

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO HOFFMANN

**Efeitos da adição de materiais pulverulentos
proveniente da britagem de rochas na
resistência de concretos convencionais**

CURITIBA

2015

LEONARDO HOFFMANN

**Efeitos da adição de materiais pulverulentos
proveniente da britagem de rochas na
resistência de concretos convencionais**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Profº Dr. José Marques Filho

CURITIBA

2015

H699e Hoffmann, Leonardo
Efeitos da adição de materiais pulverulentos proveniente da britagem de rochas na resistência de concretos convencionais/ Leonardo Hoffmann. – Curitiba, 2015.
124 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: José Marques Filho .
Bibliografia: p. 115-124.

1. Concreto. 2. Resistência de materiais. 3. Agregados (Materiais de construção). 4. Britagem (Beneficiamento de minério). I. Universidade Federal do Paraná. II. Marques Filho, José. III. Título.

CDD: 624.1834

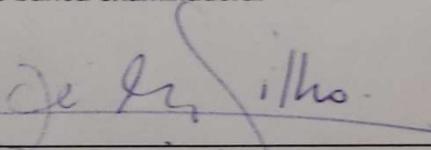
TERMO DE APROVAÇÃO

LEONARDO HOFFMANN

Efeitos da adição de materiais pulverulentos
proveniente da britagem de rochas na resistência
de concretos convencionais

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, na Área de Concentração: Materiais e Estruturas, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

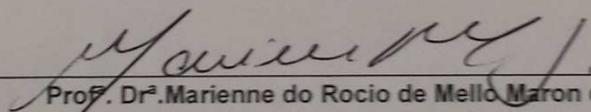
Orientador: _____



Prof. Dr. José Marques Filho

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.

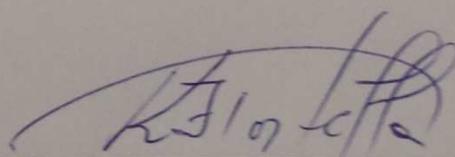
Examinador: _____



Prof. Dr. Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.

Examinador: _____



Prof. Dr. Kleber Franke Portella

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

Curitiba, 02 de Junho de 2015

AGRADECIMENTOS

A quem sempre nos guia no dia a dia, nosso Deus.

A minha linda família, Malu e Carol. Obrigada por existirem.

Aos meus pais, Luiz José e Maria Lourdes, por terem me ensinado a viver, sendo sempre fonte de inspiração e motivação.

Aos meus irmãos Luiz, Eduardo e Luiza, que sempre estiveram ao meu lado demonstrando apoio, nos momentos que mais precisei.

Um agradecimento mais do que especial ao Professor José Marques, por ter aceitado participar desta empreitada, quando já havia começado. E por saber mostrar o caminho a ser seguido para chegar ao objetivo final.

À empresa onde trabalho, Grupo Plaenge, que demonstrou apoio durante toda a caminhada de realização deste trabalho.

Aos demais mestrandos que tiveram participação efetiva na realização dos ensaios, Alan Polucha, Dayana Ruth e Heloisa Campos, e aos alunos de graduação, Gabriel Molina e Lucas Aguiar.

À Companhia de Cimento Itambé, que colaborou fornecendo o material necessário para o desenvolvimento da pesquisa, em especial aos engenheiros Jorge Christofolli e Ícaro Ribeiro.

Ao instituto LACTEC, pela realização dos ensaios de abrasão, em especial ao colaborador Bruno Ribeiro e toda equipe.

Ao laboratório Daher Tecnologia em Engenharia Ltda, pela parceria na realização dos ensaios de resistência à tração na compressão diametral.

*“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

RESUMO

O setor da construção civil é um dos que mais consome materiais, gerando grande quantidade de resíduos. Devido a isso, tem grande pressão da sociedade como um todo, para que diminua os impactos gerados, e melhore a eficiência de toda a cadeia de produção. Um tipo de material gerado na produção de areia artificial é chamado de finos de britagem. Trata-se de um material pulverulento, com grande parte de seus grãos passando pela peneira # 200 (0,075 mm) e que, em alguns casos, é considerado um resíduo. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial da utilização deste material fino, presente nas areias artificiais, na produção de concreto, através da análise das resistências à abrasão, tração e compressão simples de concretos na faixa de f_{ck} de 20 a 40 MPa. Os finos presentes em areias artificiais são considerados prejudiciais ao concreto devido a sua granulometria muito pequena, o que gera perda de abatimento em comparação aos concretos produzidos com areia natural. Esta perda de abatimento, entretanto, pode ser contornada com a adição de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes. Inicialmente, foi realizado um estudo com argamassas, tendo como objetivo verificar a perda de espalhamento nos ensaios de *Flow Table* e Cone de Kantro. Os ensaios foram realizados substituindo-se o agregado miúdo por material pulverulento, nos percentuais de 0%, 6%, 12% e 18%. Na sequência, foi realizado o estudo com concreto, variando a relação a/c em 0,45, 0,55 e 0,65, e o percentual de material pulverulento, conforme estudo com argamassa. O abatimento foi mantido constante através da adição de aditivo plastificante ou superplastificante. Para a resistência à compressão, houve aumento entre 20% e 25% para os concretos com 12% de material pulverulento, em comparação aos concretos com 0%, enquanto os demais percentuais não apresentaram ganhos ou perdas expressivas. As resistências à abrasão, para os percentuais de material pulverulento de 0% e 12%, ficaram próximas, enquanto os demais percentuais apresentaram perda. Apesar de vários regulamentos e normas limitarem a relação a/c, e/ou a resistência à compressão como requisito para resistir à abrasão. Neste trabalho foi demonstrado que não houve correlação entre estas duas grandezas.

Palavras Chaves:

Concreto; Resistência à abrasão; Material pulverulento; Areia artificial.

ABSTRACT

The building economy sector is one of the biggest natural materials consumers, also generating large amounts of waste. For this reason, building is under great concern and pressure from society, in order to decrease the generated impacts, and improve the efficiency of the entire production chain. During aggregate crushing process, a lot of fines are produced, mainly in artificial sand production, generating particles smaller than 0.075mm, and in some cases this fines are considered as a residue or waste. This study aims to evaluate the potential use of this material, present in artificial sand in concrete production, throughout abrasion, tensile and compressive concrete strengths, considering the compressive strength in the range 20-40 MPa. For several authors, the crushed fine are considered harmful to concrete, because of its very small particle size cause workability losses in comparison with concretes produced with natural sand. This loss could be compensated by the addition of plasticizers and / or superplasticizers admixtures. Initially, this study performed a study on mortars, aiming to verify the workability loss using Flow Table and Kantro tests. The tests were performed by replacing artificial sand for crushed fines in the percentages of 0% to 6%, 12% and 18%. In the sequence, concrete studies have been performed in concretes, varying the w / c ratio of 0.45, 0.55 and 0.65 and varying the percentage of crushed fines in the same proportion defined in study with mortars. The consistency was compensated using plasticizer or superplasticizer. The compressive strength increased between 20% and 25% for concrete using 12% crushed fines in relationship with to concrete with 0%, while the other fines contents did not showed significant gains or losses. The abrasion resistance using material 0% and 12% fines content are similar, and the abrasion losses for other fines content showed bigger values. In spite of several standards and regulations indicates w/c and compressive strength limits for concretes submitted to abrasion, this study did not obtained any relationship involving compressive and abrasion strengths.

