

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR EM ENGENHARIA CIVIL

MAURICIO JACICHEN SOTOMAIOR

**ESTUDO DE MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE
AGREGADOS PARA CONCRETOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

MAURICIO JACICHEN SOTOMAIOR

ESTUDO DE MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS PARA CONCRETOS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso Superior em Construção Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

Coorientador: Prof. Dr. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA
2017



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE MODELOS DE EMPACOTAMENTO DE AGREGADOS PARA CONCRETOS

Por

MAURICIO JACICHEN SOTOMAIOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Co-Orientadora – Janine Nicolosi Corrêa, Dra.
UTFPR

Prof. Adauto José Miranda de Lima, Dr.
UTFPR

Prof. Marcelo Queiroz Varisco, MSc.
UTFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

RESUMO

SOTOMAIOR, Mauricio J. **Estudo de modelos de empacotamento de agregados para concretos**. 2017. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A tecnologia do concreto está em crescente evolução, sendo que nos últimos anos, o estudo da influência dos agregados sobre o concreto tem merecido muitas pesquisas, em particular no aspecto de empacotamento de partículas visando aumentar a durabilidade das estruturas de concreto e diminuir o consumo de cimento, atendendo aspectos econômicos e ecológicos, além dos aspectos técnicos. Entre os diversos modelos de empacotamento de partículas, o presente estudo analisou os modelos de Alfred, Toufar e de De Larrard como intuito de verificar qual modelo oferece menor índice de vazios, conseqüentemente diminuindo o consumo de cimento, quando comparado a um concreto de referência que atende as especificações das normas brasileiras para uma classe de agressividade ambiental II, que corresponde a uma resistência de 25 MPa. Com os resultados obtidos, foi analisado o concreto com maior resistência à compressão e menor consumo de cimento utilizando o modelo de empacotamento de partículas que fornece maior compacidade e durabilidade.

Palavras-chave: empacotamento de partículas; concreto; modelos matemáticos; durabilidade do concreto.

ABSTRACT

SOTOMAIOR, Mauricio J. **Study of aggregate packaging models for concretes.** 2017. 65 f. Course Completion Work (Graduation in Civil Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2017

Concrete technology is in increasing evolution, and in recent years, the study of the influence of aggregates on concrete has deserved many researches, particularly in the aspect of particle packing in order to increase the durability of concrete structures and to reduce the consumption of Cement, attending to economic and ecological aspects, as well as technicians. Among the different models of particle packing, the present analytical study of the models of Alfred, Toufar and De Larrard in order to verify the lowest available price model, therefore, reducing the consumption of cement, when compared to a concrete of Reference that meets as specifications of the Brazilian standards for an environmental aggression class II, which corresponds to a resistance of 25 MPa. With the results obtained, the concrete with greater resistance to compression and lower consumption of cement was analyzed, using the particle packaging model that consumes greater compactness and durability.

Keywords: particle packing; Concrete; Mathematical models; Concrete durability

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação dos parâmetros de forma	23
Figura 2 - Modelo de Andreasen: distribuição granulométrica.....	25
Figura 3 - Representação do modelo de Furnas	26
Figura 4 - Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas	27
Figura 5 - Mistura binária sem interação. Partículas de maior dimensão dominantes	30
Figura 6 - Mistura binária sem interação. Partículas de menor dimensão dominantes	30
Figura 7 - Efeito parede exercido pelo grão classe 2 dominante	31
Figura 8 - Efeito de afastamento exercido pelo grão classe 1 dominante.....	31
Figura 9 - Evolução da compacidade em função da proporção de partículas finas em mistura binária sem interação	34
Figura 10 - Mistura binária com interação total.....	35
Figura 11 - Evolução da compacidade em função da proporção de partículas em uma mistura binária com interação total, parcial e sem interação	36
Figura 12 - Perturbações exercidas na classe intermediárias	38
Figura 13 - Curva granulométrica da areia média.....	44
Figura 14 - Curva granulométrica da areia fina.....	45
Figura 15 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	46
Figura 16 - Curvas granulométricas da mistura de Alfred.....	48
Figura 17 - Curvas granulométricas da mistura de Toufar.....	50
Figura 18 - Curvas granulométricas da mistura de De Larrard.....	52
Figura 19 - Câmara climática.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomenclatura utilizada no modelo de empacotamento compressível	32
Quadro 2 - Valores de K	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações Cimento Itambé CP-V ARI RS	42
Tabela 2 - Massa unitária dos agregados miúdos	43
Tabela 3 - Granulometria do agregado miúdo (areia média)	43
Tabela 4 - Granulometria do agregado miúdo (areia fina)	44
Tabela 5 - Granulometria do agregado graúdo	46
Tabela 6 - Resultados do modelo de Alfred	48
Tabela 7 - Resultados do modelo de Toufar	50
Tabela 8 - Resultados do modelo de De Larrard	51
Tabela 9 - Traços Teóricos dos modelos de Empacotamento	52
Tabela 10 - Traços Práticos dos modelos de Empacotamento	53
Tabela 11 - Resultados obtidos compressão axial aos 28 dias	54
Tabela 12 - Ciclos configurados na câmara climática	56
Tabela 13 - Resultados obtidos compressão axial concreto envelhecido	57

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE QUADROS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVO GERAL.....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3 JUSTIFICATIVA.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 CONCRETO	14
2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO	15
2.3 CONCRETOS NO ESTADO FRESCO.....	15
2.3.1 Trabalhabilidade	15
2.3.2 Segregação	16
2.3.3 Exsudação.....	17
2.4 ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO.....	18
2.4.1 Massa Específica.....	18
2.4.2 Resistência Mecânica.....	18
2.4.3 Porosidade.....	19
2.4.4 Permeabilidade.....	19
2.4.5 Absorção	20
2.4.6 Durabilidade.....	20
2.5 INFLUÊNCIAS DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS.....	20
2.5.1 Massa Específica dos Agregados.....	20
2.5.2 Absorção Dos Agregados.....	21
2.5.3 Granulometria	21

2.5.4 Forma e Textura Superficial dos Grãos	22
2.6 EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS	24
2.6.1 Teoria do Empacotamento de Partículas.....	24
2.6.2 Modelos de Empacotamento de Partículas	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS.....	42
3.1.1 Cimento	42
3.1.2 Agregado Miúdo	43
3.1.3 Agregado Graúdo	45
3.1.4 Água de Amassamento	47
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	47
3.2.1 Modelo de Alfred.....	47
3.2.2 Modelo de Toufar.....	49
3.2.3 Modelo de De Larrard.....	51
3.3 TRAÇOS DE CONCRETO	52
4 RESULTADOS	54
4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	54
4.2 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
5.1 CONCLUSÕES.....	59
5.2 TRABALHOS FUTUROS PROPOSTOS	59

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia do concreto, influenciada por crescentes exigências do mercado, vem passando por várias transformações nas últimas décadas como é o caso de concreto pré-fabricado, alto desempenho e especiais (AMBROZEWICZ, 2012). O desenvolvimento de métodos de dosagem de concreto capazes de serem utilizados universalmente está claramente englobado nestas exigências.

A dosagem do concreto pode ser definida como sendo a proporção adequada dos materiais (cimento, água, agregados, e eventuais aditivos químicos e minerais) de maneira que o produto resultante dessa mistura atenda aos requisitos nos estados fresco e endurecido (NEVILLE, 1997).

No estado fresco, o concreto deve apresentar trabalhabilidade adequada para que possa ser transportado, lançado e, se necessário, adensado. No estado endurecido, o concreto deve possuir as características físicas como, resistência, durabilidade e permeabilidade, dentre outros. Os valores devem estar compatíveis com as especificações de projeto. Além dos requisitos físicos, devem-se considerar os aspectos econômicos de forma que o concreto deve ser produzido com materiais que tenham custo compatível com a vida útil prevista para a obra para que esta seja economicamente viável e competitiva.

Dentre os estudos relevantes na definição da curva de distribuição granulométrica destaca-se o de Füller e Thompson. Neste estudo ressaltou-se a ideia de que os agregados com distribuição granulométrica contínua proporcionavam melhores propriedades aos concretos e argamassas. Os pesquisadores realizaram trabalhos empíricos de correção da granulometria dos agregados naturais para a produção de concretos e argamassas, concluindo que para uma mesma porcentagem de cimento, em um dado volume de concreto, havia certa distribuição de tamanhos de grão do agregado que proporcionava maior resistência à ruptura e melhor trabalhabilidade.

Desta forma, a distribuição granulométrica dos agregados que compõem os concretos pode ser composta a partir de duas ou mais composições, de modo a obter um produto com alta densidade a partir do empacotamento das partículas, tal que os espaços entre as partículas maiores são preenchidos pela classe de partículas menores de forma que se possa obter um material com menor índice de vazios, melhorando assim suas propriedades físicas e mecânicas.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é comparar, em termos de resistência a compressão axial, os modelos de empacotamento de agregados pelos métodos de Toufar, De Larrard e Alfred.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Têm-se como objetivos específicos para que possa alcançar o objetivo geral:

- Avaliar o consumo de cimento necessário para os modelos de empacotamento avaliados;
- Avaliar a durabilidade dos concretos confeccionados através do envelhecimento acelerado, e;
- Avaliar a resistência à compressão de concretos confeccionados com agregados empacotados pelos modelos propostos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A resistência do concreto é uma de suas principais características e está diretamente relacionada ao fator de empacotamento, característica esta que pode ser definida a partir de vários modelos matemáticos empíricos.

A resistência do concreto é normalmente considerada a propriedade mais importante, pois é possível analisar a qualidade geral do concreto, por estar diretamente ligada a pasta de cimento, assim, se a resistência está de acordo com o especificado, há a ideia de que a qualidade do concreto está de acordo também (NEVILLE e BROOKS, 2013).

A durabilidade é a capacidade do concreto de resistir à ação das intempéries, ou seja, o concreto é considerado durável quando há a conservação da sua forma original e qualidade quando exposto ao meio ambiente, portanto, quanto maior compacidade do concreto, mais durável será a estrutura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Conforme melhora a compacidade do concreto, também há a redução do índice de vazios, dificultando a ação de águas e agentes agressivos para o interior do concreto podendo comprometer a estrutura, além de melhorar sua resistência mecânica bem como sua durabilidade.

Tendo em vista que o agregado utilizado no concreto corresponde a cerca de três quartos do volume do concreto, que sua aplicação é de natureza econômica por tratar-se de materiais de baixo custo unitário, comparado ao do cimento, depreende-se que o uso de agregados deve acontecer de maneira mais efetiva possível. Assim, é possível com os métodos de empacotamento, uma vez que este tem como objetivo o preenchimento dos espaços vazios que poderiam ser ocupados pelo cimento, diminuir o consumo de cimento e, portanto, o custo do concreto sem afetar a resistência mecânica e as demais propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto endurecido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são contextualizados fundamentos teóricos para que se possam compreender os fenômenos que embasam a metodologia, as análises sobre os ensaios e a conclusão deste trabalho as análises e ensaios realizados.

2.1 CONCRETO

O concreto é um material heterogêneo utilizado na construção civil, resultante da mistura de agregados, aglomerantes hidráulicos e água. Em alguns casos, são adicionados aditivos que modificam suas características físicas e químicas. Para obter um concreto adequado para a sua utilização deve-se analisar as propriedades dos materiais que o compõe, o proporcionamento correto, assim como, a execução da mistura e o controle do concreto durante o estado fresco e endurecido (AMBROZEWICZ, 2012).

Para Isaia (2011), o concreto teve seu emprego difundido em escala internacional no pós Guerra, em 1945, para a reconstrução dos países envolvidos nos confrontos. Sua utilização foi devido à facilidade de moldagem, e, também, pela qualidade principal de resistir aos esforços de compressão, que ao complementar com a resistência do aço, no caso do concreto armado resulta em um material de boa resistência a compressão e a tração.

Os tipos de concreto fornecidos atualmente pelas centrais segundo Ambrozewicz (2012) são:

- Concreto convencional: utilizado na maioria das obras civis devido ao baixo custo e facilidade de produção, sendo lançado nas fôrmas por carrinhos de mão, jericas e guias, por exemplo. Tem consistência plástica e resistência que varia de 10 até 40MPa;
- Concreto de alto desempenho: aplicado em obras civis especiais, hidráulicas em geral e em recuperações. Normalmente tem adições minerais como sílica ativa e metacaulim, e aditivos como superplastificante e retardadores de pega. O aumento da durabilidade e da vida útil das obras, redução dos custos da obra são algumas vantagens desse tipo de concreto, e;
- Concreto bombeável: utilizado na maioria das obras civis, obras industriais e peças pré-moldadas sendo apropriado para bombas de concreto

evitando a segregação e perdas de material. As vantagens são o aumento da durabilidade e qualidade final da obra; redução dos custos e redução do tempo de execução.

Para compensar as deficiências, tanto dos materiais constituintes do concreto quanto da técnica de execução, no caso dos concretos comuns, diversos tipos de concretos foram desenvolvidos. Estes tipos de concreto são pesquisados para ampliar as opções, obtendo o concreto mais adequado para cada obra, conforme suas características e necessidades (ISAIA, 2011).

2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO

As propriedades do concreto possuem fundamental importância em sua durabilidade, resistência e adequação quanto a utilização. O estudo das propriedades do concreto se divide em propriedades no estado fresco e no estado endurecido sendo analisadas as características necessárias para obter o concreto mais adequado à utilização (AMBROZEWICZ, 2012).

2.3 CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

O concreto é considerado em estado fresco até o momento em que tem início a pega do aglomerante (endurecimento do concreto). Desta forma, é necessário verificar a trabalhabilidade, segregação das partículas e exsudação da pasta de aglomerante para a obtenção de um concreto de boa qualidade.

