

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DA AREIA NO DESEMPENHO DOS
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Autor: Joaquim Francisco Tavares Junior
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte
Junho/2018

Joaquim Francisco Tavares Junior

INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DA AREIA NO DESEMPENHO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais Cimentícios.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2018

JOAQUIM FRANCISCO TAVARES JUNIOR

**"INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DA AREIA NO DESEMPENHO DOS
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS"**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 26 de junho de 2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar
Orientadora
UFMG



Prof. Dr. Eduardo Chahud
UFMG



Prof. Dra. Rosemary do Bom Conselho Sales
UFMG

T231i	Tavares Junior, Joaquim Francisco. Influência do empacotamento da areia no desempenho dos compósitos cimentícios [recurso eletrônico] / Joaquim Francisco Tavares Junior. – 2018. 1 recurso online (68 f. : il., color.) : pdf. Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Bibliografia: f. 61-67. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader. 1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Materiais granulados - Teses. 4. Agregados (Materiais de construção) - Teses. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título. CDU: 691(043)
-------	---

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

Dedico este trabalho à minha família.

"Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro dos gigantes"

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo à Deus.

À minha família, especialmente à minha esposa Ludmila por me amar e apoiar em todo o momento e ainda me ajudar a construir este trabalho.

Aos meus pais.

Aos meus amigos e colegas do mestrado.

À minha orientadora, Professora Maria Teresa, que esteve ao meu lado nesses últimos anos me ensinando, me ajudando e, sobretudo acreditando e confiando em mim, o meu muitíssimo obrigado.

Aos amigos do DEMC pela ajuda e amizade.

RESUMO

A granulometria do agregado miúdo influencia o desempenho dos compósitos cimentícios e pode proporcionar o empacotamento das partículas dependendo da gradação da areia utilizada. Muitos trabalhos na literatura estudam o empacotamento do agregado miúdo alterando o fator água/cimento e/ou introduzindo aditivos ou fazendo adições para melhorar a trabalhabilidade. Neste contexto, este trabalho estuda a influência da granulometria da areia nas propriedades dos compósitos cimentícios confeccionados com agregados miúdos naturais de uma mesma granulometria e compostos confeccionados com agregados miúdos naturais de granulometrias diferentes, mantendo-se constante o fator água/cimento. Os resultados indicam que o uso de areia de granulometria 0,3mm influencia negativamente o desempenho do compósito cimentício no estado fresco e endurecido. Compostos com areia 0,6mm e 1,2mm apresentam comportamento similares. As argamassas com as três granulometrias da areia em proporções iguais maximizam o desempenho do concreto, com exceção da resistência em idades iniciais. O empacotamento aumentou a trabalhabilidade, a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão, o módulo de elasticidade dinâmico e a resistividade elétrica em relação à areia 0,3mm. O empacotamento diminuiu a absorção de água e a porosidade se comparadas à areia 0,3mm. Os resultados mostram que o composto empacotado maximiza o desempenho do concreto, exceto a resistência à compressão em idades iniciais.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios, empacotamento de partículas, agregado miúdo, granulometria

ABSTRACT

The granulometry of fine aggregates influences the cement composites' performance and, depending on the used gradation of sand, may enable packaging. In literature, many studies investigate the packaging of fine aggregate by changing the water/cement ratio and/or by introducing additives or additions to improve workability. In a different setting, this work studies the influence of particle packing on the properties of cement composites made with natural fine aggregates of the same or different granulometries, keeping the water/cement ratio constant. Experimental results were obtained with mortars composed of same sand granulometry (0.3mm, 0.6mm and 1.2mm) and packing the three granulometries in the same proportion, each for both fresh and hardened states. The use of 0.3mm sand granulometry influences negatively the cement composites performance in both states. Composites with 0.6mm and 1.2mm sand granulometry show similar behavior among themselves. The packing composite results show increased workability, compressive strength, flexion traction, dynamic modulus of elasticity and electrical strength in relation to 0.3mm granulometry. Packaging also reduced water absorption and porosity compare it. Results show that packing composite maximizes concrete performance, except compressive strength at early ages.

Keywords: Cement composites, packaging, fine aggregate, granulometry.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	19
2.1	Objetivo geral.....	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	Compósitos Cimentícios.....	20
3.1.1.	Considerações gerais	20
3.1.2	Agregados	22
3.2	Empacotamento de Partículas	25
3.2.2	Conceitos e características	25
3.2.3	Modelos de empacotamento.....	28
3.2.4	Influência do empacotamento nas propriedades dos compósitos cimentícios	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1	Materiais	33
4.2	Métodos	34
4.3	Ensaio e Avaliações	34
4.3.1	Estado fresco.....	36
4.3.1.1	Trabalhabilidade	36
4.3.1.2	Expansibilidade à frio	36
4.3.2	Estado endurecido.....	38
4.3.2.1	Resistência mecânica à compressão	38
4.3.2.2	Absorção de água	38

4.3.2.3	Porosidade aparente	38
4.3.2.4	Resistência mecânica à tração na flexão	40
4.3.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico	41
4.3.2.6	Resistividade elétrica	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Avaliações dos compósitos cimentícios no estado fresco	44
5.1.1	Trabalhabilidade	44
5.1.2	Expansibilidade à frio.....	45
5.2	Avaliações das propriedades dos compósitos cimentícios no estado endurecido 47	
5.2.1	Resistência mecânica à compressão.....	47
5.2.2	Absorção de água	49
5.2.3	Porosidade aparente	50
5.2.4	Resistência mecânica à tração na flexão.....	51
5.2.5	Módulo de elasticidade dinâmico	53
5.2.6	Resistividade elétrica.....	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Eficiência do empacotamento de partículas: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas dispersas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas. Fonte: (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2000).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.1 - Representação esquemática do trabalho	32
Figura 4.2 - Ensaio do índice de consistência na mesa de espalhamento.....	36
Figura 4.3 - Agulhas de Le Chatelier.	37
Figura 4.4 - Porosidade por imersão.	39
Figura 4.5 - Equipamento para ensaio de resistência mecânica à tração na flexão.....	40
Figura 4.6 - Equipamento para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.....	41
Figura 4.7 - Equipamento para o ensaio de resistividade elétrica.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Parâmetros físicos e químicos da água	33
Tabela 4.2 - Ensaio estado fresco e endurecido	34
Tabela 4.3 - Especificação do corpo de prova para cada ensaio no estado endurecido..	35
Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de expansibilidade para os 3 tipos de compósitos	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Resultados do ensaio de trabalhabilidade pela mesa de espalhamento	44
Gráfico 5.2 - Resultados do ensaio de resistência mecânica à compressão aos 7 e 28 dias	47
Gráfico 5.3 - Resultados do ensaio de absorção de água aos 28 dias	49
Gráfico 5.4 - Resultados do ensaio de porosidade aparente	51
Gráfico 5.5 - Resultados do ensaio de tração na flexão aos 28 dias	52
Gráfico 5.6 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	54
Gráfico 5.7 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica aos 7 e 28 dias.....	55

LISTA DE NOTAÇÕES, ABREVIATURAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society Testing Materials
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP	Corpo de prova
CP V – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NBR	Norma Brasileira
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

1 INTRODUÇÃO

A microestrutura e, conseqüentemente, as características físicas de materiais constituídos por misturas granulares dependem das propriedades das partes que o compõem e, também, das interações entre elas (STROVEN e STROVEN, 1999). Estas interações dependem da morfologia e tamanho das partes constituintes, parâmetros que influenciam diretamente o empacotamento dos grãos, o que evidencia a importância de seu estudo e as aplicações em diversas áreas da engenharia (METHA e MONTEIRO, 2014, CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

O empacotamento de partículas foi estudado pela primeira vez por Kepler, em 1611, e o termo empacotamento pode ser expresso quantitativamente pela densidade de empacotamento, definida como o volume de sólido em uma unidade de volume total (OLIVEIRA, 2013). Dessa forma, a densidade de empacotamento está associada ao índice de vazios, tendo forte influência nas propriedades mecânicas e parâmetros que avaliam a durabilidades dos materiais composto por misturas granulares (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). A fluidez inicial de suspensões concentradas depende da distribuição granulométrica, do índice de forma e da textura superficial das partículas (BONEN e SARKAR, 1995). Da mesma forma, o arranjo geométrico das partículas determina a conectividade interparticular que influencia diretamente na adesividade e, conseqüentemente na microestrutura do material (DAROLD, 2011).

Para Londero *et al.*, (2017), os concretos e argamassas se destacam perante os materiais granulares uma vez que suas partículas possuem dimensões milimétricas, micrométricas e também nanométricas. Essas partículas apresentam tanto o formato esférico, quanto anguloso e alongado. Para que a resistência mecânica e durabilidade das argamassas e concretos sejam otimizadas, essa variedade de grãos deve ser combinada ou empacotada de forma que o índice de vazios destes materiais seja reduzido. Desde 2009, Castro e Pandolfelli alertam que o conceito de uma alta densidade de empacotamento é um parâmetro chave para a obtenção de materiais cimentícios de alto desempenho. Sendo assim, é

fundamental que haja um estudo detalhado da distribuição granulométrica para a dosagem correta e a otimização dos constituintes do concreto.

A otimização da distribuição granulométrica além de permitir a obtenção de materiais mais resistentes e duráveis contribui para a sustentabilidade. Nos compósitos cimentícios, a pasta de cimento preenche os espaços vazios entre os agregados, conectando esses grãos no estado endurecido, garantindo assim a integridade e propriedades mecânicas do material. Dentre os componentes destes compósitos, o cimento é o mais oneroso e resulta em maior impacto ao meio ambiente pela elevada emissão de CO₂ durante seu processo de produção (GARTNER e HIRAO, 2015). Uma forma de se reduzir o consumo de cimento seria obter uma máxima densidade de empacotamento do agregado. Segundo Oliveira (2013), isso colaboraria para a redução do volume da pasta de cimento necessária para preencher os vazios existentes no esqueleto granular. Sendo assim, é necessário o uso de modelos de empacotamento de partículas, que permitam estabelecer a proporção e tamanho adequados dos agregados, de modo a se obter um conjunto com baixo índice de vazios.

A distribuição granulométrica pode ser uniforme, onde todas as partículas estão em uma mesma faixa granulométrica. Sendo contínua, onde o tamanho das partículas aumenta de forma proporcional ou descontínua, onde há ausência de determinados tamanhos de partículas (HERMANN, 2016). O efeito da distribuição granulométrica em compostos cimentícios sobre o empacotamento das partículas vem sendo estudado desde o início do século passado, quando surgiu a ideia de que os agregados com distribuição granulométrica contínua proporcionavam melhores propriedades aos concretos e argamassas. Dentre os estudos relevantes na definição da curva de distribuição granulométrica, destaca-se o de Füller e Thompson (2007), que realizaram trabalhos empíricos de correção da granulometria dos agregados naturais para a produção de concretos e argamassas. Estes autores concluíram a partir de experimentos empíricos de dosagens, que, para uma mesma porcentagem de cimento, em um dado volume de concreto, havia certa distribuição de tamanhos de grão do agregado que proporcionava maior resistência à ruptura e melhor trabalhabilidade, ou seja,

influenciava na compacidade da mistura, e quanto maior a compacidade, maior a resistência mecânica. Os autores afirmaram ainda que o perfil da curva granulométrica que melhor representaria a distribuição granulométrica é a curva da elipse.