Key Words:

Concrete; abrasion strength; crushed fines; artificial sand

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PLANTA DE PRODUÇÃO DE AREIA ARTIFICIAL.....	19
FIGURA 2. BACIA DE DECANTAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO NA PRODUÇÃO DE AREIA ARTIFICIAL.....	26
FIGURA 3. EVOLUÇÃO DA EMISSÃO DE CO ₂ AO LONGO DO TEMPO.....	27
FIGURA 4. ESTRUTURA MACROSCÓPICA DO CONCRETO – AGREGADOS E PASTA.....	29
FIGURA 5. FORMA DAS PARTÍCULAS DO AGREGADO – ESFERICIDADE E CURVATURA.....	37
FIGURA 6. PARTÍCULA ALONGADA (INDESEJÁVEL) À ESQUERDA E PARTÍCULA DESEJÁVEL PARA CONCRETO À DIREITA.....	38
FIGURA 7. CURVAS GRANULOMÉTRICAS, OBTIDAS POR GRANULOMETRIA A LASER, DA FRAÇÃO PASSANTE NA PENEIRA DE 150 µM.....	43
FIGURA 8. CONCRETO COM LEVE SEGREGAÇÃO.....	47
FIGURA 9. EXSUDAÇÃO NO CONCRETO.....	48
FIGURA 10. PROCESSO DE PERDA DE MATERIAL POR ABRASÃO, COM FORMAÇÃO DE POEIRA EM SUPERFÍCIES DE CONCRETO.....	53
FIGURA 11. CENTRAL DE PRODUÇÃO DE AREIA E BRITA, JAZIDA RIO BONITO, CAMPO LARGO-PR.....	64
FIGURA 12. CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	67
FIGURA 13. MATERIAL PULVERULENTO DURANTE PROCESSO DE PENEIRAMENTO.....	68
FIGURA 14. FORMATO DOS GRÃOS DE MATERIAL PULVERULENTO. FOTOMICROGRAFIA AMPLIADA 1000X.....	69
FIGURA 15. CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL PULVERULENTO.....	70
FIGURA 16. VISTA GERAL E DIMENSÕES DO CONE DE KANTRO UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	74
FIGURA 17. EXECUÇÃO DO ENSAIO FLOW TABLE.....	78
FIGURA 18. EXECUÇÃO DO ENSAIO DE CONE DE KANTRO.....	79
FIGURA 19. FORMA PARA A MOLDAGEM DOS CPS PARA ENSAIO DE ABRASÃO.....	81
FIGURA 20. EQUIPAMENTO PARA ENSAIO À ABRASÃO DO CONCRETO.....	83
FIGURA 21. CP ROMPIDO DURANTE ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	85
FIGURA 22. RESULTADOS PARA FLOW TABLE PARA A VARIAÇÃO DE QUANTIDADE DE FINOS NAS ETAPAS 1 E 2.....	87
FIGURA 23. RESULTADOS PARA CONE DE KANTRO PARA A VARIAÇÃO DE QUANTIDADE DE FINOS NAS ETAPAS 1 E 2.....	89
FIGURA 24. ENSAIO FLOW TABLE COM O MATERIAL SEGREGADO.....	90
FIGURA 25. FLOW TABLE NA ETAPA 3.....	91
FIGURA 26. COMPARAÇÃO ENTRE ETAPA 3 E 4, PARA CONE DE KANTRO.....	91
FIGURA 27. CP ROMPIDO COM COMPRESSÃO SIMPLES.....	93
FIGURA 28. RELAÇÃO MATERIAL FINO X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS.....	96
FIGURA 29. RELAÇÃO MATERIAL FINO X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POTENCIAL: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS.....	97

FIGURA 30. RELAÇÃO A/C X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS	98
FIGURA 31. RELAÇÃO A/C X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POTENCIAL: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS	99
FIGURA 32. RESISTÊNCIA MÉDIA A TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL ...	103
FIGURA 33. CP ENSAIO Nº 7 AO LONGO DO TEMPO: (a) 0 HORAS; (b) 24 HORAS; (c) 48 HORAS; (d) 72 HORAS	107
FIGURA 34. PERDA DE MASSA AO LONGO DO TEMPO DE ENSAIO DE ABRASÃO, E A LINHA DE TENDÊNCIA OBTIDA PARA CADA ENSAIO	108
FIGURA 35. PERDA DE MASSA AO FINAL DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO	108
FIGURA 36. RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO, RELACIONADO AO PERCENTUAL DE MATERIAL PULVERULENTO.....	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. LIMITES MÁXIMOS ACEITÁVEIS DE SUBSTÂNCIAS NOCIVAS NO AGREGADO MIÚDO COM RELAÇÃO A MASSA DO MATERIAL	31
TABELA 2. RELAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS ÀS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	35
TABELA 3. TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO ANTES E DEPOIS DO PROCESSO DE LAVAGEM.....	40
TABELA 4. VALORES DO ABATIMENTO DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND COM RELAÇÃO A/C ATÉ 0,70 E DE SUAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO.....	50
TABELA 5. RESISTÊNCIA MÍNIMA À COMPRESSÃO PARA DIFERENTES USOS DE CONCRETO SUJEITO AO DESGASTE SUPERFICIAL.	53
TABELA 6. NORMAS UTILIZADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ARTIFICIAL	65
TABELA 7. GRANULOMETRIA DA AREIA ARTIFICIAL ITAMBÉ	66
TABELA 8. GRANULOMETRIA DO MATERIAL PULVERULENTO	69
TABELA 9. NORMAS UTILIZADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO.....	70
TABELA 10. GRANULOMETRIA BRITA 1	71
TABELA 11. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (A) E FÍSICAS (B) DO CIMENTO CP-V-ARI RS.....	72
TABELA 12. TRAÇOS DA ARGAMASSA - 1º E 2º ETAPAS.....	75
TABELA 13. TRAÇOS DA ARGAMASSA – 3ª ETAPA	77
TABELA 14. RESUMO DA DOSAGEM PARA TRAÇOS DE CONCRETO UTILIZADOS NESTE ESTUDO	82
TABELA 15. COMPARAÇÃO DO GANHO DE ESPALHAMENTO EM RELAÇÃO À QUANTIDADE DE ADITIVOS.....	87
TABELA 16. TABELA ANOVA PARA ESPALHAMENTO NO ENSAIO <i>FLOW TABLE</i> , NA ET2.....	88
TABELA 17. RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	94
TABELA 18. RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DOS CONCRETOS COM MATERIAL PULVERULENTO E MISTURAS SEM.....	95
TABELA 19. ANOVA PARA CONCRETO COM IDADE DE 28 DIAS.....	100
TABELA 20. QUANTIDADE DE ADITIVO E <i>SLUMP TEST</i> PARA OS ENSAIOS.....	102
TABELA 21. RESULTADOS DOS CP'S PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	103
TABELA 22. ANOVA PARA RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	104
TABELA 23. EVOLUÇÃO DO PERCENTUAL DE PERDA DE MASSA DURANTE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	106
TABELA 24. MASSA DOS CP'S DURANTE OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO EM MEDIÇÃO SSS.....	109
TABELA 25. MASSA CP'S, DURANTE ENSAIOS ABRASÃO, PARA MASSA IMERSA.	109
TABELA 26. RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA, EM COMPARAÇÃO A ENSAIO COM 0% DE MATERIAL PULVERULENTO.....	112

TABELA 27. RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONCRETO.....	113
--	-----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP – Corpo de prova

CR – Concreto referência

CP IV RS - Cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos

Fck – Resistência característica do concreto

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

NBR – Norma Brasileira

SSS – Superfície seca saturada.