2.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto normalmente é determinada pela consistência, que é uma propriedade relacionada com o estado de fluidez da mistura. Dependendo da composição do concreto, quantidade de água, da granulometria dos agregados e da presença de aditivos haverá maior ou menor facilidade de deformação devido aos esforços, e, portanto, facilidade de colocar o concreto em uma forma, por exemplo (AMBROZEWICZ, 2012).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: a fluidez (facilidade de mobilidade); e coesão (resistência à exsudação e à segregação). A trabalhabilidade não é uma propriedade intrínseca do concreto, ou seja, é necessário relacionar com

o tipo de construção e os métodos de lançamento, adensamento e acabamento para não haver futuras patologias.

Um concreto pode ter trabalhabilidade para concretagem de uma determinada peça estrutural e não ter boa trabalhabilidade para outra peça estrutural e/ou outras condições operacionais. Portanto, trabalhabilidade do concreto deve ser estabelecida em função das condições, emprego, técnica e método da obra (ISAIA, 2011).

Segundo Neville e Brooks (2013), a consistência é outro termo importante do concreto no estado fresco, definida como a resistência de uma substância de manter sua forma ou facilidade que ela flui. No caso do concreto, é tomado pelo grau de umidade que, para certo limites, maior quantidade de água acarreta em uma melhor trabalhabilidade. É medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone, conhecido como *Slump Test*. O concreto é inserido em uma forma cônica e adensado manualmente conforme a NBR 12665 (ABNT, 2015) e, após o preenchimento completo, ergue-se a fôrma cônica e se mede o abatimento do concreto em relação à altura da forma, esta medida é em milímetros, sendo utilizada para fins comparativos de consistência.

Para Sobral (2000), outros ensaios podem ser realizados para realizar a medição da consistência, como:

- Ensaio de penetração;
- Ensaio de escorregamento;
- Ensaio de remoldagem, e;
- Ensaio de compactação.

2.3.2 Segregação

Define-se segregação como a separação dos componentes de uma mistura heterogênea de concreto no estado fresco de forma que a distribuição deixe de ser uniforme (NEVILLE e BROOKS, 2013). De acordo com Ambrozewicz (2012), a segregação resulta na separação dos agregados graúdos da argamassa (aglomerante, areia e água), deixando o concreto com vazios e reduzindo a resistência mecânica.

Para Isaia (2011), a segregação é uma tendência natural do concreto, principalmente nas etapas de transporte, lançamento e adensamento. Contudo, o

excesso deve ser evitado, pois, como afirma Mehta e Monteiro (2008), é importante reduzir à tendência a segregação de uma mistura de concreto porque a compactação total é essencial para atingir o potencial máximo de resistência.

Há duas formas de segregação, quando as partículas maiores tendem a se separar, uma vez que deslizam em superfícies inclinadas ou se assentam mais que as partículas finas, e quando há misturas com excesso de água, é manifestada pela separação da pasta de cimento (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Segundo Ambrozewicz (2012) as causas externa que podem determinar a segregação são:

- Transporte longo do concreto para o local de aplicação em razão da vibração;
- Perda de argamassa no transporte;
- Vibração excessiva, e;
- Lançar o concreto sobre as formas com altura superior a 2,5m.

2.3.3 Exsudação

Define-se exsudação como uma forma de segregação na qual a água tende a migrar na superfície após o concreto ter sido lançado e adensado, porém antes do início do endurecimento (pega), resultado pela incapacidade dos materiais componentes em reterem toda a água de amassamento em um estado disperso, enquanto os sólidos mais pesados se assentam (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Esta água, ao subir para a superfície, pode carregar partículas finas de aglomerante para o topo da camada, formando a pasta, resultando em uma camada porosa, fraca e não durável. Além da água acumulada na face superior, parte da água ascendente pode ficar retida embaixo de partículas maiores ou de armaduras, criando zonas de baixa aderência, e vazios orientados na mesma direção aumentando a permeabilidade do concreto (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Para Isaia (2011) as causas mais comuns são a consistência inadequada, agregado graúdo em demasia, falta de finos e lançamento e adensamento inadequados, necessitando então, evitar o emprego de água além do necessário, ou então, corrigindo a exsudação adicionando-se grãos relativamente finos que compensam as deficiências do agregado. (AMBROZEWICZ, 2012).

2.4 ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

As propriedades no estado endurecido dependem da funcionalidade da cada estrutura, sendo algumas propriedades mais importantes para cada tipo de obra (SILVA, 1985). As propriedades mais frequentes nos tipos de concretos são:

- Massa específica;
- Resistência mecânica;
- Porosidade;
- Permeabilidade;
- Absorção, e;
- Durabilidade.

Essas propriedades são conceituadas a seguir.

2.4.1 Massa Específica

Massa específica normalmente adotada é a massa por uma unidade de volume, incluindo vazios para o concreto, que usualmente adota-se 2300 kg/m^3 para concretos simples, 2500 kg/m^3 para concretos armados, 1800 kg/m^3 para concretos leves e 3700 kg/m^3 para concretos pesados (PETRUCCI, 1998).

2.4.2 Resistência Mecânica

É a principal propriedade dos concretos, porém influenciada por diversos fatores como, relação água/aglomerante (AMBROZEWICZ, 2012).

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

A resistência é uma propriedade especificada em projeto e controle de qualidade, pois, muitas de outras propriedades estão relacionadas à resistência, como módulo de elasticidade, permeabilidade e durabilidade. Sendo a mais usual forma de ensaio é o de compressão axial, onde o concreto é inserido em uma prensa hidráulica e a carga à compressão é elevada gradualmente até o rompimento do corpo de prova conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007) (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008) há diversos fatores que afetam a resistência mecânica do concreto, como: propriedades dos materiais constituintes no concreto; proporcionamento dos materiais, ou seja, relação água/aglomerante e relação agregado/aglomerante; condições de cura e idade.

2.4.3 Porosidade

O concreto é um material que por sua própria constituição é necessariamente poroso, pois não é possível preencher a totalidade dos vazios do agregado com a pasta de aglomerante, isto porque sempre é necessário utilizar água superior ao necessário para hidratar o aglomerante; inevitavelmente durante a mistura do concreto incorpora-se ar à massa; com a combinação química os valores absolutos de cimento e água que entram em reação diminuem. (PETRUCCI, 1998)

De acordo com Petrucci (1998) a determinação da porosidade só pode ser feita através do conhecimento das massas específicas absolutas e aparentes do concreto.

2.4.4 Permeabilidade

Ambrozewicz (2012), define a permeabilidade como a capacidade de a água percolar no material, alocando-se nos vazios ocasionados tanto pelo ar que incorpora na mistura, quanto pela água excessiva evaporada do amassamento. Portanto para concretos que estão sujeitos a intempéries esta é uma propriedade importante.

A permeabilidade é difícil medir, a aparelhagem existente não dá resultados facilmente reproduzíveis (PETRUCCI, 1998). O ensaio, consiste essencialmente em fazer agir sob pressão na superfície superior do corpo de prova um caudal líquido recolhendo-se em tempos determinados a quantidade de água que atravessa a massa de concreto. (NEVILLE e BROOKS, 2013)

Contudo o papel da água no concreto tem que ser avaliada de maneira adequada, sendo um ingrediente importante para as reações de hidratação do cimento e como agente plastificante, porém, pós-reações, o excesso de água é desfavorável à durabilidade da estrutura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.4.5 Absorção

Petrucci (1998), a absorção é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares. É determinada em 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.

2.4.6 Durabilidade

Define-se durabilidade como a capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração. Desta forma o concreto deve preservar a forma, qualidade e capacidade original quando exposto ao ambiente na qual foi projetado. Contudo, nenhum material é totalmente durável de acordo com essa definição, então um material atinge o fim da vida útil quando suas propriedades tiverem se deteriorado de forma que seu emprego se torna inseguro e antieconômico (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.5 INFLUÊNCIAS DOS AGREGADOS NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS

Agregados são materiais granulares sem forma e volumes definidos de atividade química inerte. O custo dos agregados é relativamente baixo, porém, ocupam aproximadamente três quartos do volume total do concreto, por isso, a qualidade é de grande importância (AMBROZEWICZ, 2012).

Para a composição do concreto as características relevantes dos agregados que devem ser analisadas são: massa específica, porosidade; granulometria; forma e textura superficial; teor de umidade; resistência à compressão; módulo de elasticidade e teor de substâncias nocivas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Sendo as quatro primeiras características importantes para o empacotamento de partículas do concreto. Todas essas características são influenciadas pela formação e classificação da rocha, assim como, o processo industrial na qual foi submetido para a obtenção do agregado. (NEVILLE e BROOKS, 2013)

2.5.1 Massa Específica dos Agregados

Das duas formas que a massa específica pode se apresentar massa específica real e massa específica aparente, somente a segunda basta para a

dosagem, sendo definida como a massa do material considerando os poros internos por unidade de volume (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Também deve ser considerado, além da massa específica, dados da massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume, ou seja, da massa unitária do agregado, incluindo os vazios deixados pelo empacotamento de partículas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Bauer (2000) a massa específica é diretamente relacionada à massa específica do concreto e então se busca a curva granulométrica que apresenta o menor índice de vazios.

2.5.2 Absorção Dos Agregados

A absorção é mais analisada em relação ao agregado miúdo devido ser friável e há alto grau de absorção, dessa forma é necessário para realizar correções da proporção da água e de agregado na mistura de concreto conhecer dados sobre a capacidade de absorção; absorção efetiva e umidade superficial (BAUER, 2000).

Define-se capacidade de absorção como a quantidade de água necessária para tornar um agregado em condição seco, secado em estufa, para a condição de saturada superfície seca, ou seja, os poros preenchidos, mas sem filme de água na superfície do grão (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Absorção efetiva, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), é a quantidade de água para trazer o agregado da condição seca ao ar para a condição saturada superfície seca.

O mesmo autor afirma que a umidade superficial é a quantidade de água além do requerido para a condição saturada superfície seca.

Quando se comenta sobre a absorção de água de agregados miúdos, em especial areia, faz-se necessário relacionar ao efeito de inchamento do agregado, pois, dependendo do teor de umidade e composição granulométrica pode ocorrer aumento considerável de volume aparente da areia, que após seco poderá deixar poros no concreto (BAUER, 2000).

2.5.3 Granulometria

Distribuição das partículas granulares de várias dimensões, expresso usualmente em porcentagem acumulados maiores e menores de cada uma das

aberturas de uma série de peneiras. Importante na influência da trabalhabilidade e custo, como por exemplo, areias grossas produzem concretos ásperos e secos, sem trabalhabilidade, porém, areias finas aumentam o consumo de água e aumentam a relação água aglomerante (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Outra característica a ser avaliada, de acordo com Mehta e Monteiro, (2008), na granulometria dos agregados é a dimensão máxima característica do agregado que é designada pela abertura da peneira na qual ficam retidos 15% ou menos das partículas do agregado. Quanto maior dimensão máxima do agregado menor será a área superficial por unidade de volume que tem que ser envolta pela pasta de aglomerante para dada relação água aglomerante.

De acordo com Bauer (2000), concretos sem finos estão sujeitos a maior exsudação, são concretos com grande permeabilidade, e sujeitos a agentes agressivos.

Granulometria ótima é a que para a mesma trabalhabilidade e o mesmo fator de água aglomerante, corresponde ao mínimo de consumo de cimento. Este valor varia de acordo com a proporção cimento/agregado, sendo necessário avaliar a menor porcentagem de finos, economicamente viável para conduzir menor quantidade de água (BAUER, 2000).

2.5.4 Forma e Textura Superficial dos Grãos

A forma e a textura influenciam na qualidade do concreto, ao alterar a trabalhabilidade, afetando nas condicionantes de bombeamento, lançamento e adensamento (BAUER, 2000).

A textura superficial é definida pelo grau de quanto à superfície do agregado é lisa ou áspera, sendo avaliado visualmente. Esta característica depende da dureza, granulação e porosidade da rocha matriz e da exposição à ação de atrito (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os grãos podem ser classificados segundo a forma em cuboides, alongados, lamelares e irregulares conforme Figura 1, estes dependem do método de obtenção, processo de formação e tipo da rocha matriz (BAUER, 2000).

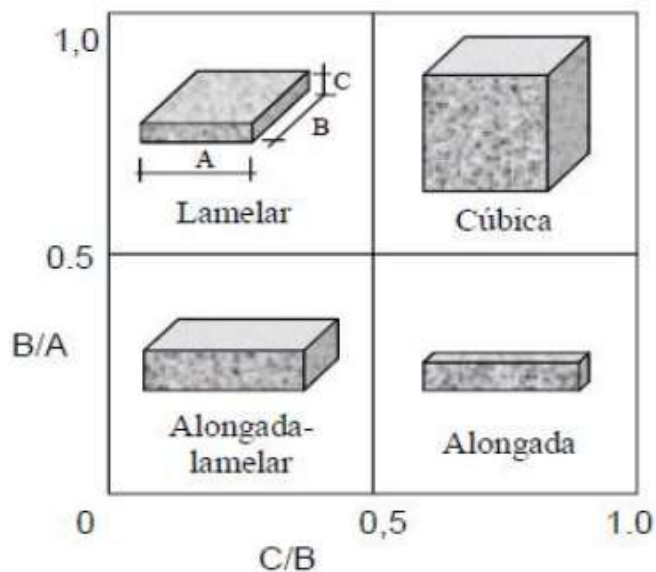


Figura 1 - Representação dos parâmetros de forma

Fonte: Farias e Palmeira (2010)

Grãos cuboides podem apresentar arestas arredondadas, normalmente partículas formadas por atrito, areias em depósitos eólicos, areias e pedregulhos de zonas marítimas ou leito de rio, tendem a ter forma arredondada como é o caso, por exemplo, do cascalho (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Grãos lamelares possuem espessura relativamente pequena em relação às demais dimensões, enquanto os grãos que possuem o comprimento maior que as demais dimensões são chamadas de alongados, sendo o caso de calcários estratificados, arenitos e folhelho que tendem a produzir fragmentos dos dois tipos citados (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para se referir à forma dos grãos pode-se ser utilizado o termo área específica volumétrica que é a relação entre a área superficial e o volume. Grãos arredondados tem baixo valor de área específica enquanto as demais possuem valor elevado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Quando há aumento da porcentagem de alongados e lamelares há perda de trabalhabilidade do concreto, quando mantido o traço, concretos produzidos com agregados com forma arredondada possuem maior trabalhabilidade (BAUER, 2000).