Muitos trabalhos na literatura estudaram o empacotamento do agregado miúdo alterando o fator água/cimento e/ou introduzindo aditivos ou fazendo adições para melhorar a trabalhabilidade (KHARAGPUR, 2017, SUNAYANA, 2017, MEHDIPOUR, 2017, KE, 2015, CAMPOS, 2015, WILLE, 2011, OLIVEIRA, 2010, CASTRO e PANDOFELLI, 2009; ZARDO *et al.*, 2004; DIAS, 2004;). Com o uso de pequenas quantidades de aditivos pode-se diminuir consideravelmente o uso de água, mantendo a trabalhabilidade e o fator água/cimento (CASTRO e PANDOFELLI, 2009).

Assim sendo, este trabalho visa estudar a influência do empacotamento de partículas, utilizando-se areias de granulometria controlada e fonte conhecida (IPT), nas propriedades dos compósitos cimentícios no estado fresco e endurecido, mantendo-se constante o fator água/cimento.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o estudo da influência do empacotamento da areia no desempenho dos compósitos cimentícios com mesmo fator água-cimento.

2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- identificar o efeito da composição granulométrica do agregado miúdo no desempenho do composto cimentício no estado fresco;
- identificar o efeito da composição granulométrica do agregado miúdo no desempenho do composto cimentício no estado endurecido;
- estudar a relação estrutura-propriedade considerando o empacotamento da areia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Compósitos Cimentícios

3.1.1. Considerações gerais

Ficher *et al.*, (2017) cita que a tecnologia dos materiais está em constante procura por materiais inovadores, que possam proporcionar melhorias tanto nas propriedades dos elementos, como uma busca por desenvolvimento sustentável e econômico de elementos fundamentais da construção civil. A ciência dos materiais, busca aprimorar cada vez mais as propriedades desses elementos, tornando-os mais eficientes e permitindo a execução dos mesmos mais esbeltos e arrojados. Os compósitos cimentícios são elementos que apresentam boa resistência à compressão, porém, no entanto, quando são sujeitos à esforços de tração e a cargas dinâmicas, são frágeis e possuem baixa deformação, tornando-se assim importante encontrar maneiras de melhorar o desempenho mecânico desse material, principalmente sob esforços de tração. Para Mo e Roberts (2013), a principal desvantagem do concreto é a sua natureza frágil, o que é atribuído à sua fraca resistência à propagação de fissuras, baixa resistência à tração e capacidade de deformação.

Para Farias (2017), os compósitos são, por definição, materiais que possuem dois ou mais constituintes, ou seja, que possuem cada qual propriedades distintas em sua composição, a fase matriz e a fase dispersa. Assim, um compósito cimentício é um material constituído pela pasta de cimento e seu agregado. Segundo Callister (2008), a fase dispersa determina os tipos de compósitos e possuem três classificações principais: compósitos reforçados com partículas, compósitos estruturais e compósitos reforçados com fibras. Em compósitos reforçados com partículas, as dimensões em todas as direções são aproximadamente as mesmas. Já para os compósitos estruturais, as combinações resultam em um material homogêneo. Por sua vez, nos compósitos reforçados com fibras, a geometria dos elementos adicionados possui grande razão entre o comprimento e o diâmetro.

Segundo Farias (2017), os compósitos reforçados com partículas, em sua maioria, possuem a fase de partículas mais dura e rígida em relação à fase matriz. O concreto simples é um exemplo de compósito reforçado com partículas, sendo esse formado por cimento como a fase matriz, areia e brita como a fase dispersa. A fase matriz dos compósitos pode ser constituída por materiais metálicos, poliméricos ou cerâmicos. As matrizes com base de metais e polímeros que formam os compósitos é frequentemente encontrada sem a combinação de outro material, pelo fato desses materiais formadores possuírem alguma ductilidade. Por outro lado, em matrizes cerâmicas ou com comportamento frágil é comum a adição do reforço com o intuito de melhorar a tenacidade do compósito.

Segundo Pachla *et al.*, (2017), a melhoria nas propriedades dos materiais pode ser obtida pelo uso de compósitos, que combina diferentes materiais e cria um novo produto com características superiores. Promove melhorias em matrizes com bom potencial, reduz custos da matéria prima e obtém um destino ecologicamente correto. Os produtos cimentícios leves possuem um grande potencial de isolamento térmico, sendo uma boa opção como matriz em compósitos.

Segundo Quaresma e Pituba (2016), o comportamento mecânico dos materiais compósitos é importante no projeto de componentes estruturais de diferentes áreas de aplicação. Assim sendo, o estudo da resposta de um corpo submetido a uma determinada carga, ou estado de excitação, configura uma importante ferramenta para a ciência dos materiais, podendo melhorar as propriedades macroscópicas por meio de mudanças de forma e/ou tipologia em nível micro estrutural. Segundo Paccola *et al.*, (2015), a concepção dos materiais compósitos tem o propósito de captar as melhores propriedades físicas, mecânicas e econômicas da combinação de dois ou mais materiais diferentes.

Para Hamouda *et al.*, (2015), os materiais compósitos oferecem o potencial para que as estruturas apresentem alta resistência e rigidez com peso inferior quando comparados com materiais estruturais convencionais. Um material compósito pode ser formado a partir de uma fase contínua, chamada de matriz, e outra fase, contínua ou não, constituídas por elementos de reforço. A fase contínua é

responsável também pela distribuição das cargas por meio do elemento de reforço, além de proteger a fase descontínua de possíveis ataques alcalinos. As matrizes são muito utilizadas e difundidas nas mais diversas áreas do setor tecnológico, e em função de seus materiais básicos. Elas podem ser do tipo polimérica, carbono, metálica ou cimentícia.

Segundo Wally (2017), várias pesquisas foram desenvolvidas através dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, para que se obtivesse, por exemplo, um concreto mais tenaz e durável. Afinal, ainda que possua uma vasta gama de características que lhe conferem o rótulo de material estrutural mais utilizado no mundo, o concreto apresenta algumas limitações, das quais destaca-se sua pequena capacidade de deformação antes da ruptura. Para Mo e Roberts (2013), a principal desvantagem do concreto é a sua natureza frágil, o que é atribuído à sua fraca resistência à formação de fissuras, baixa resistência à tração e capacidade de deformação. Para Chuah *et al.*, (2014) muitas tentativas têm sido direcionadas para melhorar o desempenho dos materiais com base no cimento, manipulando as propriedades dos compósitos cimentícios com misturas, materiais cimentícios suplementares e fibras.

3.1.2 Agregados

A NBR 7211 (ABNT, 2005) classifica o agregado quanto ao tamanho, da seguinte forma:

- a) agregado miúdo: areia natural, artificial ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,8mm, com possibilidade de retenção de 5%, e ficam retidos na peneira 0,075mm;
- b) agregado graúdo: pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152mm e ficam retidos em peneira com abertura de malha 4,8mm;

c) material pulverulento: partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075mm, inclusive os materiais solúveis em água presentes nos agregados, definida na NBR 7219 vigente;

d) outros: brita corrida, pedra de mão e pedra amarrada.

Petrucci (1998) elaborou as seguintes definições, que considerou importante para o campo dos agregados correntes:

a) filer é o material que passa na peneira nº 200;

b) areia é o material encontrado junto à natureza, pronto para o uso, que passa pela peneira nº 4;

c) pedrisco, também denominado de “Areia Artificial”, é o material obtido por fragmentação mecânica da rocha, e que passa pela peneira nº 4;

d) seixo rolado trata-se de um material natural, encontrado no fundo de rios ou em jazidas, e que fica retido na peneira nº 4;

e) pedra britada, ou brita, é o material obtido pela fragmentação da rocha e retido na peneira nº 4;

f) agregado leve é o material com peso unitário inferior a 2.000 kg/m³, constituído de pedra-pomes, argila expandida, cinza volante sinterizada, etc.

Por muito tempo, o agregado foi tratado como um material de enchimento inerte do concreto. Mas esta visão vem sendo alterada pela melhor compreensão da função desempenhada pelo agregado na determinação de várias das características do concreto. Metha e Monteiro (2014) relacionam as seguintes características do agregado relevantes para a constituição do concreto: porosidade, composição ou distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes. Neville e Brooks (2013) destacam ainda que, do ponto de vista econômico é interessante produzir concretos com a maior relação possível com o/a agregado/pasta aglomerante. Contudo, deve-se balancear essa

relação com o objetivo de se alcançar as propriedades desejadas do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Além das características estruturais, mineralógicas e químicas do agregado, outras características que também afetam a qualidade do concreto, são a forma e a textura das partículas. Uma das maneiras de se avaliar as propriedades geométricas dos agregados é através do arredondamento, que avalia a agudeza relativa ou a angulosidade das arestas e/ou cantos de uma partícula (NEVILLE, 2015). De acordo com Oliveira *et al.* (2010), quanto mais arredondada a partícula, melhor será o seu empacotamento na mistura. Todavia, quanto maior a rugosidade da superfície dos agregados e angulosidade dos cantos/arestas, melhor o ancoramento entre as partículas; assim, deve-se ter um equilíbrio no sentido não só de se ter um bom empacotamento final de partículas, mas também uma boa ancoragem.

Quanto à forma da partícula, Neville e Brooks (2013) destacam que a forma e a textura superficial da partícula do agregado são de fundamental importância para determinar as características do concreto fresco e endurecido. Esse aspecto está diretamente relacionado ao desgaste que a partícula foi submetida. No caso de agregado industrializado, esse aspecto é determinado pelas características da rocha-mãe, do tipo de britagem e da taxa de redução.

Metha e Monteiro (2014) salientam que a forma se refere às características geométricas, como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. Destacam que partículas mais angulosas, alongadas e ásperas, quando comparadas às partículas mais lisas e arredondadas, necessitam de mais pasta de cimento para produzir concretos trabalháveis, aumentando o custo.

Para Neville e Brooks (2013), tanto a forma como a textura superficial do agregado interferem significativamente na resistência do concreto, principalmente nos concretos de alta resistência, sendo a resistência à flexão mais afetada que a resistência à compressão. Agregados com texturas mais ásperas, área superficial maior, e mais angulosos, possibilitam maior aderência entre as partículas e a matriz de cimento. Agregados mais macios, porosos e com partículas

mineralógicamente heterogêneas geram maior aderência, ao contrário de agregados que possuem superfície com textura mais lisa, resistente à penetração da pasta. Para Metha e Monteiro (2014) há evidências de que durante as primeiras idades, a resistência à flexão do concreto pode ser afetada pela textura do agregado; texturas mais ásperas tendem a gerar uma aderência física mais forte entre a pasta de cimento e o agregado. Contudo, em idades mais avançadas, esse efeito não é tão considerável.