VSI – Britador tipo “Vertical Shaft Impact”

t - tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Importância da pesquisa.....	20
1.2	Objetivo da pesquisa.....	21
1.2.1	Geral.....	21
1.2.2	Específicos.....	21
1.2.3	Hipóteses.....	21
1.3	Histórico.....	22
1.4	Justificativas.....	22
1.4.1	Tecnológica.....	23
1.4.2	Ambiental.....	25
1.4.3	Econômica.....	26
1.5	Sustentabilidade na produção de concreto.....	27
1.6	Limitações da pesquisa.....	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	Concreto convencional com finos.....	29
2.2	Agregados.....	33
2.2.1	Classificação.....	35
2.2.2	Areia artificial.....	38
2.2.3	Empacotamento das partículas.....	45
2.3	Propriedades do concreto fresco.....	46
2.3.1	Exsudação.....	47
2.3.2	Trabalhabilidade.....	49
2.4	Propriedades do concreto endurecido.....	51
2.4.1	Resistência à abrasão.....	52
2.4.2	Resistência à compressão.....	58
2.5	Trabalhos relacionados.....	60
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	64
3.1	Materiais empregados.....	64
3.1.1	Agregado Miúdo.....	65
3.1.2	Agregado graúdo.....	70
3.1.3	Cimento.....	71
3.1.4	Aditivo plastificante.....	73
3.2	Parâmetros gerais analisados.....	73

3.2.1	Estudo com argamassa	73
3.2.2	Estudo com concreto	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
4.1	Resultados do estudo com argamassas	86
4.2	Resultados do estudo com concreto	92
4.2.1	Resistência à compressão e trabalhabilidade	92
4.2.2	Resistência à tração	102
4.2.3	Resistência à abrasão	105
4.3	Comparação de resultados	112
5	CONCLUSÃO	114
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, grande parte dos processos com atividade econômica é fonte geradora de resíduos, o que constantemente compromete o desenvolvimento sustentável do ambiente construído. Um dos principais desafios da sociedade contemporânea, portanto, centra-se no aproveitamento racional dos resíduos provenientes dos processos industriais. Dentro deste contexto, a construção civil surgiu como o setor tecnológico mais indicado para absorver os resíduos sólidos, devido ao grande volume de recursos necessários as suas atividades (BARBOSA *et al.*, 2008).

O setor da construção civil é aquele que mais recursos consome, sejam eles matérias-primas (água, madeiras, minerais ou agregados naturais) ou energia produzida, sendo as energias elétrica e a derivada dos combustíveis fósseis os exemplos mais facilmente assimiláveis. Entretanto, a maior parte das matérias-primas é formada por elementos que, apesar de renováveis, começam a primar pela escassez ou pela dificuldade de acesso, tornando-se necessária uma adequada utilização dos mesmos, bem como a sua gestão racionalizada (SILVA, 2011).

O Relatório Brundtland (1987), elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, define sustentabilidade como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades. É o princípio que assegura que as ações de hoje não limitem o alcance das opções econômica, social e ambiental para as futuras gerações. Dessa forma, a união das necessárias relações entre economia, tecnologia, sociedade e política, bem como a necessidade de uma nova postura ética em relação à preservação do meio ambiente, são imprescindíveis tanto no contexto atual, como na previsão para gerações futuras (ELKINGTON, 1998).

Devido a fatores como o aumento do consumo de matérias-primas, legislação ambiental mais restritiva para exploração de recursos naturais, e o esgotamento de jazidas próximas aos grandes centros urbanos, a construção

civil está sob pressão da sociedade como um todo, para melhorar sua eficiência e diminuir a geração de resíduos em toda a cadeia de produção. Dessa forma, é necessário buscar soluções técnicas visando à utilização dos materiais com a maior eficiência possível.

Um material que vem sendo substituído no Brasil nos últimos anos, devido à escassez em áreas próximas aos grandes centros e à legislação ambiental mais rigorosa, é a areia natural. A substituição vem sendo feita por areia artificial, obtida a partir da britagem de rochas. A aplicação deste tipo de material, apesar de ainda restrita no Brasil, apresenta considerável potencial de crescimento. Esses fatos justificam e incentivam o desenvolvimento de estudos que verifiquem a viabilidade do emprego da areia de britagem na produção de concreto (DRAGO *et al*, 2009).

Contudo, se não ajustada devidamente à sua aplicação, a areia de britagem pode ser um material pouco desejável no uso em concretos e argamassas. A sua distribuição granulométrica, seus altos teores de material pulverulento, a forma angulosa e, muitas vezes, lamelar das partículas, podem prejudicar o concreto, elevando a demanda de água para uma mesma trabalhabilidade e, conseqüentemente, o consumo de cimento. A rusidade dos grãos pode aumentar o atrito interno das partículas sólidas da mistura, resultando num material mais áspero e mais difícil de ser trabalhado na obra, o que influencia sua capacidade de ser bombeado e acabado. Cabe salientar que hoje, muitas destas desvantagens podem ser amenizadas com a introdução de aditivos plastificantes e redutores de água na mistura (DAMO, 2011).

O material pulverulento passante na peneira #200 (75 μm) é considerado uma substância deletéria para o concreto, quando presente em quantidades superiores às especificadas pela norma, ou seja, limites de 3% para o concreto submetido a desgaste superficial, e 5% para o concreto protegido do desgaste superficial (NBR 7211:2009), desde que passível de comprovação por apreciação petrográfica (BUEST NETO, 2006). Um fator importante na produção de areia artificial é a planta de produção, variando os tipos e a quantidade de

britador e a sequência de britagem. Na FIGURA 1, pode ser observada uma planta de produção de areia artificial e brita.

O concreto é um material formado pela mistura de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, água, aditivos e adições. O cimento utilizado comumente é o cimento Portland, principal responsável pelas elevadas emissões de CO₂ da construção civil. Para minimizar as emissões, uma das abordagens das novas tecnologias aponta para os concretos que apresentem maior resistência à compressão. Ao utilizar-se um concreto mais resistente, o cimento é empregado de maneira mais eficiente, explorando-se todo seu potencial e garantindo maior durabilidade, já que com o aumento da resistência há redução no consumo de energia e no consumo das matérias-primas, diminuindo as emissões de CO₂ (AITCIN, 2008).

De acordo com Li (2006), numerosos estudos sobre a resistência à abrasão do concreto já foram realizados. Os resultados mostraram que a resistência à abrasão foi fortemente influenciada pela resistência à compressão, por técnicas de acabamento de superfície, tipos de secagem, propriedades de agregação e pelas condições de teste, isto é, seco ou molhado.

Em Engenharia Civil, a resistência à abrasão é necessária, especialmente, em estruturas com tráfego, estruturas com passagem de água com velocidade ou com sedimentos, e pisos em geral.

Na NBR 6118:2014, na questão de estruturas que necessitam de resistência significativa à abrasão, está recomendado com limite para a relação a/c e o consumo de cimento. A Eletrobrás, 2003, para estruturas hidráulicas como vertedouros, também limita a relação a/c, sendo em ambos os casos o valor máximo admitido igual a 0,45. Esta faixa de relação a/c leva a consumos de cimento relativamente elevados, refletindo-se, também, em custos, emissões de gás do efeito estufa, e calor de hidratação elevados. A possibilidade de fissuração em estruturas sujeitas à abrasão prejudica o objetivo da estrutura, diminuindo a resistência final e sua durabilidade, levando a necessidade de reparos.



FIGURA 1. PLANTA DE PRODUÇÃO DE AREIA ARTIFICIAL

Fonte: O autor (2014)

A busca por soluções alternativas se dá pela avaliação contínua de novas abordagens no emprego dos materiais, e pela proposição de metodologias inovadoras. Neste ultimo caso, em termos de sustentabilidade e considerando-se o caso da resistência à abrasão, é coerente focar no ensaio que caracterize diretamente este parâmetro, ao invés de simplesmente limitar a relação a/c; assim, este tipo de abordagem poderá levar a resultados mais sustentáveis. Dessa forma, este estudo procurou avaliar o efeito do pó e de misturas com superfície específica alta, assim como o efeito de aditivos de ultima geração, utilizando-se concretos convencionais sujeitos à abrasão.

