total para a produção do concreto.

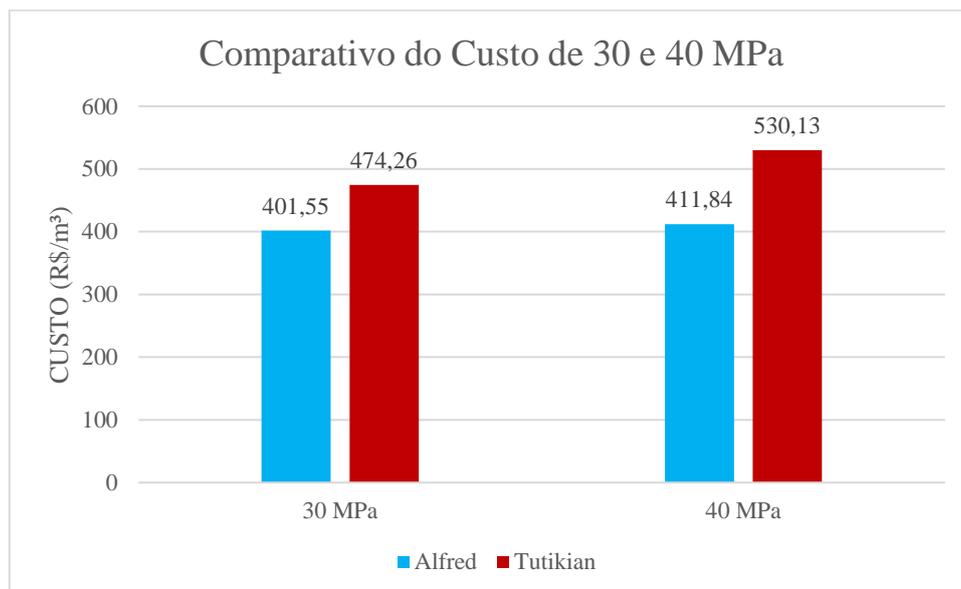
Gráfico 14 – Comparativo do custo total para a produção dos traços.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

A partir das curvas de dosagem do tópico anterior, é possível chegar nos custos de produção para as resistências comercializadas no mercado, foram feitas as composições para as resistências de 30 e 40 MPa, afim de avaliar de forma mais clara os resultados encontrados, conforme mostra o gráfico 15.

Gráfico 15 – Comparativo do custo total para a produção dos traços com resistências de 30 e 40 MPa.



Fonte: Próprio Autor, 2019.

Diante os resultados é possível analisar que os traços empacotados pelo método de Alfred, conseguiram uma redução em relação ao traço empacotado pelo método de Tutikian, visto que a não utilização da sílica ativa e a redução do consumo de cimento

para esse, gerou a redução dos custos na ordem de 18,11% para o concreto de 30 MPa e de 28,72% para o concreto de 40 MPa. Desta forma, a utilização do método de empacotamento proposto por Alfred se mostrou eficiente para otimizar o preço final da produção de um CAA, ainda mais caro do que um CCV, que segundo o SINAPI/2019, custa em torno de R\$ 307,76 e R\$ 335,21 reais para as resistências analisadas respectivamente. Ressalta-se que os valores são para a composição de fabricação dos concretos e não de aplicação, podendo o CAA empacotado pelo método proposto ser mais viável economicamente quando comparado a preço global, onde aplicação de um CCV se torna mais cara, visto que os custos de produção do CAA empacotado foram otimizados de forma representativa.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises sobre os resultados obtidos neste trabalho, o qual tem como principal objetivo comparar a influência dos métodos de empacotamento de Alfred com o utilizado na dosagem de Tutikian para um CAA, foi constatado que apesar deste último, utilizar sílica ativa na composição de seus traços, o modelo de Alfred denotou valores superiores para os traços intermediário e rico quanto aos ensaios no estado endurecido do concreto aos 28 dias, enquanto o modelo de Tutikian apresentou melhor trabalhabilidade, ambos apresentaram boa coesão e não apresentaram sinais de segregação e exsudação.

O método de Alfred, principalmente no traço pobre, onde teve-se que aumentar em 0,1% o teor de aditivo, para se atender o espalhamento estabelecido inicialmente, demanda um pequeno aumento na utilização do aditivo, devido a sua composição granular mais compacta, que interfere na fluidez da mistura.