3.2 Empacotamento de Partículas

3.2.1 Conceitos e características

O empacotamento de partículas é um projeto da distribuição granulométrica, ou seja, da distribuição do tamanho das partículas para propiciar o preenchimento dos vazios (efeito *filler*). Para Pandolfelli *et al.*, (2000) “o estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”. Uma estrutura empacotada pode acontecer de forma aleatória e, assim impossível de ser reproduzida e de forma ordenada, onde existe uma sistemática e também uma equação matemática. Estruturas ordenadas têm uma maior densidade de empacotamento se comparadas às estruturas aleatórias (RIVAS, 2010).

Para Stroven e Stroven (1999), o interesse pelo empacotamento das partículas aumentou em diversas áreas da engenharia. Esses materiais utilizados, sejam eles naturais ou industriais possuem partículas com diferentes formas e tamanhos e são consideradas como os grãos de agregados, minerais, metais ou pós químicos, solos, moléculas, poros ou rochas. Sendo assim, concluem que o

comportamento destes materiais depende das propriedades de seus constituintes e das interações entre eles.

Segundo Castro e Pandolfelli (2011), a água por ser um líquido polar, ao entrar em contato com as partículas de cimento promove a aglomeração dessas partículas. O empacotamento de partículas, seja ele permanente ou não, pode ser influenciado por essa aglomeração. A pasta de cimento e o concreto possuem uma fluidez inicial de partículas fortemente suspensas. Essa fluidez depende de considerações físicas, isto é, da distribuição granulométrica, do índice de forma e da textura superficial das partículas. Sendo assim, o projeto da distribuição de tamanho de partículas é de fundamental importância, pois promove o empacotamento e, juntamente com o fluido, define as propriedades reológicas do material durante o processo de mistura e quando no estado fresco (DATA, 2016).

Oliveira *et al.*, (2000) citam que uma série de fatores podem alterar o empacotamento de um determinado conjunto de partículas. Um deles é a existência de diversas distribuições granulométricas que alteram a condição de dispersão inicial, tenta-se preencher os vazios com granulometrias variadas (OLIVEIRA, 2013). Haddad (2016) afirma que a distribuição não contínua confere a melhor trabalhabilidade da mistura, maior fluidez, mas não alcança o melhor empacotamento nem o melhor índice de vazios. A morfologia das partículas também pode alterar a condição de empacotamento: quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha e, quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior será o efeito do atrito entre elas, devido à maior área superficial específica. Quando as partículas se encontram próximas a 100µm, a coesão entre elas pode ocasionar aglomerados, diminuindo a densidade do empacotamento (GERMAN, 1989).

Pandolfelli *et al.*, (2000) citam que outro fator que também altera a densidade do material e, conseqüentemente, o empacotamento é a porosidade interna das partículas. “As partículas podem ser totalmente densas, com porosidade interna fechada ou com porosidade aberta. Para efeito de distribuição granulométrica, as partículas que apresentam porosidade fechada são semelhantes às densas, mas resultam em misturas com densidade menor. As partículas que apresentam

porosidade aberta perturbam o empacotamento devido ao seu formato irregular e também resultam em misturas com menores densidades de empacotamento”.

Empacotamentos com menores porosidades são obtidos se os vazios entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos por partículas menores que os mesmos. Contudo, se esses vazios forem preenchidos por partículas maiores que os vazios existentes, essas promoverão o surgimento de novos vazios, que aumentarão a porosidade e reduzirão a eficiência do empacotamento. Aïtcin *et al.*, (1998) citam que uma determinada granulometria que garanta um ótimo empacotamento das partículas pode melhorar até o comportamento no escoamento do concreto. Oliveira (2013) ainda ressalta que partículas de densidades muito diferentes ou iguais podem provocar a segregação da mistura durante o adensamento.

Oliveira (2013) cita alguns fatores que influenciam no empacotamento de partículas, como o efeito de parede, que acontece quando a superfície da partícula menor tem contato com a superfície da partícula maior, que se assemelha a uma parede plana. Este efeito deixa de ser considerável quando a razão entre os diâmetros for superior a dez. A técnica de compactação necessita que as partículas entre em equilíbrio pois as partículas menores têm que ocupar o vazio das partículas maiores para diminuir a porosidade e gerar uma maior densidade. O estado de dispersão das partículas forma vazios, que causam poros na microestrutura prejudicando o desempenho dos compósitos.

Segundo Rivas (2010), dois sistemas de empacotamento extremos se destacam, um sistema monodisperso constituído de partículas de um único tamanho, proporcionando um estado de densidade mínima, e o um sistema polidisperso possuindo uma distribuição gradual de tamanho de partículas, onde as partículas menores preenchem os espaços vazios entre as partículas maiores em uma sucessão ideal, que irá proporcionar um estado de densidade máxima. Apesar dos agregados serem relativamente baratos na composição dos custos dos concretos, suas características são muito relevantes para as propriedades no estado fresco e endurecido.

Segundo Metha e Monteiro (2014), as propriedades dos agregados podem ser divididas em três categorias: características da porosidade, tamanho e formato e ainda sua composição química/mineralógica.

Segundo Metha e Monteiro (2014), quando se tem uma composição de agregados com granulometria variada que não apresentam deficiência ou excesso de qualquer dimensão são produzidas misturas mais trabalháveis e econômicas, conforme Figura 3.1.

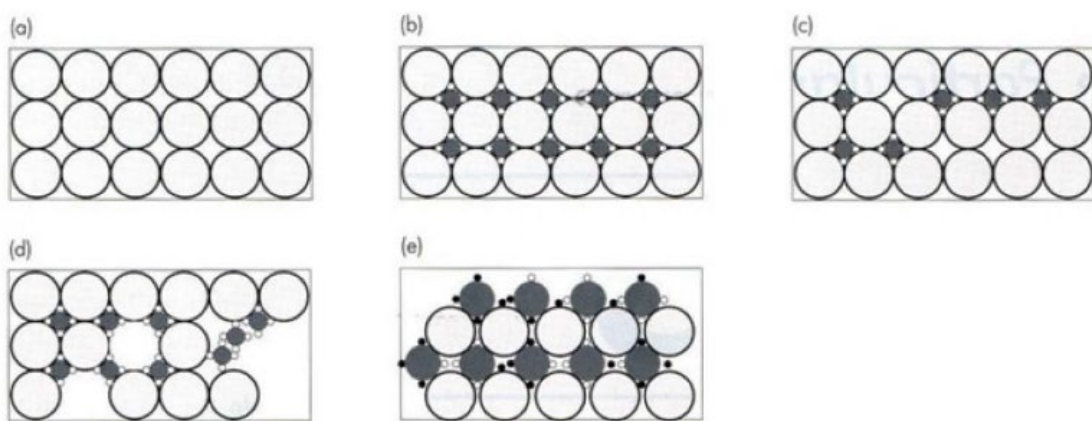


Figura 3.1 - Eficiência do empacotamento de partículas: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas dispersas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.

Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2000)

3.2.2 Modelos de empacotamento

No ano de 1892 foi publicado por Féret o primeiro tratado sobre o empacotamento de partículas em concreto, em que foi apresentada a possibilidade de selecionar tipos adequados de agregados e a relação entre a porosidade do material quando no estado endurecido e sua resistência à compressão, quando submetidos ao processo de cura úmida. Foi apresentada uma equação, cuja resistência máxima é obtida quando a porosidade inicial da matriz é mínima, ou seja, a densidade do

empacotamento é máxima. Sendo assim foram propostos modelos de empacotamento como ferramentas para se calcular a densidade de empacotamento das partículas para se otimizar as misturas granulares de concretos (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

Os modelos de empacotamento seguem duas linhas básicas: uma que considera as partículas individualmente (modelo de Furnas, equação 3.1); e outra que trata as partículas como distribuições contínuas (modelo de Andreasen, equação 3.2).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \quad (3.1)$$

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \quad (3.2)$$

Em que CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D, D_L é o diâmetro da maior partícula, D_s é o diâmetro da menor partícula, r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas e q é o módulo ou coeficiente de distribuição.

Atualmente, um novo modelo tem sido adotado, conhecido como modelo de Alfred, que é um aperfeiçoamento dos modelos anteriores, uma vez que ficou provado que tanto o modelo de Furnas quanto o modelo de Andreasen convergiam matematicamente para uma mesma equação (equação 3.3). Essa equação mostra que os dois primeiros modelos podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar a mesma ideia (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (3.3)$$

3.2.3 Influência do empacotamento nas propriedades dos compósitos cimentícios

A propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros é a resistência mecânica do concreto. O ensaio de compressão é um dos mais fáceis de serem realizados em laboratórios e o seu resultado aos 28 dias é aceito universalmente como um índice geral da resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A porosidade (vazios) existe nos concretos de cimento Portland entre a interface pasta/agregado, pasta de cimento e no próprio agregado. Estes vazios permitem que agentes agressivos como gases, sólidos dissolvidos e líquidos entrem no concreto afetando suas propriedades. Porosidade e a estrutura de poros da pasta de cimento influenciam o desempenho dos compósitos de cimento Portland no estado endurecido e suas propriedades (WANG *et al.*, 1999).

A densidade do empacotamento e a hidratação do cimento exercem influência na porosidade e na resistência dos compósitos. Desta forma, ambos os fatores devem ser considerados concomitantemente, sendo que nas idades iniciais o efeito da densidade do empacotamento é mais relevante que o grau de hidratação. Nas idades avançadas, onde a hidratação já se desenvolveu ambos os fatores exercem a mesma relevância (WANG *et al.*, 1997).

Segundo Segadães (2003), se a eficiência do empacotamento é atingida em sua plenitude o escoamento é baixo, pois o líquido disponível é usado para molhar a superfície das partículas restando pouca água nos poros. Quando a relação água/cimento é constante, quanto maior for a densidade do empacotamento, maior será a área superficial, aumentando a demanda de água (WANG *et al.*, 1999). Os compósitos devem ter a menor porosidade possível e essa menor porosidade é atingida na máxima densidade de empacotamento, onde o grau de hidratação pode ser menor devido ao aumento da área superficial (WANG *et al.*, 1997). Quando as partículas menores ocupam os interstícios entre partículas maiores, diminui-se a porosidade e aperfeiçoa-se o empacotamento.

A dispersão inadequada de partículas pode alterar a curva de distribuição, reduzindo a densidade do empacotamento e comprometendo o desempenho mecânico do compósito (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). Uma distribuição maior da granulometria do agregado miúdo favorece a densidade de empacotamento. Uma distribuição homogênea da granulometria favorece a hidratação do cimento (WANG *et al.*, 1997).

Segundo Haddad (2016), as granulometrias contínuas influenciam positivamente a consistência e a coesão no estado fresco. No estado endurecido melhoram a resistência mecânica e a durabilidade, por reduzirem os poros. Os compósitos cimentícios com boas densidades de empacotamento no estado fresco mantêm a trabalhabilidade por um período de tempo maior, sem a necessidade de aditivos. No estado endurecido apresentarão melhor resistência mecânica (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Pereira (2010), a aplicação dos conceitos de empacotamento de partículas no concreto é interessante, pois a distribuição granulométrica (distribuição de tamanho de partículas) define a porosidade do sistema, com repercussão na composição do concreto. A maior resistência desse concreto aos 28 dias pode ser associada à presença de uma melhor distribuição do tamanho das partículas, diminuindo a porosidade do sistema granular e melhorando o desempenho mecânico do concreto ao longo do tempo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência do empacotamento da areia no desempenho dos compósitos cimentícios foi essencialmente experimental. Foram estudados compósitos de cimento Portland confeccionados com agregados miúdos naturais de uma mesma granulometria e compostos confeccionados com agregados miúdos naturais de granulometrias diferentes e fator água cimento de 0,55. Os experimentos foram realizados nos laboratórios da UFMG. As etapas do trabalho experimental estão apresentadas esquematicamente na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Representação esquemática do trabalho.