1.1 Importância da pesquisa

Atualmente, a utilização de pisos industriais para o alto tráfego demanda a produção de concreto com resistência à abrasão significativa, garantindo a durabilidade e a capacidade de atuar a favor da estrutura. As normas brasileiras têm indicação estreita para esse tipo de ação, gerando limitações de relação a/c e do consumo mínimo do cimento (ABNT, NBR 6118:2014; NBR 7583:1986). Consumos altos de cimento geram, muitas vezes, estados de fissuração inadequados, custos elevados, geração expressiva de CO₂ e diminuição, por consequência, da durabilidade.

Também são relevantes as necessidades de concretos com resistência à abrasão controlada em estruturas hidráulicas que tem a passagem de água, com ou sem a presença de material carreado diretamente no concreto.

A utilização de areia artificial e seu resíduo (agregado pulverizado) como alternativa para a produção de concretos, caso viável, possibilitaria diminuir o consumo de cimento e, portanto, a emissão de CO₂ e o depósito de material inservível na natureza, bem como diminuiria a pressão ambientais na produção de areia natural.

1.2 Objetivo da pesquisa

1.2.1 Geral

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o impacto da variação do percentual de materiais finos presentes nas areias artificiais e passantes na peneira #200 (75 μm), na produção de concreto com cimento Portland, na faixa de concretos considerados convencionais, a partir das análises das resistências à abrasão, tração e à compressão.

1.2.2 Específicos

- Fornecer dados para balizar a criação de uma norma brasileira específica para a resistência à abrasão de concreto;
- Verificar a possibilidade de utilização de misturas com alta superfície específica e aditivos de última geração, em traços de concreto convencional com areia artificial com finos de britagem, visando diminuir o impacto ambiental, pela diminuição do consumo de cimento por m^3 .

1.2.3 Hipóteses

- O aumento do percentual de finos presentes na areia artificial melhora o empacotamento das partículas e, conseqüentemente, eleva a resistência à compressão e à abrasão, diminuindo o consumo de cimento por m^3 de concreto;
- Com a aplicação de plastificantes e quantidades limitadas de superplastificantes, pode-se compensar a perda de abatimento gerada pela aplicação de areia artificial com agregado pulverizado;
- A forma atual de especificar um concreto, destinado a ter solicitações à abrasão em elevado grau, tende a definir concretos com parâmetros correlacionados à resistência à compressão, sem um critério específico de resistência à abrasão, porém é possível obter resultados que levem a especificações mais adequadas aplicando ensaios diretos de abrasão.

- Os finos de britagem apresentam curva granulométrica contínua, o que permite empacotar as misturas até certo limite.

1.3 Histórico

Lodi e Prudêncio Junior (2006) colocaram que, historicamente, a areia de rocha era um material pouco desejável na construção civil devido a sua rugosidade e pela ocorrência de silte e argila, o que prejudicava a aderência entre o agregado e a pasta de cimento, elevando a demanda de água de trabalhabilidade dos concretos e o atrito interno das partículas sólidas da mistura. Como consequência, os autores salientaram que a utilização da areia de britagem em substituição à natural acarreta um elevado consumo de cimento nos concretos, visando atingir um mesmo grau ou patamar de resistência à compressão. Os mesmos autores chamaram a atenção ao fato de o concreto resultante poder ser um material de custo mais elevado e mais áspero, mais difícil de ser trabalhado na obra ou de ser bombeado. Entretanto, isso pode ser contornado com o uso de aditivos plastificantes.

Tradicionalmente, os agregados eram tratados como materiais de enchimento dentro do concreto, pelo fato de não apresentarem reações químicas complexas em contato com a água, sendo considerados inertes. Porém, esse tratamento secundário dado aos agregados se mostrou errôneo diante de descobertas da influência que estas partículas exercem na trabalhabilidade das misturas, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

1.4 Justificativas

A construção civil é considerada como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social, e apresenta um grande impacto ambiental. Por intermédio desta área se assumi um papel estratégico para o desenvolvimento do país, pela geração de emprego e renda, participação no PIB e bem estar da população. Mas, paralelamente, como apresentado, é uma geradora de impactos ambientais. O setor tem um grande desafio, harmonizar uma atividade produtiva desta magnitude com as condições que a

levem a um desenvolvimento sustentável, assim conciliando questões econômicas, sociais e ambientais, sem comprometer as gerações futuras (PISKE, CAMPOS E PASSOS, 2013).

Em determinadas regiões do país, além das restrições ambientais à exploração do produto e ao alto custo da areia natural, existem dificuldades em se obter areia natural de boa qualidade, o que justifica a busca por soluções tecnológicas alternativas. A dificuldade de obtenção de areia natural de qualidade e a proibição da sua retirada em algumas áreas geram a necessidade de extração da areia em locais distantes dos principais centros de consumo, elevando gastos com transporte, que correspondem a cerca de 70% do custo final da areia (CETEM, 2004). Por outro lado, estudos mostram que pós de pedras que apresentam porcentagem de material pulverulento variando de 7% a 20%, dependendo da litologia, podem ser utilizados, pois colaboram na melhoria da aglomeração das partículas maiores do concreto (MENOSSI, 2004).

Agregados miúdos apresentam grande influência nas propriedades do concreto, visando à otimização do seu desempenho, desde sua escolha e produção até seu desenvolvimento tecnológico, com o objetivo de atingir a qualidade almejada de maneira mais econômica e sustentável possível (DAMO, 2011). Como exemplo, Em 2006 Lang sugeriu como trabalhos futuros a identificação e a quantificação dos efeitos do teor de material pulverulento nas propriedades do concreto. Buest Neto (2006), por sua vez, sugeriu a continuidade dos trabalhos na verificação da abrasão e no desgaste de concretos utilizando agregados miúdos britados.

1.4.1 Tecnológica

É importante salientar que a qualidade constante da areia de britagem, na maioria dos casos, tanto em relação à sua granulometria quanto à ausência de impurezas, quando comparada à areia natural, é uma das características mais relevantes que podem tornar esta areia um produto de boa aceitação no mercado, principalmente nas concreteiras. Além disso, a areia de britagem pode

garantir às concreteiras uma fonte alternativa desta importante matéria prima, a médio e longo prazo (DAMO, 2011).

Um fato limitador ao emprego disseminado da areia de britagem (areia artificial) se deve à sua quantidade de finos, o que justifica seu uso ainda reduzido em diversas regiões do Brasil (DRAGO *et al*, 2009).

Segundo Rashad (2013), muitos pesquisadores utilizam materiais cimentícios em concreto para melhorar suas propriedades. A inclusão de tais materiais pode ser realizada como substituição ao cimento, ou na forma de agregado miúdo. O agregado miúdo comumente utilizado na argamassa e na produção de concreto é a areia natural, que é o material adequado para esta finalidade. Nos últimos 15 anos, tornou-se claro que a disponibilidade de areia natural de boa qualidade está diminuindo. A escassez de areia natural abriu a possibilidade para o uso de materiais cimentícios como substituição de parte da areia no concreto. Neste mesmo sentido, na produção de areia artificial ou até mesmo de brita, é gerado resíduo na forma de material pulverulento, que na maioria dos casos é descartado, devido à falta de pesquisas que demonstrem como poderia ser viável a utilização neste material na produção de concreto.