Grãos irregulares tem maior área específica volumétrica que os cuboides, além de poder eventualmente ficar presos entre as barras da armadura do concreto armado, resultando no preenchimento irregular da forma. Por outro lado, devido a sua forma e textura superficial, apresentam maior aderência da argamassa

confeccionando concretos mais resistentes, se mantido o traço, em comparação as demais formas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.6 EMPACOTAMENTO DE PARTICULAS

2.6.1 Teoria do Empacotamento de Partículas

De acordo com Riva (2010) *apud* Oliveira (2013), os primeiros estudos sobre empacotamento de partículas, iniciaram ano de 1611, por Kepler e advém de vários campos de estudos tendo despertado o interesse em diversas áreas da engenharia.

O empacotamento de partículas consiste em preencher os espaços vazios deixados por partículas de maior diâmetro por partículas de menor diâmetro. O espaço entre estas partículas é preenchido por partículas ainda menores e, assim, sucessivamente (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). De acordo com De Larrard (1999), a distribuição granulométrica das partículas, a forma ou morfologia dos grãos e o método de compactação utilizado são os principais fatores que influenciam o empacotamento de partículas.

Neste tópico serão abordados os seguintes modelos de empacotamento de partículas:

- Modelo de Alfred;
- Modelo de Toufar, e;
- Modelo de De Larrard.

2.6.2 Modelos de Empacotamento de Partículas

Modelo de Alfred

O modelo de Alfred é conhecido como Modelo de Andreasen Modificado. Funk e Dinger (1992) realizaram uma série de estudos nos modelos de empacotamento, provando que os modelos de Furnas e Andreasen convergem para uma única equação chamada de modelo de Alfred.

A seguir são apresentados os modelos de citados de empacotamento de partículas baseados na distribuição granulométrica, segundo Oliveira et al. (2000).

No modelo de Andreasen a distribuição de partículas é tratada como distribuições contínuas, pois todos os diâmetros podem ser encontrados em distribuições reais de partículas.

Para Andreasen o empacotamento ideal de partículas possui condições de similaridade em torno de duas partículas com tamanhos muito diferentes. Essa condição de similaridade define a distribuição de tamanho de partículas em termos de uma lei de potências dada pela equação:

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \quad (1)$$

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, porém isso só ocorre quando o diâmetro da menor partícula do empacotamento é zero, portanto, na prática, não ocorre. Assim, deve-se utilizar o menor diâmetro possível para maximizar o empacotamento em realizações reais.

Na Figura 2 há o gráfico do modelo de Andreasen para empacotamentos com diferentes coeficientes de distribuição.

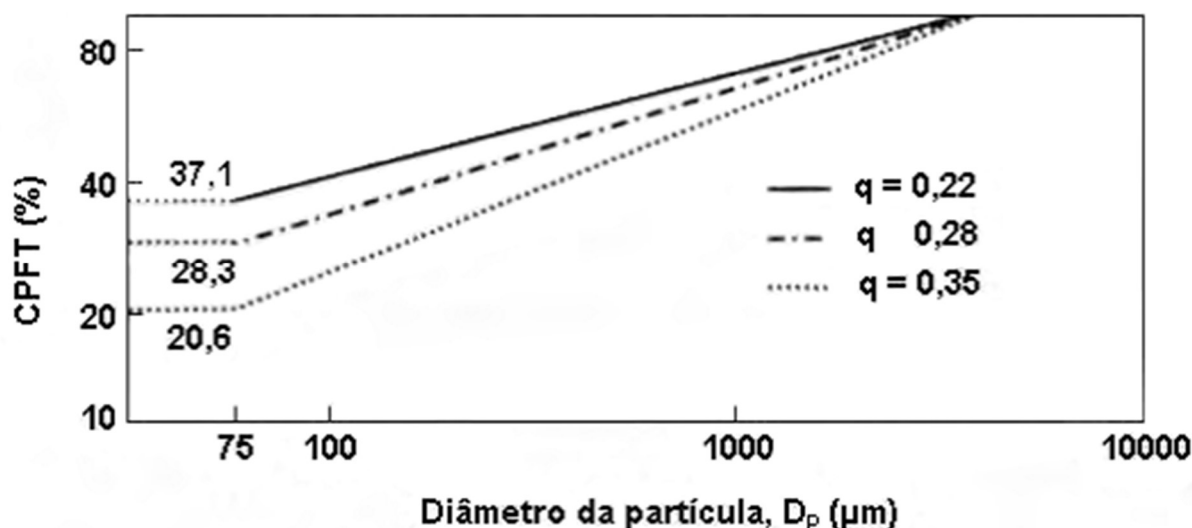


Figura 2 - Modelo de Andreasen: distribuição granulométrica

Fonte: Oliveira (2013)

No modelo de Furnas, diferente do modelo de Andreasen, a distribuição de partículas é tratada como discretas e o empacotamento máximo ocorre quando as partículas menores preenchem totalmente os vazios existentes entre as partículas maiores (OLIVEIRA, 2013).

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

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

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;

Nessa equação, o conceito do tamanho mínimo de partículas, é introduzido.

Na Figura 3 há o gráfico o modelo de Furnas.

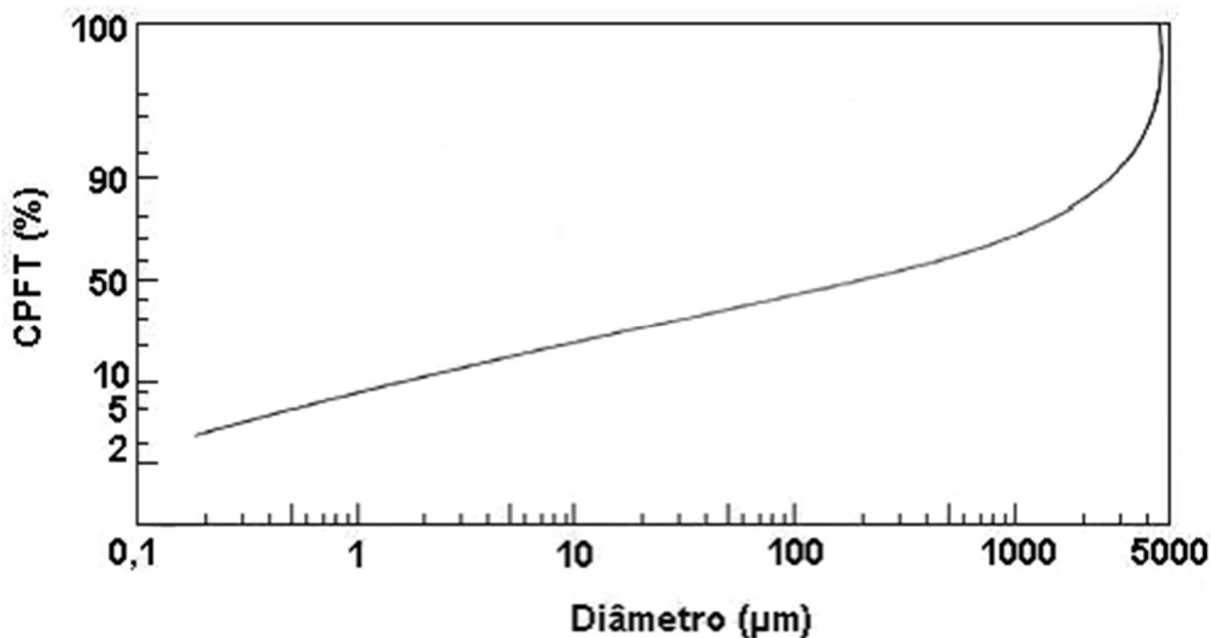


Figura 3 - Representação do modelo de Furnas

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

O modelo de Alfred é formulado a partir da comparação entre o modelo de Andreasen e o modelo de Furnas. Provando matematicamente a convergência dos dois modelos para uma única equação (3).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (3)$$

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.

Na Figura 4, a seguir, ilustra graficamente o modelo de Alfred para o empacotamento ideal de partículas.

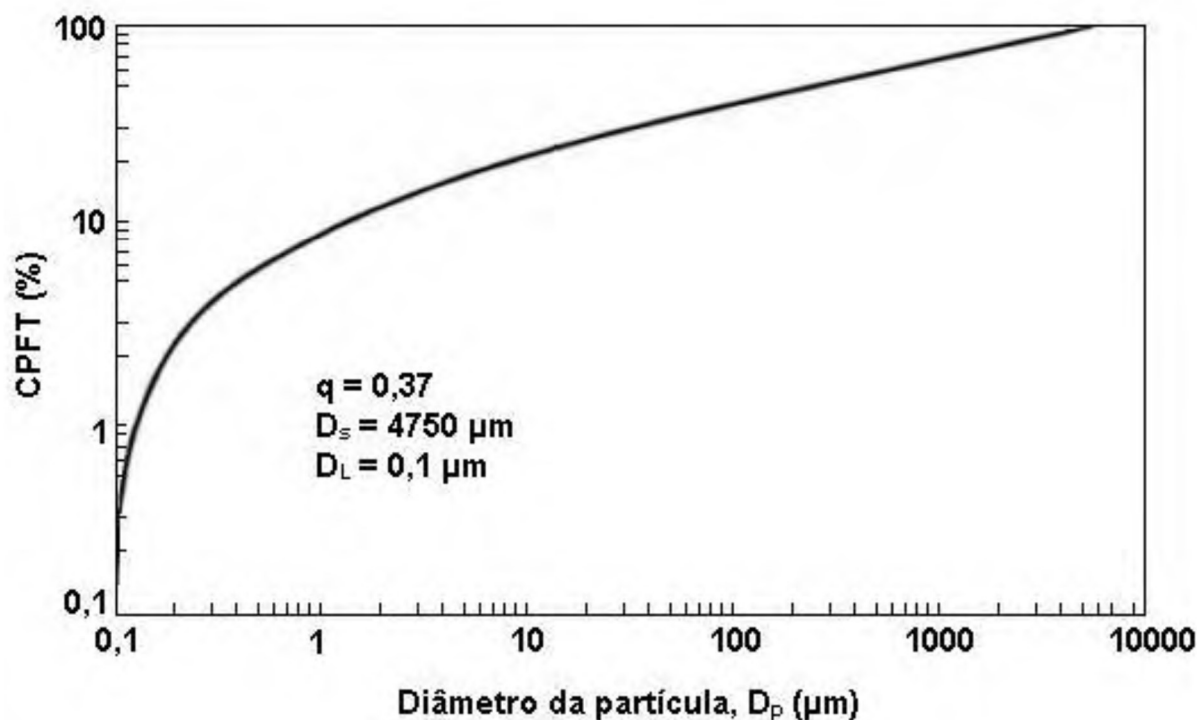


Figura 4 - Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas

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

O modelo de Alfred obtém melhores resultados de empacotamento de partículas quando comparado com o modelo de Furnas e o modelo de Andreasen (OLIVEIRA, 2013).

Modelo de Toufar

Neste modelo são consideradas duas classes de agregados (finos e grossos) constituídas por esferas perfeitas de um mesmo diâmetro. Esse modelo otimiza o empacotamento apenas dos agregados, é considerado que o cimento ocupará os espaços vazios deixados pelos agregados (FENNIS, 2011).

A otimização de empacotamento de misturas ternárias, contendo agregados finos, médios e grossos, é obtida no modelo de Toufar modificado, em duas etapas. Na primeira são consideradas apenas duas classes para se obter uma mistura binária otimizada e na segunda etapa uma nova simulação de empacotamento binário é realizada entre a mistura previamente otimizada e a terceira classe de agregado.

O modelo de Toufar considera que as partículas finas são posicionadas entre quatro partículas grossas. No entanto, mais tarde, as comparações com ensaios mostraram que este modelo prevê que a densidade de empacotamento de uma amostra de partículas mais grossas, não aumenta quando uma pequena quantidade de partículas finas é adicionada. Isto se dá devido, à suposição de que cada partícula fina é colocada num espaço, que é limitado por quatro das partículas grossas, então foi criado um modelo de Toufar modificado para corrigir esta consideração irreal (FENNIS, 2011).

A formulação matemática elaborada por Toufar modificado é dada pela equação (4):

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{r_1}{\alpha_1} + \frac{r_2}{\alpha_2} - r_2 \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) * k_d * k_s} \quad (4)$$

Sendo:

α_t = Densidade de empacotamento;

r_i = Volume da partícula i;

α_i = Densidade da partícula i.

O coeficiente k_d é dado pela equação (5):

$$k_d = \left(\frac{d_2 - d_1}{d_1 - d_2} \right) \quad (5)$$

O coeficiente k_s é dado pelas equações (6) ou (7):

$$k_s = 1 - \left[\frac{1 - 4x}{(1 - x)^4} \right] \text{ para } x < 0,4753 \quad (6)$$

Ou:

$$k_s = \frac{0,3881x}{0,4753} \text{ para } x \geq 0,4753 \quad (7)$$

Sendo:

d_i = Diâmetro da partícula i .

O coeficiente x é dado por:

$$x = \frac{r_1}{r_2} * \frac{\alpha_2}{\alpha_1(1 - \alpha_2)} \quad (8)$$

Modelo de De Larrard

O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por De Larrard (LARRARD, 1999), foi desenvolvido para o problema de empacotamento de partículas para a dosagem do concreto. Este modelo se difere dos demais métodos, pois, avalia todos os materiais para a distribuição do tamanho da partícula, assim como a interação entre elas.