4.1 Materiais

Os compósitos cimentícios foram fabricados utilizando cimento Portland CPV ARI, areia e água. O cimento Portland CPV ARI foi escolhido por possuir uma quantidade menor de adições em comparação a outros cimentos mais comuns no mercado, tais como CPII ou CPIII, assim minimizando variáveis. As areias utilizadas foram adquiridas no Instituto Brasileiro de Pesquisa – IPT, nas granulometrias de 0,3mm, 0,6mm e 1,2mm. A produção destas areias segue a NBR 7214 (ABNT, 2012). A água utilizada foi a fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, vinda diretamente dos reservatórios da UFMG. Conforme informações da COPASA, fornecidas em seu website no dia 10/01/2017, os parâmetros físicos e químicos da água estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros físicos e químicos da água.

Parâmetros	Unidade	Mínimo	Número de amostras			Valor	Limites
			Analisadas	Fora do padrão	Que atende		
Cloro	mg/L Cl	7428	8126	10	8116	1,13	0,2 a 2
Coliformes Totais	NMP/100mL	7428	8117	155	7962	98,09%	Obs.
Cor	UH	1716	2380	7	2373	<2,5	15
Escherichia coli	NMP/100mL	7428	8117	4	8113	-	Obs.
Fluoreto	mg/L F	0	1029	194	835	0,77	0,6 a 0,85
pH	-	0	8118	0	2380	8,05	5 a 9,5
Turbidez	ut	7428	2380	68	8050	0,46	5

Fonte: www.copasa.com.br, visto em 10 de janeiro de 2017.

4.2 Métodos

Foram produzidos compostos cimentícios com resistência em torno de 30MPa, constituídos de uma parte de aglomerante, três de agregado miúdo (traço 1:3), tomando como base a NBR 1715 (ABNT,1996) e relação água/aglomerante de 0,55, valor estipulado em função de ensaios preliminares. Três compostos foram confeccionados com areias nas granulometrias de 1,2mm, 0,6mm e 0,3mm, respectivamente. O quarto composto foi produzido com as três granulometrias de areia. Considerando os 3 diâmetros de areia analisados é possível calcular as porcentagens a serem utilizadas, desde que se considere a utilização da mesma porcentagem de partículas maiores (D_L) e partículas menores (D_s), utilizando a equação 3.1.

Considerando que a porcentagem de areia 0,6mm seja de 33,3% e as porcentagens das areias 1,2mm e 0,3mm devam ser iguais ($r=1$), o quarto composto foi confeccionado com 33,3% de cada tipo de areia.

4.3 Ensaios e Avaliações

Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Ensaios estado fresco e endurecido.

Ensaios no estado endurecido	Ensaios no estado fresco
Resistência à compressão Absorção de água por imersão Porosidade aparente Tração na flexão Módulo de elasticidade dinâmico Resistividade elétrica	Trabalhabilidade Expansibilidade

Para cada ensaio foram confeccionados corpos de prova com dimensões específicas conforme descrito na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Especificação dos corpos de prova para cada ensaio no estado endurecido

Ensaio no estado endurecido	Cilíndrico com diâmetro e altura em mm			Prismático em mm 40x40x160
	50 x 100	100 x 200	100 x 30	
Resistência à compressão	x			
Absorção de água	x			
Tração na flexão				x
Módulo de elasticidade dinâmico		x		
Resistividade elétrica		x		
Porosidade aparente			x	

Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura úmida.

4.3.1 Estado fresco

4.3.1.1 Trabalhabilidade

A avaliação da trabalhabilidade dos compósitos foi feita em uma mesa rotatória com base no ensaio de índice de consistência descrito na norma NBR 13276 (ABNT, 2002). Para a determinação do índice de consistência foi coletada a medida do diâmetro do espalhamento do compósito na mesa conforme Figura 4.2.



Figura 4.2 - Ensaio do índice de consistência na mesa de espalhamento

4.3.1.2 Expansibilidade à frio

A expansibilidade foi avaliada pelo método das agulhas de Le Chatelier (Figura 4.3) e foi realizado com base na norma NBR 11582 (ABNT, 2012). Teve como objetivo avaliar a ocorrência de indesejáveis expansões volumétricas posteriores ao endurecimento do compósito cimentício.

Foram moldadas 3 amostras para cada situação. As amostras foram imersas em água potável para a cura inicial durante 24h. Após o período da cura inicial, as

placas de vidro foram retiradas e as agulhas colocadas em um recipiente cheio de água, de tal maneira que as extremidades das hastes ficassem fora da água, por seis dias. Os afastamentos das extremidades das agulhas foram medidos logo após a moldagem dos corpos de prova e após sete dias consecutivos em água. A expansibilidade é descrita pela diferença dos afastamentos no primeiro dia e no sétimo dia. O resultado é a média de três determinações, sendo expresso em milímetros, com aproximação de 0,5mm.



Figura 4.3. - Agulhas de Le Chatelier.

4.3.2 Estado endurecido

4.3.2.1 Resistência mecânica à compressão

Os ensaios de resistência mecânica à compressão foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Os corpos de prova foram curados até 7 dias e 28 dias para a realização dos ensaios. Conforme estabelecido na norma NBR 7215 (ABNT, 1996), a velocidade de carregamento da máquina de ensaio foi equivalente a $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

4.3.2.2 Absorção de água

Os corpos de prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura foram moldados e após 24h desmoldados e, então, colocados na estufa por dois dias à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$. Em um primeiro momento, foi avaliada a constância de massa em corpo de prova após 3, 6 e 24 horas de secagem. De acordo, com a norma utilizada, NBR 9778 (ABNT, 2009), essa constância de massa não pode exceder a 0,5% do menor valor obtido. Depois do período na estufa, as amostras foram resfriadas em dessecador e assim obtida sua massa seca. Os corpos de prova foram então imersos em um recipiente com água, à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e ficaram por 28 dias para se obter uma nova massa após total saturação por meio da equação (4.1) abaixo.

$$\text{Absorção por imersão} = [(M_{\text{sat}} - M_s)/M_s] \times 100 \quad (4.1)$$

Em que M_{sat} é a massa do corpo de prova saturado (g) e M_s é a massa do corpo de prova seco (g).

4.3.2.3 Porosidade aparente

A porosidade aparente (P) indica o percentual ou fração de espaços vazios em um material em uma amplitude de 0% a 100%. Foi calculada considerando a variação percentual da massa do corpo de prova antes e durante a imersão. Este

cálculo foi baseado na Norma Britânica BS 100545-3 (BSI, 1997). As amostras foram confeccionadas e curadas por 28 dias. Neste ensaio se determina a massa de água que entrou nos poros dos corpos de prova sem perda. O ensaio consiste em colocar os corpos de prova na água e movimentá-los de forma que todas as faces fiquem 100% paralelas à superfície do recipiente e repousar por um período 4 horas. Posteriormente mediu-se a massa, com o corpo de prova submerso em água com uma balança hidrostática (Figura 4.4). O valor da porosidade foi calculado pela equação 4.2.

$$P = \{[(M_{\text{sub}} + M_e) - M_s] / (M_s)\} \times 100 \quad (4.2)$$

Em que P é a porosidade (%), M_{sub} é a massa do corpo de prova submerso (g) e M_e é a massa de empuxo da água (g).

Para os ensaios de porosidade aparente por imersão foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro por 30mm de altura.



Figura 4.4 - Porosidade por imersão.

4.3.2.4 Resistência mecânica à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi executado em corpos prismáticos com dimensões de 40x40x160mm. Conforme a norma NBR 12142 (ABNT, 2010), a máquina do ensaio deve promover a aplicação controlada da carga sobre o corpo de prova a ser ensaiado. Essa aplicação pode ser tanto através da movimentação dos elementos de aplicação de carga como através dos elementos de apoio. Este movimento deve manter um paralelismo perfeito com o eixo vertical da máquina, que deve ser equipada com um dispositivo de flexão que assegure a aplicação ao corpo de prova perpendicularmente às suas faces superior e inferior e sem excentricidades.

O corpo de prova ficou apoiado em suas extremidades no sentido longitudinal. A força do equipamento foi aplicada no eixo de forma contínua sem choques de forma que a tensão sobre o corpo de prova aumente entre 0,9 a 1,2 MPa/min. Os resultados foram apresentados em MPa. O equipamento utilizado foi a “Máquina de Ensaio Universal Instron”, modelo 5582, cuja capacidade é de 100KN, conforme ilustrado na Figura 4.5.

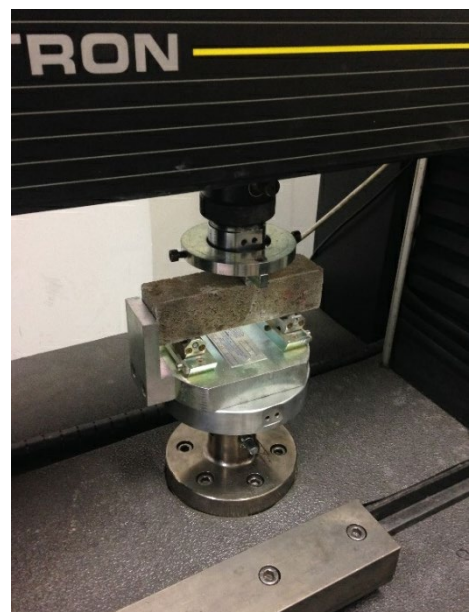


Figura 4.5 - Equipamento para ensaio de resistência mecânica à tração na flexão.

4.3.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Para o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico foram utilizadas as recomendações da norma ASTM C125 (2008). Este ensaio consiste em propagar ondas longitudinais no corpo de prova cilíndrico de 100mm de diâmetro e 200mm de altura. As ondas propagadas por pulso ultrassônico no corpo de prova são usadas para determinar a frequência ressonante do material conforme Figura 4.6. O equipamento usado foi o Erudite MKII. A voltagem é de 0,10 V com a frequência variando de 13.000 a 25.00Hz e step de 10,0Hz. A Equação (4.3) determina o módulo de elasticidade através da frequência de ressonância do material. Os resultados foram apresentados em GPa aos 28 dias.

$$E_d = 4 \times 10^{-9} (L^2 \times F_r^2 \times \rho) \quad (4.3)$$

Em que E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, L é o comprimento da amostra, F_r é a frequência de ressonância medida no equipamento e ρ é a densidade do material.



