

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

ADRIAN DOUGLAS BARANHUK

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS
AGREGADOS NA POROSIDADE DO CONCRETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

ADRIAN DOUGLAS BARANHUK

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS
AGREGADOS NA POROSIDADE DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia de Produção Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS
NA POROSIDADE DO CONCRETO**

Por

ADRIAN DOUGLAS BARANHUK

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 9 de setembro de 2014 às dezessete horas e trinta minutos, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Prof.^a Janine Nicolosi Corrêa, Dra.
UTFPR

Prof.^a Eliane Betânia Carvalho Costa, Dra.
UTFPR

Dedico este trabalho aos meus pais Teodosio e Elizabeth pelo apoio incondicional.

As minhas irmãs Gislaine e Elaine.

A minha namorada Thaise por compreender os meus dias de ausência.

Aos professores que dedicam seu tempo em ensinar e transmitir suas experiências.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelos desafios que tens colocado em meu caminho, pois sem eles não poderia evoluir e almejar maiores sonhos.

Aos meus pais, irmãs, namorada e parentes que sempre estiveram me apoiando e sempre estiveram ao meu lado, principalmente nos meus maus momentos de estresse e revolta.

In memoriam ao professor José Armando Bassetti Neto pelos seus ensinamentos e por ser um exemplo a ser seguido.

Aos mestres que deste pequeno até a data de hoje estiveram lapidando-me para que eu seja não apenas um excelente profissional, mas também um cidadão.

Ao laboratorista Gustavo do departamento de construção civil que esteve sempre ajudando quando se fez necessário.

À professora Dra. Juliana Casali pelo início de orientação ao qual se deu a escolha desta pesquisa.

Ao meu professor orientador Dr. Wellington Mazer que aceitou meu tema de pesquisa e minhas dificuldades para orientar os melhores caminhos para atingir meus objetivos almejados na pesquisa.

À professora Dra. Janine Nicolosi Corrêa pelo apoio e sugestões para melhoria deste trabalho.

Aos seguranças da UTFPR que permitiram meu acesso aos laboratórios fora dos horários letivos.

Aos meus amigos que de alguma forma ajudaram-me a evoluir e a vencer a cada desafio, estando sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis.

A cada pessoa, principalmente aquelas que eu tenha esquecidos de citar, agradeço pelos poucos momentos que passamos juntos e os conhecimentos para mim transmitidos.

RESUMO

A resistência às ações externas as quais o elemento de concreto está sujeito está relacionada com a porosidade do concreto. Um dos fatores que interfere na resistência é a relação água/cimento, onde quanto maior a relação água/cimento menor é a resistência. Este consumo de água está relacionado ao índice de vazios do concreto no estado endurecido; quanto mais água o concreto consumir, maior será a influência no índice de vazios. No processo de cura, bolhas de ar incorporadas ficam aprisionadas no interior da massa do concreto, em geral interligadas umas as outras, criando pequenas capilaridades que facilitam a penetração de agentes agressivos e conseqüentemente como a massa de concreto torna-se não uniforme, criando pontos de fragilidade. Os modelos de empacotamentos de partículas têm como objetivo diminuir este índice de vazios, preenchendo estes vazios com partículas cada vez menores, dificultando a interligação de bolhas de ar incorporadas no amassamento do concreto. Existem alguns modelos matemáticos que se dividem em modelos de distribuição contínua e de distribuição discreta, para a determinação do empacotamento das partículas. O trabalho apresentado busca aplicar dois modelos, sendo um modelo representante do grupo de distribuição discreta e o outro modelo representante do grupo de distribuição contínua. Os traços do concreto tiveram a granulometria dos agregados modificadas pelos modelos matemáticos, criando assim novos traços com nova distribuição granulométrica. Estes dois modelos foram comparados ao traço definido a partir dos traços utilizados em algumas concreteiras no estado do Paraná. Foram utilizados os mesmos materiais que as concreteiras utilizam para produzir seus concretos. A análise de empacotamento de partículas deu-se por ensaios cujo objetivo é analisar a durabilidade da massa de concreto. Para a comparação entre os corpos de prova, os mesmos foram preparados e ensaiados de forma padronizada. Os melhores resultados foram obtidos para traços que tiveram sua granulometria definida pelos modelos matemáticos de empacotamento de partículas. Os concretos produzidos por traços com a granulometria controlada por um modelo matemático apresentaram melhores resultados em relação ao concreto produzido pelo traço de referência, obtendo um concreto mais resistente aos agentes agressivos, em outras palavras, com maior durabilidade.

Palavras-chave: Empacotamento de Partícula. Porosidade. Durabilidade.

ABSTRACT

The resistance to external actions which the concrete element is subject is related to the porosity of concrete. One of the factors that interfere in resistance is the water / cement ratio, where the higher the water / cement is less resistance. This water consumption is related the voids of concrete in the hardened state; The more concrete water consumption, the greater the influence on the voids. In the curing process of incorporated air bubbles are trapped inside the mass of concrete generally interconnected to each other, creating small capillaries which facilitate the penetration of aggressive agents and consequently as the mass of concrete becomes non-uniform, creating points fragility. Models of packagings of particles aim to reduce this voids, filling these voids with smaller and smaller particles, making the interconnection of air bubbles incorporated in the kneading of the concrete. There are some mathematical models which are divided into continuous distribution and discrete distribution models, for determining the packaging of the particles. The presented work aims to apply two models, one model group representative discrete distribution model and the other group representative continuous distribution. Traces of concrete had the chipping size modified by mathematical models, thus creating new features with new particle size distribution. These two models were compared to the mark set by tracing used in some concrete in the state of Paraná. The same materials that concrete producers to make their practical use were used. The analysis of particle packaging was performed by testing aiming to examine the durability of mass concrete. To compare the samples, they were prepared and tested in a standardized manner. The best results were obtained for traits that had their grain size defined by mathematical models of particle packaging. The concrete produced by dashes with particle size controlled by a mathematical model showed better results in relation to the concrete produced at the mark, getting a concrete more resistant to aggressive agents, in other words, with greater durability.

Keywords: Particle Packaging. Porosity. Durability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1– <i>Slump Test</i> : ensaio de consistência | 11 |
| Figura 2 – Segregação: exemplos de seções de concreto..... | 13 |
| Figura 3 – Efeitos de empacotamento de partículas | 19 |
| Figura 4 – Modelo de Andreasen: distribuição granulométrica..... | 20 |
| Figura 5 – Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas | 21 |
| Figura 6 – Modelo de Furnas: apresentação da distribuição granulométrica | 23 |
| Figura 7 - Cimento Portland utilizado na pesquisa | 27 |
| Figura 8 – Agregados miúdos..... | 27 |
| Figura 9 – Agregados graúdos | 28 |
| Figura 10 – Medidor de ar incorporado ao concreto..... | 33 |
| Figura 11 – Câmara de envelhecimento..... | 35 |
| Figura 12 – Produção do concreto a partir do primeiro traço do modelo de Alfred.... | 46 |
| Figura 13 – Produção do concreto a partir do traço corrigido do modelo de Alfred... | 47 |
| Figura 14 - Produção do concreto a partir do traço pelo modelo de Toufar | 48 |
| Figura 15 – Produção do concreto a partir do traço de referência | 48 |
| Figura 16 – Absorção de água por capilaridade | 54 |
| Figura 17 – Corpos de Prova após os ciclos na câmara de envelhecimento | 57 |
| Figura 18 – Laudo técnico do cimento CP V-ARI-RS | 77 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 – Curva granulométrica: Agregado miúdo..... | 38 |
| Gráfico 2 – Curva granulométrica: Agregado graúdo | 39 |
| Gráfico 3 – Curva granulométrica ideal: Agregado miúdo (1º traço) | 41 |
| Gráfico 4 – Curva granulométrica ideal: Agregado graúdo (1º traço)..... | 42 |
| Gráfico 5 – Curva granulométrica ideal: Concreto a ser produzido (1º traço) | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Ciclos para programação na câmara de envelhecimento | 34 |
| Tabela 2 – Análise granulométrica: Areia natural..... | 36 |
| Tabela 3 – Análise granulométrica: Areia industrial | 36 |
| Tabela 4 – Análise granulométrica: Brita 0 | 37 |
| Tabela 5 – Análise granulométrica: Brita 1 | 37 |
| Tabela 6 – Caracterizações dos agregados | 37 |
| Tabela 7 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo | 38 |
| Tabela 8 – Curva granulométrica ideal: Agregado miúdo | 40 |
| Tabela 9 – Curva granulométrica ideal: Agregado graúdo..... | 40 |
| Tabela 10 – Curva granulométrica ideal: Concreto a produzir..... | 41 |
| Tabela 11 – Porcentagem de materiais para produção do traço – Modelo Alfred (1º traço)..... | 43 |
| Tabela 12 – Porcentagem de materiais para produção do traço – Modelo Toufar..... | 44 |
| Tabela 13 – Resultados da análise no estado fresco do concreto..... | 45 |
| Tabela 13 – Resultados da análise no estado fresco do concreto..... | 46 |
| Tabela 14 – Resultado médio da absorção de água por imersão total..... | 49 |
| Tabela 15– Comparativo entre os traços produzidos: Absorção de água por imersão total | 49 |
| Tabela 16 – Resultado médio dos índices de vazios..... | 50 |
| Tabela 17– Comparativo entre os traços produzidos: Índice de vazios..... | 50 |
| Tabela 18 – Resultado médio da massa específica na condição seca..... | 50 |
| Tabela 19 – Comparativo entre os traços produzidos: Massa específica na condição seca..... | 51 |
| Tabela 20 – Resultado médio da massa específica na condição saturada | 51 |
| Tabela 21 – Comparativo entre os traços produzidos: Massa específica na condição saturada | 51 |
| Tabela 22 – Resultado médio da massa específica real | 52 |
| Tabela 23 – Comparativo entre os traços produzidos: Massa específica real..... | 52 |
| Tabela 24 – Resultado médio absorção por capilaridade..... | 53 |
| Tabela 25 – Comparativo entre os traços produzidos: Absorção de água por capilaridade..... | 53 |
| Tabela 26 – Resultado médio da velocidade de propagação de onda ultrassônica .. | 54 |
| Tabela 27 – Comparativo entre os traços produzidos: Propagação de onda ultrassônica | 55 |
| Tabela 28 – Resistência característica à compressão axial com idade de 28 dias ... | 55 |
| Tabela 29 – Comparativo entre os traços: Resistência à compressão axial a idade de 28 dias..... | 56 |
| Tabela 30 – Resistência característica à compressão axial após a câmara de envelhecimento | 56 |
| Tabela 31 – Comparativo entre os traços: Resistência aos 28 dias x Resistência após câmara de envelhecimento..... | 57 |
| Tabela 32 - Equações consideradas | 65 |
| Tabela 33 – Análise de empacotamento entre agregado miúdo..... | 65 |
| Tabela 34 – Análise de empacotamento entre agregado graúdo | 66 |
| Tabela 35 – Análise entre agregado miúdo e agregado graúdo | 66 |
| Tabela 36 – Características dos agregados | 67 |
| Tabela 37 – Resultados dos cálculos do modelo de Toufar..... | 67 |

| | |
|---|----|
| Tabela 38 – Dados coletados para ensaio de absorção por imersão total | 69 |
| Tabela 39 – Cálculos das propriedades | 70 |
| Tabela 40 – Dados coletados no ensaio de absorção por capilaridade..... | 70 |
| Tabela 41 – Cálculos para obter a absorção por capilaridade..... | 71 |
| Tabela 42 – Dados obtidos pelo ensaio de ultrassom | 72 |
| Tabela 43 – Ensaio de injeção de ar por pressão, pela superfície do corpo de prova | 73 |
| Tabela 44 – Ensaio de injeção de ar sob pressão, por furo no corpo de prova | 73 |
| Tabela 45 – Dados dos valores de resistências obtidas pela ruptura dos corpos de prova | 74 |
| Tabela 46 – Resistência a compressão axial após realização dos ciclos na câmara de envelhecimento | 75 |
| Tabela 47 – Constância de massa | 76 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 5 |
| 1.1. ASPECTOS GERAIS | 5 |
| 1.2. OBJETIVOS | 6 |
| 1.2.1. Objetivo Geral | 6 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 6 |
| 1.3. JUSTIFICATIVA..... | 6 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 2.1. CONCRETO | 8 |
| 2.1.1. Propriedades..... | 9 |
| 2.1.1.1. Estado fresco do concreto | 10 |
| 2.1.1.2. Estado endurecido do concreto | 14 |
| 2.1.2. Empacotamento das Partículas | 18 |
| 2.1.2.1. Modelo de Andreasen | 19 |
| 2.1.2.2. Modelo de Alfred | 20 |
| 2.1.2.3. Modelo de Furnas | 22 |
| 2.1.2.4. Modelo de Toufar | 23 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 26 |
| 3.1. MATERIAIS | 26 |
| 3.1.1. Cimento..... | 26 |
| 3.1.2. Agregado Miúdo..... | 27 |
| 3.1.3. Agregado Graúdo..... | 28 |
| 3.1.4. Água de Amassamento | 29 |
| 3.1.5. Aditivo Superplastificante | 29 |
| 3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 30 |
| 3.2.1. Empacotamento | 30 |
| 3.2.2. Mistura dos Materiais | 32 |
| 3.2.3. Análise no Estado Fresco do Concreto | 32 |
| 3.2.4. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova | 33 |
| 3.2.5. Análise no Estado Endurecido do Concreto | 33 |
| 4. RESULTADOS E ANÁLISE..... | 36 |
| 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS..... | 36 |
| 4.2. EMPACOTAMENTO DAS PARTICULAS..... | 39 |
| 4.2.1. Modelo de Alfred | 40 |
| 4.2.2. Modelo de Toufar..... | 44 |
| 4.3. ESTADO FRESCO DO CONCRETO | 44 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.4. | ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO | 49 |
| 4.4.1. | Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica | 49 |
| 4.4.2. | Determinação da Absorção de Água por Capilaridade | 52 |
| 4.4.3. | Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica | 54 |
| 4.4.4. | Resistência Característica do Concreto à Compressão Axial | 55 |
| 4.4.5. | Câmara de Envelhecimento | 56 |
| 5. | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 58 |
| 5.1. | CONCLUSÃO..... | 58 |
| 5.2. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 60 |
| | REFERÊNCIAS..... | 61 |
| | APÊNDICE A – EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS | 65 |
| | APÊNDICE B – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO | 68 |
| | APÊNDICE C – CONSTÂNCIA DE MASSA..... | 76 |
| | ANEXO A – LAUDO TÉCNICO DO CIMENTO PORTLAND UTILIZADO NA PESQUISA..... | 77 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS GERAIS

Conforme Ambrozewicz (2012), uma das áreas de estudo atualmente, são os materiais de construção utilizados em estruturas e seu comportamento em função do tempo, verificando a vida útil da estrutura.

Sabe-se que ao estudar a origem física e química dos materiais, pode se analisar o comportamento de suas propriedades, sendo estas propriedades importantes para obter uma construção mais durável, juntamente com características da construção.

Em estruturas de concreto armado, a durabilidade vem sendo muito discutida (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE e BROOKS, 2013), devido ao material concreto ser considerado heterogêneo e possuir diferentes propriedades do estado fresco para o estado endurecido, e a falta de conhecimento do comportamento físico e químico, faz com que manifestações patológicas apareçam e como consequência a estrutura tenha a sua durabilidade comprometida (LIMA, 2011).

Segundo Lima (2011), a durabilidade depende não só do conhecimento da composição dos componentes (agregados miúdo e graúdo, aglomerantes e água), mas da análise do ambiente onde esta estrutura está situada e de quais principais características que o concreto precisa ter para ser uma estrutura durável, quanto aos limites normativos.

Atenta-se ao quanto essas melhorias podem custar no final do processo e muitas vezes tornam-se inviáveis para sua aplicação, optando-se assim por uma construção menos durável (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Uma das formas de se conseguir uma estrutura durável é obter um índice de compacidade mais alto do concreto. Esta propriedade afeta em muitas propriedades do concreto em seu estado endurecido; uma das consequências é o aumento da resistência e a diminuição da porosidade (DA SILVA, 2011).

O estudo realizado sobre esta propriedade tem como objetivo obter o menor índice de vazios, diminuindo e dificultando o transporte de massa para dentro do concreto. Para obter uma redução do índice de vazios. Esse trabalho irá aplicar o

estudo do empacotamento das partículas, melhorando conseqüentemente o índice de compacidade do concreto.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a influência do empacotamento dos agregados na porosidade do concreto.

1.2.2. Objetivos Específicos

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

- Analisar a composição granulométrica que obtém o menor índice de vazios com o mesmo custo do concreto;
- Analisar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos concretos produzidos;
- Avaliar a porosidade do concreto produzido por dois métodos de empacotamento de partículas; e,
- Avaliar a durabilidade do concreto frente à variação de temperatura e umidade.

1.3. JUSTIFICATIVA

Segundo Da Silva (2011), a durabilidade “é uma propriedade diretamente ligada à estrutura dos poros, das microfissuras da pasta de cimento e a forma que os agentes agressivos penetram no concreto”. Desta forma, quanto menos poros

interligados existirem no concreto, mais durável a estrutura será. A durabilidade, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007) está relacionada com a resistência do concreto, logo, para obter um concreto com maior durabilidade é necessário mais investimentos, tornando o custo do concreto significativo.

Conforme Ambrozewicz (2012), a impermeabilidade é uma propriedade muito importante, relacionada com o conceito de durabilidade, esta propriedade quantifica a capacidade do concreto resistir à ação de águas agressivas ou capacidade destrutiva dos agentes atmosféricos.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), com a redução do índice de vazios, obtém-se um concreto com maior compacidade, dificultando o transporte de agentes agressivos para o interior da massa de concreto e conseqüentemente melhorando a resistência aos esforços que o concreto está sujeito. Desta forma, tendo em vista as questões mencionadas, este trabalho buscou estudar a curva granulométrica dos agregados com intuito de melhorar o empacotamento das partículas, para obter a redução do índice de vazios mantendo o mesmo custo do concreto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão contextualizados alguns fundamentos teóricos para que se possa compreender as análises e ensaios realizados neste trabalho.

2.1. CONCRETO

Segundo Ambrozewicz (2012), concreto é o material utilizado na construção, resultante da mistura, com quantidade adequada de: agregados, aglomerante e água. Para obter um concreto adequado a sua utilização, deve-se realizar uma análise das:

- Propriedades de cada material constituinte;
- Proporcionalidade mais adequada de cada material;
- Desenvolvimento cauteloso da mistura; e,
- Suas propriedades no estado fresco e endurecido.

Para Isaia (2011), o concreto teve sua utilização difundida mais rapidamente após a Segunda Guerra Mundial, em 1945, para a reconstrução dos países destruídos pelos confrontos. Sua utilização deu-se além da facilidade de moldagem, mas também pela qualidade principal de resistir aos esforços de compressão, que ao complementar com a resistência do aço, resulta em um material de boa resistência a compressão e a tração, chamado de concreto armado.