Pesquisas afirmam que a relação entre os índices de resistência à abrasão e de resistência à compressão em ensaios são diretamente proporcionais, com a resistência à abrasão aumentando de acordo com o aumento da resistência à compressão (LI, 2006). De fato, os resultados dos testes de abrasão na pesquisa de Rashad (2013) indicaram que a resistência à compressão foi um fator importante que afetou a resistência à abrasão do concreto, bem como a resistência à tração. Visando à melhoria do empacotamento das partículas de material muito fino, é possível ter uma matriz granular mais densa, tendendo a um ganho na proporcionalidade entre a resistência à abrasão, em relação à resistência à compressão do concreto. Outro fator importante na resistência à abrasão refere-se ao fato de que, tanto técnicas de acabamento superficial, quanto os diferentes tipos de cura têm uma forte influência sobre esta variável (NAIK, 1995).

É particularmente importante a verificação dos efeitos de quantidades significativas de pó em misturas de concreto, para determinar seu grau de benefício na resistência à abrasão, juntamente com a verificação da atuação de superplastificantes em concreto convencional com alto teor de finos.

1.4.2 Ambiental

A legislação ambiental vem, nos últimos anos, aumentando as exigências para a retirada de areia natural, principalmente de leito de rios (RODRIGUES, 2006, BARBOSA *et al.*, 2008). Com isso, fica cada vez mais restrita a quantidade de locais para a retirada de areia que, no atual contexto, encontram-se localizados em pontos distantes do mercado consumidor.

A extração da areia natural em rios atingiu, em 2004, aproximadamente, 320 milhões de m³ por ano, volume suficiente para construir 7.100 estádios como o do Maracanã (KUCK, 2004), com o consumo de agregados naturais variando entre 1 e 8 t/habitante.ano. No Brasil, o consumo de agregados naturais, somente na produção de concreto e argamassas, foi igual a 220 milhões de toneladas, em 2006 (JONH *et al.*, 2006).

A retirada de areia natural causa danos ao meio ambiente; a areia artificial, entretanto, não está isenta de impactos negativos. Durante o processo de produção, além da areia na granulometria desejada, é gerado material fino, passante pela peneira #200. Este material é considerado usualmente como indesejado, sendo necessária a sua retirada, que é feita pela lavagem do material britado, ou utilizando-se sistemas de britagem via úmida. A água com este material fino em suspensão deve ser encaminhada para lagoas de decantação (FIGURA 2) e, a seguir, o material decantado deve ser disposto em aterros, tornando as regiões de disposição em ambientes improdutivos. Nesta mesma linha de pensamento, Menossi (2004) afirmou que o descarte da fração granulométrica (abaixo de 0,075 mm) das areia artificiais pode ocasionar uma série de impactos ambientais.

Na indústria brasileira de britagem, a geração de 1 t de brita gera 0,3 t de areia artificial e 0,03 t de materiais finos residuais (BARCAJI e TOLEDO FILHO,

2012), e este material fino é hoje considerado apenas como resíduo, sem qualquer tipo de aproveitamento, conforme já descrito.



FIGURA 2. BACIA DE DECANTAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO NA PRODUÇÃO DE AREIA ARTIFICIAL

Fonte: O autor (2014)

1.4.3 Econômica

Para Menossi (2004) “A distribuição granulométrica tem influência direta na trabalhabilidade do concreto fresco, pois uma alta porcentagem de material fino ($\sim 0,15$ mm) exige aumento de água de amassamento e, conseqüentemente, de cimento, o que torna o concreto mais oneroso. O material ainda mais fino, inferior a $0,075$ mm, com finura da ordem do cimento, o torna ainda mais oneroso porque os grãos desse material misturam-se com os do cimento, criando descontinuidade na argamassa, reduzindo a resistência do concreto. A grande superfície específica desse material requer muita água de molhagem e, para que se tenha a mesma trabalhabilidade e fator a/c , necessita-se de maior quantidade de cimento, aumentando a retração e a permeabilidade do concreto”.

Segundo Neville (1997), como o agregado custa menos que o cimento, quanto mais agregado e menos cimento se usar no concreto, mais econômico este será. Na produção de areia artificial existe o custo de lavagem da areia para a retirada do material fino. Será possível, assim, diminuir o custo de produção da

areia, caso não seja necessária a realização desta etapa de lavagem. Este fato será viável a partir do momento que este material fino puder estar presente na areia para ser usada na produção de concretos ou argamassas, sem qualquer restrição.

1.5 Sustentabilidade na produção de concreto

A cadeia produtiva do concreto em 2003 já era responsável por aproximadamente 7% das emissões antropogênicas de CO₂, como pode ser observado na FIGURA 3 (MARLAND e ANDRES, 2003),

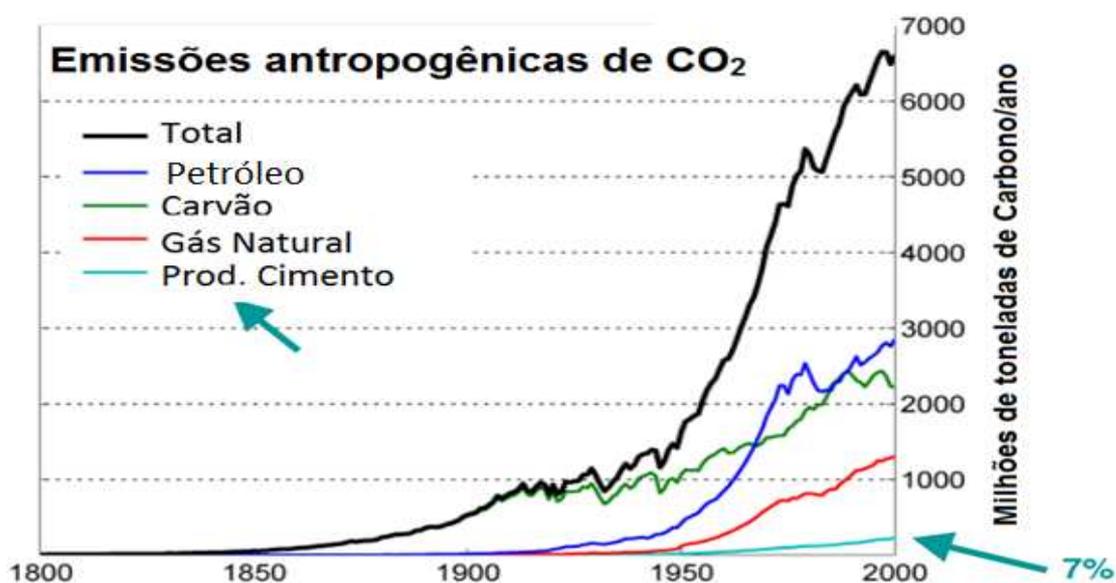


FIGURA 3. EVOLUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ AO LONGO DO TEMPO

Fonte: Marland e Andres (2003)

A média mundial de emissão de CO₂ na produção de cimento foi igual a 810 kg de CO₂ por tonelada em 2004 (HENDRIKS *et al.*, 2004). Durante o ciclo de vida do cimento, a maior parte das emissões de CO₂ ocorre na etapa de produção. As grandes emissões nas usinas são ocasionadas principalmente na produção do clínquer - pela alta temperatura do forno rotativo, o qual consome grandes volumes de combustíveis - e pela decomposição química das matérias-primas. A decomposição ocorre pelo processo de descarbonatação, que transforma calcário (CaCO₃) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂), conforme a Equação (1):



A descarbonatação gera 440 kg de CO₂ por tonelada produzida de óxido de cálcio, valor que demonstra a grande participação do clínquer na geração dos gases de efeito estufa.

Segundo Mehta (2002), três são as ferramentas na direção da sustentabilidade da indústria do cimento: redução do consumo de concreto nas estruturas, redução no consumo de cimento no concreto, e redução no consumo de clínquer no cimento. Portanto, novas tecnologias no concreto, que já são tendências para o futuro, são aliadas na busca de um mundo mais sustentável.