Figura 4.6 - Equipamento para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

4.3.2.6 Resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica foi executado com corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura aos 28 dias. Foram realizados 3 ensaios por situação. O corpo de prova foi retirado da cura e colocado no equipamento, que possui 2 eletrodos no formato de base metálica que são fixadas na extremidade do corpo de prova em sua seção longitudinal. Este ensaio segue as recomendações da *International Eletrotechnical Commission* para testes de medição de resistividade elétrica de materiais isolantes elétricos (IEC, 1980), conforme Figura 4.7. Foi aplicada uma diferença de potencial e medida a corrente gerada sobre os eletrodos. A resistividade foi obtida pelo produto da resistência pela área da seção do corpo de prova e dividido pelo comprimento. Os resultados deste ensaio foram apresentados em Omhs.cm.



Figura 4.7 - Equipamento para o ensaio de resistividade elétrica

O ensaio de resistividade elétrica permite avaliar a qualidade dos materiais, especialmente no tocante à contribuição do concreto para a taxa de corrosão da armadura devido à ação de íons de cloretos (SILVA, 2011; GJORV, 2008; SANTOS, 2006; SENGUL; WHITING; NAGI, 2003; MILLARD; HARRISON; EDWARDS, 1989).

A resistividade elétrica está relacionada à microestrutura dos compostos, em especial à porosidade (tamanho, distribuição e conectividade) e à presença de íons, ou seja, a resistividade está relacionada ao fluxo de íons que se difundem nos compostos cimentícios por meio da água presente nos poros. Segundo Gowers e Millard (1999), o fluxo iônico entre as regiões anódica e catódica da armadura é regulado pela resistência elétrica do concreto. Quanto menor a resistividade elétrica do concreto, maior a corrente elétrica circulante e maior a velocidade do processo corrosivo, ou seja, quanto maior a resistividade elétrica, maior a dificuldade dos íons em atravessar o concreto, sendo mais baixo o risco de corrosão. Dessa forma, é possível, por meio da resistividade elétrica, avaliar o risco de ocorrência de corrosão das armaduras (SILVA, 2011; SENGUL; GJORV, 2008; MILLARD; SANTOS, 2006; HARRISON; EDWARDS, 1989).

De acordo Whiting e Nagi (2003), a faixa de corrosão muito alta corresponde a resistividades menores que 5 kΩ.cm, a faixa de corrosão alta é de 5 a 10 KΩ.cm, a faixa de corrosão moderada a baixa é de 10 a 20 KΩ.cm e a baixa faixa de corrosão é acima de 20 kΩ.cm. Segundo o European Concerted Action CE - COST 509 - Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete por Lacerda e Helene (2005), a faixa de alta corrosão corresponde a resistividades < 10 kΩ.cm, a faixa de corrosão moderada entre 10 e 50 KΩ.cm, a baixa faixa de corrosão > 50 até 100 kΩ.cm e a insignificante > 100 kΩ.cm. Hoppe (2005) ressalta a alta sensibilidade da resistividade aos diversos fatores intrínsecos como relação água/aglomerante, consumo e tipo de cimento, o agregado e adições minerais e aditivos, pois os mesmos promovem alterações no tamanho e distribuição dos poros, teor de umidade interna, pH, entre outras (LUBECK, 2008).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Avaliações dos compósitos cimentícios no estado fresco

5.1.1 Trabalhabilidade

No Gráfico 5.1 são apresentados os resultados do ensaio da mesa de espalhamento para compósitos cimentícios fabricados com os agregados miúdos de granulometrias 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e também a mistura dessas 3 granulometrias no compósito denominado empacotado. Foram realizadas 3 medidas por situação. Observa-se que o compósito cimentício confeccionado com areia de 0,3mm apresenta menor espalhabilidade que os demais compósitos, e que a trabalhabilidade aumentou à medida que a granulometria da areia do compósito também aumentou. Ke (2015) concluiu que as partículas finas são prejudiciais para a trabalhabilidade de misturas com os outros fatores constantes. O maior espalhamento é do compósito empacotado, evidenciando que os compósitos com granulometrias únicas são desfavoráveis à trabalhabilidade, pois grãos de tamanhos similares enrijecem o sistema prejudicando a trabalhabilidade (ARNOLD, 2011).

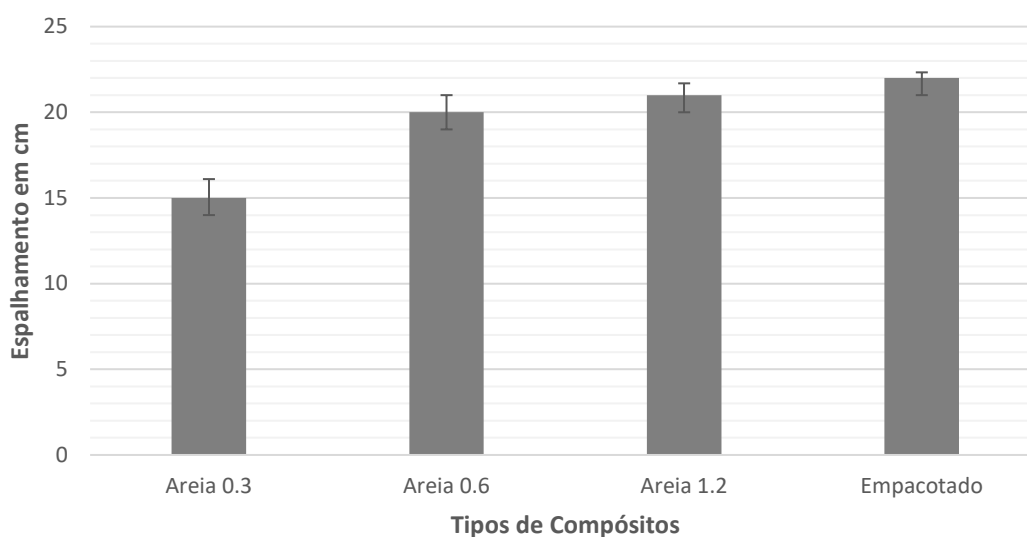


Gráfico 5.1 - Resultados do ensaio de trabalhabilidade pela mesa de espalhamento

Haddad (2016) descreve que maiores superfícies específicas absorvem mais água e, conseqüentemente, possuem menor quantidade disponível de água para ajudar na mistura, corroborando com a afirmação de que aumentando a granulometria, aumenta-se a trabalhabilidade. Reforçando o citado, o compósito de areia 1,2mm obteve um resultado de trabalhabilidade 40% maior do que o compósito de areia 0,3mm.

Segundo Carasek *et al.*, (2016), as argamassas com maior teor de empacotamento resultam em misturas com maior índice de espalhamento. Isso porque existem menos vazios para a pasta ligante preencher, diminuindo o atrito interno e resultando em uma maior fluidez. Justifica-se assim, o fato de que o compósito empacotado possa atingir o valor mais elevado de trabalhabilidade. Este valor foi aproximadamente 5% maior que o compósito de areia 1,2 mm e, aproximadamente, 17% maior que a média entre os três compósitos de areias de granulometria única.

5.1.2 Expansibilidade à frio

No ensaio de expansibilidade não foi detectada abertura das agulhas para nenhum compósito cimentício. Assim como os dados fornecidos pelo fabricante do cimento, que atestam a sua expansibilidade em 0mm, não se constatou nenhuma abertura da agulha para essas amostras, conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de expansibilidade para os 3 tipos de compósitos

Compósito cimentício	Medições dos afastamentos entre as agulhas (mm)			Média (mm)
	Primeira	Segunda	Terceira	
Areia 0.3	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	
Areia 0.6	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	
Areia 1.2	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	
Empacotada	0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	
	0,0	0,0	0,0	

Não foram encontrados dados na literatura sobre a influência do empacotamento na expansibilidade.

5.2 Avaliações das propriedades dos compósitos cimentícios no estado endurecido

5.2.1 Resistência mecânica à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Gráfico 5.2. Foram realizados 3 testes por tipo de compósito.

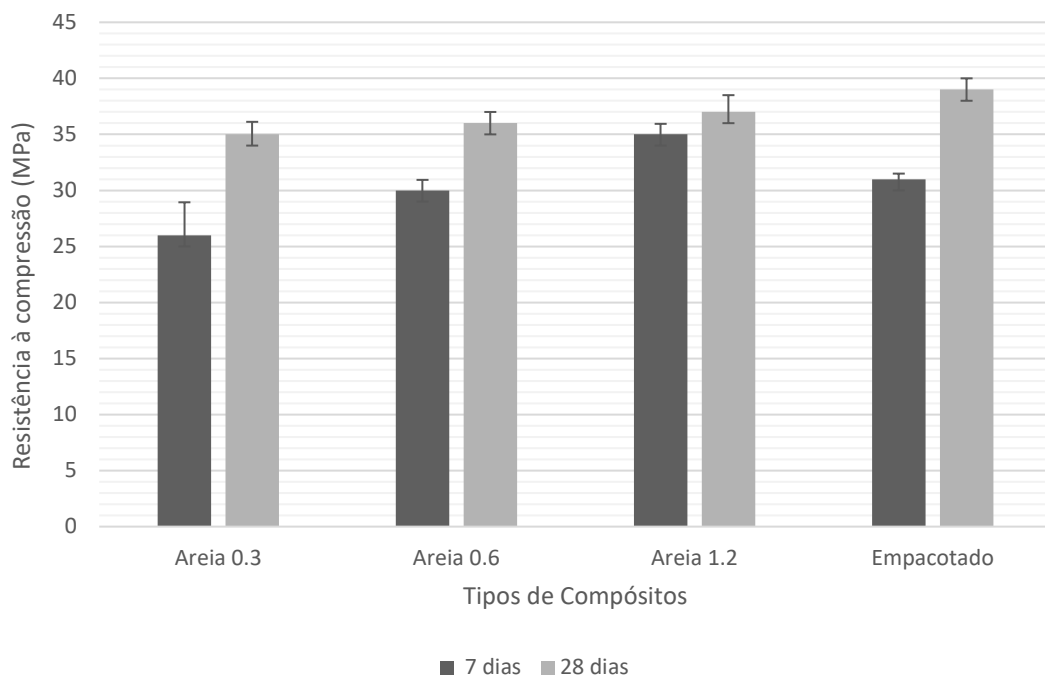


Gráfico 5.2 - Resultados do ensaio de resistência mecânica à compressão aos 7 e 28 dias

Os resultados mostram que à medida que a granulometria do agregado miúdo aumenta há também um aumento da resistência à compressão tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Lembrando que foram mantidos o fator água/cimento de 0,55, bem como o método de mistura e adensamento para que fossem minimizadas as possíveis variáveis. Observa-se que no composto com empacotamento, a resistência à compressão aos 7 dias é menor que no composto com areia 1,2mm. No entanto, aos 28 dias a resistência à compressão do compósito empacotado é

ligeiramente maior que todos os demais compósitos. Segundo Wang (1997), para uma distribuição granulométrica ampla, o grau de hidratação do cimento é menor nas primeiras idades e o compósito empacotado apresenta menor resistência à compressão nas primeiras idades corroborando com esta afirmação.