Conforme Isaia (2011), inicialmente no século XX, não se levou em consideração as consequências da união do aço ao concreto, gerando problemas observados em ambientes mais agressivos, ao longo da vida útil da estrutura, como por exemplo, a corrosão do aço e como consequência a perda de resistência do concreto armado. Atualmente os projetos mostram avanços quanto à prolongação da vida útil do concreto, melhorando sua durabilidade assim como a sua funcionalidade de resistir a esforços solicitantes.

De acordo com Ambrozewicz (2012), os concretos fornecidos pelas centrais são:

- Concreto convencional: seu lançamento é realizado por métodos convencionais, como por exemplo, carrinho de mão, jericas, etc.. Há uma significativa utilização na grande maioria das construções, devido o baixo custo e facilidade de produção, com resistência variando de 10 até 40 MPa;
- Concreto de alto desempenho: desenvolvido com adições mineral e aditivo superplastificante, estes concretos têm excelentes propriedades. A sua utilização é mais restrita, devido seu custo significativo de produção, sendo analisado a sua utilização baseando-se no custo total da obra; e,
- Concreto bombeável: Concreto utilizável para obras com necessidade de bombeá-lo conforme a necessidade de vencer uma distância vertical ou horizontal significativa. A sua produção é realizada conforme a bomba utilizada, de tal forma não realizar exsudação ou segregação.

Existem outros tipos de concretos, que se diferem pelas características físicas e químicas tendo diferentes propriedades quando comparados um a um.

Os diversos tipos de concretos foram desenvolvidos para compensar as deficiências ou desvantagens, seja pelo material constituinte ou pelas técnicas de execução, estes tipos são pesquisados com intuito de ampliar as opções, obtendo a opção mais adequada para cada obra, conforme suas características e necessidades (ISAIA, 2011).

2.1.1. Propriedades

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

2.1.1.1. Estado fresco do concreto

O concreto no estado fresco é constituído por envolvimento da pasta de cimento aos agregados e espaços cheios de ar. As propriedades desejáveis segundo Sobral (2000) “*são as que asseguram a obtenção de mistura de fácil transporte, lançamento e adensamento, sem segregação, e que, depois do endurecimento, se apresenta homogêneo, com o mínimo de vazios*”.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto devido sua ampla utilização decorrente de combinações positivas e influências tecnológicas e econômicas, destacando-se a fluidez inicial do concreto e os efeitos de cura a partir das reações de hidratação do cimento. O estudo das características do concreto no estado fresco influencia nas resistências finais, realizadas com custos relativamente reduzidos.

Trabalhabilidade e consistência

Segundo Sobral (2000), a trabalhabilidade tem características mais subjetivas que físicas, sendo a consistência seu comportamento físico mais importante. Esta propriedade não é específica do concreto, mas está relacionada às características de execução e funcionalidade de cada obra. Cada etapa desde a mistura até o adensamento do concreto na obra exige que a trabalhabilidade seja mantida dentro de determinados limites, para que não tenha influência nas propriedades no estado fresco e conseqüentemente no estado endurecido.

A consistência é a influência mais importante na trabalhabilidade, sendo necessária uma consistência adequada para cada tipo de concreto. Quando a consistência não está adequada a trabalhabilidade necessária, o manuseio e o adensamento do concreto facilita o surgimento de futuras patologias (SOBRAL, 2000).

De acordo com Ambrozewicz (2012), a consistência é a facilidade maior ou menor do concreto se deformar com atuação de esforços e variando quase sempre com a quantidade de água. Geralmente, é medida através do ensaio de abatimento

do tronco de cone, *Slump Test*, cuja à execução deste ensaio, ocorre com o concreto no estado fresco. Este é inserido em uma fôrma cônica e adensado, após o preenchimento completo ergue-se a fôrma e se mede o abatimento do concreto em relação à altura da forma, esta medida é em centímetros, sendo utilizada para fins comparativos de consistência, conforme mostrado na figura 1 que ilustra na situação (a), o equipamento a ser utilizado e na situação (b) a maneira que deve ser realizada a leitura.



(a) (b)
Figura 1– *Slump Test*: ensaio de consistência
(a) equipamento para realizar o ensaio; (b) leitura do ensaio.

Fonte: Romano et al. (2011)

Segundo Ambrozewicz (2012), a consistência e a trabalhabilidade são dependentes particularmente da granulometria dos agregados, presença de aditivos e consumo de água.

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.

Segregação

Segundo Ambrozewicz (2012), a segregação é ocorrência da separação dos materiais constituídos no concreto, ou seja, é a tendência dos agregados graúdos se separarem da argamassa do concreto, deixando-o heterogêneo, resultando em um concreto não adequado para o adensamento e conseqüentemente com baixa resistência mecânica.

Para Romano *et al.* (2011), a desestabilização da homogeneidade pode ocorrer em diferentes situações, como por exemplo:

- Pasta, separação da água dos finos, conhecido como exsudação;
- Argamassa, separação do agregado miúdo da pasta; e,
- Concreto, separação do agregado graúdo da argamassa.

De acordo com Ambrozewicz (2012), alguns fatores externos podem gerar segregação, como por exemplo;

- Transporte longo com carrinho de mão, jérica, entre outros;
- Perda da argamassa no transporte, por exemplo, bica de madeira;
- Vibração excessiva; e,
- Lançamento do concreto com pá sobre fôrmas com altura superior a 2,5 m.

A segregação, também conceituada como separação de fases, pode ocorrer em duas situações: estática ou dinâmica. Onde na situação estática, o material sedimenta nas etapas intermediárias ou primeiras horas após o lançamento, devido à ação da gravidade e do tempo, já na situação dinâmica o material é induzido a sedimentar seja na etapa de transporte, lançamento, preenchimento, ou mesmo, em ensaios reológicos (ROMANO *et al.*, 2011).

Para o autor mencionado no paragrafo anterior, a forma de analisar a segregação pode ser visual ou indireta. Os métodos visuais são subjetivos, sendo realizado no estado fresco ou endurecido, no estado fresco analisa-se a estabilidade após o ensaio de abatimento do tronco de cone, *Slump Test*, e no estado endurecido analisam-se as seções transversais dos corpos de prova cilíndricos, conforme está representado na figura 2, que ilustra os tipos de segregação que podem ocorrer na massa de concreto.



Figura 2 – Segregação: exemplos de seções de concreto

(1) concreto estável, com boa distribuição dos agregados na argamassa; (2) concreto estável com boa distribuição dos agregados graúdos na argamassa; (3) concreto instável, com tendência a segregação das partículas; (4), concreto instável, com segregação dos agregados, tornando o concreto heterogêneo, onde pode notar a separação da argamassa do concreto.

Fonte: Romano et al. (2011)

Exsudação

Segundo Romano *et al.* (2011), a exsudação é um tipo de segregação, ou seja, é uma propriedade oriunda da segregação.

De acordo com Ambrozewicz (2012), a exsudação é quando a água do interior do concreto sobe à superfície, carregando com ela os materiais mais finos, produzindo no estado endurecido um concreto poroso e menos resistente, conseqüentemente tendo sua durabilidade reduzida. Uma forma de corrigir e manter estável esta propriedade é a dosagem de água na quantidade ideal para a hidratação do cimento; algumas situações adicionam materiais mais finos no concreto, compensando assim às deficiências dos agregados.

Em argamassas, o ensaio de retenção de água avalia a capacidade da argamassa em não perder água para o ambiente ou para uma base de superfície porosa, normatizado pela norma da NBR 13277 (ABNT, 2005).

A exsudação é determinada no estado fresco, com a pesagem da água coletada após períodos de vibração de materiais, normatizado pela

NBR 15558 (ABNT, 2008 *apud* ROMANO *et al.*, 2011).

2.1.1.2. Estado endurecido do concreto

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

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

Essas propriedades são conceituadas neste capítulo.

Massa específica

Segundo Silva (1985), a massa específica tem como finalidade a obtenção do peso próprio da estrutura, variando com: tipo de concreto, forma de adensamento, índice de vazios e tipo de agregados. A diferença de peso próprio entre um concreto adensado e outro sem adensamento é em torno de 0,3 ton/m³.

Resistência característica à compressão axial

De acordo com Ambrozewicz (2012), a resistência característica à compressão axial é a propriedade mais importante, influenciando-se por diversos fatores, como por exemplo, a relação água/cimento.

Segundo Silva (1985), a influência mais importante é a relação água/cimento,

tendo a maioria dos efeitos ocasionados pelo excesso de água no amassamento. Alguns pesquisadores relacionaram a resistência com a relação água /cimento.

Para Tutikian (2011), a resistência mecânica do concreto é a característica mais utilizada para avaliar a qualidade do material, mesmo sabendo a necessidade de outras características em determinadas situações.

De acordo com Higgins (1982) *apud* Tutikian (2011), “a resistência é uma medida das forças externas aplicadas ao material, as quais são necessárias para vencer as forças internas de atração entre as partículas elementares do mesmo”.

Segundo Tutikian (2011), muitos artigos comentam a não dependência entre a resistência dos materiais e suas porosidades, relevando a relação inversa entre tais características, sendo expressa pelo modelo geral citado por Mehta e Monteiro (2008), apresentado na equação 1.

$$S = S_0 e^{-kp} \quad (1)$$

onde:

S= resistência do material que tem uma dada porosidade (p);

S_0 = resistência intrínseca sob porosidade zero;

k = constante que depende do material.

A equação 1 é uma relação genérica para o caso do concreto deve-se considerar a influência das suas fases constituintes : sólidos, vazios e da zona de transição.

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/cimento e relação agregado/cimento;
- Condições de cura e idade.

Porosidade

Segundo Alves (1999), não se pode deduzir uma porosidade nula em um material, devido sua formação natural. A porosidade é gerada na pasta de cimento, na interface pasta-agregado, além da porosidade já existente no agregado. Este volume de poros pode ser calculado analiticamente ou por processos experimentais, levando em consideração a massa específica aparente e a massa específica real do concreto.

De acordo com Silva (1985), a porosidade é a totalidade de vazios, a qual se tem dificuldade de obter um material sem vazios devido algumas razões, como:

- A água utilizada é sempre de quantidade superior a necessária para hidratação do cimento, evaporando-se e deixando o concreto poroso;
- Os volumes absolutos do cimento e da água são reduzidos com a hidratação; e
- Ao realizar a mistura sempre há incorporação de ar.

Permeabilidade

Segundo Silva (1985), a permeabilidade é a capacidade do concreto permitir a passagem de água pelo seu material, sendo por: pressão, filtração e difusão através de capilaridade.

Alves (1999) define a permeabilidade como não dependente da porosidade, mas relacionada com a relação água/cimento e com a distribuição granulométrica dos agregados, onde os agregados com maiores formas obtêm um concreto mais permeável.

Para Ambrozewicz (2012), a permeabilidade é a capacidade de a água passar pelo material pelos vazios ocasionados pelo ar que incorpora na mistura, pelo consumo excessivo de água. Assim tornando um concreto de fraca resistência contra agentes agressivos.

“A permeabilidade é a chave da durabilidade”. (MEHTA E MONTEIRO, 2008)

Segundo Mehta e Monteiro (2008), cada vez mais engenheiros especialistas

em concreto têm se preocupado com a importância da permeabilidade do concreto para a durabilidade de estruturas expostas a agentes agressivos, como por exemplo, água do mar.

Absorção de fluidos

Segundo Silva (1985), a absorção de fluidos é a capacidade de o concreto reter o fluido em seus condutos capilares. Para ocorrer absorção é necessária a interligação entre os poros, de tal forma gerar condutos capilares com a superfície externa e a permeabilidade se dá pela continuidade destes canais.

De acordo com Alves (1999), a absorção de fluidos está relacionada com a pressão atmosférica e o volume de poros abertos do material.

Durabilidade

Para obter uma estrutura mais durável, é necessário ter um concreto mais resistente, menos permeável e reduzindo ao máximo o volume de vazios no seu interior (AMBROZEWICZ, 2012)

Segundo Oliveira (2000), a durabilidade está relacionada à capacidade da estrutura suportar a ação dos agentes agressivos durante sua vida em serviço. Esta deterioração ocorre lentamente e possuem diversas formas de agressão, podendo ser: químicas, mecânicas, físicas, intrínsecos, biológicos e outros.

A durabilidade segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2007), está relacionada com a agressividade do ambiente, sua resistência característica à compressão, à relação água/cimento e ao cobrimento mínimo. Esta propriedade é dependente das outras propriedades, como por exemplo, a permeabilidade. Quando alguma propriedade no estado fresco não está de acordo com o mínimo necessário para a função desejada do concreto, a resistência do concreto torna-se reduzida e conseqüentemente a durabilidade esperada fica comprometida, facilitando a ocorrência de futuras patologias.

2.1.2. Empacotamento das Partículas

O estudo de empacotamento das partículas não é realizado pelos motivos de custo e trabalhabilidade, em outras palavras, atingir uma distribuição granulométrica ideal exige um determinado custo. Mas, o fator a qual não se aplica o estudo de empacotamento das partículas nos concretos está relacionado à trabalhabilidade, que na prática não proporciona bons resultados para o uso de partículas estabilizadas granulométricamente (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

De acordo com Riva (2010) *apud* Oliveira (2013), os primeiros estudos sobre empacotamento de partículas, têm o registro datado no ano de 1611, estudado por Kepler e advém de vários campos de estudos. Este estudo tem despertado o interesse em diversas áreas da engenharia. Este interesse ao estudo de empacotamento das partículas é proveniente da diversidade de forma, tamanho e origem.

Segundo McGeary (1961) *apud* Oliveira (2013), o estudo de empacotamento de partículas é definido como “*o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente*”.

Segundo Oliveira *et al.* (2000) *apud* Oliveira (2013), há duas abordagens: a contínua, que analisa as partículas com distribuição contínua; e a discreta, que analisa a partícula individualmente.

Para Riva (2010) *apud* Oliveira (2013), os dois possíveis casos extremos de empacotamento refere-se um caso quando há uma densidade mínima devido às partículas possuírem o mesmo tamanho e o outro caso é o empacotamento realizado por partículas com uma distribuição de tamanho gradual, onde as partículas menores preenchem os vazios deixados pelas partículas maiores, conforme mostra na figura 3, que ilustra alguns efeitos de empacotamento devido ao tamanho e quantidade das partículas. Na figura 3 observa que a situação (b), onde ocorre à máxima densidade das partículas, representante do objetivo a ser alcançado quando realiza o estudo de empacotamento das partículas.

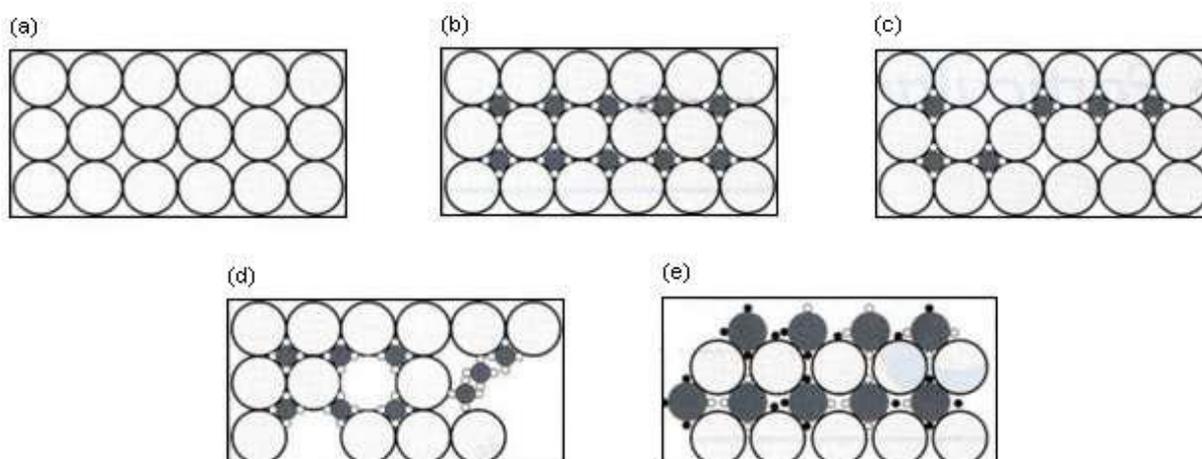


Figura 3 – Efeitos de empacotamento de partículas

(a) densidade mínima de empacotamento; (b) densidade máxima de empacotamento; (c) deficiência de partículas de tamanho menores; (d) deficiência de partículas de tamanho maiores; (e) distribuição inadequada do tamanho das partículas

Fonte: Roy, Scheetz e Silsbee (1993 *apud* Oliveira, 2013)

Há diversos modelos de abordagens contínuas, citando, por exemplo:

- Modelo Andreasen; e
- Modelo Alfred.

Há diversos modelos de abordagens discreta, citando, por exemplo:

- Modelo de Furnas; e
- Modelo de Toufar.

2.1.2.1. Modelo de Andreasen

O modelo de Andreasen é tratado como distribuição contínua das partículas, porque em conjunto de partículas reais todos os tamanhos podem ser encontrados (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Oliveira (2013), Andreasen assumiu em seu estudo que para atingir a máxima densidade de empacotamento de partículas, deve possuir condições de similaridade em torno de diferentes tamanhos de duas partículas. Essa condição de similaridade define a distribuição na granulometria das partículas em termos de uma lei de potência, conforme apresenta a equação 2.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_P}{D_L} \right)^q \quad (2)$$

onde:

$CPFT$ = porcentagem acumulada de partículas menores que D_P ; e

D_P = diâmetro da partícula; e

D_L = diâmetro da maior partícula; e

$q = 0,37$

A utilização de $q = 0,37$ se dá pelo máximo empacotamento teoricamente possível quando D_S (diâmetro da menor partícula) é igual à zero, não havendo ocorrência desta condição na prática. Para maximizar o empacotamento utiliza-se o menor diâmetro de partícula possível na granulometria em estudo (Oliveira 2013).

Na figura 4 observa-se graficamente a utilização da equação 2.