Os resultados positivos do modelo de Alfred, está relacionado a uma eficiente distribuição granulométrica para o CAA, onde levou-se em consideração a quantidade de finos para atender este tipo de concreto sem que houvesse a necessidade de fazer adições. Mesmo os traços pobres apresentando valores inferiores comparados com o modelo utilizado por Tutikian, conseguiram atingir as características de autodensabilidade sem apresentar exsudação. Ressalta-se que a obtenção da parcela de finos necessária, mostrou-se dificultosa, devido à escassez de areias com a granulometria caracterizada como filer, o que na prática pode se mostrar como um obstáculo para aplicação do método.

Diante do exposto, conclui-se que o conceito de empacotamento das partículas para CAA, compreende ampla influência nas propriedades dos estados do concreto. Verificou-se que o modelo de Alfred por possuir uma seleção mais precisa da composição granulométrica dos agregados otimiza o consumo de cimento em cerca de 1% em comparação ao modelo de Tutikian. O que representa um rendimento para traços dosados utilizando esse método de empacotamento, uma vez que é possível aumentar a resistência, mantendo-se o consumo de cimento.

Portanto, conclui-se que o modelo de empacotamento proposto por Alfred aplicado para a confecção de CAA, garante a extinção do uso de adições minerais e otimiza os custos de produção do mesmo, sendo sua aplicação viável economicamente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a análise dos dados obtidos neste trabalho, pode-se explorar alguns pontos que não foram abordados, visto que o tema abre a sugestão para vários estudos.

Como analisar a viabilidade de aplicação do método de empacotamento proposto por Alfred para concretos convencionais afim de otimizar o consumo de cimento.

Aplicar o método para outros tipos de agregados com diferentes tipos de areia da região (grossa, média e fina) e agregados graúdos de todas as dimensões (seixo ou brita), para analisar o comportamento dos traços no estado fluido e no estado endurecido.

Fazer a comparação dos resultados de um traço de concreto, seja ele auto adensável ou convencional, com a utilização do método de empacotamento proposto por Alfred com um traço sem nenhum tipo de empacotamento.

Verificar a aplicabilidade do método com agregados artificiais fazendo a substituição parcial ou integral, para compor a parcela de material fino.

6 REFERÊNCIAS

- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção**. São Paulo: Pini, 2012. 459 p.
- ARAÚJO, J. G. A. **Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedreira nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto-adensável**. 2007. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15900-1: **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 – **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.
- BARBOSA, M. P.; **Concreto fresco: influência do empacotamento de partículas e outros fatores**. Introdução à ciência dos materiais aplicados à engenharia civil, UNESP Ilha Solteira, 2008.
- 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.
- COUTINHO, R.S.C. **Estudo de concreto auto adensável com agregado miúdo reciclado de concreto**. 2017. 93p. Curso de Engenharia Civil, ULBRA, Palmas, 2017.

DE LARRARD, F.; **Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. Modern Concrete Technology Series**, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999, 421pp.

GEYER, A. **Utilização do concreto auto adensável em estruturas de edifícios com custos**

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R. **Métodos de dosagem de concreto auto adensável**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2009, pg. 165.

Gomes, P. C. C.; Barros, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1.ed. São Paulo: PINI, 2009. 144p.

HARTMANN, Carine et al. **Aditivos químicos para concretos e cimentos**. In: **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Ed. G. C. ISAIA. São Paulo: IBRACON. 2002. vol 1.

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

LEAL, J.C.L. **Análise do desempenho dos concretos auto adensáveis utilizando diferentes tipos de agregados graúdos encontrados na região de Palmas-TO**. 2009. 89p. Curso de Engenharia Civil, ULBRA, Palmas, 2009.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, D.C.M. **Análise da influência da utilização do pó de granito nas propriedades do concreto auto adensável**. 2018. 47p. Curso de Engenharia Civil, ULBRA, Palmas, 2018.

- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2a ed. rev. São Paulo: Pini, 1997.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J, **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre, Editora Bookman – 2ª edição, 2013. 448 p.
- OLIVEIRA, C. O.; **Análise das Propriedades Reológicas de Materiais Cimentícios Associando o Conceito de Empacotamento de Partícula**. 2013. 142 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação Em engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia –UNESP –Ilha Solteira, 2013.
- OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.
- PETRUCCI, E. G. R., **Concreto de cimento Portland**. São Paulo, 1998.
- SOTOMAIOR, M.J.S. **Estudo de modelos de empacotamentos de agregados para concretos**. 2017. 65p. Curso superior em Construção Civil, UTFPR, Paraná, 2017.
- TUTIKIAN, BERNARDO FONSECA. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto adensáveis**. Porto Alegre – 2007.
- TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; MOLIN, Denise Carpena dal. **CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**. São Paulo: Pini, 2008.
- TUTUKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de Concreto Auto Adensável**, Porto Alegre, 2004.