Oliveira (2018) concluiu que a dosagem baseada no empacotamento de partículas eleva a resistência à compressão do concreto. Resultados ligeiramente maiores alcançados pelo compósito empacotado confirmam esta conclusão, porém o ganho foi cerca de 5%, o que não é muito relevante. Na resistência à compressão o compósito empacotado não obteve valores significativamente superiores aos de granulometria única, o compósito empacotado foi apenas 5% superior à média dos demais compósitos. Ke (2015) reforça que o aumento da densidade de empacotamento melhora as propriedades mecânicas dos compósitos.

Novamente, o compósito de areia 0,3mm ficou com o menor resultado entre todos os outros. O valor do compósito de areia 0,3mm obteve um valor 10% menor que o resultado do compósito empacotado. Ankush (2014) cita que com a utilização de partículas finas, a resistência à compressão diminui, o que aconteceu com o compósito de menor granulometria. Mehdipour (2017) identificou que uma quantidade elevada de partículas finas pode diminuir a densidade de empacotamento, provocando o efeito de dispersão do ligante e assim diminuindo a resistência à compressão do compósito.

A resistência dos compósitos fabricados com o empacotamento das três granulometrias não apresentou um aumento significativo, como era de se esperar. Isso pode ser dado pelo fato de que não houve alteração no fator água/cimento. Também indicaria que o empacotamento, devido à sua granulometria contínua, não afeta tanto os resultados quanto o fator água/cimento. Segundo Wille (2011), o fator água/cimento é o mais relevante para concretos de baixa resistência, porém para concretos de alta resistência a densidade do empacotamento também influencia significativamente na resistência.

Todos os compósitos apresentaram uma resistência superior a 35 MPa, este valor de resistência à compressão, pela norma NBR 8953 (ABNT,1992), classificaria os compósitos quanto à resistência à compressão em concretos C35. Este valor de resistência atende a grande parte dos projetos de concreto armado da atualidade.

5.2.2 Absorção de água

Os resultados médios dos ensaios de absorção de água realizados são apresentados juntamente com a variação de amplitude dos mesmos no Gráfico 5.3. Foram realizados 3 ensaios por situação.

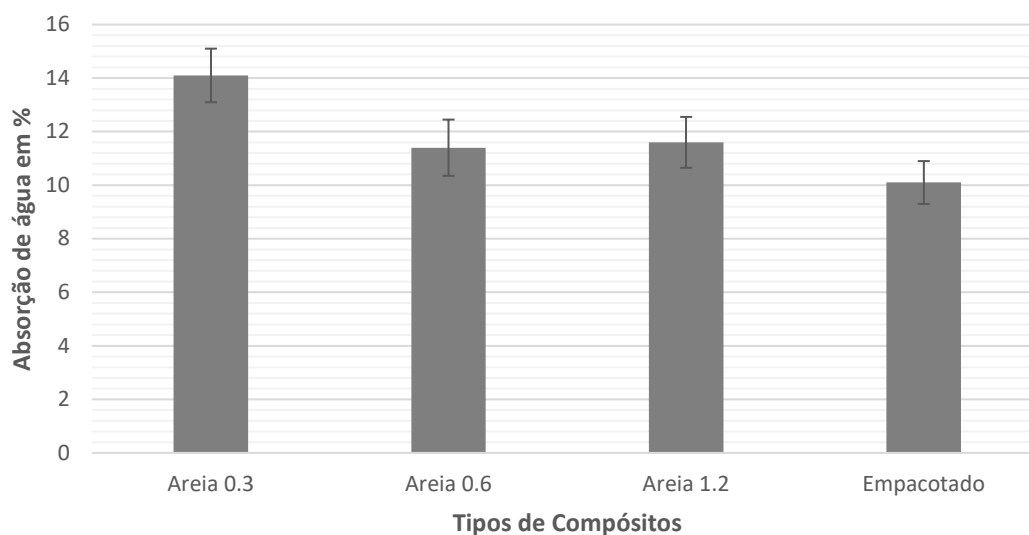


Gráfico 5.3 - Resultados do ensaio de absorção de água aos 28 dias

Como era esperado o compósito com areia de granulometria 0,3mm apesar de ter apresentado uma alta resistência à compressão nas duas idades, no que diz respeito à absorção de água foi a que consumiu mais água, no limite em que não interfere muito na resistência. O compósito de areia 0,3mm absorveu 40% mais água que o compósito empacotado. Ke (2015) concluiu que as partículas finas levam a uma maior absorção de água no estado endurecido. Este resultado indica

que o compósito de areia 0,3mm é mais poroso que o compósito empacotado. Este resultado deve influenciar outros ensaios.

Em termos de absorção de água é observado que se baseando nas areias de granulometrias 0,6mm e 1,2mm, o empacotamento não proporciona nenhuma melhora evidente. Sendo que a diferença entre a média da absorção de água entre os compósitos de areia 0,6mm e 1,2mm em relação à absorção do compósito de areia empacotada foi apenas 8% superior.

Estudos mostram que de uma maneira geral, corpos constituídos de agregados mais finos são os mais permeáveis, enquanto corpos com matrizes grossas são os que apresentam melhor desempenho durante a secagem. Inocentini *et al.*, (2001) apresentam que os poros na matriz, responsáveis pela retenção de água no concreto, têm porosidade e permeabilidade controlada pela distribuição discreta de partículas da matriz. Pode-se afirmar diante dos resultados que o compósito de areia 0,3mm é mais poroso que os demais compósitos.

Os resultados justificam os obtidos na resistência à compressão, uma vez que tal propriedade varia inversamente com a porosidade (CALLISTER, 2006).

5.2.3 Porosidade aparente

Os resultados médios dos ensaios de porosidade aparente, por absorção de água são apresentados juntamente com a variação de amplitude dos mesmos no Gráfico 5.4. Foram realizados 3 ensaios por situação.

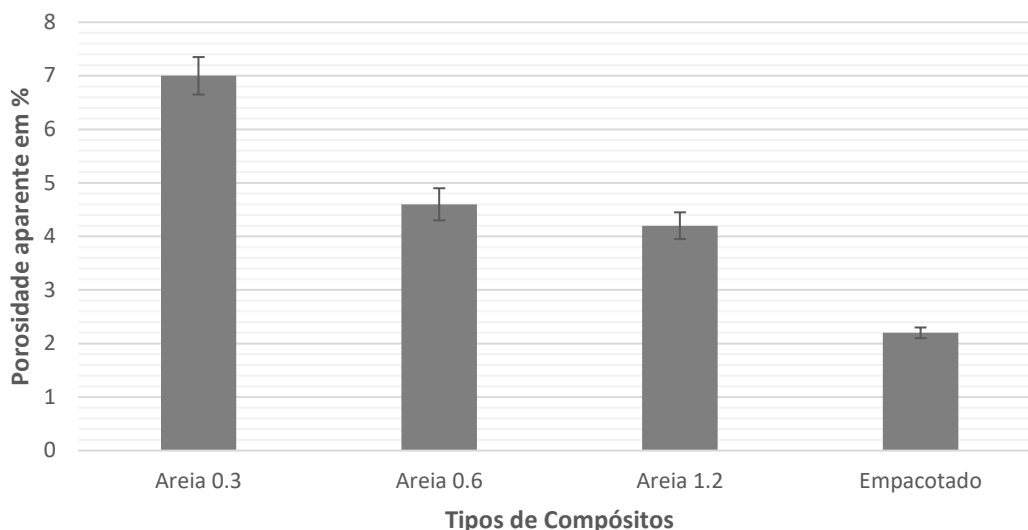


Gráfico 5.4 - Resultados do ensaio de porosidade aparente

Os resultados apresentam a mesma tendência observada no ensaio de absorção de água. Como era esperado, o compósito com areia de granulometria 0,3mm foi o que apresentou a maior quantidade de poros, cerca 3 vezes mais que o compósito empacotado e 1,5 vezes mais que os compósitos de areia 0,6mm e 1,2mm. Segundo Manthagopalan (2011), a presença de finos eleva a demanda de água e pode acarretar em uma maior porosidade, o que foi comprovado neste ensaio. Como observado no ensaio de absorção de água, os compósitos com areia 0,6 mm e 1,2mm apresentaram uma porosidade similar. O compósito que apresentou a menor porosidade foi o compósito empacotado. Isto se deve ao fato de que as partículas menores preenchem melhor os espaços entre as maiores.

5.2.4 Resistência mecânica à tração na flexão

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão são apresentados no Gráfico 5.5. Foram realizados 3 testes por tipo de compósito.

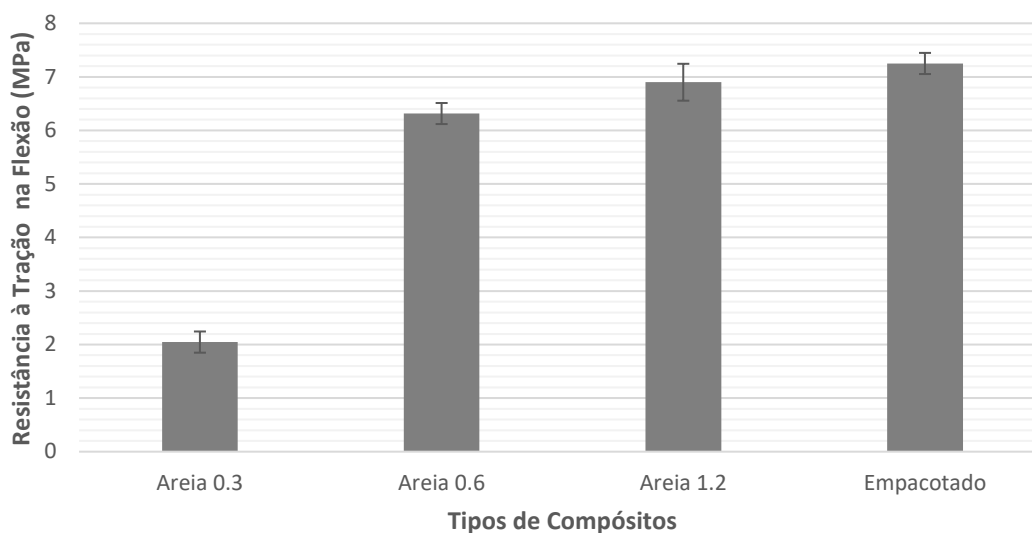


Gráfico 5.5 - Resultados do ensaio de tração na flexão aos 28 dias

Conforme especificado no Gráfico 5, os resultados do ensaio de resistência mecânica à tração na flexão para o compósito contendo a areia de 0,3mm alcançou apenas 30% dos valores dos demais compósitos, sugerindo uma elevada absorção de água da mistura pela areia 0,3mm, o que corroboraria com a redução da sua resistência. Meng (2012) afirma que a densidade aumenta com o tamanho do grão do agregado explicando o aumento da resistência com o aumento do tamanho do grão.

O compósito empacotado apresentou uma resistência à flexão levemente superior às demais, porém apresentando pequena diferença em relação ao compósito de granulometria única de 1,2mm. De acordo com Hadadd (2016), misturas com granulometrias únicas geram vazios que resultam em uma menor resistência à flexão, o que corroboraria com os resultados encontrados. A diferença entre a média da resistência na flexão entre os compósitos de areia 0,6mm e 1,2mm com relação a resistência a flexão do compósito de areia empacotada foi apenas 8% superior.