O modelo de empacotamento compressível é dividido em dois módulos: virtual e real. O empacotamento virtual é obtido quando se arranjam as partículas uma a uma correspondendo a um arranjo geométrico ideal, ou seja, em caso de partículas cúbicas idênticas, seriam arranjados os grãos um a um, de forma a se obter a compactação máxima ou compacidade virtual de 100%; ou, então, em caso de partículas esféricas, correspondendo a um arranjo cubico de face centrada (CFC), obtém-se a compactação de 74%.

No empacotamento real, não é possível obter a compacidade máxima (virtual) devido à consideração das relações físicas dos materiais, assim como o procedimento do empacotamento. Desta forma, este método considera a relação entre o empacotamento virtual com o empacotamento real por meio de um parâmetro intrínseco ao procedimento real de empacotamento adotado, denominado fator de compactação. Desta forma a *compacidade real* é sempre inferior à compacidade virtual.

Outro conceito importante considerado é que há uma classe dominante de grãos, e que esta classe assegura a continuidade sólida do corpo granular. Desta forma, quando as partículas de maior dimensão são as dominantes, o volume será preenchido como se os grãos menores não estivessem presentes na mistura, como

mostrado na Figura 5. Quando as partículas de menor dimensão são as dominantes, a porosidade dos grãos de maior dimensão será empacotada pelas partículas de menor dimensão, conforme mostrado na figura 6. Há sempre uma classe dominante em misturas empacotadas, caso contrário, a mistura seria constituída por uma suspensão (todas as classes de grãos estariam flutuando em um líquido) e não um empacotamento.

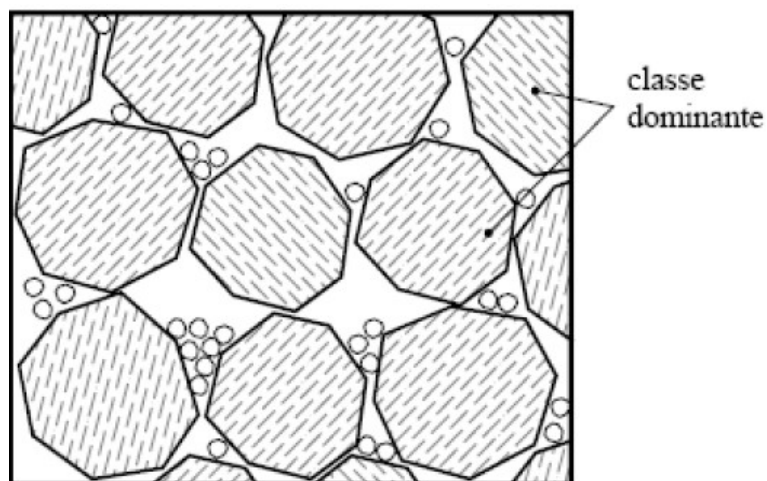


Figura 5 - Mistura binária sem interação. Partículas de maior dimensão dominantes

Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

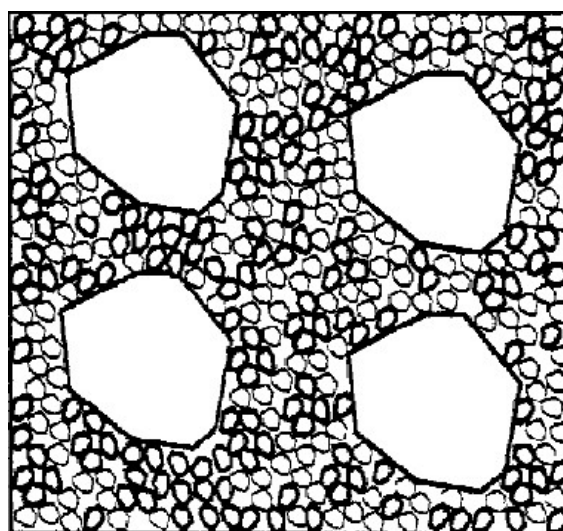


Figura 6 - Mistura binária sem interação. Partículas de menor dimensão dominantes

Fonte: Adaptado de De larrard (1999).

Quanto à interação dos grãos, há dois efeitos que diminuem a compacidade da mistura e ocorrem em misturas com alto grau de empacotamento, sendo: efeito parede e efeito de afastamento.

Sendo considerada a seguinte notação: classe 1 como a classe que consiste de partículas de maior diâmetro e como classe 2 a de partículas de menor diâmetro. O efeito de parede ocorrerá quando a classe 2 for dominante, e a diferença de tamanho, em relação as partículas menor e maior, for de tal magnitude que torna a superfície de contato praticamente plana, conforme ilustrado na Figura 7.

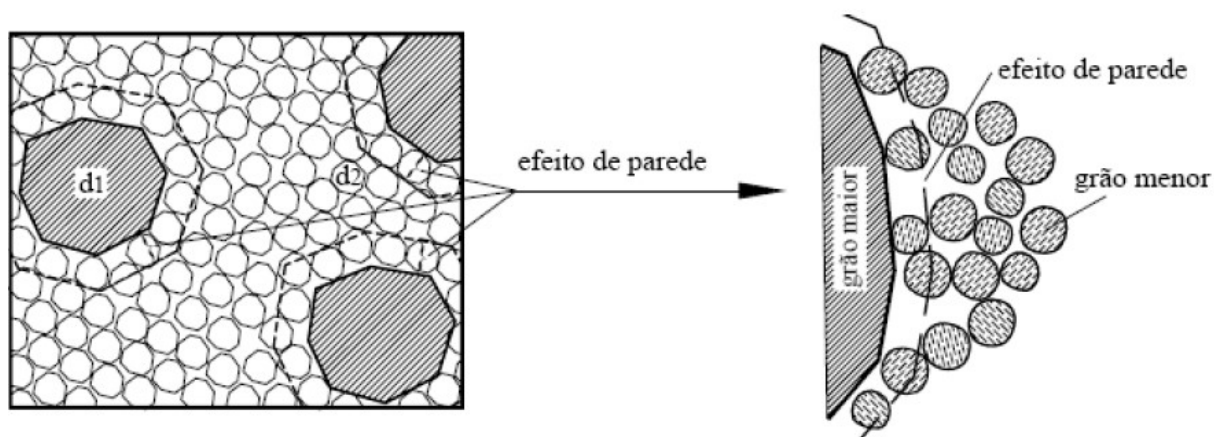


Figura 7 - Efeito parede exercido pelo grão classe 2 dominante

Fonte: Formagini (2005).

O efeito de afastamento ocorrerá quando a classe 1 é a dominante, e a partícula menor é maior do que o vazio entre os grãos da classe 1, ocasionando um afastamento, conforme ilustrado na Figura 8.

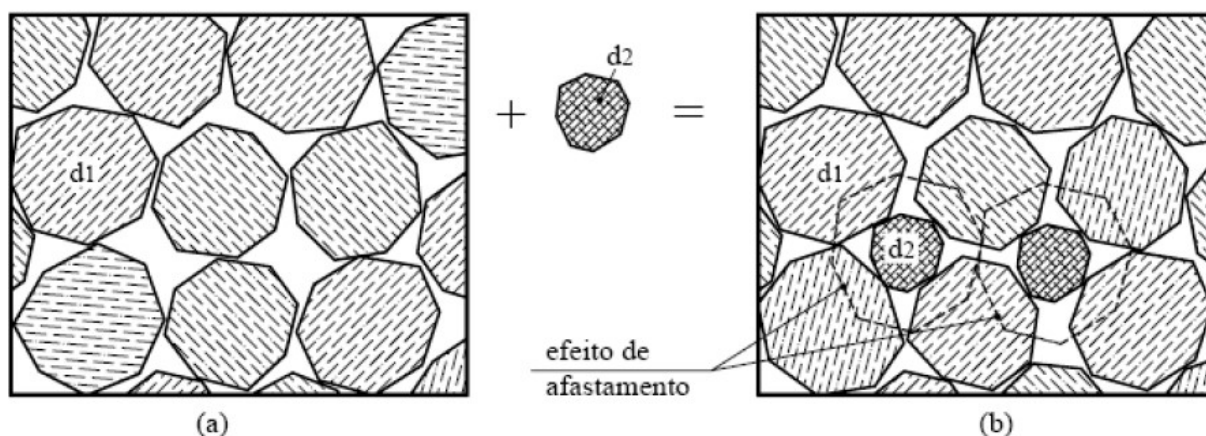


Figura 8 - Efeito de afastamento exercido pelo grão classe 1 dominante

Fonte: Formagini (2005).

No quadro 1 serão apresentadas as equações que permitem a realização da modelagem do empacotamento de partículas seguindo a seguinte nomenclatura:

Quadro 1 - Nomenclatura utilizada no modelo de empacotamento compressível

N	Número de classes granulares da mistura
d_i	Diâmetro médio da classe i
β_i	Compacidade virtual da classe i tomada individualmente
y_i	Proporção em volume da classe i na mistura
ϕ_i^*	Teor em volume máximo da classe i em presença das outras classes
ϕ_i	Teor em volume da classe i
γ^i	Compacidade virtual da mistura sendo a classe i a classe dominante
γ	Compacidade virtual da mistura
C	Compacidade experimental da mistura (real)
π	Porosidade
e	Índice de vazios
K_i	Índice de compactação parcial devido à classe i
K	Índice de compactação para a mistura

Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

Mistura Binária

A mistura binária de partículas é composta por duas classes granulares de diâmetros respectivos d_1 e d_2 , onde d_1 é maior que d_2 ($d_1 > d_2$). Para realizar o cálculo é necessário conhecer a compacidade virtual (γ) das classes tomadas, assim como, as frações volumétricas ($y_1; y_2$) e os volumes parciais ($\phi_1; \phi_2$) de sólidos ocupados por cada classe em um volume unitário de massa. Tem-se que:

$$y_i = \frac{\phi_i}{\phi_1 + \phi_2} \quad (9)$$

$$y_1 + y_2 = 1 \quad (10)$$

A compacidade virtual da mistura (γ) é dada por:

$$\gamma = \phi_1 + \phi_2 \quad (11)$$

Mistura Binária sem Interação entre Partículas

A mistura binária é considerada sem interação quando uma das classes de grãos não é perturbada pela presença da outra classe, ou seja, isso ocorre quando d_1 for muito maior que d_2 ($d_1 \gg d_2$), por exemplo.

Quando a classe 1 é a dominante, seus grãos preenchem o volume disponível como se nenhum grão fino estivesse presente, assim, o teor em volume da classe 1 é equivalente a compacidade virtual dessa classe, e a contribuição da classe 2 pode variar livremente, de acordo com a definição do usuário, entre zero e um valor a partir do qual a classe 1 deixa de ser dominante. Tem-se:

$$\phi_1^* = \beta_1 \quad (12)$$

$$\gamma = \gamma^1 = \phi_1^* + \phi_2 = \beta_1 + y_2 * \gamma \quad (13)$$

$$\gamma^1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2} \quad (14)$$

O sobrescrito (1) indica que a classe 1 é a dominante. Também o sobrescrito (*) que indica que os grãos de classe 1 ocupam o espaço máximo possível no volume unitário, enquanto que os grãos de classe 2 ocupam um espaço que poderia ser ainda maior se dispusessem de mais grãos desta classe.

Quando a classe 2 é a dominante, seus grãos ocupam todo o espaço deixado pelos grãos da classe 1. Portanto, enquanto a classe 1 é dominante, ao aumentar o volume dos grãos de classe 2, chegará um momento em que os grãos da classe 2 ocuparão todo o espaço possível nos vazios deixados pela classe 1, correspondendo ao máximo empacotamento da mistura binária, tem-se:

$$\phi_2^* = \beta_2(1 - \phi_1) \quad (15)$$

$$\gamma = \phi_1 + \phi_2^* = y_1\gamma + \beta_2(1 - y_1 * \gamma) \quad (16)$$

$$\gamma^2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1(1 - \beta_2)} \quad (17)$$

Na Figura 9 há a evolução da compacidade virtual de uma mistura binária com classes 1 e 2, sem interação. Quando todos os espaços vazios da classe 1 são preenchidos por grãos da classe 2 obtém-se o máximo de compacidade que ocorre quando y_2 for igual a 0,205, em que ocorre a mudança de dominância das classes. A partir deste ponto, qualquer incremento de grãos finos gerará um afastamento dos grãos maiores para que os grãos finos possam ser acomodados. Portanto, a partir do ponto de compacidade máxima, a compacidade virtual irá diminuir com o

aumento do volume da classe 2 na mistura, desta forma, a compacidade da mistura é sempre menor ou igual à compacidade onde uma das classes é dominante.

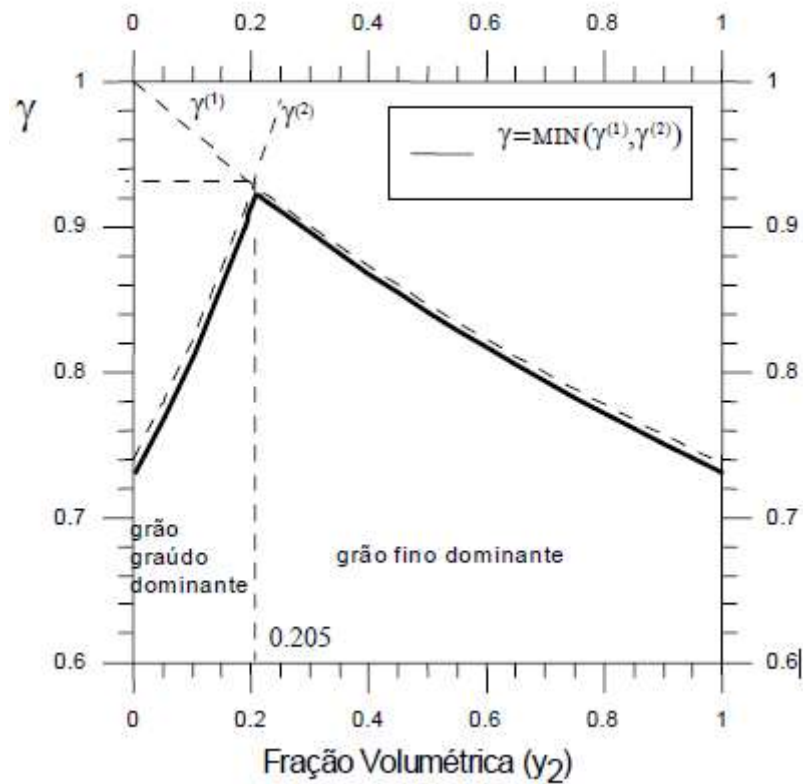


Figura 9 - Evolução da compacidade em função da proporção de partículas finas em mistura binária sem interação

Fonte: Formagini (2005).