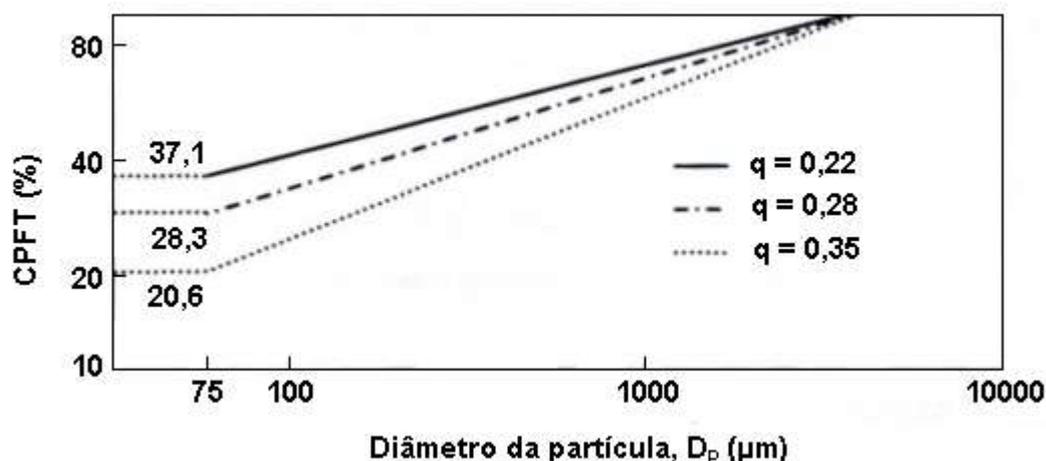


Figura 4 – Modelo de Andreasen: distribuição granulométrica

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

2.1.2.2. Modelo de Alfred

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, conforme apresenta

a equação 3 (OLIVEIRA, 2013).

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

onde:

$CPFT$ = porcentagem acumulada de partículas menores que D_P ; e

D_P = diâmetro da partícula; e

D_S = diâmetro da menor partícula; e

D_L = diâmetro da maior partícula; e

$q = 0,37$.

Na figura 5, observa-se a representação gráfica da equação 3.

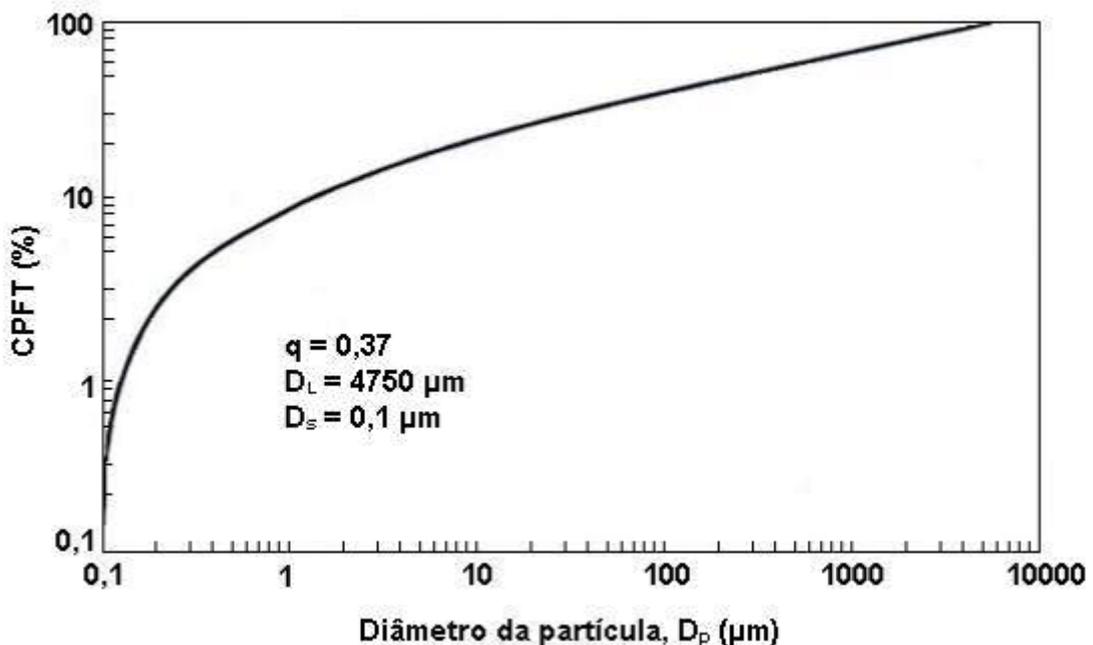


Figura 5 – Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas

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

Segundo 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.

Para Vanderlei *apud* Oliveira (2013), por meio de simulações computacionais, concluiu-se que valores de (q) inferiores ou igual a 0,37 podem favorecer o máximo

empacotamento das partículas para distribuições infinitas e para os valores superiores a 0,37, sempre existirá uma porosidade residual.

2.1.2.3. Modelo de Furnas

Segundo Oliveira (2013), o modelo de Furnas trata a distribuição das partículas como distribuição discreta, quando todas as partículas menores existentes preenchem os vazios existentes pelas partículas maiores; obtém-se assim o empacotamento máximo das partículas.

Furnas analisou a distribuição das partículas envolvidas e comprovou que a ocorrência da máxima densidade de empacotamento ocorria por uma proporcionalidade das partículas como uma progressão geométrica, generalizando sua teoria para qualquer tamanho de partícula discreta conforme apresenta a equação 4 (OLIVEIRA, 2013).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_P^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \quad (4)$$

onde:

$CPFT$ = porcentagem acumulada de partículas menores que D_P ; e

D_P = diâmetro da partícula; e

D_S = diâmetro da menor partícula; e

D_L = diâmetro da maior partícula; e

r = razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

Na figura 6 ilustra graficamente o modelo de Furnas a partir da equação 4, considerando esta distribuição como empacotamento ideal de partículas.

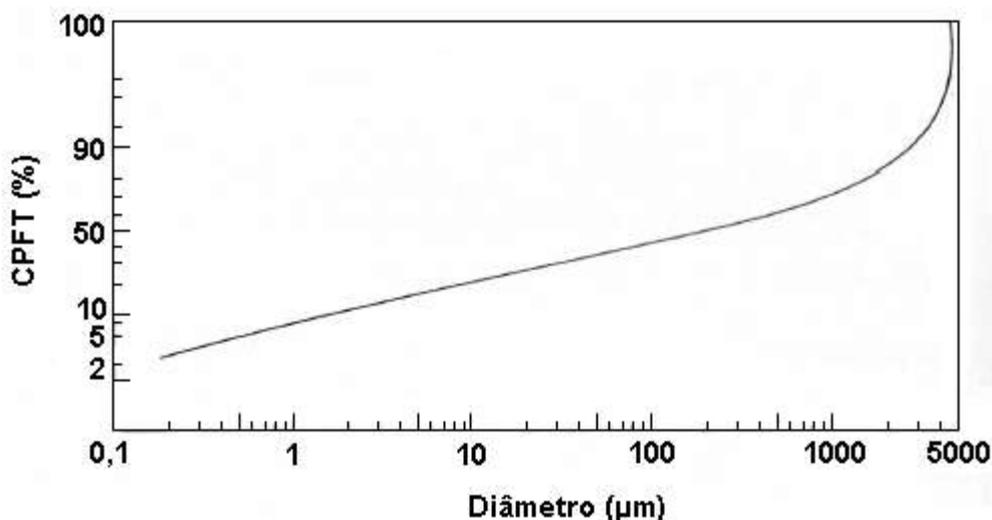


Figura 6 – Modelo de Furnas: apresentação da distribuição granulométrica
Fonte: Watanabe, Ishikawa e Wakamatsu (1989 *apud* OLIVEIRA, 2013)

2.1.2.4. Modelo de Toufar

Segundo Toufar *et al. apud* Fennis (2011) o modelo de Toufar descreve o cálculo de misturas binária, ou seja, duas classe de agregados (finos e grossos) considerando esféricos e de mesmo diâmetro. A otimização do empacotamento se dá pela condição que a pasta de cimento ocupará os vazios deixados pelos agregados.

Para realização de misturas com três classes de elementos, ou seja, agregados finos, médios e grossos; o cálculo do empacotamento é obtido pelo modelo de Toufar modificado, sendo realizado em duas etapas. Na primeira etapa considera-se apenas dois tipos de agregados, obtendo uma mistura binária, e na segunda etapa, utiliza-se da mistura otimizada na primeira etapa com o terceiro tipo de agregado (FENNIS, 2011).

A consideração do modelo de Toufar é baseada no preenchimento, do vazio deixado por quatro partículas grossas, com as partículas finas. Entretanto, com o passar do tempo, as comparações com ensaios mostraram que este modelo prevê que não há interferência na densidade das partículas mais grossas quando adicionado às partículas finas. A modificação no modelo se fez necessária para corrigir esta consideração irreal, sendo chamado de modelo de

Toufar modificado (FENNIS, 2011).

O calculo da densidade pelo modelo de Toufar é expresso na equação 5.

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{r_1}{\alpha_1} + \frac{r_2}{\alpha_2} - r_2 \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) k_d k_s} \quad (5)$$

Com:

$$k_d = \left(\frac{d_2 - d_1}{d_1 + d_2} \right) \quad (6)$$

$$k_s = 1 - \left[\frac{1 - 4x}{(1+x)^4} \right] \quad (7)$$

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

onde:

k_d = relação de diâmetro de duas classes de partículas;

k_s = probabilidade estatística do número de interstícios entre as partículas grossas;

d_1 = diâmetro da menor partícula;

d_2 = diâmetro da maior partícula;

r_1 = volume da menor partícula;

r_2 = volume da maior partícula;

α_t = densidade da mistura;

α_1 = densidade da menor partícula;

α_2 = densidade da maior partícula; e,

x = relação de empacotamento entre as partículas.

Para a modificação do modelo de Toufar, alterou a equação 7 para: equação 9 quando o valor de (x) for maior ou igual a 0,4753 e equação 10 para valores de (x) menores que 0,4753.

$$k_s = 1 - \left[\frac{1-4x}{(1+x)^4} \right] \quad \text{para } x \geq 0,4753 \quad (9)$$

$$k_s = \frac{0,3881x}{0,4753} \quad \text{para } x < 0,4753 \quad (10)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os ensaios realizados e descritos neste capítulo visa-se responder os objetivos, referente à porosidade do concreto com granulometria controlada.

Realizou ensaios com três tipos de traço de concreto:

- Traço convencional utilizado como referência;
- Traço pelo modelo de Alfred; e,
- Traço pelo modelo Toufar.

Primeiramente descrevem-se os materiais utilizados para composição dos três tipos de concretos a serem ensaiados, sendo posteriormente na segunda parte deste trabalho a caracterização dos mesmos. Alguns materiais terão suas características obtidas com o fabricante e os demais serão caracterizados em laboratório.

3.1. MATERIAIS

Para todo experimento foi realizada a caracterização dos materiais. Esta caracterização foi feita para obter informações para o desenvolvimento do traço, tais como: curva granulométrica, módulo de finura, diâmetro máximo do agregado, massa específica, massa unitária, material pulverulento e absorção de fluido. Essas informações auxiliaram não apenas no desenvolvimento do traço, mas na influência da porosidade final do concreto. Esta seção apresentara os materiais que foram doados, por uma concreteira X da cidade de Curitiba-PR e utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

3.1.1. Cimento

No desenvolvimento dos traços de concreto foi utilizado o cimento fabricado pela empresa Itambé, classificado como CP V-ARI-RS, conforme ilustra a figura 7,

especificado conforme previsto na NBR 5733 (ABNT, 1991). A caracterização desse cimento se deu por meio de análise química, massa unitária, massa específica, área superficial específica Blaine, tempos de início e fim de pega e resistência à compressão, conforme laudo técnico do fabricante apresentado em anexo A.



Figura 7 - Cimento Portland utilizado na pesquisa

Fonte: Elaboração do próprio autor

3.1.2. Agregado Miúdo

Para a composição do agregado miúdo, utilizaram-se dois tipos de areia: areia natural classificada como muito fina e areia industrial classificada como média; conforme ilustrado na figura 8.



(a)

(b)

**Figura 8 – Agregados miúdos
(a) areia natural e (b) areia industrial
Fonte: Elaboração do próprio autor**

Para aproximar-se da curva granulométrica obtida através dos modelos de empacotamento em análise, caracterizaram-se os materiais conforme os ensaios apresentados 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).

3.1.3. Agregado Graúdo

Para a composição do agregado graúdo, utilizaram-se dois tipos de agregados: brita 0 e brita 1; conforme ilustrado na figura 9.



(a)

(b)

Figura 9 – Agregados graúdos

(a) brita 0 e (b) brita 1

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para aproximar-se da curva granulométrica obtida através dos modelos de empacotamento em análise, caracterizaram-se os materiais 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).

3.1.4. Água de Amassamento

Conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), a água proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Curitiba/PR é considerada adequada para o uso em concretos e não necessita ser ensaiada.

3.1.5. Aditivo Superplastificante

Utilizou-se o aditivo superplastificante *MC-PowerFlow 1102*, com composição sintética a base de polímeros policarboxilatos. A função deste se dará na redução da relação água/cimento, para que se possa obter um concreto com menor porosidade e melhor resistência.

3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para alcançar os objetivos estabelecidos neste trabalho, realizou-se alguns ensaios. Os ensaios apresentados nesta seção são regulamentados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A metodologia adotada se dividiu em três etapas: concepção, produção e análise. Na concepção obteve-se primeiramente o empacotamento de acordo com o modelo em estudo e, com base na curva granulométrica obtida através dos modelos de empacotamento, desenvolveu-se uma composição granulométrica com os agregados, de tal forma a aproximar-se à composição granulométrica obtida através dos modelos de empacotamento. Após esta etapa, iniciou-se a etapa de produção, começando pelo processo de mistura dos materiais, analisando-o no estado fresco, com ensaios visuais e experimentais, como por exemplo, abatimento de tronco de cone (*Slump Test*). Com a mistura homogênea, foram moldados 39 corpos de prova, conforme descrito nesta seção. Após a cura úmida de 28 dias no mínimo, fez-se a análise dos mesmos no estado endurecido de suas propriedades pertinentes aos objetivos apresentados neste trabalho, com ensaios não destrutivos e destrutivos.

3.2.1. Empacotamento

Inicialmente, calculou-se o empacotamento pelos dois modelos, o modelo de Alfred e o modelo de Toufar. A escolha se deu pela comparação das origens dos modelos, sendo o modelo Alfred desenvolvido pela indústria cerâmica, sendo adaptado para a indústria do concreto, com características de distribuição contínua. Entretanto, o modelo de Toufar foi desenvolvido para a indústria de concreto, com características de distribuição discretas. Esta comparação se deu com finalidade de observar qual dos dois métodos tem melhores resultados quanto ao estudo da durabilidade, por meio de redução da permeabilidade do concreto.

Para determinar a curva granulométrica ideal pelo modelo de Alfred, adotou-se o valor de (q) igual a 0,37. Com a curva granulométrica resultante do modelo, calcula-se a proporção de areia natural e industrial até sua curva granulométrica

aproximar-se a curva calculada conforme o modelo, repetindo este cálculo para os agregados graúdos. Para o modelo de Toufar, utilizaram-se as características dos materiais para obter a curva granulométrica ideal, sendo esta obtida através da proporcionalidade dos materiais, conforme o modelo matemático de Toufar.

Para aproximar a curva granulométrica dos agregados com a curva granulométrica produzida pelo modelo de empacotamento de Alfred, deu-se a necessidade de realizar uma análise matemática com auxílio do *software Excel* (*Microsoft Office*, 2010). Utilizando-se da equação 11 para obter a aproximação da curva granulométrica dos agregados com o resultado do empacotamento.

$$E_n = A * \alpha + B * \beta \quad (11)$$

onde:

A = Curva granulométrica areia natural, ou brita 0, ou empacotamento do agregado miúdo;

B = Curva granulométrica areia industrial, ou brita 1 ou empacotamento do agregado graúdo;

α e β = porcentagem referente ao material; e,

E_n = empacotamento em estudo.

Realizou-se iterações de α e β até atingir da média do quadrado do erro, conforme equação 12.

$$Erro = \left[\frac{E_n - (A * \alpha + B * \beta)}{E_n} \right]^2 \quad (12)$$

onde:

A = Curva granulométrica areia natural, ou brita 0, ou empacotamento do agregado miúdo;

B = Curva granulométrica areia industrial, ou brita 1 ou empacotamento do agregado graúdo;

α e β = porcentagem referente ao material;

E_n = empacotamento em estudo; e,

$Erro$ = erro entre a curva do empacotamento e a curva dos agregados.

Retirou-se a média do quadrado do erro e aplicando a ferramenta *solver* do *software Excel*, para realizar as iterações, tendo seu objetivo como a minimização da média do quadrado do erro.

Para o modelo de Toufar, utilizou-se da ferramenta *solver* do *software Excel*® (*Microsoft Office*, 2010), para realizar as iterações dos valores até obter o valor da máxima densidade.

O empacotamento será realizado com o mesmo consumo de cimento, trabalhando apenas com a granulometria dos agregados, para fins comparativos com o traço referência.

3.2.2. Mistura dos Materiais

Os materiais foram misturados em uma betoneira de 120 litros, respeitando a ordem de colocação dos materiais. Iniciando-se com a imprimação da betoneira e logo após, adicionou-se uma parte da água; após esta etapa, acrescentaram-se os materiais secos na seguinte ordem: agregado graúdo, cimento, agregado miúdo; e após a homogeneização dos materiais, acrescentou-se o restante da água com o aditivo (TUTIKIAN, 2011).

3.2.3. Análise no Estado Fresco do Concreto

A análise no estado fresco do concreto se deu por análise visual para as propriedades de trabalhabilidade, exsudação, e segregação; e ensaios físicos, como análise da consistência por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone, *Slump Test*, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Para cada traço produzido foi calculado o teor de argamassa como outra forma de analisar a coesão do traço produzido, comparando-os entre si.

No estado fresco, para análise do teor de ar incorporado, utilizou-se o aparelho ilustrado na figura 10, que realiza medição de ar incorporado na mistura de concreto, da marca *Contenco*. A leitura do aparelho se deu em porcentagem, sendo

a diferença da leitura final com a leitura inicial, sendo considerado o teor de ar incorporado.



Figura 10 – Medidor de ar incorporado ao concreto
Fonte: Elaboração do próprio autor

3.2.4. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2008) e a cura dos corpos de prova, realizou com os corpos de prova dentro da câmara úmida, porém não imerso em água com cal, simulando assim uma situação real de concretagem.

3.2.5. Análise no Estado Endurecido do Concreto

A análise no estado endurecido do concreto se deu em relação à porosidade dos corpos de prova, analisando-os por vários ensaios não destrutivos e o ensaio de resistência característica a compressão axial para que possa avaliar a concordância com a teoria. Os corpos de prova utilizados para estes ensaios tiveram idade mínima de 28 dias, sendo moldados e curados conforme detalhado no item 3.2.4 referente à moldagem e cura dos corpos de prova.