Para Neville (2015) a tração na flexão é diretamente proporcional a resistência à compressão e estes resultados seguiram esta tendência. Nascimento (2016) cita que o empacotamento de partículas melhora a resistência à tração do concreto, o que aconteceu com os compósitos ensaiados.

5.2.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico são apresentados no Gráfico 5.6. Foram realizados 3 testes por tipo de compósito. Conforme especificado no Gráfico 6, os resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para o compósito contendo a areia de 0,3mm alcançou 66% dos valores dos demais compósitos, sugerindo que a amostra tem uma constituição diferente das demais, que afeta o valor da frequência ressonante medida. Este dado, se comparado aos do ensaio de absorção de água e porosidade aparente visualizado nos Gráficos 3 e 4, indicam a influência da porosidade nos ensaios.

Segundo Lenz (2016), os concretos de boa qualidade atingem valores de módulo de elasticidade superiores a 35 GPa, fato que só aconteceu no compósito de areia empacotada.

Foi observado que novamente o compósito de areia empacotada obteve um desempenho levemente superior aos compósitos de areia 0,6mm e 1,2mm. O compósito empacotado foi 13% mais resistente que a média dos compósitos 0,6mm e 1,2mm. Montijo (2007) reforça que a composição granulométrica é responsável pela macro porosidade do concreto. Lenz (2016) percebe que o empacotamento de partículas pode levar uma estrutura granular mais compacta, elevando a rigidez do compósito e o seu módulo de elasticidade.

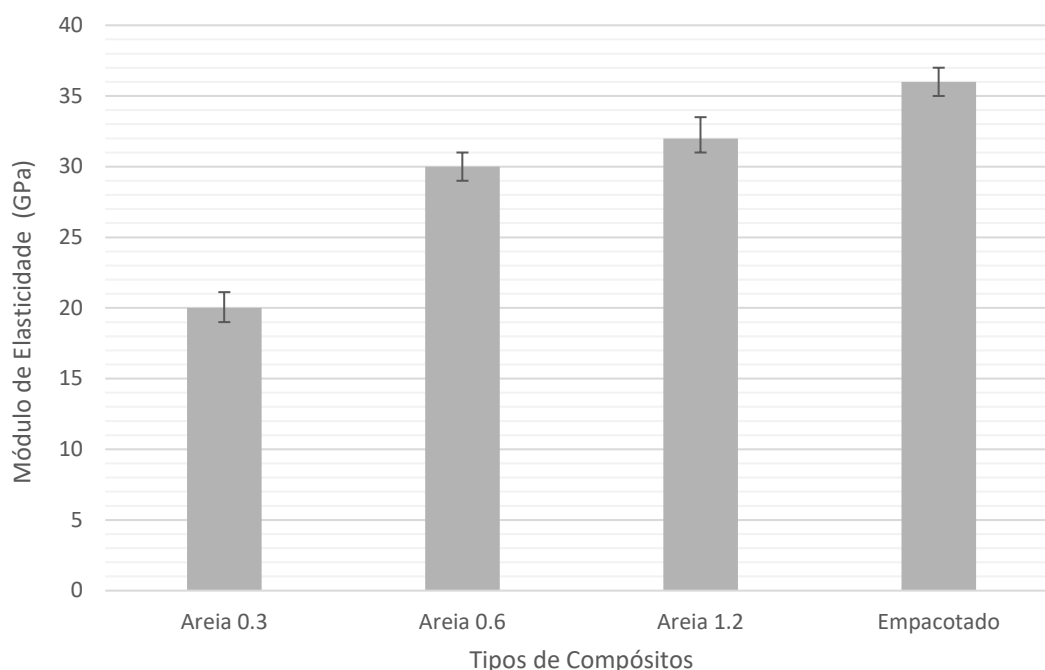


Gráfico 5.6 - Resultados do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

O resultado de módulo de elasticidade seguiu a tendência observada no ensaio de resistência à compressão, onde quanto maior a resistência à compressão, maior o módulo de elasticidade (METHA E MONTEIRO, 2014).

5.2.6 Resistividade elétrica

Os resultados médios e a amplitude dos ensaios de resistividade elétrica são apresentados no Gráfico 5.7. Todos os compósitos obtiveram resultados mais elevados aos 28 dias em relação aos resultados de 7 dias, apenas o compósito de areia 0,6mm obteve um ganho muito pequeno. O compósito de areia 0,3mm alcançou valores de resistividade elétrica menores. Os demais apresentam valores similares. O compósito de areia empacotada obteve o maior resultado em 7 dias e 28 dias. O compósito com areia 0,3mm apresentou valor de resistividade cerca de 20% menor que os valores de resistividade das demais amostras.

Comparando-se a média dos resultados dos compósitos de areia 0,6mm e 1,2mm com o resultado do compósito com areia empacotada nota-se que este compósito obteve valor de resistividade 9% maior que os outros dois compósitos.

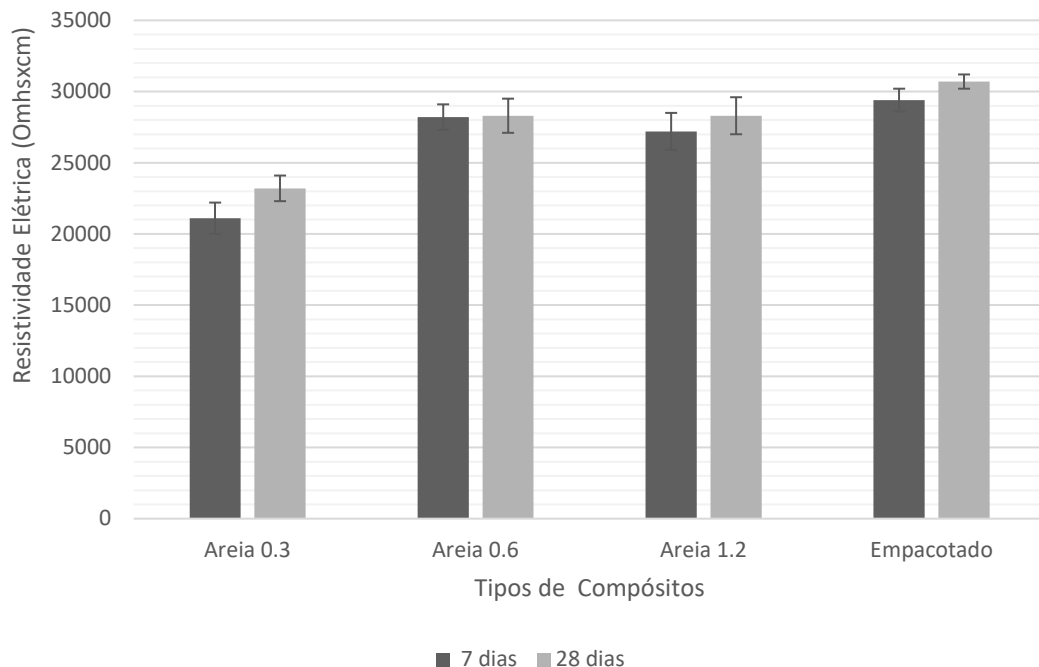


Gráfico 5.7 - Resultados do ensaio de resistividade elétrica aos 7 e 28 dias

Whiting e Nagi (2003), afirmam que resultados de resistividade inferiores a 5 kΩ.cm representam risco de corrosão muito alto; entre 5 e 10 kΩ.cm o risco é considerado alto; de 10 a 20 kΩ.cm moderado; e valores maiores que 20 kΩ.cm tem baixo risco de corrosão. Os valores obtidos demonstram que os compósitos estão na faixa de corrosão de baixo risco. Lenz (2016) concluiu que para concretos com o mesmo fator a/c, os resultados da resistividade elétrica em concretos com estrutura granular modificada são estatisticamente semelhantes. Todos os compósitos estão na mesma faixa de risco à corrosão, baixo risco.

Como a resistividade está relacionada à porosidade de forma inversa e a amostra 0,3mm é mais porosa que as demais, sua resistividade então deveria ser menor, o que foi comprovado no ensaio.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios dos compósitos cimentícios com areias de 0,3mm, 0,6mm, 1,2mm e empacotada no estado fresco indicam que, quanto maior a granulometria, maior a trabalhabilidade. O compósito empacotado alcançou 17% a mais de trabalhabilidade que a média dos demais compósitos e superou em 47% a trabalhabilidade do compósito da areia mais fina 0,3mm.

Nenhum compósito cimentício apresentou expansibilidade e não existe na literatura referências sobre o assunto, assim o compósito não oferece risco de expansibilidade.

A composição granulométrica influenciou no estado endurecido dos compósitos: ocorreu crescimento da resistência à compressão com o tempo de cura e todos os compósitos atingiram resistência à compressão superior a 35 MPa aos 28 dias. O empacotamento foi ligeiramente favorável à resistência à compressão aos 28 dias, porém desfavorável aos 7 dias, como era esperado, pois o empacotamento limita a hidratação do cimento nas primeiras idades. Os resultados da resistência à tração na flexão seguiram a tendência dos resultados da resistência à compressão, como era esperado.

Os resultados de porosidade aparente apresentam a mesma tendência observada no ensaio de absorção de água: o compósito com areia de granulometria 0,3mm foi o que apresentou a maior porosidade/absorção de água; os compósitos com areia 0,6mm e 1,2mm apresentaram uma porosidade/absorção de água similar. O compósito que apresentou a menor porosidade foi o compósito empacotado, que absorveu 40% menos água que o compósito com areia de 0,3mm.

O aumento da granulometria da areia melhorou os valores de resistividade elétrica e módulo de elasticidade dinâmicos. Nos dois ensaios, o compósito de areia empacotada obteve um desempenho levemente superior aos compósitos de areia 0,6mm e 1,2mm, enquanto o compósito contendo a areia de 0,3mm apresentou desempenho significativamente inferior, sugerindo que este compósito apresente maior porosidade.

Todos os ensaios seguiram uma tendência: o aumento da granulometria da areia maximiza o desempenho do compósito, bem como o empacotamento.

Funk e Dinger por meio de simulações computacionais determinaram que para maximizar o empacotamento, o valor do coeficiente de distribuição (q) deve ser de 0,37 (OLIVEIRA *et al.*, 2000). Dessa forma, com base na Eq. (3.3) pode-se determinar a porcentagem de areia 0,6mm como sendo igual a 43,6%. Considerando que as areias de 1,2mm e 0,3mm estejam presentes em quantidades iguais, os teores que maximizariam o empacotamento seria de 28,2%. Dessa forma, pode-se inferir que melhores resultados seriam obtidos com tal proporção. No entanto, se estabelece uma dúvida, na medida que a literatura afirma que os modelos de Furnas (utilizado) e o de Andreasen (Eq. 3.2) convergem (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 7215: Cimento Portland- Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 7219: Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1985.

_____. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 9778: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 11582: Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010b

_____. NBR 13276. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão. Rio de Janeiro, 2002.

_____. BSI. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão. Rio de Janeiro, 2002.

AİTCIN, P. C. *Cements of yesterday and today; concrete of tomorrow*, Cement Concrete Research. 30, 9 (2000) 1349-1359.