Mistura binária com interação total

Quando os tamanhos de partícula são iguais ($d_1 = d_2$) há uma mistura binária com interação total. Nesse caso, as compacidades são iguais, conforme:

$$\gamma = \gamma^1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2(1 - \frac{\beta_1}{\beta_2})} = \gamma^2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1(1 - \frac{\beta_2}{\beta_1})} \quad (18)$$

A Figura 10 mostra um caso de interação total, em que mesmo que ocorra segregação total, a compactação média da mistura não se altera, parte do volume é preenchido totalmente por grãos da classe 1 e o restante do volume é preenchido por grãos da classe 2.

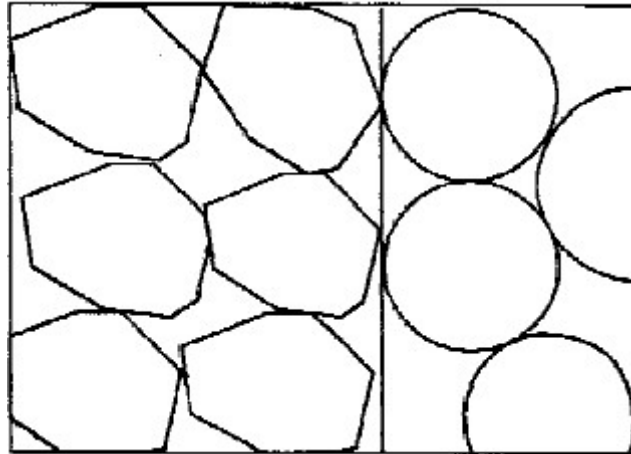


Figura 10 - Mistura binária com interação total

Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

Mistura Binária com Interação Parcial

Em uma mistura binária com interação parcial ocorrem efeitos de parede e de afastamento. Considerando que o valor de d_2 não é muito menor do que o valor de d_1 .

No efeito de afastamento, o diâmetro do grão da classe 2 seria maior do que os espaços deixados pelos grãos da classe 1 (considerados dominantes), provocando localmente um afastamento. Este efeito de afastamento dos grãos é calculado:

$$\gamma^1 = \frac{\beta_1}{1 - y_2(1 - a_{1,2} * \frac{\beta_1}{\beta_2})} \quad (19)$$

Onde $a_{1,2}$ é o coeficiente de efeito de afastamento, pode variar entre zero (quando $d_1 \gg d_2$) e um (quando $d_1 = d_2$) e a interação é total.

No efeito de parede, a classe 2 é dominante e os grãos da classe 1 são inseridos na mistura, provocando aumento de vazios na vizinhança da sua superfície. Este efeito de parede dos grãos é calculado:

$$\gamma^2 = \frac{\beta_2}{1 - y_1(1 - \beta_2 + b_{1,2} * \frac{\beta_1}{\beta_2})} \quad (20)$$

Onde $b_{1,2}$ é o coeficiente de efeito de parede, pode variar entre zero (quando $d_1 \gg d_2$) e um (quando $d_1 = d_2$) e a interação é total.

Considerando os casos de evolução da compacidade virtual em misturas binárias, a fim de enfatizar a influência dos efeitos de afastamento e de parede no empacotamento conforme a figura 11.

A compacidade virtual da mistura é dada:

$$\gamma = \text{Min}(y^1, y^2) \quad (21)$$

Na Figura 11 há a evolução da compacidade entre diversas interações.

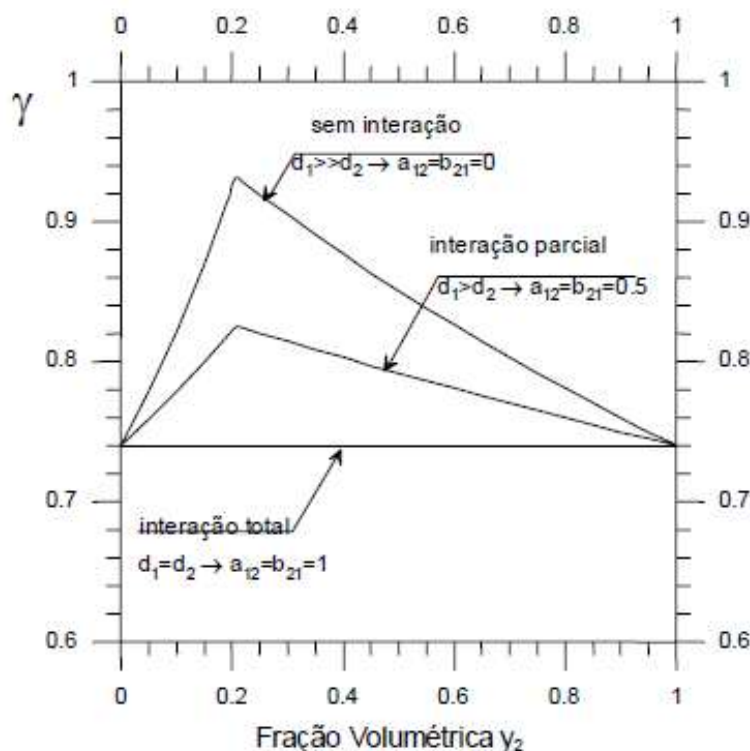


Figura 11 - Evolução da compacidade em função da proporção de partículas em uma mistura binária com interação total, parcial e sem interação

Fonte: Formagini (2005).

A curva superior representa a variação da compacidade de uma mistura sem os efeitos de interação com coeficientes de afastamento e de parede iguais a zero. A curva inferior representa a variação da compacidade de uma mistura com o efeito de interação total com coeficientes de afastamento e de parede iguais a um. O efeito da variação da compacidade para uma mistura de grãos com interação parcial é mostrado na curva intermediária, neste caso, adotou-se um valor intermediário 0,5.

Na Figura 11 é indicado claramente que os efeitos de afastamento e de parede estão correlacionados à inclinação da função da compacidade virtual em y_2 igual a zero e y_1 igual a um. Utilizando a função índice de vazios os parâmetros $a_{1,2}$ e $b_{1,2}$ podem ser calculados pelas equações (22) a (24):

$$e(y_2) = 1 - \phi(y_2) \quad (22)$$

$$a_{1,2} = \beta_2 \left[\left| \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=0} + \frac{1}{\beta_1} \right] \quad (23)$$

$$b_{1,2} = \frac{\frac{1}{\beta_2} - 1 - \left| \frac{\partial e}{\partial y_2} \right|_{y_2=1}}{\frac{1}{\beta_1} - 1} \quad (24)$$

Alternativamente para a determinação dos coeficientes de interação de afastamento e de parede, em função dos diâmetros dos grãos, com uma razoável aproximação, é representada pelas seguintes equações (25) e (26):

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (25)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,50} \quad (26)$$

Mistura Polidispersa

A mistura é considerada polidispersa quando é constituída por mais de duas classes de grãos. São descritos os processos de empacotamento para misturas polidispersas com e sem interação e para misturas compostas por M materiais, onde cada material corresponde a uma mistura polidispersa de N classes.

Mistura Polidispersa sem Interação

Para a mistura polidispersa ser considerada sem interação, a diferença entre os tamanhos de partícula deve ser muito grande: $d_1 \gg d_2 \gg d_n$. Considerando uma classe i dominante, a compacidade virtual da mistura é dada pela equação (27):

$$\gamma = \gamma^i = \frac{\beta_i}{1 - (1 - \beta_i) \sum_{j=1}^{i-1} y_j - \sum_{j=i+1}^N y_j} \quad (27)$$

A compacidade virtual da mistura é dada pela equação (28):

$$\gamma = \text{Min}_{1 \leq i \leq N} (y_i) \quad (28)$$

Mistura Polidispersa com interação: Composta de N classes Monodispersas

Considera-se mistura polidispersa composta por N classes o caso de $d_1 \geq d_2 \geq d_3 \gg d_N$. Considerando uma classe i como dominante, esta sofre o efeito de parede das classes de agregados de maior tamanho e o efeito de afastamento das classes de agregados de maior tamanho, conforme a Figura 12.

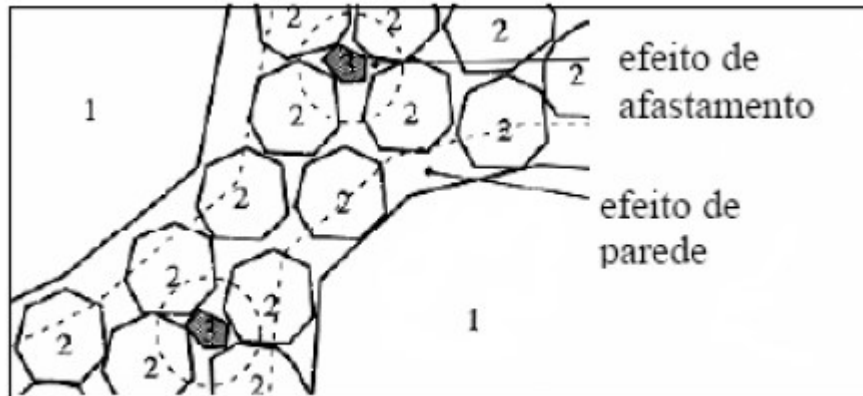


Figura 12 - Perturbações exercidas na classe intermediária

Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

A compacidade virtual da mistura é obtida por operações similares às desenvolvidas para o caso de misturas binárias como na equação (29):

$$\gamma^i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} * \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^N \left[1 - a_{ij} * \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \quad (29)$$

A compacidade virtual da mistura é dada pela equação (30):

$$\gamma = \text{Min}_{1 \leq i \leq N} (\gamma_i) \quad (30)$$

Mistura Polidispersa Composta por M Materiais com N Classes

Para o cálculo da compacidade virtual de uma mistura polidispersa composta por M materiais divididos em N classes cada um, considera-se que a faixa de cada classe é sempre fixa, e são variadas as proporções (p) do material que contribui para cada faixa, ou seja, o teor de cada classe não pode variar no interior do material ao qual ela pertence. A fração volumétrica de cada classe de um dado material só pode ser alterada se for variado o teor do material como um todo (SILVA, 2004).

Todos os materiais são compostos pelas mesmas classes granulares (mesmas faixas granulométricas), mesmo que algumas classes apresentem fração

volumétrica zero em alguns materiais. Denomina-se P_k a fração volumétrica do material k , e y_{kj} a fração volumétrica da classe j que pertence ao material k , sendo que a seguinte relação deve ser obedecida da equação (31):

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N P_k y_{kj} = 1 \quad (31)$$

A compacidade virtual da mistura, considerando a classe i como dominante é dada pela expressão (32):

$$\gamma^i = \frac{1}{\sum_{k=1}^M P_k \delta_{ki}} \quad (32)$$

Sendo δ_{ki} é dado pela fórmula (33):

$$\delta_{ki} = \sum_{j=1}^i \left[1 - b_{ij} \left(1 - \frac{1}{\beta_{kj}} \right) \right] y_{kj} + \sum_{j=i+1}^N \frac{a_{ij} * y_{kj}}{\beta_{kj}} \quad (33)$$

A compacidade virtual da mistura é dada pela equação (30).

Modelo de Empacotamento Real

A compacidade virtual não pode ser diretamente utilizada para prever o empacotamento de misturas, pois descreve apenas as características geométricas do material, já a compacidade real não depende apenas da geometria dos grãos, mas também do protocolo de compactação.

Para correlacionar compacidade virtual com a compacidade real utiliza-se uma modelagem que leva em consideração as condições reais de compactação da mistura. Define-se, desta forma, o índice de compactação, representado por uma grandeza escalar K que representa a energia associada a um procedimento operacional de empacotamento, pela fórmula (34):

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma^i}} \quad (34)$$

Para um empacotamento monodisperso utiliza-se a formula (35):

$$K = \frac{1}{\frac{\beta}{C} - 1} \quad (35)$$

Portanto, sendo K conhecido, a equação (35) torna-se uma equação implícita em C , pois todos os valores podem ser determinados, seja pelo usuário

(y_i), seja por procedimentos experimentais (β_i), seja ainda pelo Modelo de Empacotamento Virtual (γ^i).

Os valores de K determinados por De Larrard, (1999) são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Valores de K

Procedimento	Fator K
Lançamento simples do Material	4,10
Apiloamento	4,50
Vibração	4,75
Vibração e compressão de 10 kPa	9,00
Demanda de água	6,70
Empacotamento virtual	∞

Fonte: Adaptado de De Larrard (1999).

Conhecendo-se os valores de K para os diversos protocolos de empacotamento, determina-se o valor da compacidade virtual (β) de uma determinada classe granular através da equação:

$$\beta = \frac{1 + K}{K} * C \quad (36)$$

A realização de ensaios para a determinação da compacidade real deve seguir protocolos bem estabelecidos para haver reprodutibilidade dos valores determinados. Os protocolos experimentais utilizados têm sido aqueles correspondentes para misturas granulares pulverulentas com diâmetro menor que $100 \mu\text{m}$ utilizando K para demanda de água e para misturas granulares com diâmetro maior que $100 \mu\text{m}$ utilizando K para vibração e compressão de 10Kpa.