Os ensaios não destrutivos e destrutivos realizados nessa pesquisa foram:

- Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica;
NBR 9778 (ABNT, 2009)
- Argamassas e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade;
NBR 9779 (ABNT, 2012)
- Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica;
NBR 8802 (ABNT, 2013)
- Determinação da penetração de ar sob pressão: Esse ensaio consiste em injetar sobre a superfície ou em uma abertura vedada no interior do corpo de prova, até atingir uma determinada pressão, onde se deve parar de injetar ar e fechar a válvula de entrada de ar, e aguardar o tempo necessário para que tenha uma determinada variação de pressão. Comparando os valores obtidos entre os tipos de traços produzidos, onde quando mais tempo levar para dispersar a pressão inserida, menor será o índice de vazios do corpo de prova;
- Câmara de envelhecimento: nesse ensaio tem-se como objetivo simular várias alterações climáticas num determinado espaço de tempo, fazendo com que o corpo de prova esteja sujeito a diversas solicitações de esforços. Para esta pesquisa aplicou-se três situações de clima, de acordo com históricos registrados na região do Paraná pelo SIMEPAR, com duração do ensaio de 144 horas com o tempo para um ciclo de 120 minutos, conforme apresentado na tabela 1, que apresenta os valores de temperatura, umidade e o tempo de cada etapa do ciclo; e,

Tabela 1 – Ciclos para programação na câmara de envelhecimento

| Ciclo | Duração | Temperatura | Umidade |
|--------------|----------------|--------------------|----------------|
| 1 | 40 minutos | - 4,5 °C | 55% |
| 2 | 40 minutos | 10 °C | 100% |
| 3 | 40 minutos | 35 °C | 68% |

Fonte: SIMEPAR (2013)

Na figura 11, pode-se observar o equipamento utilizado para realização deste ensaio.



Figura 11 – Câmara de envelhecimento
Fonte: Elaboração do próprio autor

- Ensaio de resistência característica do concreto à compressão.
NBR 5739 (ABNT, 2007)

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta apresentação dos resultados, estão representadas as curvas granulométricas com a porcentagem retida acumulada dos agregados utilizados para produzir os traços a serem analisados.

As tabelas abaixo representam os dados obtidos da análise granulométrica dos agregados. A tabela 2 mostra a granulometria da areia natural, a tabela 3 mostra a granulometria da areia industrial, a tabela 4 mostra a granulometria da brita 0 e a tabela 5 mostra a granulometria da brita 1.

Tabela 2 – Análise granulométrica: Areia natural

| Peneira (#) | Massa (g) | % Retida | % Retida Acumulada |
|-------------|-----------|----------|--------------------|
| 9,5 | 1,28 | 0,32% | 0,32% |
| 6,3 | 1,64 | 0,41% | 0,73% |
| 4,8 | 2,15 | 0,54% | 1,27% |
| 2,4 | 6,33 | 1,58% | 2,85% |
| 1,2 | 7,45 | 1,86% | 4,71% |
| 0,6 | 48,01 | 12,00% | 16,72% |
| 0,3 | 162,45 | 40,61% | 57,33% |
| 0,15 | 141,67 | 35,42% | 92,75% |
| FUNDO | 29,02 | 7,26% | 100,00% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 3 – Análise granulométrica: Areia industrial

| Peneira (#) | Massa (g) | % Retida | % Retida Acumulada |
|-------------|-----------|----------|--------------------|
| 9,5 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| 6,3 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| 4,8 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| 2,4 | 37,67 | 9,42% | 9,42% |
| 1,2 | 78,94 | 19,74% | 29,15% |
| 0,6 | 83,64 | 20,91% | 50,06% |
| 0,3 | 69,87 | 17,47% | 67,53% |
| 0,15 | 55,92 | 13,98% | 81,51% |
| FUNDO | 73,96 | 18,49% | 100,00% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 4 – Análise granulométrica: Brita 0

| Peneira (#) | Massa (g) | % Retida | % Retida Acumulada |
|-------------|-----------|----------|--------------------|
| 25 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| 19 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| 12,5 | 3,03 | 0,30% | 0,30% |
| 9,5 | 120,42 | 12,04% | 12,35% |
| 6,3 | 621,15 | 62,12% | 74,46% |
| 4,8 | 160 | 16,00% | 90,46% |
| 2,4 | 84,35 | 8,44% | 98,90% |
| FUNDO | 11,05 | 1,11% | 100,00% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 5 – Análise granulométrica: Brita 1

| Peneira (#) | Massa (g) | % Retida | % Retida Acumulada |
|-------------|-----------|----------|--------------------|
| 25 | 0 | 0,00% | 0,00% |
| 19 | 82,43 | 4,12% | 4,12% |
| 12,5 | 1211,79 | 60,58% | 64,70% |
| 9,5 | 557,44 | 27,87% | 92,57% |
| 6,3 | 132,74 | 6,64% | 99,21% |
| 4,8 | 5,1 | 0,25% | 99,46% |
| 2,4 | 0,22 | 0,01% | 99,47% |
| FUNDO | 10,54 | 0,53% | 100,00% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

A tabela 6 mostra as demais caracterizações necessárias para a produção dos traços de concreto.

Tabela 6 – Caracterizações dos agregados

| Material | Massa Específica (kg/dm ³) | Massa Unitária (kg/dm ³) | Material Pulverulento (%) | Módulo de Finura | Diâmetro Máximo (mm) |
|------------------|--|--------------------------------------|---------------------------|------------------|----------------------|
| Areia Natural | 2,58 | 1,37 | 0,50% | 1,71 | 4,80 |
| Areia Industrial | 2,58 | 1,29 | 8,90% | 2,82 | 2,40 |
| Brita 0 | 2,76 | 1,37 | 1,30% | 5,92 | 12,50 |
| Brita 1 | 2,76 | 1,52 | 0,30% | 6,84 | 19,00 |

Fonte: Dados fornecidos por uma concreteira da região de Curitiba/PR

Observa-se na tabela 6, que para os valores de módulo de finura das areias, ao compará-los com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009) para utilização apresentados na tabela 7, nota-se que o módulo de finura da areia natural encontra-se entre os limites da zona utilizável inferior e o módulo de finura da areia industrial

está apresentado dentro dos limites da zona ótima utilizável.

Tabela 7 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

| Peneira (mm) | Porcentagem, em massa, retida acumulada | | | |
|--------------|---|------------|--------------------|-----------------|
| | Limites Inferiores | | Limites Superiores | |
| | Zona Utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona Utilizável |
| 9,50 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6,30 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,75 | 0 | 0 | 5 | 10 |
| 2,36 | 0 | 10 | 20 | 25 |
| 1,18 | 5 | 20 | 30 | 50 |
| 0,60 | 15 | 35 | 55 | 70 |
| 0,30 | 50 | 65 | 85 | 95 |
| 0,15 | 85 | 90 | 95 | 100 |

NOTA 1 - O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

NOTA 2 - O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

NOTA 3 - O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009)

Para melhor visualização entre as análises granulométricas, foram construídos dois gráficos, o gráfico 1 que mostra as curvas granulométrica dos agregados miúdos e o gráfico 2 que mostra as curvas dos agregados graúdos.

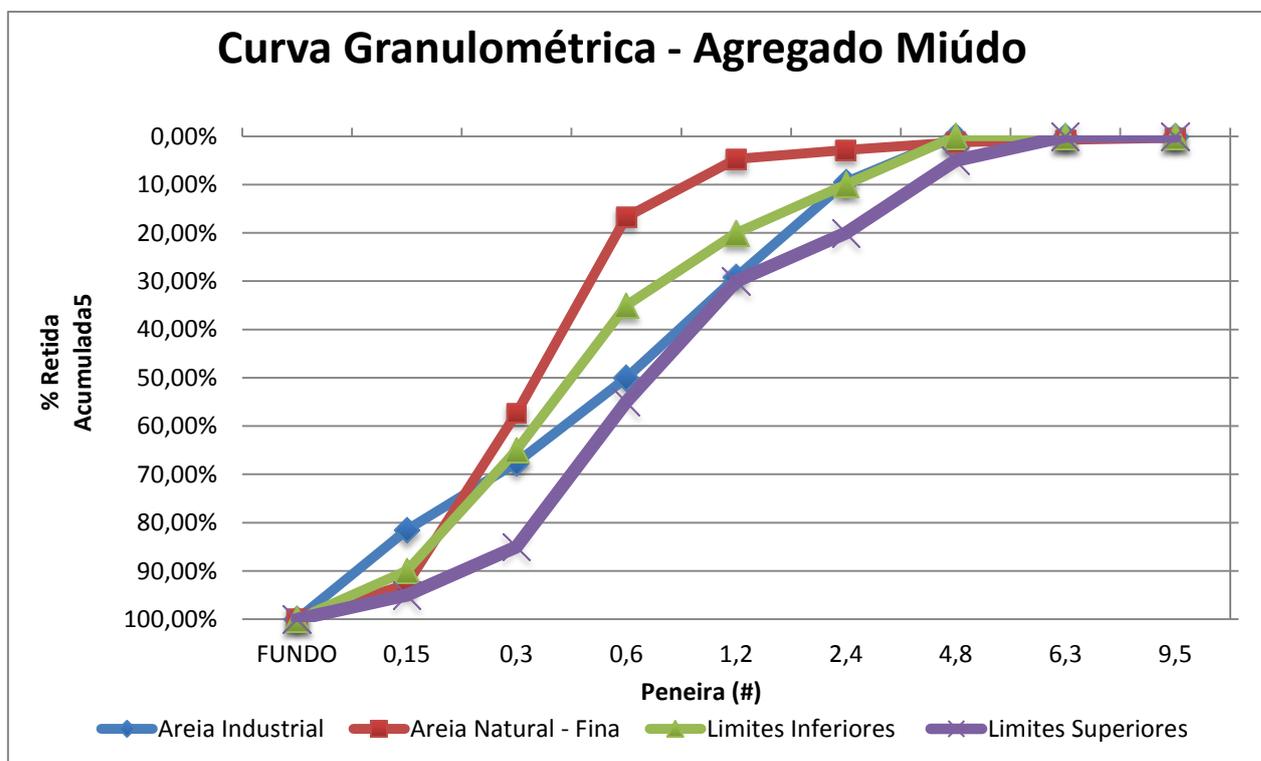


Gráfico 1 – Curva granulométrica: Agregado miúdo

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme se observa no gráfico 1, a curva granulométrica da areia natural está fora dos limites ótimos estimados pela norma, porém a curva granulométrica da areia industrial contém parte da curva na zona ótima. Contudo essas curvas granulométricas podem influenciar na aproximação com a curva granulométrica do modelo de empacotamento de Alfred.

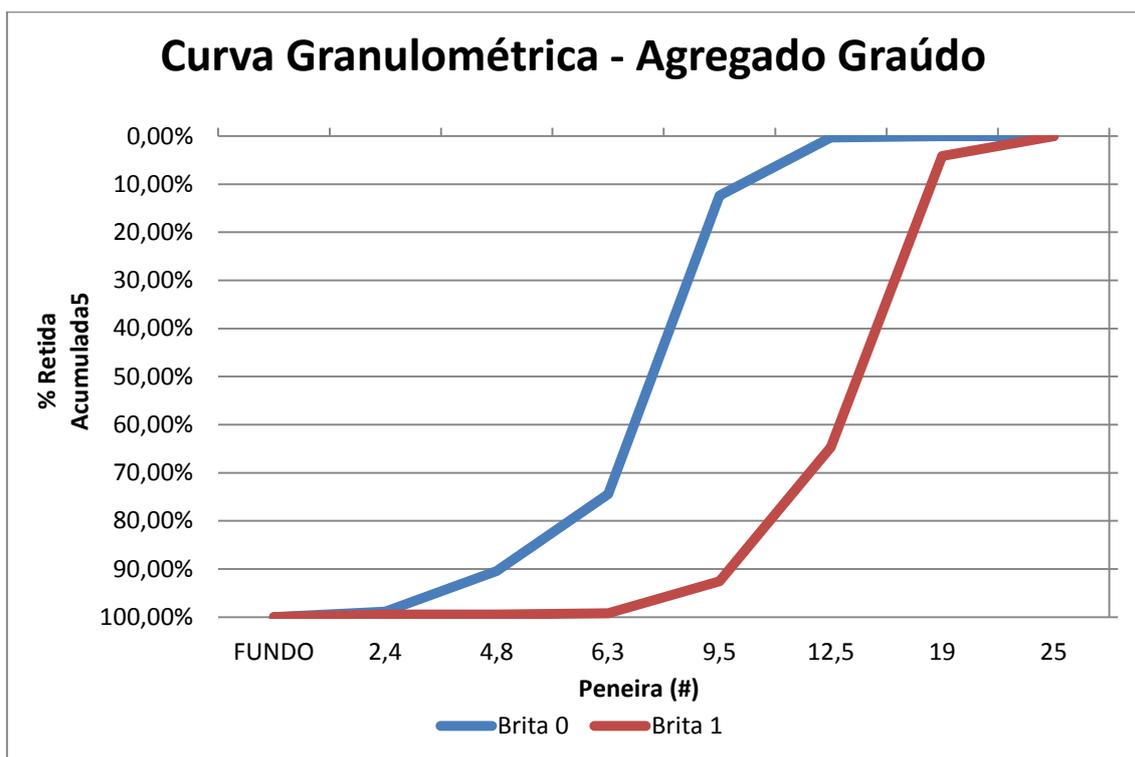


Gráfico 2 – Curva granulométrica: Agregado graúdo
 Fonte: Elaboração do próprio autor.

Conforme se observa nas curvas granulométricas do agregado graúdo, trata-se de agregados com distribuição granulométrica distinta, podendo favorecer a aproximação com a curva granulométrica ideal, pelo modelo de empacotamento de Alfred.

4.2. EMPACOTAMENTO DAS PARTICULAS

Para analisar o empacotamento de partículas têm-se os resultados dos modelos a seguir.

4.2.1. Modelo de Alfred

Para obter a curva ideal de empacotamento de partículas utilizando o modelo de Alfred, primeiramente, foram analisadas separadamente as curvas granulométricas dos agregados miúdos e dos agregados graúdos e após a obtenção da curva ideal para cada grupo de agregado, foi obtida a curva ideal do traço de concreto. Na tabela 8, são mostrados os resultados obtidos para a curva granulométrica ideal do agregado miúdo, na tabela 9 é mostrada a curva granulométrica ideal do agregado graúdo e na tabela 10 é apresentada a curva granulométrica ideal do traço a ser produzido.

Tabela 8 – Curva granulométrica ideal: Agregado miúdo

| Peneira (mm) | Retido (%) | Retido Acumulado (%) |
|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| 9,5 | 0,00% | 0,00% |
| 6,3 | 16,92% | 16,92% |
| 4,8 | 9,87% | 26,79% |
| 2,4 | 21,09% | 47,88% |
| 1,2 | 16,32% | 64,19% |
| 0,6 | 12,63% | 76,82% |
| 0,3 | 9,77% | 86,59% |
| 0,15 | 7,56% | 94,15% |
| 0,075 Fundo | 5,85% | 100,00% |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 9 – Curva granulométrica ideal: Agregado graúdo

| Peneira (mm) | Retido (%) | Retido Acumulado (%) |
|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| 25 | 0,00% | 0,00% |
| 19 | 14,31% | 14,31% |
| 12,5 | 19,21% | 33,52% |
| 9,5 | 11,07% | 44,59% |
| 6,3 | 14,60% | 59,20% |
| 4,8 | 8,52% | 67,71% |
| 2,4 | 18,20% | 85,92% |
| 1,2 Fundo | 14,08% | 100,00% |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 10 – Curva granulométrica ideal: Concreto a produzir

| Peneira (mm) | Retido (%) | Retido Acumulado (%) |
|--------------|------------|----------------------|
| 25 | 0,00% | 0,00% |
| 19 | 10,93% | 10,93% |
| 12,5 | 14,68% | 25,61% |
| 9,5 | 8,46% | 34,06% |
| 6,3 | 11,16% | 45,22% |
| 4,8 | 6,51% | 51,73% |
| 2,4 | 13,90% | 65,63% |
| 1,2 | 10,76% | 76,39% |
| 0,6 | 8,33% | 84,72% |
| 0,3 | 6,44% | 91,16% |
| 0,15 | 4,98% | 96,14% |
| 0,075 Fundo | 3,86% | 100,00% |

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nos gráficos abaixo são mostradas as curvas granulométricas ideais indicadas nas tabelas acima. No gráfico 3 apresentada a curva granulométrica ideal do agregado miúdo, o gráfico 4 contém a curva granulométrica ideal do agregado graúdo e no gráfico 5 é mostrada a curva granulométrica ideal do concreto a ser produzido.

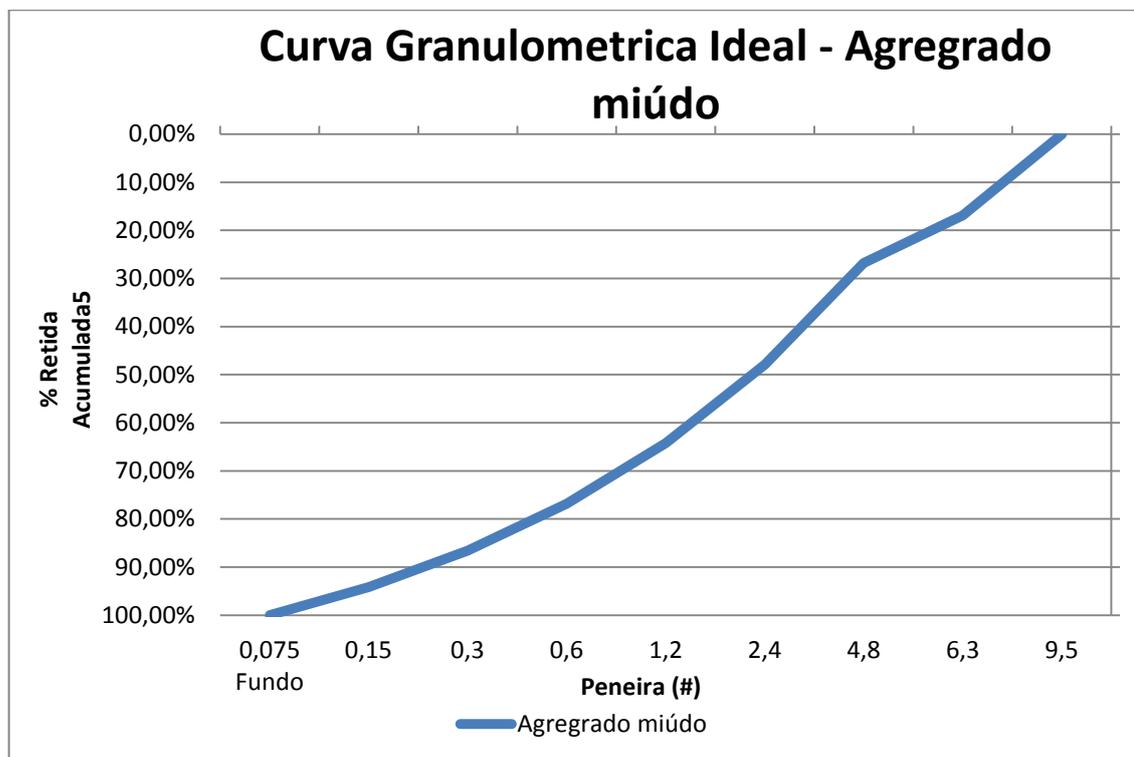


Gráfico 3 – Curva granulométrica ideal: Agregado miúdo (1º traço)