AİTCIN, P. C. *Concreto de alto desempenho*. Tradução: Serra, G. G. São Paulo: Pini, 2000.

AİTCIN, P. C.; NEHDI, M.; MINDESS, S. *Rheology of high performance concrete: effect of ultrafine particles*, Cement Concrete Res. 28, 5 (1998) 687-697.

ALMEIDA, I.R. *Concretos de alto desempenho*. In: *CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 1159-1193.

ALMEIDA, S.F. et al. *Determinação do módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios dinâmicos*. In *Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto*, 2005.

ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZA, B. C. *Inspeção e controle de qualidade do concreto*. São Paulo: NEWSWORK, 19932002. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. 64p.

ANKUSH, G.; RAJEEV, C.; KOSHTA, M. K. *Influence of Fine Aggregate Particle Size and Fly-ash on the Compressive Strength of Mortar for SCC*. *International Journal of Scientific and Research ublications*, v. 4, n. 1, India, 2014.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTMC 215. Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens*. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2008.

ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). *ASTM C 618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete*. ASTM, Philadelphia, 2005.

ARNOLD, D. C. M. *Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas*. Rio do Sinos, 2011.

BAUER, L.A.F., *Materiais de construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1994. 435 p.

BENTZ, D.P., HANSEN, A.S., GUYNN, J.M. *Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes*. Cem. Concr. Compos., 33 (2011), pp. 824–831.

BONEN, D., L. SARKAR. *The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss* (1995), Canada.

CARASEK, H., F, LOPEZ, M. *Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento* - ISSN 1517-7076 artigo 11739, pp.714-732, 2016

CASTRO, A. L., PANDOLFELLI, V. C. *Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil*. Cerâmica 55, 2009.

CASTRO, A. L., LIBORIO, J. B. L., PANDOLFELLI, V. C. *Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil*. Cerâmica 57, 2011.

CALLISTER, W, D. *Ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada*. 2 .ed. Rio de Janeiro, LTC, 2008.

CAMPOS, H. F. *Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental*. Curitiba. 2015.

DAROLT, R. D. *Influência da distribuição de Tamanho de Partículas sobre a Piroplasticidade em Porcelanato Técnico em Função do Procedimento de Moagem* UNESC, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Cerâmica Industrial, 16 (3) Maio/Junho (2011).

DATA, Geraldo de F. M., *Análise comparativa da tensão limite de escoamento de argamassas por meio da técnica de Pashias e reometria rotacional* ISSN 1517-7076 artigo 11750 (2016), pp. 866-879.

DIAS, R. V. *Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas*. São Carlos. 2004.

FICHER, M.N., *Estudo do Comportamento à Tração indireta de compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta*, Brasília, DF, 2017.

GARTNER, L., HIRAO, H., *A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 126-142.

GERMAN, R. M. *Particle Parking Characteristics*. Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1989. 443p.

GOWERS, K.R.; MILLARD, S.G. *Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique*. ACI Materials Journal, v. 96, n. 5, p. 536-541, 1999

HADDAD, Lucimar D., *Análise da Influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento* ISSN 1983-4071. Ciência & Engenharia jun 2016.

HERMANN, Aline. *Empacotamento de Agregados Reciclados para Concretos Vibro compactados. 170. Dissertação (Mestrado)*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

HOOTON, R.D., BICKLEY, J.A. *Design for durability: the key to improving concrete sustainability* Constr. Build. Mater., 67 (2014), pp. 422–430.

IEC. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Technical committee 80: Current publications issued by TC 80 with the reference to the IMO performance standards where applicable. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems*, 1980.

INNOCENTINI, M. D. M., YAMAMOTO, J., RIBEIRO C., PILEGGI, R. G., RIZZI JR A. C., BITTENCOURT L. R. M., RETTORE R. P., PANDOLFELLI V. C. *Efeito da distribuição granulométrica na secagem de concretos refratários - CERÂMICA 47 (304) 2001.*

IONASHIRO, M. G. *Fundamentos da Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial*. Giz Editorial: São Paulo, 2005.

ISAIA, Geraldo C. *Materiais de Construção Civil e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1ª Edição. Volume 1 e 2. São Paulo: IBRACON, 2007.

KE, X., HOUH, H., ZHOU, M., WANG, Y., ZHOU, X, *Effect of particle gradation on properties of fresh and hardened cemented paste backfill*. China, 2015

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. *O Cimento Portland. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322

LARRARD, F., *Ultrafine particles for the making of very high strength concretes*, Cement. Concrete. Research. 19, 2 (1989) 161-172.

LENZ, L. *Avaliação da Influência do Empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais*, Curitiba 2016

LONDERO, C. *Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias*, São Paulo 2017.

MANTHAGOPALAN, P. *Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste*, Rolla, M.O., 2017.

MEHDIPOUR, I., KHAYAT, K. H., *Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand*, Cement and Concrete Composites Volume 33, Issue 3, March 2017, Pages 353-358

MEHTA, P.K. *The chemistry and technology of cements made from rice-husk ash*. Proceedings of UNIDO/ESCAP/RCTT Workshop on Rice-Husk Ash Cement, Peshawar, Pakistan, Regional Centre for Technology Transfer, Bangalore, Índia, 1979, pp.113-122.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 páginas.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 páginas.

MEHTA, P. D., AITCIN P. C., CEM. - *Concrete Aggregates*. In: American Society for Testing Materials, J., Philadelphia, PA, 1990, v.12, n.2, p. 70-78.

MENG, L.; LU, P.; LI, S.; ZHAO, J.; LI, T. *Shape and size effects on the packing density of binary spherocylinders*. Powder Technology, v. 228, p. 284-294, Sept. 2012.

MINDES, S., YOUNG, J.F., DARWIN, D., *Concrete*, 2nd Edition, Pearson Education Inc., Sidney, EUA (2003), p. 644.

MONTIJA, F. C., *Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto*. São Paulo, 2007.

NASCIMENTO, J. E. M. F., *Avaliação das Propriedades dos Concretos nos Estados fresco e Endurecido após a Adição de Cinza de Madeira*, Fortaleza, 2016.

NETO, C. S., *Agregados para concreto*. In: *CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 324-343.

NEVILLE, A.M., BROOKS J.J., *Tecnologia do Concreto - 2ª Ed*. 2013.

NEVILLE, A.M. *Propriedades do concreto*. 5 ed. 2015.

HELENE, P., *Dosagem dos concretos de cimento Portland*. In: *CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 439-471.

HELENE, P; ANDRADE, T., *Concreto de cimento Portland*. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. IBRACON. São Paulo, 2007. p.905-944.

OLIVEIRA I. R. D. E, STUDART A. R., PILEGGI R. G., PANDOLFELLI V. C., *Dispersão e empacotamento de partículas– princípios e aplicações em processamento cerâmico*. Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, SP (2000) 195p.

OLIVEIRA, O.C., *Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho*. Ilha Solteira, 2018.

OLIVEIRA, C. O., *Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas*, Dissertação de M.Sc., Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil, 2013.

OLIVEIRA, C.O., MACIEL, G.F., CASTRO, A.L., BARBOSA, M.P., CAMPOS, R.S. *Impact of particle packing concept on dosage of high performance concrete*. SCIELO Matéria (Rio J.) vol.23 no.1 Rio de Janeiro, 2016 Epub Mar 05, 2016.

PACHECO, A.A.L. *Estudo da adição de nanopartículas de quartzo em materiais cimentícios*. Campinas, 2017.

PETRUCCI, E.G.R. *Concreto de cimento portland* – 13ª ED. 1998

QUARESMA, W.M.G., PITUBA, J.J.C., *Avaliação de uma proposta de modelagem do concreto na meso-escala*, ISSN 1983-4195, São Paulo, 2017.

RAMEZANIANPOUR, A.M., HOOTON, R.D. *A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs*. Cem. Concr. Comp., 51 (2014), pp. 1–13.

REBMANN, M. S. *Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência*. 2011, 211 p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2011.

RIVAS, R. D. D. *Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados*. 2010. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

RODRIGUES, G.S.S.; FIGUEIREDO, E.J.P. *Módulo de deformação do concreto*. In Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005.

SAILLIO, M., BAROGHEL-BOUNY, V., BARBERON, F. *Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder* Constr. Build. Mater., 68 (2014), pp. 82–91.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. *Hydration of cementitious materials, present and future*. Cement and Concrete research 41: 651-665. 2011.

SEGADÃES, A.M. & T.C. DEVEZAS, A.P. SILVA *Relação entre distribuição granulométrica, morfologia e empacotamento de partículas num sistema real: Alta-Alumina* Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Junho/2003, pp. 150-161.

SILVA, M.G. *Cimentos Portland com adições minerais*. In: ISAIA, G.C. (Ed). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007.

SNELLINGS, R., MERTENS, G., ELSSEN, J. *Supplementary cementitious materials*- Reviews in Mineralogy, 2012 - Mineral Soc America

SPRAGG, R.P. *Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders*. Publication FHWA/IN/JTRP-2011/21. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2011.

STARK, J., MÖSER, B., BELLMANN, F. *Nucleation and Growth of C-S-H Phases on Mineral Admixtures*. pp. 531–8 in *Advances in Construction Materials 2007*, Edited by C. U. Grosse. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2007.

STROEVEN P., STROEVEN M., *Space system for simulation of aggregated matter application to cement hydration*, Cement. Concrete. Research. 29, 8 (1999) 1299-1304.

SUNAYANA, S., BARAI, S. V., *Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method*. Kharagpur, 2017.

VIEIRA, A. A. P., *Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos*. Universidade Federal da Paraíba, 2005. Dissertação de Mestrado.

WALLY, G. B., *Análise de propriedades mecânicas de engineered cementitious composites (eccs) produzidos com adição de material pozolânico*, Pelotas, 2017.

WANG A., ZHANG C., ZHANG N., *The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement* - Cement and Concrete Research 29 (1999) 1721–1726.

WANG A., ZHANG C., ZHANG N., *Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement*-Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 5, pp. 685-695, 1997.

WILLE, K., A., NAAMAN, A. E., MONTESINOS, G. J. P., *Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way*, ACI Material Journal, 2011.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. E. *Electrical Resistivity of Concrete – A Literature Review*. Skokie/USA, Portland Cement Association, 57 p. 2003.

YANG, K. H., JUNG, Y. B., CHO, M. S., TAE, S. H. *Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete* - Journal of Cleaner Production, 2015 – Elsevier.

YEGUL, F. R. *Building technology and architecture*. Disponível em: <http://id-archserve.ucsb.edu/arhistory/152k/index.html>. Acesso em: JUNHO 2005.

ZARDO, A. M., BEZERRA, E. M., MARTELLO, L. S., SAVASTANO, H. J., *Utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como Filler em compostos de fibrocimento*. SÃO PAULO 2004.

ZHANG, T., YU, Q., WEI, J., ZHANG, P. *Efficient utilization of cementitious materials to produce sustainable blended cement* -Cement and Concrete Composites., 34 (2012), pp. 692–699.

ZUNINO, F, LOPEZ, M. *Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach*- Cement and Concrete Composites, 2016 – Elsevier.