A compacidade real para uma mistura polidispersa contendo M materiais e N classes pode ser obtida pela equação (37):

$$K = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{k=1}^M \frac{P_k * y_{ki}}{\beta_{ki}}}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma^i}} \quad (37)$$

Sendo os valores de γ^i dado pela equação (30).

Se o valor do índice de compactação não é conhecido para um determinado protocolo de empacotamento, há dois procedimentos podem ser seguidos para a sua determinação.

O primeiro procedimento consiste em submeter uma mistura monodispersa de grãos cujo parâmetro β é conhecido, como é o caso de grãos esféricos ($\beta = 0,74$) ao protocolo de empacotamento determinando a compacidade real. Desta forma, pode-se determinar o valor de K . Este procedimento tem aplicação limitada, uma vez que é difícil de dispor de misturas granulares de partículas esféricas monodispersas.

O segundo procedimento consiste em uma análise inversa sobre os resultados experimentais de compactação obtidos de diversas proporções de uma mistura binária sem interação. A análise inversa consiste em estimar um valor inicial de K e calcular os valores de β_1 e β_2 para as compactações $C(y_2 = 0)$ e $C(y_2 = 1)$ que correspondem às misturas monodispersas de grãos de classe 1 e classe 2 respectivamente. Com estes valores determinados podem-se calcular os valores de compactação a partir de um valor tentativa de K , ou seja, calcular $C(y_2, K)$. Com as compactações experimentais, pode-se determinar um resíduo de y_2 e K . Cabe então variar K de forma a minimizar o resíduo. O valor obtido será considerado o Índice de Compactação do protocolo adotado e poderá ser utilizado para todos os outros tipos de grãos e de misturas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios realizados e descritos neste capítulo visam responder os objetivos, referentes à resistência mecânica, durabilidade e absorção do concreto.

Inicialmente descrevem-se os materiais utilizados para composição dos tipos de concretos a serem ensaiados, e posterior caracterização. Alguns materiais terão suas características obtidas com o fabricante e os demais serão caracterizados em laboratório.

Foram realizadas simulações numéricas com os modelos de empacotamento e o método da ABCP, mantendo o mesmo consumo de cimento, para identificar os traços de concreto de cada um dos modelos, então foram confeccionados os corpos de prova.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS

Para a parte experimental foi realizada a caracterização dos materiais que teve como fim obter informações para o desenvolvimento do traço do concreto, por meio de ensaios como: curva granulométrica, módulo de finura, diâmetro máximo do agregado, massa específica, massa unitária, e absorção de fluido.

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Sede Ecoville, durante o período de fevereiro de março de 2017, utilizando os equipamentos devidamente calibrados e utensílios de acordo com as normas citadas nos itens 3.1.2 e 3.1.3.

3.1.1 Cimento

No desenvolvimento dos traços de concreto o cimento utilizado foi o CP-V ARI RS, fabricado pela empresa Itambé com as seguintes especificações conforme exposto na tabela 1:

Tabela 1 – Especificações Cimento Itambé CP-V ARI RS

Tempo de pega		Resistencia à compressão			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
h : min	h : min	MPa	MPa	MPa	MPa
02:37	03:14	22,4	37,7	43	51,2

Fonte: Itambé, 2013

3.1.2 Agregado Miúdo

Para a composição do agregado miúdo, foi utilizada areia do tipo média e fina. Os materiais foram caracterizados conforme os ensaios descritos nas normas a seguir:

- Determinação da massa específica e massa específica aparente NBR NM 52 (ABNT,2009);
- Determinação da composição granulométrica NBR NM 248 (ABNT,2003);
- Determinação da massa unitária e do volume de vazios NBR NM 45 (ABNT,2006), e;
- Agregados para concreto – Especificação NBR 7211 (ABNT,2009).

Os ensaios realizados conforme as normas já citadas resultaram nas informações descritas nas tabelas 2, 3 e 4:

Tabela 2 – Massa unitária dos agregados miúdos

Agregado	Massa Unitária	Massa Específica	Absorção
Areia Fina	1,70 g/cm ³	2,59 g/cm ³	0,30%
Areia Média	1,28 g/cm ³	2,56 g/cm ³	9,24%

Fonte: O Autor

Sendo os dados da tabela 3 e figura 13 referentes a areia média.

Tabela 3 – Granulometria do agregado miúdo (areia média)

Peneira (mm)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Passante (%)
4,8	6,2	1,24	1,24	98,76
2,4	8,8	1,76	3,01	96,99
1,2	22,5	4,51	7,52	92,48
0,6	87	17,44	24,95	75,05
0,3	216,9	43,48	68,43	31,57
0,15	126,1	25,28	93,71	6,29
Fundo	31,4	6,29	100,00	0,00
Total	498,9 g	Módulo de Finura		1,99

Fonte: O Autor

Com os dados da granulometria da tabela 3 gerou-se o gráfico da curva granulométrica na figura 13:

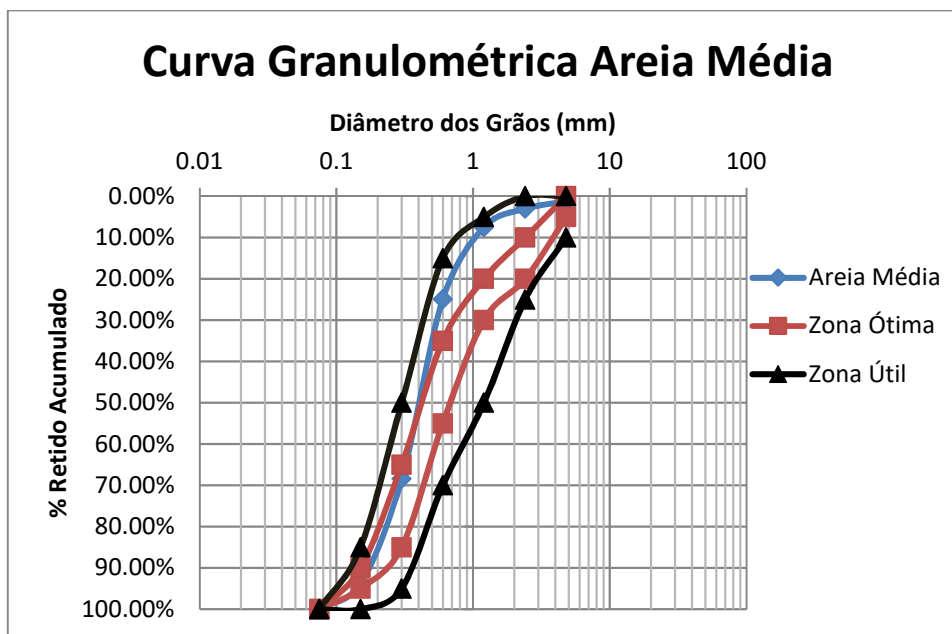


Figura 13 – Curva granulométrica da areia média

Fonte: O Autor

Analisando a figura 13 conforme a inclinação da curva e como apresenta dados em todos os diâmetros das peneiras a curva granulométrica a areia média apresenta granulometria contínua.

O módulo de finura da areia média está dentro da zona utilizável inferior que varia de 1,55 a 2,20 estabelecido pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Seguindo o mesmo procedimento para a areia fina tem-se as informações da tabela 4:

Tabela 4 – Granulometria do agregado miúdo (areia fina)

Granulometria Agregado Miúdo (Areia Fina)				
Peneira (mm)	Peso Retido (g)	% Retido	% Retido Acum.	% Passante
4,8	0	0,00%	0,00%	100,00%
2,4	0	0,00%	0,00%	100,00%
1,2	0	0,00%	0,00%	100,00%
0,6	0,4	0,08%	0,08%	99,92%
0,3	6,3	1,27%	1,35%	98,65%
0,15	386	77,70%	79,05%	20,95%
Fundo	104,1	20,95%	100,00%	0,00%
Total	496,8	Módulo de Finura		0,80

Fonte: O Autor

Com os dados da granulometria é possível gerar o gráfico da curva granulométrica na figura 14:

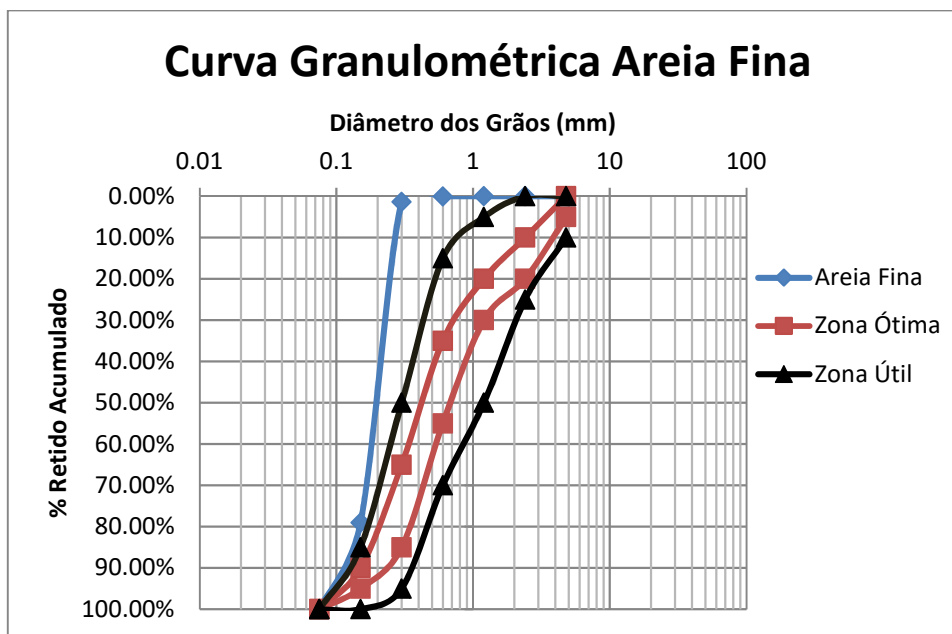


Figura 14 – Curva granulométrica da areia fina

Fonte: O Autor

Analisando a figura 14 conforme a inclinação da curva e como apresenta dados em praticamente em um dos diâmetros das peneiras a curva granulométrica a areia fina apresenta granulometria descontínua.

O módulo de finura da areia fina está fora do intervalo utilizável por norma dentro das peneiras utilizadas.

3.1.3 Agregado Graúdo

Para a composição do agregado graúdo, foi utilizado agregado tipo Brita 1. Os materiais foram caracterizados conforme os ensaios apresentados a seguir:

- Determinação da massa específica e massa específica aparente NBR NM 53 (ABNT,2009);
- Determinação da composição granulométrica NBR NM 248 (ABNT,2003);
- Determinação da massa unitária e do volume de vazios NBR NM 45 (ABNT,2006); e,
- Agregados para concreto – Especificação NBR 7211 (ABNT,2009).

Obtendo massa específica de 2,35 g/cm³ e massa unitária de 1,55 g/cm³.

Os ensaios levaram aos resultados descritos na tabela 5 e no gráfico da figura 15:

Tabela 5 – Granulometria do agregado graúdo

Granulometria Agregado Graúdo				
Peneira (mm)	Peso Retido (g)	% Retido	% Retido Acum.	% Passante
-	-	-	-	-
25	0	0,00%	0,00%	100,00%
19	16,9	1,69%	1,69%	98,31%
12,5	272	27,20%	28,89%	71,11%
9,5	390,3	39,03%	67,93%	32,07%
6,3	297,7	29,77%	97,70%	2,30%
Fundo	23	2,30%	100,00%	0,00%
Total	999,9	Dimensão Máxima Carac.		19mm

Fonte: O Autor

Conforme dados da tabela 3, o agregado graúdo possui dimensão máxima característica de 19 milímetros sendo característico da brita classificada comercialmente como brita 1.

Com os dados da granulometria é possível gerar o gráfico da curva granulométrica na figura 15:

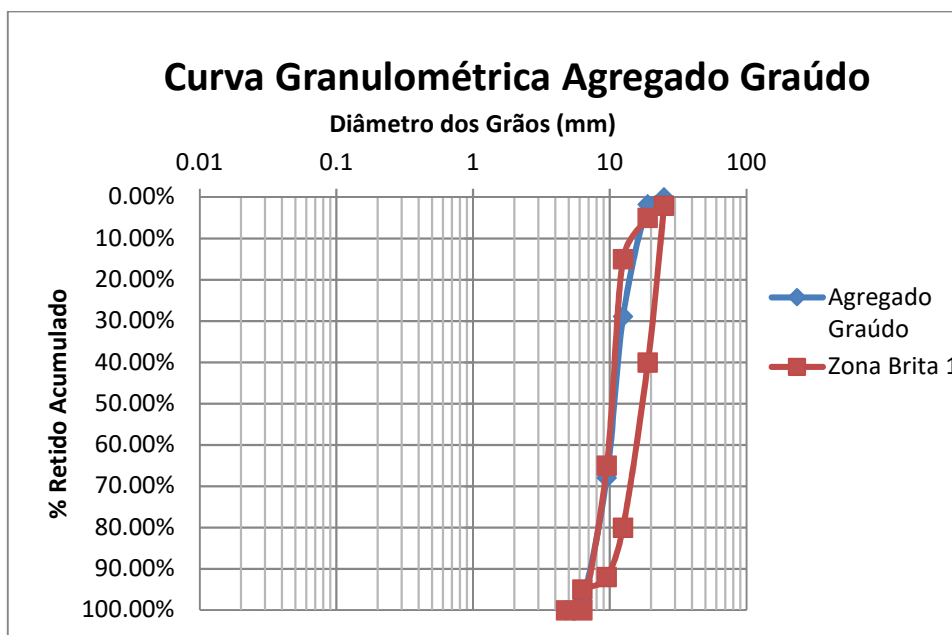


Figura 15 – Curva granulometria da areia graúdo

Fonte: O Autor

A curva granulométrica também indica que o agregado está dentro da curva de agregado caracterizado comercialmente de Brita 1.