Fonte: Elaboração do próprio autor

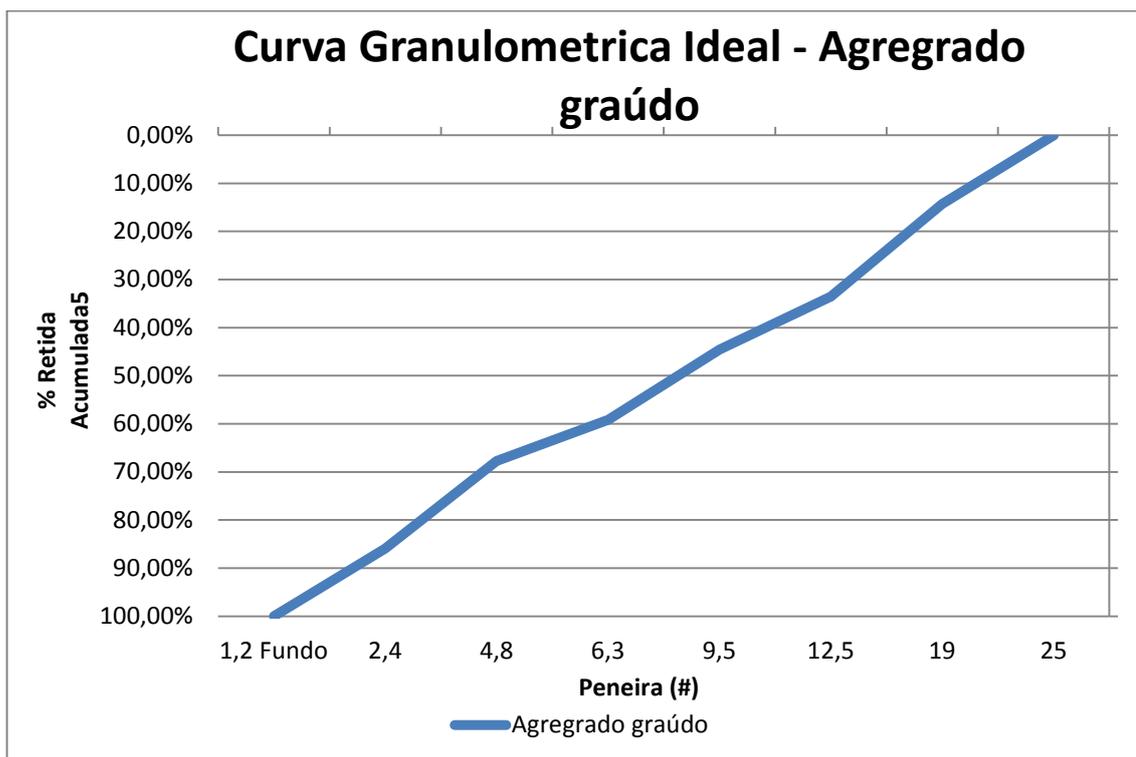


Gráfico 4 – Curva granulométrica ideal: Agregado graúdo (1º traço)
 Fonte: Elaboração do próprio autor

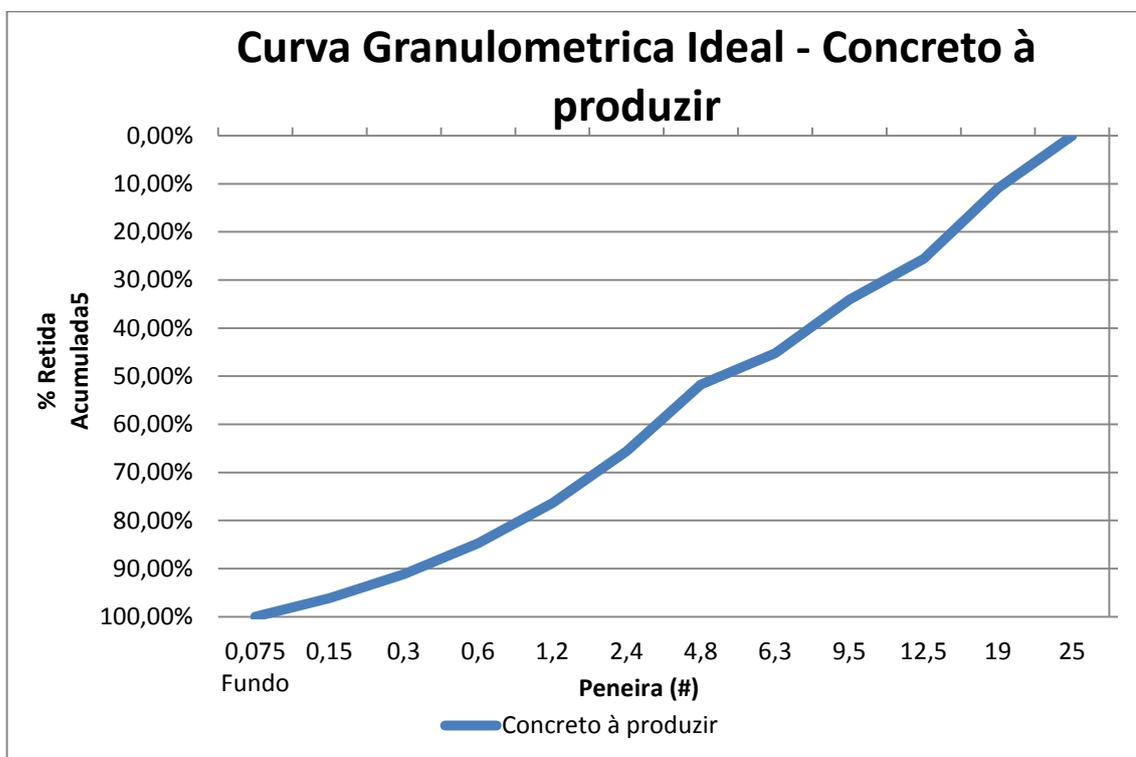


Gráfico 5 – Curva granulométrica ideal: Concreto a ser produzido (1º traço)
 Fonte: Elaboração do próprio autor

As tabelas com os cálculos para obter a curva granulométrica representada

no gráfico 5 estão apresentados no apêndice A.1.

Para a definição das proporções de materiais a serem utilizados para se obter uma curva granulométrica real, a ser utilizada, mais próxima possível da curva granulométrica ideal, obtida pelo modelo de Alfred, foi utilizando a ferramenta *Solver* do programa computacional *Excel*, e tais proporções são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Porcentagem de materiais para produção do traço – Modelo Alfred (1º traço)

| Material | Porcentagem de Material (%) |
|------------------|------------------------------------|
| Areia natural | 0,72% |
| Areia industrial | 30,60% |
| Brita 0 | 16,61% |
| Brita 1 | 52,07% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

É possível observar na tabela 11, que a porcentagem de areia natural é muito baixa, indicando uma hipótese de um concreto com baixa coesão.

Utilizando os dados apresentado na tabela 11 e convertendo os coeficientes para dosagem em massa dos materiais é obtido o primeiro traço 1 : 0,03 : 1,04 : 0,59 : 2,06 (cimento : areia natural : areia industrial : brita 0 : brita 1), o qual foi utilizado para produção do concreto, mantendo o consumo de cimento de 385 kg/m³ de concreto, a relação água/cimento de 0,40 e porcentual de aditivo de 0.96%.

Pelos problemas observados na produção do concreto em laboratório, fez-se necessária a correção do traço, aumentando o teor de argamassa do concreto, reduzindo a relação água/cimento para 0,32 e o porcentual de aditivo para 0,77%. Após as alterações, obteve o traço 1 : 0,405 : 1,102 : 0,620 : 1,654 (cimento : areia natural : areia industrial : brita 0 : brita 1), sendo este traço corrigido utilizado para comparação com o traço de referência e o traço obtido pelo modelo de Toufar.

4.2.2. Modelo de Toufar

A porcentagem de materiais utilizados no modelo de empacotamento de Toufar é apresentada na tabela 12, que diferentemente do modelo de Alfred, apresenta uma melhor distribuição do material, podendo representar uma melhora na coesão.

Tabela 12 – Porcentagem de materiais para produção do traço – Modelo Toufar

| Material | Porcentagem de Material (%) |
|------------------|------------------------------------|
| Areia natural | 12,31% |
| Areia industrial | 22,12% |
| Brita 0 | 21,41% |
| Brita 1 | 44,15% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os cálculos para a obtenção dos dados apresentados na tabela 12 estão contidos no apêndice A.2.

Para o modelo de Toufar, utilizando os valores da tabela 12 e convertendo os coeficientes para massa é obtido o traço 1 : 0,46 : 0,75 : 0,76 : 1,74 (cimento : areia natural : areia industrial : brita 0 : brita 1), em massa, a ser utilizado na produção do concreto, com a relação água/cimento de 0,32 e consumo de aditivo de 0,52%, devido a readequação necessária para evitar a segregação.

4.3. ESTADO FRESCO DO CONCRETO

Para o concreto no estado fresco, foram realizadas análises visuais e ensaios técnicos, conforme apresentado na tabela 13, juntamente com os dados básicos de cada concreto.

Tabela 13 – Resultados da análise no estado fresco do concreto

(CONTINUA)

| Concreto Dados | Concreto Referência | Concreto Alfred^a | Concreto Toufar |
|--|--------------------------------------|--|---|
| Traço^b | 1 : 1,11 : 0,71 : 1,33 : 0,78 | 1 : 0,41 : 1,10 : 0,62 : 1,65 | 1 : 0,46 : 0,75 : 0,76 : 1,74 |
| Consumo de cimento | 385 kg | 385 kg | 385 kg |
| Relação água/cimento | 0,40 | 0,32 | 0,32 |
| Consumo aditivo | 0,96% | 0,77% | 0,52% |
| Teor de argamassa | 57,20% | 52,44% | 46,93% |
| Teor de ar incorporado | 5,40% | 2,60% | 1,50% |
| Slump Test | 100 mm | 245 mm | 240 mm |
| Mesa de Graf | 393 mm | Não realizável – Concreto muito fluido | Não realizável – Concreto muito fluido |
| Coesão^c – Visual | Ótima coesão | Moderada coesão | Boa coesão |
| Segregação^d - Visual | Não há presença de segregação | Presença de segregação parcial | Presença de pouca segregação |
| Exsudação^e - Visual | Não há presença de exsudação | Presença de exsudação parcial | Presença de pouca exsudação |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 14 – Resultados da análise no estado fresco do concreto

(CONCLUSÃO)

Observações:

^a - Utilização do traço readequado em laboratório, devido a impossibilidade de produção do traço obtido através do modelo matemático de Alfred.

^b – Traço apresentado na ordem: cimento : areia natural: areia industrial : brita 0 : brita 1

^c - Níveis de coesão:

Ótima Coesão: coesão aparente em mais de 80 % da massa de concreto

Boa Coesão: coesão aparente entre 55% e 80 % da massa de concreto;

Moderada Coesão: coesão aparente entre 35 % e 55% da massa de concreto;

Baixa Coesão: coesão aparente inferior a 35 % da massa de concreto;

^d - Níveis de Segregação

Segregação total: acima de 80% do material da massa do concreto;

Segregação parcial: 35% a 80% do material da massa do concreto;

Pouca segregação: entre 10% e 35% do material da massa do concreto;

^e - Níveis de Exsudação

Exsudação total: acima de 80% do material da massa do concreto;

Exsudação parcial: 30% a 80% do material da massa do concreto;

Pouca exsudação: entre 1% e 30% do material da massa do concreto;

Fonte: Elaboração do próprio autor

É possível observar na tabela 13, que para o modelo de Alfred o traço utilizado difere do traço apresentado na seção 4.2.1. A alteração do traço se fez necessária devido à impossibilidade de utilização de concreto produzido a partir do mesmo, conforme é possível observar na figura 12, que ilustra o concreto dentro da betoneira, com aspectos visuais de um concreto bastante fluido e sem coesão, fazendo necessária a correção do mesmo.



Figura 12 – Produção do concreto a partir do primeiro traço do modelo de Alfred
Fonte: Elaboração do próprio autor

Após a correção do traço de Alfred para o traço apresentado anteriormente na tabela 13, o concreto apresentou aspectos visuais melhores que o traço inicial, melhorando o teor de argamassa para 52,44%, conforme ilustrado na figura 13.



Figura 13 – Produção do concreto a partir do traço corrigido do modelo de Alfred
Fonte: Elaboração do próprio autor

Contudo, é possível observar que a aproximação das curvas granulométricas dos materiais utilizados é incompatível com a curva granulométrica obtida pelo modelo de Alfred, tornando o traço obtido pelo modelo de Alfred inviável para produção de concreto.

Para o modelo de Toufar, o traço apresentado na tabela 13, foi adotado um consumo menor de aditivo e a relação água/cimento foi mantida igual ao traço corrigido de Alfred, para fins comparativos. Observa-se na figura 14 que há melhoras no aspecto visual do traço, mesmo com teor de argamassa inferior o modelo de Toufar apresentou melhor trabalhabilidade e menor segregação dos materiais.



Figura 14 - Produção do concreto a partir do traço pelo modelo de Toufar
Fonte: Elaboração do próprio autor

Ambos os traços apresentaram no estado fresco piora na trabalhabilidade, segregação e coesão, quando comparados ao traço de referência. Conforme ilustrado na figura 15, é possível observar que o traço de referência possui melhor coesão, porém seu teor de ar incorporado é maior quando comparado aos traços obtidos através dos modelos de empacotamento das partículas.



Figura 15 – Produção do concreto a partir do traço de referência
Fonte: Elaboração do próprio autor

Entretanto, os ensaios de teor de ar incorporado nos traços desenvolvidos pelos modelos matemáticos de empacotamento de partículas podem ter influência quanto à fluidez, por apresentarem exsudação, a camada de pasta (água e cimento), podendo dificultar a passagem do ar injetado na câmara, retornando um baixo de teor de ar incorporado, não condizendo com a realidade do concreto.

4.4. ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

Para a análise do concreto no estado endurecido, foram realizados diversos ensaios, cujos resultados serão discutidos no final desta seção.

4.4.1. Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da absorção de água por imersão são apresentados na tabela 14.

Tabela 15 – Resultado médio da absorção de água por imersão total

| Traço | Absorção - média | Incerteza Padrão ($1 \sigma_p$) |
|-------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Traço Referência (T 01) | 6,9% | 0,6% |
| Traço Alfred (T 02) | 5,9% | 1,7% |
| Traço Toufar (T 03) | 5,0% | 0,4% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando a tabela 14, nota-se que há uma redução na absorção de água, porém na tabela 15, que se refere às comparações entre os traços, observa-se que a melhora para o traço pelo modelo de Alfred, não pode ser garantida. Tendo como certeza apenas a melhora do traço quando o empacotamento das partículas é realizado pelo modelo de Toufar, garantido cerca de 95% de certeza.

Tabela 16– Comparativo entre os traços produzidos: Absorção de água por imersão total

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|---------------------------|--|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 0,94% | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 1,90% | São diferentes com 95,45% de certeza |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 0,96% | Não se pode afirmar que são diferentes |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Para os resultados obtidos no ensaio de determinação de índice de vazios, apresentados na tabela 16, os valores médios desta propriedade, para cada traço produzido são:

Tabela 17 – Resultado médio dos índices de vazios

| Traço | Índice de vazios - médio | Incerteza Padrão (1 σ_p) |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Traço Referência (T 01) | 15,3% | 0,4% |
| Traço Alfred (T 02) | 13,4% | 4,4% |
| Traço Toufar (T 03) | 11,6% | 0,4% |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando a tabela 16, é possível observar que a redução do índice de vazios pode ser percebida, porém ao analisar a tabela 17, nota-se que apenas obteve-se melhora no índice de vazios, com cerca de 99% de certeza no traço que teve seu empacotamento de partículas realizado pelo modelo de Toufar. Não sendo possível analisar o modelo de Alfred devido à amplitude do erro obtido.

Tabela 18– Comparativo entre os traços produzidos: Índice de vazios

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|---------------------------|--|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 1,83% | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 3,68% | São diferentes com 99,73% de certeza |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 1,84% | Não se pode afirmar que são diferentes |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os resultados obtidos no ensaio de determinação de massa específica na condição seca são apresentados na tabela 18 com os valores médios desta propriedade, para cada traço produzido.

Tabela 19 – Resultado médio da massa específica na condição seca

| Traço | Massa específica seca Média | Incerteza Padrão (1 σ_p) |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Traço Referência (T 01) | 2,226 g/cm ³ | 0,028 g/cm ³ |
| Traço Alfred (T 02) | 2,269 g/cm ³ | 0,081 g/cm ³ |
| Traço Toufar (T 03) | 2,336 g/cm ³ | 0,022 g/cm ³ |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando a tabela 18, nota-se o aumento na massa específica na condição seca, porém ao analisar a tabela 19, percebe-se que se teve este aumento com aproximadamente 99 % de certeza no traço que teve seu empacotamento de partículas realizado pelo modelo de Toufar. Não sendo possível analisar para o modelo de Alfred devido à amplitude do erro obtido.

Tabela 20 – Comparativo entre os traços produzidos: Massa específica na condição seca

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|---------------------------|--|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 0,043 g/cm ³ | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 0,110 g/cm ³ | São diferentes com 99,73% de certeza |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 0,067 g/cm ³ | Não se pode afirmar que são diferentes |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os resultados obtidos no ensaio de determinação de massa específica na condição saturada são apresentados na tabela 20 com os valores médios desta propriedade, para cada traço produzido.

Tabela 21 – Resultado médio da massa específica na condição saturada

| Traço | Massa específica Saturada - média | Incerteza Padrão (1 σ_p) |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Traço Referência (T 01) | 2,378 g/cm ³ | 0,021 g/cm ³ |
| Traço Alfred (T 02) | 2,403 g/cm ³ | 0,064 g/cm ³ |
| Traço Toufar (T 03) | 2,452 g/cm ³ | 0,018 g/cm ³ |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Observando a tabela 20, nota-se o aumento na massa específica na condição saturada, porém ao analisar a tabela 21, nota-se que se teve este aumento com aproximadamente 99% de certeza no traço que teve seu empacotamento de partículas realizado pelo modelo de Toufar. Não sendo possível analisar para o modelo de Alfred devido à amplitude do erro obtido.

Tabela 22 – Comparativo entre os traços produzidos: Massa específica na condição saturada

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|---------------------------|--|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 0,025 g/cm ³ | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 0,074 g/cm ³ | São diferentes com 99,73% de certeza |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 0,049 g/cm ³ | Não se pode afirmar que são diferentes |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os resultados obtidos no ensaio de determinação de massa específica real são apresentados na tabela 22 com os valores médios desta propriedade, para cada traço produzido.