Pelo exposto, a indústria da construção civil deve buscar a maior eficiência dos materiais que utiliza, tentando minimizar qualquer tipo de resíduo. Dessa forma, este estudo visa contribuir na minimização da geração de resíduos, pela utilização do material pulverulento proveniente da produção de areia artificial. Outra forma de contribuição visa à sustentabilidade na cadeia de produção da indústria da construção civil, pela otimização do empacotamento das partículas na fração granular dos agregados do concreto, obtendo-se concreto com um consumo menor de cimento, feito a partir de substituição parcial da areia por material pulverulento, provenientes da cominuição das rochas durante o processo de britagem.

1.6 Limitações da pesquisa

O estudo foi realizado com concreto com resistência à compressão na faixa de 20 a 40 MPa, chamados concretos convencionais. Esta faixa de resistência é a mais utilizada atualmente em obras. Os agregados utilizados nesta pesquisa foram os tipicamente utilizados na região metropolitana de Curitiba - PR. O agregado utilizado foi de origem calcária, sendo utilizado material proveniente de centrais de britagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto convencional com finos

A estrutura interna do concreto é heterogênea e complexa, sendo dividida em fases formadas pelos agregados (representando 80 a 90% do volume do concreto), pela pasta de cimento, pela interface agregados/pasta (chamada de zona de transição), e pelos vazios. Na FIGURA 4 está apresentado o aspecto macroscópico das fases do cimento. A zona de transição é a interface entre o agregado e a pasta, apresenta espessura de, aproximadamente, 1/20 mm, e é a fase mais frágil do concreto, onde se iniciam as rupturas em concretos comuns. Na fase pasta (Pasta Matriz) surgem os produtos da hidratação do cimento, formando os cristais: C-S-H (Estruturas Fibrilares); C-H (Estruturas Prismáticas); C_6ASH_{32} (Etringita); $C_4AS.H_{18}$. (Monossulfato hidratado) (FREITAS, 2001).



FIGURA 4. ESTRUTURA MACROSCÓPICA DO CONCRETO – AGREGADOS E PASTA

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

O teor de partículas finas nas misturas de concreto pode influenciar consideravelmente a quantidade de água de amassamento necessária, o que pode provocar a diminuição da resistência mecânica do concreto produzido. Além disso, sem os devidos cuidados, estas partículas podem reduzir a

resistência ao desgaste do concreto, principalmente por abrasão (NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na literatura, em diversos estudos com concretos convencionais, é realizada a substituição da areia natural por areia artificial, como mostram os trabalhos de Drago *et al.* (2009), Menossi (2004), Lodi e Prudêncio Junior (2006), Klein (2008), Barbosa (2008), Bastos (2002) e Gonçalves (2005). Nestes trabalhos a utilização da areia artificial é feita com a quantidade de material pulverulento presente ao final da produção comercial, ou após a submissão a algum processo para a sua retirada, em geral pelo método de lavagem.

No trabalho de Drago *et al.* (2009) a quantidade máxima de material pulverulento presente na areia artificial foi igual a 15,6%; para Menossi (2004), este valor foi igual a 13,6%.

Segundo Damo (2011) a introdução da areia de britagem no concreto resultou em uma distribuição granulométrica que, na maioria dos casos, levou em direção à minimização da quantidade de vazios. No entanto, a natureza angular do material e uma superfície específica rugosa podem, em contrapartida, aumentar o volume de vazios na areia. Uma maior quantidade de finos em areias de britagem resulta numa maior superfície específica, que geralmente aumenta a demanda de água no concreto. Por outro lado, microfinos provenientes de areia de britagem podem agir como *filler* e diminuir o volume de vazios na pasta, evitando a necessidade do uso de maior quantidade de material cimentício.

Na NBR 7211:2009 estão apresentados os limites de material pulverulento em areia, com a finalidade de utilização como agregado para concreto, como pode ser observado na TABELA 1.

TABELA 1. LIMITES MÁXIMOS ACEITÁVEIS DE SUBSTÂNCIAS NOCIVAS NO AGREGADO MIÚDO COM RELAÇÃO A MASSA DO MATERIAL

Determinação	Método de ensaio		Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo %
Torrões de argila e materiais friáveis	ABNT NBR 7218		3,0
Materiais carbonosos ^a	ASTM C 123	Concreto aparente	0,5
		Concreto não aparente	1,0
Material fino que passa através da peneira 75µm por lavagem (material pulverulento)	ABNT NBR NM 46	Concreto submetido a desgaste superficial	3,0
		Concretos protegidos do desgaste superficial	5,0
Impurezas orgânicas ^b	ABNT NBR NM 49		A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução-padrão
	ABNT NBR 7221	Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos	10 %

^a Quando não for detectado a presença de materiais carbonosos durante apreciação petrográfica, pode-se prescindir do ensaio de quantificação dos materiais carbonosos [ASTM C 123].

^b Quando a coloração da solução obtida no ensaio for mais escura do que a solução-padrão a utilização do agregado miúdo deve ser estabelecido pelo ensaio previsto na ABNT NBR 7221

Fonte: NBR 7211 (2009)

Em complemento à TABELA 1, no Item 5.2.2, na NBR 7211, está exposto que: “Quando o material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem, conforme procedimento de ensaio estabelecido na ABNT NBR NM 45, for constituído totalmente de grãos gerados durante a britagem da rocha, os valores constantes na TABELA 1 podem ter seus limites alterados de 3% para 10% (para concreto submetido ao desgaste superficial) e de 5% para 12% (para concreto protegido do desgaste superficial), desde que seja possível comprovar, por apreciação petrográfica realizada de acordo com a ABNT NBR 7389, que os grãos constituintes acima de 150 µm não geram finos que interferem nas propriedades do concreto. São exemplos de materiais prejudiciais micáceos, ferruginosos e argilominerais expansivos”.

Por outro lado, diversos autores afirmam que não é a quantidade de microfios presentes no agregado que pode prejudicar o concreto, mas sim a sua origem e a quantidade de argilo-minerais presente. Segundo Quiroga e Fowler (2004), o efeito prejudicial que as argilas exercem no desempenho do concreto sempre foi atribuído ao seu tamanho; no entanto, conforme Topçu and Demir (2008), Quiroga e Fowler (2004) e Stewart *et al.* (2006) apud Damo (2011) expõem, estudos que foram realizados para comprovar que não é sua quantidade ou seu tamanho que afetam o concreto, mas sim sua composição mineralógica. Da mesma forma, em 2002, associações européias e britânicas introduziram novas especificações para agregados de concreto, atestando que não apenas a quantidade de finos pode ser considerada significativa no desempenho do concreto, mas, também, a mineralogia dos finos deve ser entendida como fator crítico.

De forma similar, Seleem e Ei-Hefnawy (2003) mostraram que a inclusão de argilo-minerais prejudica o desempenho do concreto, ao compararem concretos produzidos com determinada quantidade de material fino inerte proveniente de agregados finos de britagem, com concretos produzidos com a mesma quantidade de finos constituídos de argilo-minerais. Em determinados concretos, mantida constante a relação água/cimento, o valor do abatimento do tronco de cone para concretos com finos de britagem foi 80% maior quando comparado ao abatimento de concretos com finos de argilo-minerais. Com relação à resistência à compressão, os autores puderam observar que acrescentando finos de natureza silicosa não houve redução da resistência à compressão, e que pelo contrário, observou-se um aumento na resistência, sob a condição de que a água adicionada não ocorra aumento para compensar a redução na trabalhabilidade. Por outro lado, os finos de argilo-minerais causaram uma redução na resistência à compressão, mesmo mantida constante a relação água/cimento, de 8% e 19%, nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

Segundo GONÇALVES (2005) a redução do teor de finos da areia artificial devido à classificação promoveu uma redução na resistência à compressão, em relação às misturas contendo a areia artificial sem

classificação. A redução na resistência à compressão foi atribuída à redução do empacotamento das misturas contendo areia artificial classificada, e ao aumento do módulo de finura, podendo formar uma zona de interface pasta/agregado maior.