3.1.4 Água de Amassamento

A água proveniente da rede pública de Curitiba está dentro dos parâmetros estabelecidos pela NBR 15900-1 (ABNT,2009), portanto, considera-se desnecessários os ensaios em relação a estes parâmetros.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foram realizadas simulações numéricas com os modelos de empacotamento propostos para identificar o traço de concreto para a confecção dos corpos de prova, totalizando, 44 corpos de prova cilíndricos de dimensões de 10x20cm com os seguintes propósitos:

- 1 corpo de prova de cada traço para ensaio de compressão axial aos 7 dias, totalizando 4 corpos de prova;
- 6 corpos de prova de cada traço para o ensaio de compressão axial aos 28 dias, totalizando 24 corpos de prova, e;
- Média de 4 corpos de prova de cada traço para o ensaio de envelhecimento acelerado, totalizando 16 corpos de prova;

. No tópico a seguir são descritos os resumos práticos de cada um dos modelos apresentados.

3.2.1 Modelo de Alfred

A formulação matemática a ser utilizada no modelo de Alfred é dada pela equação (3). A porcentagem passante (CPFT), para a linha exemplo a seguir é relativo a peneira 4,8mm:

$$CPFT = 100 \left(\frac{4,8^{0,37} - 0,075^{0,37}}{25^{0,37} - 0,075^{0,37}} \right) = 48\%$$

Está equação é aplicada para cada um dos diâmetros existentes na curva granulométrica dos agregados gerando valores teóricos de empacotamento de partículas, sendo necessário o peneiramento para a obtenção da quantidade devida de agregados, desta forma realizou-se o empacotamento pelo modelo de Alfred utilizando a mistura com os agregados disponíveis, esta mistura sendo realizada

com as seguintes porcentagens para a mistura teórica de 55% de agregado graúdo e 45% para agregados mídos, e a mistura real de 33% para brita, 46% para areia média e 21% para areia fina. Gerando os dados teóricos e reais, de acordo com a tabela 6:

Tabela 6 – Resultados do modelo de Alfred

PENEIRA	PASSANTE (%)	RETIDA (%)	RET. ACUM. TEÓRICO (%)	RET. ACUM. REAL (%)
25	100	0,0	0,0	0,0
19	89	10,9	10,9	0,6
12,5	74	14,7	25,6	9,5
9,5	66	8,5	34,1	22,4
6,3	55	11,2	45,2	32,2
4,8	48	6,5	51,7	33,6
2,4	34	13,9	65,6	34,4
1,2	24	10,8	76,4	36,5
0,6	15	8,3	84,7	44,5
0,3	9	6,4	91,2	64,8
0,15	4	5,0	96,1	92,7
FUNDO	0	3,9	100,0	100,0

Fonte: O Autor

Os valores relativos à tabela 6 geram a curva granulométrica da figura 16:

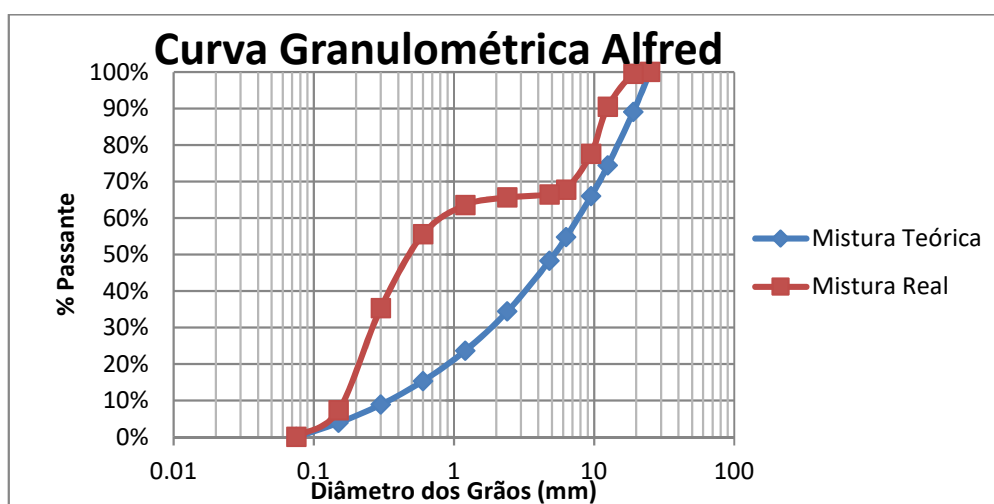


Figura 16 – Curvas granulométricas da mistura de Alfred

Fonte: O Autor

Pode-se notar que há certa discrepância nas curvas granulométricas entre o modelo teórico e o real desenvolvido para o modelo de Alfred.

Estas equações foram aplicadas na combinação de misturas dos agregados existentes no empacotamento de partículas e todas as simulações matemáticas estão descritas no anexo A.

3.2.2 Modelo de Toufar

A formulação matemática a ser utilizada no modelo de Toufar é dada pelas equações (4), (5), (6), (7) e (8). Apresentando as equações na prática como exemplo:

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{0,55}{0,66} + \frac{0,45}{0,50} - 0,45 \left(\frac{1}{0,50} - 1 \right) * 0,97 * 0,87} = 0,7371;$$

Para o cálculo de k_d :

$$k_d = \left(\frac{4,8 - 0,075}{0,075 + 4,8} \right) = 0,97;$$

Para o coeficiente x:

$$x = \frac{0,55}{0,45} * \frac{0,50}{0,66(1 - 0,5)} = 1,8621;$$

Calculando k_s :

$$k_s = \frac{0,3881 * 1,8621}{0,4753} = 0,8741.$$

As equações são aplicadas nas misturas dos agregados gerando valores teóricos de empacotamento de partículas, sendo necessário o peneiramento para a obtenção da quantidade devida de agregados, desta forma, realizou-se o empacotamento pelo modelo de Toufar utilizando a mistura com os agregados disponíveis, esta mistura sendo realizada com as seguintes porcentagens para a mistura teórica de 58% para agregado graúdo, 19% de areia média e 19% de areia fina, e a mistura real de 56% para brita, 20% para areia média e 24% para areia fina. Gerando os dados teóricos e reais de acordo com a tabela 7:

Tabela 7 – Resultados do modelo de Toufar

PENEIRA (mm)	TEÓRICO		REAL	
	PASSANTE (%)	RET. ACUM. (%)	PASSANTE (%)	RET. ACUM. (%)
25	100,00	0,00	100,00	0,00
19	99,02	0,98	99,05	0,95
12,5	83,24	16,76	83,82	16,18
9,5	60,60	39,40	61,96	38,04
6,3	43,33	56,67	45,29	54,71
4,8	41,76	58,24	43,75	56,25
2,4	41,43	58,57	43,40	56,60
1,2	40,57	59,43	42,50	57,50
0,6	37,26	62,74	39,01	60,99
0,3	28,71	71,29	30,01	69,99
0,15	6,32	93,68	6,61	93,39
Fundo	0,00	100,00	0,00	100,00

Fonte: O Autor

Os valores relativos à tabela 7 geram a curva granulométrica da figura 17:

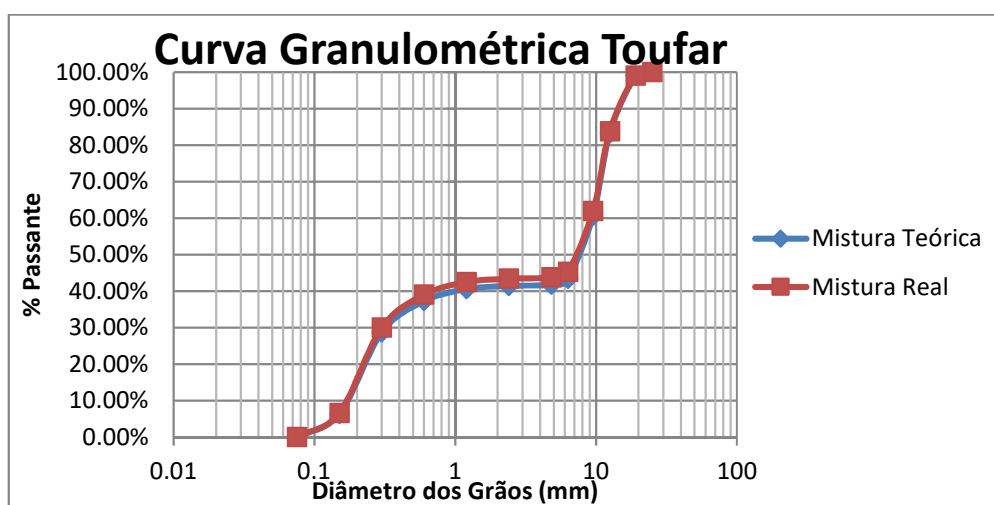


Figura 17 – Curvas granulométricas da mistura de Toufar

Fonte: O Autor

Pode-se notar que as curvas granulométricas entre o modelo teórico e o real desenvolvido para o modelo de Toufar estão semelhantes.

Estas equações (4), (5), (6), (7) e (8) foram aplicadas na combinação de misturas dos agregados existentes no empacotamento de partículas e todas as simulações matemáticas estão descritas no anexo B.

3.2.3 Modelo de De Larrard

A formulação matemática a ser utilizada no modelo de De Larrard é dada pela equação para uma mistura polidispersa contendo M materiais e N classes, obtida pela equação (37), (32) e (33).

As equações são aplicadas nas misturas dos agregados gerando valores teóricos de empacotamento de partículas, sendo necessário o peneiramento para a obtenção da quantidade devida de agregados, desta forma, realizou-se o empacotamento pelo modelo de De Larrard utilizando os agregados disponíveis, esta mistura sendo realizada com as seguintes porcentagens para a mistura teórica de 58% para agregado graúdo, 32% de areia média e 10% de areia fina, e a mistura real de 56% para brita, 34% para areia média e 10% para areia fina. Gerando os dados teóricos e reais de acordo com a tabela 8:

Tabela 8 – Resultados do modelo de De Larrard

PENEIRA (mm)	TEÓRICO		Real	
	PASSANTE (%)	RET. ACUM. (%)	PASSANTE (%)	RET. ACUM. (%)
25	100,00	0,00	100,00	0,00
19	99,02	0,98	99,06	0,94
12,5	83,24	16,76	83,88	16,12
9,5	60,60	39,40	62,10	37,90
6,3	43,33	56,67	45,48	54,52
4,8	41,60	58,40	43,78	56,22
2,4	41,04	58,96	43,19	56,81
1,2	39,59	60,41	41,68	58,32
0,6	34,02	65,98	35,84	64,16
0,3	19,98	80,02	21,14	78,86
0,15	4,24	95,76	4,49	95,51
Fundo	0,00	100,00	0,00	100,00

Fonte: O Autor

Durante a execução do concreto, foi necessário realizar ajustes nos traços de Alfred e Toufar para corrigir o teor de argamassa e a trabalhabilidade, assim o traço efetivamente aplicado foi o apresentado na tabela 10:

Tabela 10– Traços práticos dos modelos de empacotamento.

Modelo	Cimento	Areia Fina	Areia Média	Brita	Água
ABCP	1	-	1,22	2,68	0,50
Alfred	1	0,95	2,11	1,50	0,53
Toufar	1	1,15	0,93	2,63	0,49
De Larrard	1	0,36	1,14	1,90	0,50

Fonte: O Autor.

Ambos os traços modificados foram adicionados 50mg de aditivo superplastificante a base de policarboxilatos.

Mesmo com a correção do traço efetuada o concreto executado pelo modelo de Toufar ainda apresentou-se bastante seco. Para acertar a trabalhabilidade seria necessário alterar bastante a relação água cimento, afetando a comparação entre os métodos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão contextualizados os resultados obtidos dos ensaios de Compressão Axial aos 7 dias, 28 dias, e após submetidos ao envelhecimento acelerado.

Os resultados obtidos pelo concreto moldado pelo modelo de Toufar não serão utilizados para conclusões mais incisivas em comparação com os demais modelos.

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de Compressão Axial para avaliar a resistência mecânica.

Aos 7 dias os corpos de prova para os modelos de ABCP, Alfred, Toufar e De Larrard, alcançaram a resistência a compressão de, respectivamente, 21,7 MPa, 24,2 MPa, 24,3 MPa e 22,5 MPa. Pode-se observar que aos 7 dias os corpos de prova já adquiriram resistência próxima a esperada de 25 MPa.

Os resultados referentes as resistências aos 28 dias podem ser observados conforme tabela 11:

Tabela 11 – Resultados obtidos compressão axial aos 28 dias.

Modelo	Resist. Média* (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Erro (Mpa)	Consumo Cimento (kg/m ³)
ABCP	28,4	1,8	0,8	410
Alfred	33,5	1,8	0,8	352
Toufar	25,7	2,0	0,9	372
De Larrad	37,1	3,0	1.3	436

*Valores obtidos por média da resistência de 6 corpos de prova

Fonte: O Autor.

Com base nas informações da tabela 11 é possível estabelecer relações dos modelos de empacotamento para este experimento com o método da ABCP:

- O modelo de Alfred consome 14% a menos de cimento por metro cúbico (58kg/m³) e houve acréscimo de 18% na resistência dos corpos de prova na média (5,1 MPa);
- O modelo de Toufar, apesar dos empecilhos citados, consome 9% a menos de cimento por metro cúbico (38kg/m³) e teve resistência

quase equivalente do método da ABCP em valor absoluto, atingindo a resistência de dosagem,e;

- O modelo de De Larrard consome 6% a mais de cimento por metro cúbico (26kg/m^3), contudo, houve acréscimo de 31% na resistência dos corpos de prova na média (8,7 MPa).