Tabela 23 – Resultado médio da massa específica real

| Traço | Massa específica real média | Incerteza Padrão (1 σ_p) |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Traço Referência (T 01) | 2,627 g/cm ³ | 0,027 g/cm ³ |
| Traço Alfred (T 02) | 2,621 g/cm ³ | 0,086 g/cm ³ |
| Traço Toufar (T 03) | 2,642 g/cm ³ | 0,024 g/cm ³ |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Observa-se que na tabela 22, os valores não apresentam dispersão, porém analisando a tabela 23, é possível observar que não se pode avaliar a diferença entre os valores obtidos, devido à aproximação dos mesmos, observando a igualdade entre os valores com 68,27% de certeza.

Tabela 24 – Comparativo entre os traços produzidos: Massa específica real

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|---------------------------|--|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 0,006 g/cm ³ | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 0,016 g/cm ³ | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 0,021 g/cm ³ | Não se pode afirmar que são diferentes |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os dados coletados para obter os valores das tabelas acima apresentadas são demonstrados no apêndice B.1.

4.4.2. Determinação da Absorção de Água por Capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade são apresentados na tabela 24, com os valores médios para cada traço produzido.

Tabela 25 – Resultado médio absorção por capilaridade

| Traço | Absorção Média | Incerteza Padrão ($1 \sigma_p$) |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Traço Referência (T 01) | 1,0591 g/cm ² | 0,0010 g/cm ² |
| Traço Alfred (T 02) | 0,8254 g/cm ² | 0,0010 g/cm ² |
| Traço Toufar (T 03) | 0,8186 g/cm ² | 0,0011 g/cm ² |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Analisando a tabela 24, observa-se uma redução da absorção entre o traço referência e os traços que tiveram seu empacotamento de partículas melhorado. Na tabela 25 são apresentadas as diferenças entre as médias dos traços.

Tabela 26 – Comparativo entre os traços produzidos: Absorção de água por capilaridade

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|---------------------------|--------------------------------------|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 0,2338 g/cm ² | São diferentes com 99,73% de certeza |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 0,2406 g/cm ² | São diferentes com 99,73% de certeza |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 0,0068 g/cm ² | São diferentes com 99,73% de certeza |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Como pode ser observado na tabela 25, cujos cálculos para a obtenção destes valores são apresentados no apêndice B.2, pode-se dizer que os traços que tiveram o empacotamento das partículas melhorado, tiveram a absorção de água por capilaridade reduzida, com cerca de 99% de certeza.

Pode se observar na figura 15, que a absorção da água por capilaridade nos corpos de prova com granulometria controlada pelos modelos de empacotamento, foi inferior a absorção no corpo de prova do traço de referência.



Figura 16 – Absorção de água por capilaridade
 (a) Traço de Toufar; (b) Traço de Alfred; (c) Traço referência.
 Fonte: Elaboração do próprio autor

4.4.3. Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica são apresentados na tabela 26, com os valores médios para cada traço produzido.

Tabela 27 – Resultado médio da velocidade de propagação de onda ultrassônica

| Traço | Velocidade Média | Incerteza Padrão ($1 \sigma_p$) |
|-------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Traço Referência (T 01) | 3760 m/s | 100 m/s |
| Traço Alfred (T 02) | 3879 m/s | 200 m/s |
| Traço Toufar (T 03) | 4115 m/s | 150 m/s |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Na tabela 27, que apresenta o comparativo entre os traços, é possível observar que o traço com o empacotamento das partículas realizado pelo modelo de Toufar apresenta aproximadamente 95% de certeza que ocorreu melhoria do preenchimento dos vazios e quando comparado com o traço que teve o empacotamento das partículas realizado pelo modelo de Alfred, teve melhora de aproximadamente 68% de certeza. Podendo o modelo de Toufar ser considerado um modelo matemático adequado para a produção do concreto, de acordo com esta propriedade.

Tabela 28 – Comparativo entre os traços produzidos: Propagação de onda ultrassônica

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|----------------------------------|--|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 120 m/s | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 355 m/s | São diferentes com 95,45% de certeza |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 235 m/s | São diferentes com 68,27% de certeza |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Os dados coletados para obter estes resultados são apresentados no apêndice B.3.

4.4.4. Resistência Característica do Concreto à Compressão Axial

Para a resistência característica do concreto à compressão axial, partir dos dados apresentados no apêndice B.5, obtém para a idade de 28 dias a tabela 28, que se refere às médias das resistências dos corpos de prova com idade de 28 dias.

Tabela 29 – Resistência característica à compressão axial com idade de 28 dias

| Traço | Resistência média | Incerteza Padrão ($1 \sigma_p$) |
|-------------------------|--------------------------|---|
| Traço Referência (T 01) | 39,1 MPa | 2,5 MPa |
| Traço Alfred (T 02) | 55,9 MPa | 4,5 MPa |
| Traço Toufar (T 03) | 62,9 MPa | 3,3 MPa |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Comparando os valores entre os traços, conforme apresentado na tabela 29, observa-se que os traços com o empacotamento modificado pelos modelos matemáticos, tiveram melhora quando esta propriedade, com aproximadamente 99% de certeza, e quando comparados entre os modelos matemáticos, se observa com cerca de 68% de certeza que o modelo de Toufar, apresenta melhores resistências que o modelo de Alfred, sendo o modelo mais indicado por esta propriedade, o modelo de Toufar.

Tabela 30 – Comparativo entre os traços: Resistência à compressão axial a idade de 28 dias

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|
| Traço Referência (T 01) x Traço Alfred (T 02) | 16,8 MPa | São diferentes com 99,73% de certeza |
| Traço Referência (T 01) x Traço Toufar (T 03) | 23,8 MPa | São diferentes com 99,73% de certeza |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Toufar (T 03) | 7,0 MPa | São diferentes com 68,27% de certeza |

Fonte: Elaboração do próprio autor

4.4.5. Câmara de Envelhecimento

Para avaliar a influência do ensaio da câmara de envelhecimento, após aplicar os ciclos indicados na tabela 1, apresentada anteriormente, foi realizado o ensaio de resistência característica à compressão axial nos corpos de prova e a partir dos dados coletados, que são apresentados no apêndice B.6, obteve-se os valores apresentados na tabela 28, referente à resistência de ruptura média dos corpos de prova após a câmara de envelhecimento.

Tabela 31 – Resistência característica à compressão axial após a câmara de envelhecimento

| Traço | Resistência média | Incerteza Padrão (1 σ_p) |
|--------------------------------|--------------------------|---|
| Traço Referência (T 01) - Após | 38,5 MPa | 5,4 MPa |
| Traço Alfred (T 02) - Após | 47,4 MPa | 5,1 MPa |
| Traço Toufar (T 03) - Após | 56,1 MPa | 5,2 MPa |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Comparando os valores apresentados na tabela 30, com os valores apresentados na tabela 28, no item 4.4.5 que se refere à resistência característica à compressão axial dos corpos de prova com idade de 28 dias, obtém a tabela 31, que aborda a comparação entre as resistências para verificar a eficiência dos modelos matemáticos quando expostos as condições da tabela 1.

Tabela 32 – Comparativo entre os traços: Resistência aos 28 dias x Resistência após câmara de envelhecimento

| Comparativo entre os traços | Diferença entre as médias | Condição |
|--|---------------------------|--|
| Traço Referência (T 01) x Traço Referência (T 01) - Após | 0,6 MPa | Não se pode afirmar que são diferentes |
| Traço Alfred (T 02) x Traço Alfred (T 02) - Após | 8,4 MPa | São diferentes com 68,27% de certeza |
| Traço Toufar (T 03) x Traço Toufar (T 03) - Após | 6,8 MPa | São diferentes com 68,27% de certeza |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Como podem ser observados na tabela 29, os corpos de prova que tiveram o empacotamento de partículas melhorado, tiveram perda de resistência com aproximadamente 68% de certeza, não sendo apresentada esta perda de resistência pelo traço de referência.

Observa-se na figura 17, como os corpos de prova saíram após os ciclos na câmara de envelhecimento; na ilustração nota-se a dificuldade, dos traços que tiveram seu empacotamento melhorado, em atingir o equilíbrio hidráulico; em outras palavras, os corpos de prova representantes dos modelos de empacotamento de Alfred e Toufar, estavam úmidos e com sua superfície molhada, enquanto o corpo de prova representante do traço de referência apenas estava úmido com sua superfície seca.

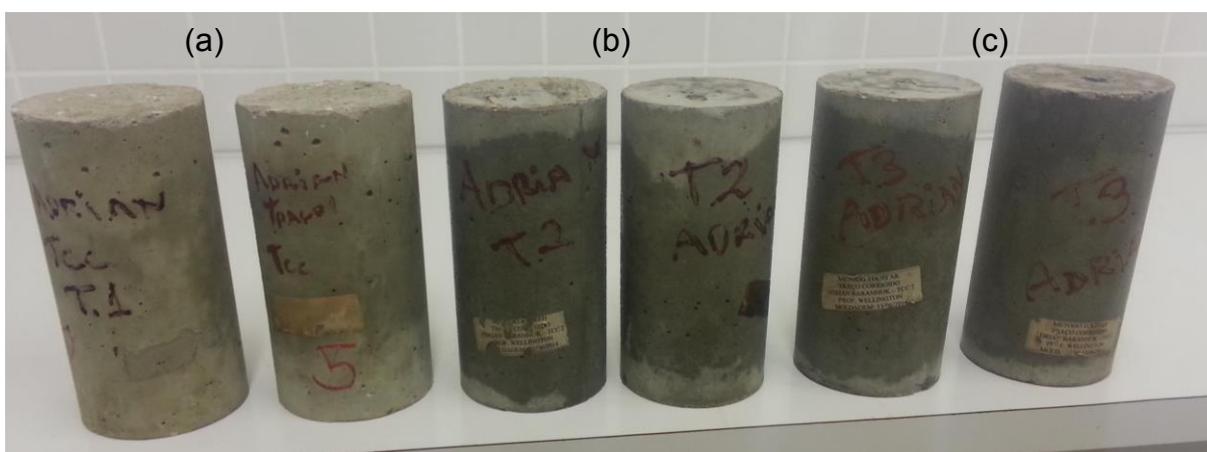


Figura 17 – Corpos de Prova após os ciclos na câmara de envelhecimento (a) Traço de referência; (b) Traço de Alfred; (c) Traço de Toufar

Fonte: Elaboração do próprio autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÃO

Analisar a composição granulométrica que obtém o menor índice de vazios com o mesmo custo do concreto

Para os modelos apresentados, nota-se que ao aplicar os conceitos de empacotamento de partículas apenas na granulometria dos agregados foram obtidos resultados favoráveis, sendo que o modelo de Toufar apresentou uma redução do índice de vazios significativos, quando comparado ao traço referência.

Considerando que o modelo de Alfred no estado fresco não apresentou possibilidade de utilização do concreto, sem que fosse feita a correção do traço em laboratório, não é possível concluir em relação ao seu desempenho devido à grande amplitude de seu erro, impossibilitando a comparação com o modelo de Toufar e o traço de referência. Sendo o modelo de Toufar melhor indicado para a produção de concretos, de acordo com os dados apresentados neste trabalho.

Cabe salientar que os modelos matemáticos de empacotamento de partículas consideram a forma dos grãos perfeitamente esféricos, entretanto, os agregados utilizados nesta pesquisa possuem forma angulosa, influenciando na efetividade dos modelos de empacotamento de partículas na prática.

Analisar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos concretos produzidos

Para o estado fresco e endurecido dos concretos produzidos, foi observada melhoras, porém o traço corrido pelo modelo de Alfred em algumas propriedades não apresentou condições para ser comparado ao modelo de Toufar e nem ao traço de referência, não sendo possível concluir sua efetividade quanto ao seu uso, considerando estas propriedades. Porém em relação ao modelo de Toufar, foi

possível observar melhora de seu desempenho na resistência mecânica e frente à ação de agentes agressivos ao concreto, com aumento significativo da sua resistência média de 23,8 MPa +/- 4,2 MPa e redução do índice de vazios. Estes resultados permite que este modelo de empacotamento seja indicado para a indústria de concreto para melhorar o comportamento do material produzido.

Avaliar a porosidade do concreto produzido por dois métodos de empacotamento de partículas

Comparando os modelos de Alfred e Toufar não se pode concluir qual deles apresenta melhores resultados quando analisados em relação à porosidade. Porém observa-se melhora na porosidade através de ensaios como absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão, que ao comparar o traço de referência observa-se que há melhoras na redução da porosidade, tornando o concreto menos poroso e mais resistente aos agentes agressivos ao concreto.

Avaliar a durabilidade do concreto

Ao avaliar a durabilidade do concreto, pelas melhoras nas propriedades no estado endurecido do concreto, é possível concluir que pode ser obtido um concreto com menor permeabilidade melhorando a curva granulométrica, entretanto, pelo ensaio de resistência a compressão dos corpos de prova após serem submetidos à câmara de envelhecimento, nota-se que ao melhorar o índice de vazios do concreto, o concreto torna-se mais frágil quanto a sua ruptura, pela perda de resistência apresentadas pelos traços que tiveram a granulometria alterada, hipoteticamente esses concretos quando sujeitos a baixas temperaturas, podem ter sua integridade comprometida, por possuírem menor índice de vazios, quando a água no interior do concreto congela, ela aumenta seu volume e por haver redução no índice de vazios, esta expansão pode gerar microfissuras no concreto interferindo significativamente na sua integridade, reduzindo sua capacidade de resistência aos esforços. Como

pode ser observado o traço de referencia não apresentou esta diminuição de resistência, sendo este traço mais poroso que os traços com a granulometria desenvolvida pelos modelos de empacotamento de partículas.

Conclusão geral

Como conclusão geral, observa-se que o empacotamento dos agregados tem influência na porosidade do concreto, reduzindo-a significativamente quando aplicado o modelo de Toufar, de acordo com os dados apresentados neste trabalho.

Entretanto as condições climáticas à qual esse concreto produzido estará sujeito deverão ser levadas em consideração, conforme dados apresentados neste trabalho, hipoteticamente em regiões que há temperaturas negativas, interferem significativamente no comportamento do concreto, sendo necessária a verificação dos efeitos e soluções para aplicação dos modelos matemáticos de empacotamento de partículas em concreto para estas regiões.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme apresentado neste trabalho, são necessárias algumas verificações, sendo estas colocadas como sugestões de trabalhos futuros:

- Analisar a microestrutura do concreto após estar submetidos a temperaturas negativas; e
- Adaptar o modelo de Alfred para a indústria de concreto; e
- Avaliar outras granulometrias de agregado miúdo e graúdo para validação do modelo de Toufar;
- Correlacionar o tempo de exposição de 1 ciclo do concreto na câmara de envelhecimento ao tempo de exposição em ambiente aberto.

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 67:** Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

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

_____. **NBR 5733:** Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

_____. **NBR 5738:** Concreto – Procedimento para Moldagem e cura de Corpos de Prova. Rio de Janeiro, 2008. 1 p.

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

_____. **NBR 6118:** Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007. 221 p.

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

_____. **NBR 8802**: Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica. 2013. 8 p.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e Concreto Endurecido – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica. 2005. 1 p.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de água por capilaridade. 2012. 3 p.

_____. **NBR 10787**: Concreto Endurecido – Determinação da Penetração de Água sobre Pressão, 2011. 6 p.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da Retenção de Água. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

_____. **NBR 15558**: Concreto – Determinação da exsudação. Rio de Janeiro, 2008. 7 p.

_____. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. 2009. 11 p.

ALVES, J. D.. **Materiais de Construção**. Goiânia: Editora da UFG, 1999. 298 p., 24 cm.

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

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.

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

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

LIMA, M. G. de. **Ações do Meio Ambiente sobre a Estrutura de Concreto**. *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, 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, H. M.. **Propriedades do Concreto Endurecido**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000. 447 p. (Materiais de Construção, v 1).

ROMANO, R. C. de O.; CARDOSO, F. A.; PILLEGGI, R. G. **Propriedades do Concreto no Estado Fresco**. *in* ISAIA G. C., **Concreto: ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 931 p.

SILVA, M. R.. **Materiais de Construção**. São Paulo: Pini, 1985. 266 p.

SIMEPAR, **Previsão climática para a Primavera/2013**, Paraná, 2013

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).

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland.** *in* ISAIA G. C., **Concreto: ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. 931 p.

APÊNDICE A – EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS

A.1 – MODELO DE ALFRED

Os cálculos realizados para obter as curvas ideais são expressos na tabela 32, tabela 33, tabela 34 e tabela 35, respectivamente.

Tabela 33 - Equações consideradas

| | |
|-----------------|---------------------------------------|
| EQUAÇÃO: | $\alpha*(G1+G2) + \beta*(G3+G4) = E3$ |
| | $\alpha*G1 + \beta*G2 = E1$ |
| | $\alpha*G3 + \beta*G4 = E2$ |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 34 – Análise de empacotamento entre agregado miúdo

| Peneira (mm) | MATRIZ - ($\alpha*G1 + \beta*G2 = E1$) | | MATRIZ - E1 | Erro ^ 2 |
|---------------------|--|--------|--------------------|-----------------|
| 25 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 19 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12,5 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9,5 | 0,0032 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6,3 | 0,0041 | 0,0000 | 0,1692 | 0,9989 |
| 4,8 | 0,0054 | 0,0000 | 0,0987 | 0,9975 |
| 2,4 | 0,0158 | 0,0942 | 0,2109 | 0,3158 |
| 1,2 | 0,0186 | 0,1974 | 0,1632 | 0,0339 |
| 0,6 | 0,1200 | 0,2091 | 0,1263 | 0,4094 |
| 0,3 | 0,4061 | 0,1747 | 0,0977 | 0,7095 |
| 0,15 | 0,3542 | 0,1398 | 0,0756 | 0,8361 |
| 0,075 Fundo | 0,0726 | 0,1849 | 0,0585 | 4,4803 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com os seguintes resultados de proporcionalidade:

$$\alpha = 0,022983331$$

$$\beta = 0,977016669$$

$$\text{Variação do Erro} = 1,9854$$

$$\text{Média do Erro} = 1,0977$$

Tabela 35 – Análise de empacotamento entre agregado graúdo

| Peneira (mm) | MATRIZ - ($\alpha \cdot G_3 + 6 \cdot G_4 = E_2$) | | MATRIZ - E2 | Erro ^ 2 |
|--------------|---|--------|-------------|----------|
| 25 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 19 | 0,0000 | 0,0412 | 0,1431 | 0,6109 |
| 12,5 | 0,0030 | 0,6058 | 0,1921 | 1,9447 |
| 9,5 | 0,1204 | 0,2787 | 0,1107 | 1,3726 |
| 6,3 | 0,6212 | 0,0664 | 0,1460 | 0,1391 |
| 4,8 | 0,1600 | 0,0025 | 0,0852 | 0,2736 |
| 2,4 | 0,0844 | 0,0001 | 0,1820 | 0,7876 |
| 1,2 | 0,0111 | 0,0053 | 0,1408 | 0,9076 |
| 0,6 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 0,3 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 0,15 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 0,075 Fundo | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com os seguintes resultados de proporcionalidade:

$$\alpha = 0,241808516$$

$$\beta = 0,758191484$$

$$\text{Variação do Erro} = 0,1404$$

$$\text{Média do Erro} = 0,2635$$

Tabela 36 – Análise entre agregado miúdo e agregado graúdo

| Peneira (mm) | MATRIZ - ($\alpha \cdot (G_1 + G_2) + 6 \cdot (G_3 + G_4) = E_3$) | | MATRIZ - E3 | Erro ^ 2 |
|--------------|---|--------|-------------|----------|
| 25 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 19 | 0,0000 | 0,0312 | 0,1093 | 0,6459 |
| 12,5 | 0,0000 | 0,4601 | 0,1468 | 1,3291 |
| 9,5 | 0,0001 | 0,2404 | 0,0846 | 0,9076 |
| 6,3 | 0,0001 | 0,2005 | 0,1116 | 0,0551 |
| 4,8 | 0,0001 | 0,0406 | 0,0651 | 0,3256 |
| 2,4 | 0,0924 | 0,0205 | 0,1390 | 0,4772 |
| 1,2 | 0,1932 | 0,0067 | 0,1076 | 0,1560 |
| 0,6 | 0,2071 | 0,0000 | 0,0833 | 0,0489 |
| 0,3 | 0,1800 | 0,0000 | 0,0644 | 0,0156 |
| 0,15 | 0,1447 | 0,0000 | 0,0498 | 0,0082 |
| 0,075 Fundo | 0,1823 | 0,0000 | 0,0386 | 0,2308 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Com os seguintes resultados de proporcionalidade:

$$\alpha = 0,313189342$$

$$\beta = 0,686810658$$

$$\text{Variação do Erro} = 0,0286$$

$$\text{Média do Erro} = 0,1647$$

A.2 – MODELO DE TOUFFAR

Para o modelo de Touffar, utilizou as características dos agregados conforme apresentado na tabela 36.