Nanthagopalan e Santhanam (2011), utilizando 100% de areia artificial como agregado miúdo, puderam avaliar a influência nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, constatando-se a necessidade do aumento da relação a/c devido a quantidade de material pulverulento presente na areia. Entretanto, foram observadas melhorias nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido.

Em outro estudo (QUIROGA e FOWLER, 2004), para alcançar o “*slump*” desejado, a demanda de redutor de água aumentou com a quantidade de finos. No entanto, o tipo de finos também desempenhou um papel significativo na demanda do redutor de água. Nesta pesquisa, finos calcários necessitaram consistentemente de menos superplastificante do que finos de basalto e granito, mesmo quando finos calcários eram compostos de partículas mais finas do que as outras duas, devido a sua forma mais arredondada. Em traços de concreto, a dosagem de superplastificante para atingir o abatimento do tronco de cone alvo foi 1,5 a 2,5 vezes mais elevada para a mistura com agregado fino com 15% finos de granito, do que em traços sem finos. Ao mesmo tempo, as misturas com 15% de finos de calcário precisaram de 25% a menos de superplastificante do que traços com finos de granito. A demanda de superplastificante aumentou com a quantidade de finos, sem exceção, sendo a taxa de consumo de superplastificante baixa para valores baixos de finos, e alta para quantidades elevadas de finos, isto é, acima de 15% (QUIROGA e FOWLER, 2004).

2.2 Agregados

Os agregados possuem grande influência nas propriedades reológicas e mecânicas de argamassas e concretos. A massa específica, a forma e a textura superficial, além da composição granulométrica, influem significativamente nas propriedades dos concretos no estado fresco. A porosidade, a composição

mineralógica, a dureza, o módulo de elasticidade e a sanidade afetam as propriedades do concreto no estado endurecido (METHA e MONTEIRO, 2008).

Concretos com curva granulométrica otimizada podem apresentar elevado grau de empacotamento do esqueleto granular da mistura, exigindo menores quantidades de cimento. Como resultado, eles são mais baratos por usar menos cimento e têm menos problemas de durabilidade, tais como geração de calor, porosidade, e retração por secagem (QUIROGA e FOWLER, 2004).

Em resumo, o conhecimento não apenas das características dos agregados, mas, também, de como elas influenciam no comportamento e no desempenho do concreto, é essencial para o desenvolvimento de concretos cada vez mais sustentáveis, econômicos e de alta qualidade (DAMO, 2011). Na TABELA 2 pode-se verificar o impacto de algumas características do agregado no concreto.

Weidmann (2008) estudou em concretos a substituição de areia natural por areia de britagem em diversos teores e pôde observar que, para uma mesma relação água/cimento, houve aumento da resistência à compressão quando aumentado o teor de areia artificial. O autor acrescenta que, o maior número de partículas lisas e arredondadas da areia natural pode prejudicar a qualidade da aderência da pasta de cimento às partículas, que é função da rugosidade da superfície e da área específica das mesmas.

TABELA 2. RELAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS ÀS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Propriedades do Concreto Influenciadas pelas Características do Agregado	
Propriedades do Concreto	Características Relevantes do Agregado
Resistência Mecânica	Resistência mecânica Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima
Economia	Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

Fonte: Adaptado de Sbrighi Neto (2001)

2.2.1 Classificação

A classificação dos agregados, segundo Sbrighi Neto (2005) *apud* Klein (2008), pode ser quanto à sua origem, quanto à dimensão dos grãos e quanto à sua massa unitária. De acordo com a origem, os agregados podem ser classificados em: naturais, britados, artificiais e reciclados.

Os agregados naturais são aqueles encontrados na natureza já preparados para o uso sem outro tipo de beneficiamento que não seja a lavagem, sendo provenientes das rochas existentes na crosta terrestre que estão sujeitas aos processos de intemperismo. Alguns exemplos de agregados naturais são a areia de rio, areia de cava ou pedregulho. Por sua vez, os agregados britados são aqueles provenientes de processos de cominuição mecânica de rochas.

Os agregados artificiais são aqueles derivados de processos industriais, como é o caso da argila expandida, e os agregados reciclados são resíduos com propriedades adequadas ao uso como agregado em concreto, submetidos ou não ao beneficiamento, como entulho de construção ou demolição.

Os agregados, de acordo com sua dimensão, se classificam em graúdo e miúdo, segundo a norma NBR 7211:2009. Agregados graúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75 mm. Os agregados miúdos, por sua vez, devem passar pela peneira com abertura de malha 4,75 mm, ficando retidos na peneira com abertura de malha igual a 150 μm .

Na NBR 9935 (2011) está denominado como material fino granular aquele que passa na peneira com abertura de malha 150 μm ; e de material pulverulento as partículas com dimensão inferior a 75 μm .

As porcentagens admissíveis de material pulverulento presente nas areias são, de acordo com a NBR 7211:2009, iguais a 3% para os concretos submetidos a desgaste superficial e 5% para concretos protegidos de desgaste superficial, podendo expandir estes limites para 10 e 12%, respectivamente, desde que seja comprovado por análise petrográfica que os grãos constituintes não interferem nas propriedades do concreto.

Por fim, quanto à massa unitária, tem-se que os agregados naturais apresentam valores entre 1520 e 1680 kg/m^3 e são responsáveis por produzirem concretos normais, com massa específica aproximada de 2400 kg/m^3 . Para finalidades especiais, porém, existem os agregados leves – com massa unitária inferior a 1120 kg/m^3 - e os agregados pesados – com massa unitária superior a 2080 kg/m^3 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A forma das partículas do agregado pode ser classificada pelo uso de dois parâmetros, designados de esfericidade e curvatura, que têm sido utilizados na caracterização dos grãos, conforme pode ser visualizado na

FIGURA 5.

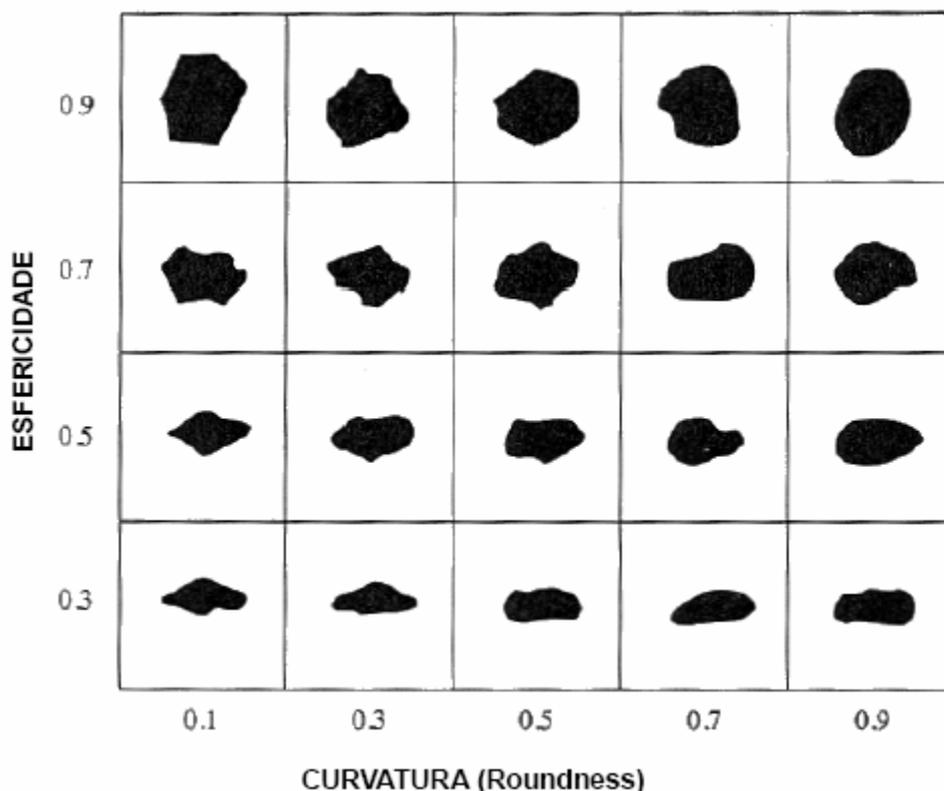


FIGURA 5. FORMA DAS PARTÍCULAS DO AGREGADO – ESFERICIDADE E CURVATURA

Fonte: POOLE e SIMS (1998) *apud* BUEST NETO (2006)