Portanto, considerando o modelo de Alfred quando comparado com o modelo da ABCP, é possível reduzir, aproximadamente, um saco de cimento por metro cúbico adquirindo acréscimo de resistência, somente utilizando o modelo de empacotamento de partículas ocasionando economia e redução de material, conseqüentemente, sustentabilidade considerável, dependendo da demanda de cimento.

Ainda comparando os modelos de empacotamento com o modelo da ABCP, quando o cálculo do consumo de cimento para o ABCP é realizado para adquirir a resistência obtida dos modelos de Alfred e De Larrard, a diferença de consumo é elevada para 75kg/m^3 (427kg/m^3) e 9kg/m^3 (445kg/m^3) respectivamente, representando uma diferença de 17% para Alfred e 2% para De Larrard, frisando que neste caso o modelo de De larrard consumiu menos cimento.

Continuando com base nas informações da tabela 11, a partir das médias e dos erros associados, propagados por correção de Student, é possível estabelecer se há ou não diferença estatística entre os resultados das resistências comparados para o intervalo de confiança de 68%, 95% e 99%:

- Entre ABCP e Alfred há 99% de certeza que estes valores são estatisticamente diferentes, sendo o modelo de Alfred, apresentando maior resistência;
- Entre ABCP e De Larrard há 99% de certeza que estes valores são estatisticamente diferentes, sendo o modelo de De Larrard, apresentando maior resistência, e;
- Entre Alfred e De Larrard há 95% de certeza que estes valores são estatisticamente diferentes, sendo o modelo de De Larrard, apresentando maior resistência.

Desta forma, estatisticamente é possível estabelecer previsões para uma próxima média de resistências dos modelos de empacotamento de partículas seguindo os traços de concreto apresentados:

- ABCP apresenta resistência média de $28,4 \pm 0,8$ MPa;
- Alfred apresenta resistência média de $33,5 \pm 0,8$ MPa, e;
- De Larrard apresenta resistência média de $37,1 \pm 1,3$ MPa.

Portanto, apesar do modelo de empacotamento de partículas De Larrard apresentar acréscimo no consumo de cimento, há aumento expressivo na resistência mecânica sendo comprovado estatisticamente a diferença deste dos demais modelos.

4.2 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

Os corpos de prova de cada um dos ensaios foram colocados em uma câmara climática (ilustrado na figura 19) para simular as diferentes estações do ano, acelerando o processo de desgaste da estrutura quanto às intempéries.

A câmara foi configurada nos ciclos descritos na tabela 12:



Figura 19 – Câmara Climática

Fonte: O Autor

Tabela 12 – Ciclos configurados na câmara climática

Duração (minutos)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
60	10	90
60	20	80
60	35	70
60	15	60
60	-4	60

Fonte: O Autor.

Os corpos de prova foram submetidos aos ciclos nas condições descritas na tabela 12 durante uma semana. Estes corpos de prova dos modelos de ABCP, Toufar, Alfred e De Larrard durante o ensaio de compressão axial, nesta etapa, possuíam idades, respectivamente, de 50 dias, 43 dias, 40 dias e 40 dias e, então, foi realizado o ensaio de compressão axial nestes corpos de prova, resultando nas informações contidas na tabela 13:

Tabela 13 – Resultados obtidos compressão axial concreto envelhecido

Modelo	Resist. Média* (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Erro (Mpa)	Consumo Cimento (kg/m ³)
ABCP	22,9	3,3	2,5	410
Alfred	33,0	2,4	1,2	352
Toufar	28,9	5,4	3,2	372
De Larrad	36,5	2,0	1,2	436

*Valores obtidos por média da resistência de 4 corpos de prova

Fonte: O Autor.

Continuando com base nas informações da tabela 13, a partir das médias e dos erros associados, propagados por correção de Student, é possível estabelecer se há ou não diferença estatística entre os resultados das resistências comparados para o intervalo de confiança de 68%, 95% e 99%:

- Entre ABCP e Alfred há 99% de certeza que estes valores são estatisticamente diferentes, sendo o modelo de Alfred, apresentando maior resistência;
- Entre ABCP e De Larrard há 99% de certeza que estes valores são estatisticamente diferentes, sendo o modelo de De Larrard, apresentando maior resistência, e;
- Entre Alfred e De Larrard há 95% de certeza que estes valores são estatisticamente diferentes, sendo o modelo de De Larrard, apresentando maior resistência.

Manteve-se as afirmações expostas antes dos corpos de prova submetidos a câmara climática conforme o item 4.1 Desta forma, estatisticamente é possível estabelecer previsões para uma próxima média de resistências dos modelos de empacotamento de partículas envelhecidos seguindo os traços de concreto apresentados:

- ABCP apresenta resistência média de $22,9 \pm 2,5$ MPa;
- Alfred apresenta resistência média de $33 \pm 1,2$ MPa, e;
- De Larrard apresenta resistência média de $36,5 \pm 2,0$ MPa.

Então, nota-se que os modelos de empacotamento de partículas sofreram pouca influência na resistência mecânica, pois houve porcentagem de variação quase nula, diferente do modelo da ABCP que mesmo sendo o concreto com maior

idade houve decréscimo de 21% de sua resistência mecânica à compressão submetidos as condições da câmara climática.

Portanto, o concreto desenvolvido ao empacotamento de partículas mostrou-se mais durável, mantendo suas características originais de resistência do que o concreto desenvolvido pelo método da ABCP.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios, e analisando os resultados obtidos tendo em vista que o objetivo geral desta pesquisa é comparar, em termos de resistência a compressão axial, os modelos de empacotamento de agregados pelos métodos de Toufar, De Larrard e Alfred, foi verificado que o Modelo de De Larrard apresentou melhores resultados de resistência à compressão média de $37,1 \pm 1,3$ MPa quando comparado aos demais modelos.

Também, foi verificado que o modelo de Alfred houve menor consumo de cimento enquanto aumentou a resistência do concreto, contudo, apesar de ter maior consumo de cimento o modelo de De Larrard houve melhora significativa na resistência do concreto. Os modelos de empacotamento de partículas também provaram ser mais duráveis quanto ao envelhecimento acelerado, pois houve pouca variação de resistência após o ensaio.

Portanto, conclui-se que os modelos de empacotamento estudados apresentam melhores características tanto de resistência, quanto de durabilidade e trabalhabilidade quando comparado com o concreto padrão.

5.2 TRABALHOS FUTUROS PROPOSTOS

- Efetuar o ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio nos concretos produzidos por empacotamento de partículas;
- Analisar o comportamento dos concretos por empacotamento de partículas quanto à ambientes agressivos como cloretos, sulfatos e carbonatação, e;
- Analisar a viabilidade de aplicação do empacotamento de partículas para concretos de alta resistência e concreto auto adensável.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume de vazios, 2006. 8 p.

_____. **NBR NM 52**: Agregados Miúdos - Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente. 2009. 6 p.

_____. **NBR NM 53**: Agregados Graúdos - Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e absorção de água. 2009. 8 p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da Composição Granulométrica, 2003. 6 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos - Especificações. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para Concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

_____. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland – Controle, Preparo e Recebimento - Procedimento - Especificações. Rio de Janeiro, 2015. 19 p.

_____. **NBR 15900-1**: Água para Amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção**. São Paulo: Pini, 2012. 459 p.

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.

DA SILVA, T. J. **Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto**, in ISAIA G. C., **Concreto: ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 931 p.

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

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. **Agregados Para a Construção Civil**. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2010

FENNIS, S. A. A. M.; **Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization**. 2011. 256 p. Dissertação (Doutorado) - Universidade Técnica de Delft - Holanda, 2011.

FORMAGINI, S. **Utilização do modelo de empacotamento compressível de partículas para otimização de misturas granulares**, Exame de qualificação para

candidatura ao doutorado - Seminário, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2003.

ITAMBÉ, **Relatório de características do cimento CP V ARI**. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/wpcontent/themes/itambe/_assets/pdf/relatorios/2013-13/CP-V-ARI.pdf> Acesso em: 15 de Junho de 2017.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J, **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre, Editora Bookman – 2ª edição, 2013. 448 p.

OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 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.

SILVA, A.S.M.; **Dosagem de Concreto pelos Métodos de Empacotamento Compressível e Aitcin-Faury Modificado**. 2004. 124p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

SOBRAL, E. S.. **Propriedades do Concreto Fresco**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 2000. 447 p. (Materiais de Construção, v. 1).

ANEXOS

ANEXO A

Simulação Matemática de Alfred

Diâmetro máximo (DL) =	25
Diâmetro mínimo (DS) =	0,075
Coefficiente de empacotamento (q) =	0,37

PENEIRA	% PASSANTE	% RETIDA	% RET. ACUM.
25	100%	0,0%	0,0%
19	89%	10,9%	10,9%
12,5	74%	14,7%	25,6%
9,5	66%	8,5%	34,1%
6,3	55%	11,2%	45,2%
4,8	48%	6,5%	51,7%
2,4	34%	13,9%	65,6%
1,2	24%	10,8%	76,4%
0,6	15%	8,3%	84,7%
0,3	9%	6,4%	91,2%
0,15	4%	5,0%	96,1%
0,075	0%	3,9%	100,0%

MU	1,55
ME	2,44
Empacotamento	0,82

		CONSUMO/m ³	TRAÇO
A/C	0,50		
CIMENTO	0,12	352	1
AREIA FINA	0,16	427	1,21
AREIA MÉDIA	0,37	949	2,70
BRITA	0,29	678	1,93
ÁGUA	0,06	176	0,5

ANEXO B

Simulação Matemática de Toufar

Menor diâmetro (d1) =	0,075	Relação entre os diâmetros	MU 1 =	1,70	ME 1 =	2,59
Maior diâmetro (d2) =	4,8	kd =	MU 2 =	1,28	ME 2 =	2,56
		0,969230769				
fator de densidade (a1) =	0,66					
fator de densidade (a2) =	0,50					

MISTURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
a/c																
r1	0,50	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65
r2	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35
x	1,5235	1,5857	1,6505	1,7180	1,7885	1,8621	1,9390	2,0196	2,1039	2,1924	2,2853	2,3830	2,4858	2,5941	2,7085	2,8294
ks	0,8251	0,8357	0,8460	0,8558	0,8651	0,8741	0,8826	0,8908	0,8986	0,9059	0,9129	0,9196	0,9259	0,9318	0,9374	0,9427
at	0,7343	0,7352	0,7360	0,7366	0,7369	0,7371	0,7370	0,7368	0,7365	0,7359	0,7352	0,7344	0,7334	0,7322	0,7310	0,7297

Menor diâmetro (d1) =	2,2	Relação entre os diâmetros	MU 1 =	1,51	ME 1 =	2,58
Maior diâmetro (d2) =	25	kd =	MU 2 =	1,55	ME 2 =	2,35
		0,83815082				
fator de densidade (a1) =	0,74					
fator de densidade (a2) =	0,66					

MISTURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
a/c																
r1	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
r2	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55
x	1,1265	1,1810	1,2370	1,2947	1,3541	1,4154	1,4786	1,5438	1,6111	1,6806	1,7524	1,8267	1,9035	1,9830	2,0653	2,1507
ks	0,7308	0,7470	0,7625	0,7772	0,7911	0,8043	0,8168	0,8286	0,8398	0,8504	0,8604	0,8699	0,8788	0,8872	0,8951	0,9026
at	0,8019	0,8040	0,8059	0,8076	0,8090	0,8103	0,8113	0,8121	0,8128	0,8133	0,8137	0,8138	0,8139	0,8138	0,8136	0,8132

		CONSUMO/m ³	TRAÇO
A/C	0,50		
CIMENTO	0,12	372	1
AREIA FINA	0,19	487	1,31
AREIA MÉDIA	0,15	394	1,06
BRITA	0,47	1109	2,98
ÁGUA	0,06	186	0,5

ANEXO C

Simulação Matemática de De Larrard

MU 1	1,7 g/cm ³	areia fina	ME 1	2,59 g/cm ³
MU 2	1,28 g/cm ³	areia média	ME 2	2,56 g/cm ³
MU 3	1,55 g/cm ³	brita	ME 3	2,35 g/cm ³

β1	0,6564	d1	0,15	K =	4,5
β2	0,5000	d2	0,3		
β3	0,6596	d3	9,5		

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
y1	0,05	0,1	0,15	0,2	0,43	0,38	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,3
y2	0,43	0,38	0,33	0,28	0,05	0,1	0,17	0,22	0,27	0,32	0,37	0,12
y3	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
soma	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

a12	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196	0,71196
a13	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690	0,12690
a23	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944	0,17944
b12	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645	0,64645
b13	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359	0,02359
b23	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699	0,04699

γ1	1,26823	1,26026	1,25240	1,24464	1,21013	1,21747	1,36141	1,37070	1,38012	1,38967	1,39936	1,35224
γ2	0,93598	0,96589	0,99777	1,03182	1,22399	1,17636	1,20134	1,15543	1,11289	1,07338	1,03657	1,25106
γ3	0,59078	0,60826	0,62681	0,64652	0,75588	0,72907	0,68030	0,65851	0,63807	0,61886	0,60077	0,70359

φ =	0,520	0,857	0,891	0,564	0,645	0,626	0,586	0,570	0,554	0,956	0,916	0,604
K =	4,495	4,533	4,535	4,494	4,508	4,505	4,498	4,522	4,505	4,519	4,494	4,532

Estimativa de Compacidade	0,60819
---------------------------	---------

A/C		CONSUMO/m ³	TRAÇO
A/C	0,50		
CIMENTO	0,15	436	1
AREIA FINA	0,06	158	0,36
AREIA MÉDIA	0,19	498	1,14
BRITA	0,35	829	1,90
ÁGUA	0,07	218	0,5