Tabela 37 – Características dos agregados

| Material | Diâmetro Mínimo (mm) | Diâmetro Máximo (mm) | Massa Específica (kg/dm ³) | Massa Unitária (kg/dm ³) | σ : |
|------------------|----------------------|----------------------|--|--------------------------------------|------------|
| Areia Industrial | 0,075 | 2,4 | 2,58 | 1,29 | 0,5 |
| Areia Fina | 0,075 | 6,3 | 2,58 | 1,37 | 0,53100775 |
| Brita 0 | 1,2 | 12,5 | 2,76 | 1,37 | 0,49637681 |
| Brita 1 | 1,2 | 19 | 2,76 | 1,52 | 0,55072464 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Obtendo a tabela 37, a partir das características dos materiais fornecido pela concreteira.

Tabela 38 – Resultados dos cálculos do modelo de Touffar

| Material: | Areia Industrial + +Areia Fina | Brita 0 + Brita 1 | Agregado Miúdo + Agregado Graúdo |
|--------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| r_1 : | 0,357497444 | 0,326565782 | 0,344355372 |
| r_2 : | 0,642502556 | 0,673434218 | 0,655644628 |
| k_d : | 0,976470588 | 0,881188119 | 0,984334204 |
| x : | 1,259978904 | 1,197528656 | 1,523553145 |
| k_s : | 0,76846677 | 0,751715863 | 0,825073995 |
| σ_t : | 0,667046751 | 0,659281682 | 0,80936618 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

APÊNDICE B – PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

B.1 – DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Para determinação destas propriedades teve-se como dados, conforme apresentado na tabela 38, que apresentam os dados coletados.

Na tabela 39, apresentam os cálculos realizados para obter os valores apresentados no item 4.4.1

Tabela 39 – Dados coletados para ensaio de absorção por imersão total

| Corpo de Prova | 0 minutos | 50 minutos | 55 minutos | 60 minutos | 65 minutos | 70 minutos | 1070 minutos | 2930 minutos | 4220 minutos | 5660 minutos | Massa da balança hidrostática |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| CP_T1_02 | 3470,2 g | 3531,0 g | 3544,3 g | 3551,0 g | 3557,3 g | 3563,0 g | 3687,1 g | 3712,4 g | 3715,0 g | 3716,6 g | 2149,6 g |
| CP_T1_03 | 3504,3 g | 3613,2 g | 3626,7 g | 3634,5 g | 3641,6 g | 3647,7 g | 3745,8 g | 3755,6 g | 3756,9 g | 3757,6 g | 2176,4 g |
| CP_T1_05 | 3503,3 g | 3594,8 g | 3608,8 g | 3617,1 g | 3624,5 g | 3630,9 g | 3731,3 g | 3740,1 g | 3741,3 g | 3741,9 g | 2170,8 g |
| CP_T1_06 | 3501,9 g | 3592,2 g | 3607,3 g | 3616,4 g | 3624,3 g | 3630,9 g | 3719,9 g | 3728,7 g | 3730,2 g | 3731,0 g | 2161,0 g |
| CP_T1_07 | 3501,2 g | 3563,2 g | 3573,7 g | 3578,9 g | 3583,3 g | 3587,1 g | 3687,0 g | 3723,0 g | 3730,7 g | 3733,3 g | 2168,5 g |
| Média | 3496,2 g | 3578,9 g | 3592,2 g | 3599,6 g | 3606,2 g | 3611,9 g | 3714,2 g | 3732,0 g | 3734,8 g | 3736,1 g | 2165,3 g |
| Desvio Padrão | 14,6 g | 32,2 g | 32,9 g | 33,9 g | 34,8 g | 35,4 g | 26,4 g | 16,6 g | 15,5 g | 15,1 g | 10,4 g |
| Incerteza Padrão | 15 g | 32 g | 33 g | 34 g | 35 g | 35 g | 26 g | 17 g | 15 g | 15 g | 10 g |
| (Incerteza Padrão)^2 | 212,4 g | 1036,8 g | 1082,6 g | 1149,2 g | 1207,8 g | 1252,5 g | 699,4 g | 274,7 g | 240,2 g | 227,5 g | 107,2 g |
| CP_T2_01 | 3604,9 g | 3678,8 g | 3697,4 g | 3706,8 g | 3714,6 g | 3720,3 g | 3797,8 g | 3811,3 g | 3812,5 g | 3813,2 g | 2245,1 g |
| CP_T2_04 | 3505,1 g | 3547,4 g | 3559,9 g | 3567,2 g | 3573,5 g | 3579,0 g | 3686,9 g | 3712,1 g | 3716,5 g | 3719,1 g | 2158,4 g |
| CP_T2_08 | 3576,3 g | 3649,5 g | 3661,4 g | 3668,6 g | 3674,6 g | 3679,5 g | 3757,3 g | 3780,0 g | 3783,9 g | 3785,4 g | 2221,9 g |
| CP_T2_09 | 3576,7 g | 3649,1 g | 3664,0 g | 3672,6 g | 3679,6 g | 3684,8 g | 3759,3 g | 3771,4 g | 3774,2 g | 3775,8 g | 2197,1 g |
| CP_T2_10 | 3513,2 g | 3568,7 g | 3582,8 g | 3590,9 g | 3597,7 g | 3602,9 g | 3692,2 g | 3723,8 g | 3731,6 g | 3735,3 g | 2171,6 g |
| Média | 3555,2 g | 3618,7 g | 3633,1 g | 3641,2 g | 3648,0 g | 3653,3 g | 3738,7 g | 3759,7 g | 3763,7 g | 3765,8 g | 2198,8 g |
| Desvio Padrão | 43,7 g | 57,2 g | 58,7 g | 59,3 g | 59,6 g | 59,6 g | 47,7 g | 41,1 g | 39,2 g | 38,2 g | 35,5 g |
| Incerteza Padrão | 44 g | 57 g | 59 g | 59 g | 60 g | 60 g | 48 g | 41 g | 39 g | 38 g | 36 g |
| (Incerteza Padrão)^2 | 1912,9 g | 3267,1 g | 3444,6 g | 3511,5 g | 3555,5 g | 3557,1 g | 2277,2 g | 1691,5 g | 1539,5 g | 1460,5 g | 1263,0 g |
| CP_T3_01 | 3683,3 g | 3740,4 g | 3753,4 g | 3760,4 g | 3766,2 g | 3770,8 g | 3838,2 g | 3850,8 g | 3853,0 g | 3854,4 g | 2283,3 g |
| CP_T3_02 | 3675,3 g | 3720,6 g | 3732,5 g | 3738,8 g | 3744,3 g | 3748,5 g | 3827,7 g | 3851,4 g | 3855,5 g | 3857,2 g | 2290,0 g |
| CP_T3_06 | 3658,7 g | 3746,8 g | 3759,4 g | 3766,1 g | 3771,8 g | 3776,0 g | 3838,3 g | 3847,9 g | 3850,1 g | 3851,6 g | 2276,7 g |
| CP_T3_07 | 3657,6 g | 3714,3 g | 3726,7 g | 3733,3 g | 3739,1 g | 3743,9 g | 3818,9 g | 3833,9 g | 3835,8 g | 3837,4 g | 2265,9 g |
| CP_T3_10 | 3675,9 g | 3746,7 g | 3759,3 g | 3765,7 g | 3770,9 g | 3775,7 g | 3844,0 g | 3857,4 g | 3859,3 g | 3860,8 g | 2290,3 g |
| Média | 3670,2 g | 3733,8 g | 3746,3 g | 3752,9 g | 3758,5 g | 3763,0 g | 3833,4 g | 3848,3 g | 3850,7 g | 3852,3 g | 2281,2 g |
| Desvio Padrão | 11,4 g | 15,3 g | 15,5 g | 15,6 g | 15,6 g | 15,5 g | 10,0 g | 8,7 g | 9,0 g | 9,0 g | 10,2 g |
| Incerteza Padrão | 11 g | 15 g | 16 g | 16 g | 16 g | 16 g | 10 g | 9 g | 9 g | 9 g | 10 g |
| (Incerteza Padrão)^2 | 130,3 g | 233,4 g | 241,4 g | 244,3 g | 242,0 g | 241,5 g | 100,5 g | 76,5 g | 81,2 g | 80,8 g | 104,8 g |

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 40 – Cálculos das propriedades

| Corpo de Prova | Absorção de água | Índice de vazios | Massa Específica - Seca | Massa Específica - Saturada | Massa Específica - Real |
|---------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| CP_T1_02 | 7,10% | 15,72% | 2,215 g/cm ³ | 2,372 g/cm ³ | 2,628 g/cm ³ |
| CP_T1_03 | 7,23% | 16,02% | 2,216 g/cm ³ | 2,376 g/cm ³ | 2,639 g/cm ³ |
| CP_T1_05 | 6,81% | 15,19% | 2,230 g/cm ³ | 2,382 g/cm ³ | 2,629 g/cm ³ |
| CP_T1_06 | 6,54% | 14,59% | 2,231 g/cm ³ | 2,376 g/cm ³ | 2,612 g/cm ³ |
| CP_T1_07 | 6,63% | 14,83% | 2,237 g/cm ³ | 2,386 g/cm ³ | 2,627 g/cm ³ |
| Média | 6,86% | 15,27% | 2,226 g/cm ³ | 2,378 g/cm ³ | 2,627 g/cm ³ |
| Incerteza Padrão | 0,6% | 0,4% | 0,028 g/cm ³ | 0,021 g/cm ³ | 0,027 g/cm ³ |
| (Incerteza Padrão) ² | 0,0039% | 0,0014% | 0,001 g/cm ³ | 0,000 g/cm ³ | 0,001 g/cm ³ |
| CP_T2_01 | 5,78% | 13,28% | 2,299 g/cm³ | 2,432 g/cm³ | 2,651 g/cm³ |
| CP_T2_04 | 6,11% | 13,71% | 2,246 g/cm³ | 2,383 g/cm³ | 2,603 g/cm³ |
| CP_T2_08 | 5,85% | 13,37% | 2,287 g/cm³ | 2,421 g/cm³ | 2,641 g/cm³ |
| CP_T2_09 | 5,57% | 12,61% | 2,266 g/cm³ | 2,392 g/cm³ | 2,593 g/cm³ |
| CP_T2_10 | 6,32% | 14,20% | 2,247 g/cm³ | 2,389 g/cm³ | 2,619 g/cm³ |
| Média | 5,92% | 13,44% | 2,269 g/cm ³ | 2,403 g/cm ³ | 2,621 g/cm ³ |
| Incerteza Padrão | 1,7% | 4,4% | 0,081 g/cm ³ | 0,064 g/cm ³ | 0,086 g/cm ³ |
| (Incerteza Padrão) ² | 0,0281% | 0,1902% | 0,006 g/cm ³ | 0,004 g/cm ³ | 0,007 g/cm ³ |
| CP_T3_01 | 4,65% | 10,89% | 2,344 g/cm ³ | 2,453 g/cm ³ | 2,631 g/cm ³ |
| CP_T3_02 | 4,95% | 11,61% | 2,345 g/cm ³ | 2,461 g/cm ³ | 2,653 g/cm ³ |
| CP_T3_06 | 5,27% | 12,25% | 2,323 g/cm ³ | 2,446 g/cm ³ | 2,647 g/cm ³ |
| CP_T3_07 | 4,92% | 11,44% | 2,327 g/cm ³ | 2,442 g/cm ³ | 2,628 g/cm ³ |
| CP_T3_10 | 5,03% | 11,77% | 2,341 g/cm ³ | 2,458 g/cm ³ | 2,653 g/cm ³ |
| Média | 4,96% | 11,59% | 2,336 g/cm ³ | 2,452 g/cm ³ | 2,642 g/cm ³ |
| Incerteza Padrão | 0,4% | 0,4% | 0,022 g/cm ³ | 0,018 g/cm ³ | 0,024 g/cm ³ |
| (Incerteza Padrão) ² | 0,0016% | 0,0016% | 0,000 g/cm ³ | 0,000 g/cm ³ | 0,001 g/cm ³ |

Fonte: Elaboração do próprio autor

B.2 – DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Para a Absorção de água por capilaridade se têm a tabela 40, que apresenta os dados coletados do ensaio realizado.

Tabela 41 – Dados coletados no ensaio de absorção por capilaridade

(CONTINUA)

| Corpo de Prova | 0 minutos | 180 minutos | 360 minutos | 1440 minutos | 2880 minutos | 4320 minutos |
|----------------|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| CP_T1_02 | 3470,2 g | 3491,4 g | 3497,1 g | 3514,0 g | 3525,1 g | 3531,0 g |
| CP_T1_03 | 3504,3 g | 3579,2 g | 3584,3 g | 3598,2 g | 3608,7 g | 3613,2 g |
| CP_T1_04 | 3490,0 g | 3537,2 g | 3542,2 g | 3559,6 g | 3572,4 g | 3578,9 g |
| CP_T1_05 | 3503,3 g | 3561,2 g | 3566,0 g | 3580,3 g | 3589,9 g | 3594,8 g |
| CP_T1_06 | 3501,9 g | 3557,2 g | 3562,4 g | 3576,4 g | 3586,1 g | 3592,2 g |
| CP_T1_07 | 3501,2 g | 3527,9 g | 3531,7 g | 3547,1 g | 3557,8 g | 3563,2 g |

(CONCLUSÃO)

| Corpo de Prova | 0 minutos | 180 minutos | 360 minutos | 1440 minutos | 2880 minutos | 4320 minutos |
|----------------|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| CP_T2_01 | 3604,9 g | 3654,7 g | 3658,8 g | 3669,1 g | 3675,9 g | 3678,8 g |
| CP_T2_04 | 3505,1 g | 3525,4 g | 3529,2 g | 3538,1 g | 3543,8 g | 3547,4 g |
| CP_T2_07 | 3498,9 g | 3537,7 g | 3542,6 g | 3556,1 g | 3565,1 g | 3569,0 g |
| CP_T2_08 | 3576,3 g | 3618,6 g | 3624,5 g | 3638,1 g | 3645,8 g | 3649,5 g |
| CP_T2_09 | 3576,7 g | 3629,1 g | 3632,3 g | 3641,2 g | 3646,4 g | 3649,1 g |
| CP_T2_10 | 3513,2 g | 3542,5 g | 3546,7 g | 3557,7 g | 3564,9 g | 3568,7 g |
| CP_T3_01 | 3683,3 g | 3717,1 g | 3721,2 g | 3730,9 g | 3737,2 g | 3740,4 g |
| CP_T3_02 | 3675,3 g | 3700,8 g | 3704,3 g | 3712,7 g | 3718,3 g | 3720,6 g |
| CP_T3_06 | 3658,7 g | 3724,5 g | 3728,4 g | 3738,3 g | 3744,4 g | 3746,8 g |
| CP_T3_07 | 3657,6 g | 3695,2 g | 3698,4 g | 3706,7 g | 3712,2 g | 3714,3 g |
| CP_T3_09 | 3570,4 g | 3613,1 g | 3617,0 g | 3627,0 g | 3633,5 g | 3636,6 g |
| CP_T3_10 | 3675,9 g | 3726,7 g | 3730,2 g | 3739,1 g | 3744,6 g | 3746,7 g |

Fonte: Elaboração do próprio autor

A partir dos dados da tabela 40, obtém a tabela 41, que apresenta os cálculos para obter o valor da absorção.

Tabela 42 – Cálculos para obter a absorção por capilaridade

| Corpo de Prova | $m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}}$ | Erro Padrão (Massa) | Área | Erro Padrão (Área) | Absorção 'C' | Incerteza Padrão |
|----------------|---|---------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| CP_T1_02 | 60,80 g | 0,07 g | 80,8738 cm ² | 0,8165 cm ² | 0,7518 g/cm ² | 0,0027 g/cm ² |
| CP_T1_03 | 108,90 g | 0,07 g | 79,2483 cm ² | 0,8111 cm ² | 1,3742 g/cm ² | 0,0039 g/cm ² |
| CP_T1_04 | 88,90 g | 0,07 g | 78,6970 cm ² | 0,8104 cm ² | 1,1296 g/cm ² | 0,0016 g/cm ² |
| CP_T1_05 | 91,50 g | 0,07 g | 78,8936 cm ² | 0,8100 cm ² | 1,1598 g/cm ² | 0,0019 g/cm ² |
| CP_T1_06 | 90,30 g | 0,07 g | 78,3828 cm ² | 0,8096 cm ² | 1,1520 g/cm ² | 0,0018 g/cm ² |
| CP_T1_07 | 62,00 g | 0,07 g | 78,7363 cm ² | 0,8096 cm ² | 0,7874 g/cm ² | 0,0024 g/cm ² |
| CP_T2_01 | 73,90 g | 0,07 g | 78,2260 cm² | 0,8092 cm² | 0,9447 g/cm² | 0,0011 g/cm² |
| CP_T2_04 | 42,30 g | 0,07 g | 78,2260 cm² | 0,8092 cm² | 0,5407 g/cm² | 0,0048 g/cm² |
| CP_T2_07 | 70,10 g | 0,07 g | 78,2260 cm² | 0,8092 cm² | 0,8961 g/cm² | 0,0014 g/cm² |
| CP_T2_08 | 73,20 g | 0,07 g | 78,2260 cm² | 0,8092 cm² | 0,9358 g/cm² | 0,0011 g/cm² |
| CP_T2_09 | 72,40 g | 0,07 g | 78,2260 cm² | 0,8092 cm² | 0,9255 g/cm² | 0,0012 g/cm² |
| CP_T2_10 | 55,50 g | 0,07 g | 78,2260 cm² | 0,8092 cm² | 0,7095 g/cm² | 0,0031 g/cm² |
| CP_T3_01 | 57,10 g | 0,07 g | 78,2260 cm ² | 0,8092 cm ² | 0,7299 g/cm ² | 0,0029 g/cm ² |
| CP_T3_02 | 45,30 g | 0,07 g | 78,2260 cm ² | 0,8092 cm ² | 0,5791 g/cm ² | 0,0044 g/cm ² |
| CP_T3_06 | 88,10 g | 0,07 g | 78,2260 cm ² | 0,8092 cm ² | 1,1262 g/cm ² | 0,0016 g/cm ² |
| CP_T3_07 | 56,70 g | 0,07 g | 78,2260 cm ² | 0,8092 cm ² | 0,7248 g/cm ² | 0,0030 g/cm ² |
| CP_T3_09 | 66,20 g | 0,07 g | 78,2260 cm ² | 0,8092 cm ² | 0,8463 g/cm ² | 0,0018 g/cm ² |
| CP_T3_10 | 70,80 g | 0,07 g | 78,2260 cm ² | 0,8092 cm ² | 0,9051 g/cm ² | 0,0013 g/cm ² |

Fonte: Elaboração do próprio autor

B.3 – DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPOAGAÇÃO DE ONDA ULTRA-SÔNICA

Para análise da propagação de onda, foi coletado os dados apresentados na tabela 42, sendo estes utilizados para comparação entre os traços

Tabela 43 – Dados obtidos pelo ensaio de ultrassom

| Corpos de Prova | Velocidade |
|---|-------------------|
| CP_T1_02 | 3642 m/s |
| CP_T1_03 | 3766 m/s |
| CP_T1_05 | 3853 m/s |
| CP_T1_06 | 3868 m/s |
| CP_T1_07 | 3669 m/s |
| Média | 3760 m/s |
| Desvio Padrão | 103 m/s |
| Incerteza Padrão | 100 m/s |
| CP_T2_01 | 3913 m/s |
| CP_T2_04 | 3831 m/s |
| CP_T2_08 | 3795 m/s |
| CP_T2_09 | 4201 m/s |
| CP_T2_10 | 3656 m/s |
| Média | 3879 m/s |
| Desvio Padrão | 202 m/s |
| Incerteza Padrão (σ_p) | 200 m/s |
| CP_T3_01 | 4255 m/s |
| CP_T3_02 | 3968 m/s |
| CP_T3_06 | 4098 m/s |
| CP_T3_07 | 4276 m/s |
| CP_T3_10 | 3976 m/s |
| Média | 4115 m/s |
| Desvio Padrão | 147 m/s |
| Incerteza Padrão | 150 m/s |

Fonte: Elaboração do próprio autor

B.4 – DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE AR SOB PRESSÃO

Para este ensaio não foi realizado análise, devido à incompatibilidade dos dados, apresentados na tabela 43 e tabela 44.

Tabela 44 – Ensaio de injeção de ar por pressão, pela superfície do corpo de prova

| Corpo de Prova | SUPERFICIAL - ENSAIO NÃO CONCLUSIVO | | | | | | | Sobre o furo (h:m:s)* |
|----------------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| | Tempo 1 (h:m:s)* | Tempo 2 (h:m:s)* | Tempo 3 (h:m:s)* | Tempo 4 (h:m:s)* | Tempo 5 (h:m:s)* | Tempo 6 (h:m:s)* | Tempo 7 (h:m:s)* | |
| CP_T1_02 | 00:00:55 | 00:01:28 | 00:00:49 | 00:01:43 | 00:01:03 | 00:01:00 | 00:01:14 | 00:00:43 |
| CP_T1_05 | 00:02:30 | 00:03:14 | 00:01:46 | 00:02:08 | 00:02:44 | 00:02:24 | 00:02:06 | 00:01:46 |
| CP_T2_08 | 00:00:55 | 00:00:44 | 00:00:39 | 00:00:33 | N.R | N.R | N.R | 00:00:26 |
| CP_T2_09 | 00:02:23 | 00:02:22 | 00:02:21 | N.R | N.R | N.R | N.R | 00:00:44 |
| CP_T3_01 | 00:01:16 | 00:02:46 | 00:03:27 | 00:01:48 | N.R | N.R | N.R | 00:01:27 |
| CP_T3_07 | 00:01:01 | 00:00:53 | 00:00:52 | N.R | N.R | N.R | N.R | 00:00:25 |

Legenda:

N.R = Não realizado

***(h:m:s) = representação de tempo hora: minuto:segundo**

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 45 – Ensaio de injeção de ar sob pressão, por furo no corpo de prova

| Corpo de Prova | SUPERFICIE VERTICAL - ENSAIO NÃO CONCLUSIVO (hora:minutos:segundos) | | | |
|----------------|---|----------|----------|----------|
| | | | | |
| CP_T1_02 | 00:01:16 | 00:01:20 | 00:01:20 | 00:01:20 |
| CP_T1_05 | 00:02:20 | 00:02:24 | 00:02:24 | 00:02:23 |
| CP_T2_08 | 00:01:06 | 00:01:02 | 00:00:47 | 00:00:46 |
| CP_T2_09 | 00:02:14 | 00:02:16 | 00:02:20 | 00:02:20 |
| CP_T3_01 | 00:02:47 | 00:02:48 | 00:02:46 | 00:02:48 |
| CP_T3_07 | 00:00:50 | 00:00:48 | 00:00:47 | 00:00:51 |

Fonte: Elaboração do próprio autor

B.5 – RESISTENCIA CARACTERISTICA À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO

No decorrer do trabalho realizou ensaio de compressão axial nos corpos de prova que foram sendo excluídos, estando com um banco de dados das resistências de todos os corpos de prova moldados, conforme apresenta a tabela 46.

Tabela 46 – Dados dos valores de resistências obtidas pela ruptura dos corpos de prova

| Traço | Corpo de Prova | Data da Moldagem | Data da Ruptura | Idade (dias) | Força Máxima (N) | Tensão de Ruptura (Mpa) |
|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|----------------|--------------------|-------------------------|
| TRAÇO 01 | CP_T1. | 16/05/2014 | 13/06/2014 | 28 DIAS | 284560,09 N | 36,23 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1. | 16/05/2014 | 13/06/2014 | 28 DIAS | 322067,47 N | 41,01 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1 | 16/05/2014 | 13/06/2014 | 28 DIAS | 314627,97 N | 40,06 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1_01 | 16/05/2014 | 18/07/2014 | 63 DIAS | 424980,25 N | 54,11 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1_08 | 16/05/2014 | 18/07/2014 | 63 DIAS | 408861,38 N | 52,06 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1_09 | 16/05/2014 | 18/07/2014 | 63 DIAS | 418470,72 N | 53,28 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1_10 | 16/05/2014 | 18/07/2014 | 63 DIAS | 343662,63 N | 43,76 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1_03 | 16/05/2014 | 04/08/2014 | 80 DIAS | 288383,16 N | 36,72 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1_06 | 16/05/2014 | 04/08/2014 | 80 DIAS | 310494,94 N | 39,53 MPa |
| TRAÇO 01 | CP_T1_07 | 16/05/2014 | 04/08/2014 | 80 DIAS | 324030,66 N | 41,26 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2. | 11/06/2014 | 14/07/2014 | 28 DIAS | 464967,47 N | 59,20 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2. | 11/06/2014 | 14/07/2014 | 28 DIAS | 452465,00 N | 57,61 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2. | 11/06/2014 | 14/07/2014 | 28 DIAS | 399045,41 N | 50,81 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2_02 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 489765,72 N | 62,36 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2_03 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 475920,03 N | 60,60 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2_05 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 425393,56 N | 54,16 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2_06 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 424060,31 N | 53,99 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2_01 | 11/06/2014 | 04/08/2014 | 54 DIAS | 448848,59 N | 57,15 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2_04 | 11/06/2014 | 04/08/2014 | 54 DIAS | 433969,63 N | 55,25 MPa |
| TRAÇO 02 | CP_T2_10 | 11/06/2014 | 04/08/2014 | 54 DIAS | 456081,41 N | 58,07 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3. | 11/06/2014 | 14/07/2014 | 28 DIAS | 517250,47 N | 65,86 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3. | 11/06/2014 | 14/07/2014 | 28 DIAS | 465690,75 N | 59,29 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3 | 11/06/2014 | 14/07/2014 | 28 DIAS | 498341,78 N | 63,45 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3_03 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 434899,56 N | 55,37 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3_04 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 426323,50 N | 54,28 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3_05 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 442959,00 N | 56,40 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3_08 | 11/06/2014 | 18/07/2014 | 37 DIAS | 524793,25 N | 66,82 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3_02 | 11/06/2014 | 04/08/2014 | 54 DIAS | 492555,53 N | 62,71 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3_06 | 11/06/2014 | 04/08/2014 | 54 DIAS | 495448,66 N | 63,08 MPa |
| TRAÇO 03 | CP_T3_10 | 11/06/2014 | 04/08/2014 | 54 DIAS | 571570,86 N | 72,77 MPa |

Fonte: Elaboração do próprio autor

B.6 – CÂMARA DE ENVELHECIMENTO

Para fins de análise, utilizou os dados de resistência dos corpos de prova após estarem submetidos à câmara de envelhecimento.

Tabela 47 – Resistência a compressão axial após realização dos ciclos na câmara de envelhecimento

| Corpo de Prova | Resistência após a câmara de envelhecimento | Idade do corpo de Prova |
|-----------------------|--|--------------------------------|
| CP_T1_02 | 34,67 MPa | 103 dias |
| CP_T1_05 | 42,27 MPa | 103 dias |
| CP_T2_08 | 51,03 MPa | 77 dias |
| CP_T2_09 | 43,82 MPa | 77 dias |
| CP_T3_01 | 59,75 MPa | 77 dias |
| CP_T3_07 | 52,41 MPa | 77 dias |

Fonte: Elaboração do próprio autor

APÊNDICE C – CONSTÂNCIA DE MASSA

C.1 – CONSTÂNCIA DE MASSA

Para verificação da constância de massa após secagem dos corpos de prova em estufa, têm a tabela 47, que apresenta a constância de massa conforme a norma.

Tabela 48 – Constância de massa

| Corpo de Prova | Massa Seca Após 24 horas (gramas) | Massa Seca Após 48 horas (gramas) | Constância de massa (gramas) | 0,5 % da Menor massa (gramas) | SITUAÇÃO |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|
| CP_T1_02 | 3464,5 | 3465,3 | 0,80 | 17,32 | OK |
| CP_T1_03 | 3499,0 | 3500,1 | 1,10 | 17,50 | OK |
| CP_T1_05 | 3498,8 | 3499,2 | 0,40 | 17,49 | OK |
| CP_T1_06 | 3500,6 | 3497,5 | -3,10 | 17,50 | OK |
| CP_T1_07 | 3496,5 | 3496,9 | 0,40 | 17,48 | OK |
| CP_T2_01 | 3601,3 | 3600,5 | -0,80 | 18,01 | OK |
| CP_T2_04 | 3503,1 | 3500,9 | -2,20 | 17,52 | OK |
| CP_T2_08 | 3573,9 | 3571,9 | -2,00 | 17,87 | OK |
| CP_T2_09 | 3578,7 | 3572,6 | -6,10 | 17,89 | OK |
| CP_T2_10 | 3508,4 | 3508,9 | 0,50 | 17,54 | OK |
| CP_T3_01 | 3690,6 | 3679,8 | -10,80 | 18,45 | OK |
| CP_T3_02 | 3672,2 | 3671,4 | -0,80 | 18,36 | OK |
| CP_T3_06 | 3654,9 | 3654,8 | -0,10 | 18,27 | OK |
| CP_T3_07 | 3661,8 | 3653,4 | -8,40 | 18,31 | OK |
| CP_T3_10 | 3676,1 | 3671,7 | -4,40 | 18,38 | OK |

Fonte: Elaboração do próprio autor

ANEXO A – LAUDO TÉCNICO DO CIMENTO PORTLAND UTILIZADO NA PESQUISA

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

 PERÍODO : mai/14
 EMISSÃO : 02/07/2014

| Data | Químicos | | | | | | | | | | Físicos | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|--------------|--------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Perda Fogo | CaO Livre | Resid. Insol. | Equiv. Alcal. | Exp. Quente | Tempo de Pega | | Cons. Normal | Blaine | # 200 | # 325 | Resistência à Compressão | | | |
| | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | mm | h : min | h : min | % | cm ² /g | % | % | 1 dia | 3 dias | 7 dias | 28 dias |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | MPa | MPa | MPa |
| 02 | 6,64 | 23,40 | 3,24 | 54,37 | 4,63 | 2,72 | 3,12 | 1,15 | 11,07 | 0,81 | 0,00 | 02:50 | 03:30 | 30,2 | 4.600 | 0,50 | 2,20 | 20,7 | 33,6 | 39,9 | 49,2 |
| 06 | 6,57 | 23,15 | 3,27 | 54,92 | 5,01 | 2,66 | 2,92 | 1,51 | 11,21 | 0,82 | 0,50 | 03:25 | 04:00 | 30,0 | 4.580 | 0,40 | 2,20 | 20,6 | 35,2 | 39,7 | 50,2 |
| 08 | 6,44 | 22,71 | 3,23 | 55,73 | 4,83 | 2,67 | 2,90 | 0,56 | 10,14 | 0,79 | 0,50 | 03:05 | 03:45 | 30,0 | 4.590 | 0,60 | 2,10 | 20,8 | 34,0 | 41,3 | 49,8 |
| 12 | 6,47 | 22,81 | 3,29 | 55,70 | 4,70 | 2,56 | 2,93 | 0,98 | 10,16 | 0,70 | 0,50 | 03:20 | 04:00 | 30,0 | 4.600 | 0,50 | 2,60 | 20,4 | 34,6 | 40,6 | 51,8 |
| 14 | 6,45 | 22,84 | 3,30 | 55,42 | 4,43 | 2,69 | 2,99 | 1,04 | 10,29 | 0,73 | 0,50 | 03:20 | 04:00 | 30,2 | 4.580 | 0,50 | 2,50 | 21,4 | 36,4 | 41,2 | 50,6 |
| 16 | 6,00 | 21,97 | 3,19 | 56,36 | 4,24 | 2,70 | 3,06 | 1,09 | 9,88 | 0,72 | 0,00 | 03:10 | 04:00 | 30,4 | 4.660 | 0,60 | 1,50 | 21,4 | 37,8 | 41,3 | 51,5 |
| 20 | 6,03 | 22,10 | 3,16 | 56,62 | 4,71 | 3,03 | 3,29 | 1,04 | 9,79 | 0,73 | 0,00 | 02:50 | 03:30 | 30,0 | 4.710 | 0,40 | 1,80 | 21,3 | 37,5 | 42,0 | 51,8 |
| 22 | 5,91 | 22,18 | 3,19 | 56,07 | 4,95 | 2,97 | 3,48 | 1,46 | 9,20 | 0,71 | 0,50 | 02:30 | 03:00 | 30,0 | 4.730 | 0,40 | 1,90 | 22,1 | 38,3 | 41,6 | 51,5 |
| 26 | 5,91 | 22,40 | 3,24 | 56,06 | 4,02 | 2,83 | 3,24 | 0,76 | 9,63 | 0,73 | 0,00 | 02:25 | 03:15 | 29,7 | 4.700 | 0,30 | 2,10 | 22,9 | 38,1 | 42,0 | 51,1 |
| 28 | 6,03 | 22,56 | 3,22 | 57,07 | 3,65 | 2,87 | 3,20 | 0,76 | 9,56 | 0,78 | 0,50 | 02:50 | 03:30 | 29,8 | 4.690 | 0,50 | 1,70 | 20,5 | 38,7 | 41,3 | 50,9 |
| 30 | 6,16 | 22,57 | 3,21 | 55,96 | 3,36 | 2,99 | 3,33 | 0,64 | 9,40 | 0,78 | 0,00 | 03:05 | 04:00 | 30,0 | 4.650 | 0,50 | 1,60 | 21,3 | 39,0 | 42,0 | 51,0 |
| Média | 6,24 | 22,61 | 3,23 | 55,85 | 4,41 | 2,79 | 3,13 | 1,00 | 10,03 | 0,75 | 0,27 | 02:59 | 03:41 | 30,0 | 4.645 | 0,47 | 2,02 | 21,2 | 36,6 | 41,2 | 50,9 |
| Sd | 0,28 | 0,44 | 0,04 | 0,76 | 0,54 | 0,16 | 0,19 | 0,31 | 0,64 | 0,04 | 0,26 | 00:20 | 00:21 | 0,2 | 56,81 | 0,09 | 0,35 | 0,8 | 2,0 | 0,8 | 0,8 |
| Min | 5,91 | 21,97 | 3,16 | 54,37 | 3,36 | 2,56 | 2,90 | 0,56 | 9,20 | 0,70 | 0,00 | 02:25 | 03:00 | 29,7 | 4.580 | 0,30 | 1,50 | 20,4 | 33,6 | 39,7 | 49,2 |
| Max | 6,64 | 23,40 | 3,30 | 57,07 | 5,01 | 3,03 | 3,48 | 1,51 | 11,21 | 0,82 | 0,50 | 03:25 | 04:00 | 30,4 | 4.730 | 0,60 | 2,60 | 22,9 | 39,0 | 42,0 | 51,8 |

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI RS é regida pela NBR 5733, que não estabelece valor mínimo para esta idade.
 A massa específica média do CP V-ARI RS ITAMBÉ é 3,00 g/cm³ (NBR NM 23).
 As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.

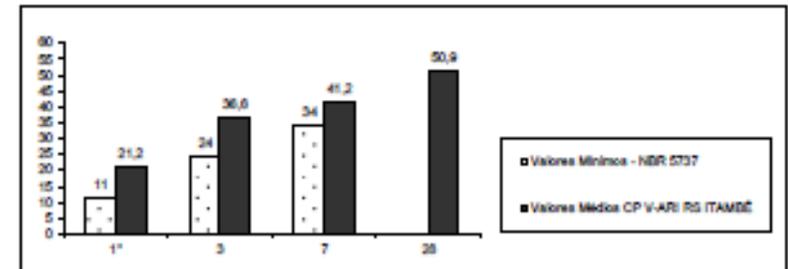


Figura 18 – Laudo técnico do cimento CP V-ARI-RS
 Fonte: Itambé (2014)