A esfericidade é dada pelo diâmetro da partícula e por sua dimensão máxima característica (DMC), enquanto a curvatura é o raio médio das extremidades e limites pelo raio de circunferência máxima inscrita de cada partícula.

De uma maneira geral, considera-se que as partículas de elevada esfericidade, mas angulosas (com baixo valor do parâmetro curvatura) são as ideais para produção de concretos em comparação às partículas lamelares e alongadas (POOLE e SIMS, 1998, *apud* BUEST NETO, 2006), conforme mostrado na FIGURA 6 a seguir.

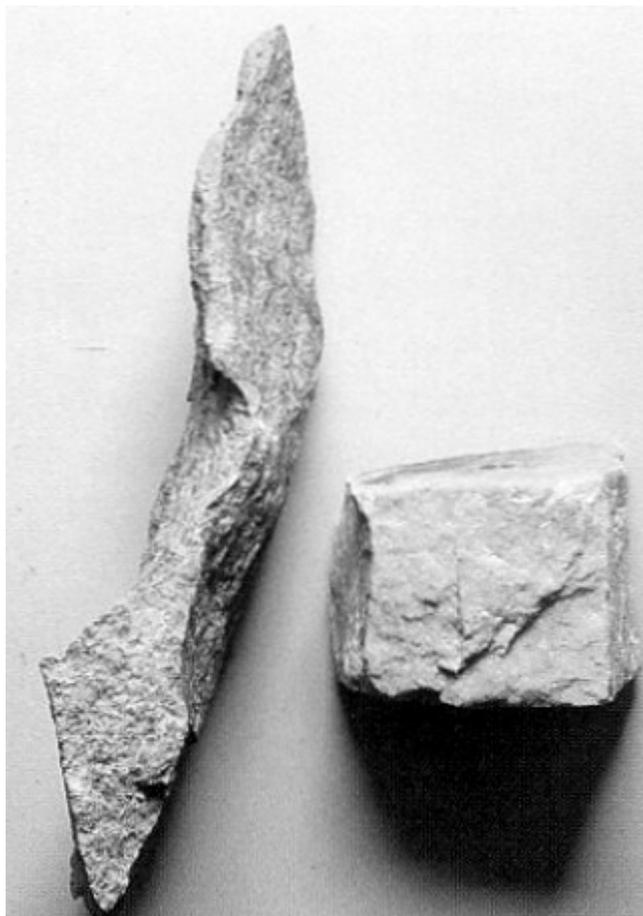


FIGURA 6. PARTÍCULA ALONGADA (INDESEJÁVEL) À ESQUERDA E PARTÍCULA DESEJÁVEL PARA CONCRETO Á DIREITA

Fonte: Poole e Sims (1998), *apud* Buest Neto (2006)

2.2.2 Areia artificial

A areia artificial é produzida por esmagamento/britagem de rocha, visando-se à obtenção de um agregado miúdo bem classificado, que é geralmente mais angular e tem uma textura de superfície mais áspera do que as partículas de areia natural. No entanto, usando a tecnologia de britagem apropriada (britador de impacto), é possível propulsionar as partículas com um rotor em movimento a velocidades elevadas, provocando o impacto de rocha contra rocha, produzindo partículas com formas cúbicas com classificação uniforme, de forma consistente e sob condições controladas (NANTHAGOPALAN; SANTHANAM, 2011).

A questão do uso de areia artificial é antiga no Brasil pois, no processo de beneficiamento de rochas para a produção de agregados graúdos, é gerado um resíduo chamado “finos de britagem”, também conhecido como “areia de brita”, “areia de pedra britada”, ou ainda “pó de pedra”, que são resíduos de brita menores que #4,8 mm. Estes finos representam, em massa, cerca de 20% do material processado nas pedreiras (MENDES, 1999), o que corresponde a uma geração de 18,62 milhões de toneladas em 2000, conforme dados de Valverde (2006). Porém, o seu aproveitamento na construção civil é ainda limitado e, por esta razão, os finos são estocados em pilhas nos pátios das pedreiras, contribuindo para alteração da paisagem, causando impactos ambientais, obstrução de canais de drenagem, geração de poeira nas operações de britagem e formação de pilhas (GONÇALVES, 2005).

Na NBR 7211:2009 se admite o uso de areia de origem artificial, visto que define agregado miúdo como "areia natural quartzosa ou areia artificial resultante da britagem de rochas estáveis, de diâmetro máximo igual ou inferior a 4,75 mm".

Segundo Menossi (2004), a utilização de areia artificial em grande escala apresenta as seguintes vantagens, capazes de beneficiar não só as próprias pedreiras e concreteiras, como também o próprio consumidor:

- aproveitamento integral das pedreiras, sem descarte de efluentes;
- obtenção de uma “areia” com características físicas e químicas constantes;
- menor consumo de cimento na preparação do concreto;
- solução de problemas ambientais;
- custo final reduzido do concreto.

Vale ressaltar que algumas características dos agregados miúdos de britagem exercem notável influência na crescente aceitação deste agregado na indústria do concreto. Como já comentado anteriormente, a uniformidade da areia de britagem, quando comparada àquela da areia natural, e sua maior

facilidade de obtenção, são suas principais vantagens de utilização (DAMO, 2011).

As características das areias artificiais estão diretamente ligadas ao tipo de rocha de origem e ao tipo de britador a ser utilizado no processo de produção. Na TABELA 3, é possível observar o percentual de material pulverulento para combinações entre quatro tipos de rochas, britadas em dois tipos de britadores.

TABELA 3. TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO ANTES E DEPOIS DO PROCESSO DE LAVAGEM

Rocha de origem / Tipo de britador	Teor de material pulverulento (%) NBR NM 46 (2003)	
	Original	Lavada
Calcário CONE	21,00	9,81
Calcário VSI	23,60	9,75
Basalto CONE	18,44	9,08
Basalto VSI	14,15	9,32
Gnaisse CONE	14,31	9,75
Gnaisse VSI	15,32	8,79
Granito CONE	13,38	8,67
Granito VSI	10,84	8,58

Fonte: Adaptado de Damo (2011)

Como apresentado, a produção de areias artificiais geralmente resulta em grandes quantidades de finos ou materiais que passam na peneira #200 (0,075 mm) de malha. Enquanto um limite de 7% de finos é imposto a areias naturais pela especificação ASTM C 33 (2013), areias artificiais tipicamente apresentam 10% a 20%. Esta diferença e o fato de que o uso de areias artificiais tem aumentado devido ao esgotamento dos recursos naturais, vem gerando acúmulo de material pulverulento nos locais produtores (QUIROGA e FOWLER 2004).

Assim, observa-se que algumas das características da areia de britagem estão relacionadas ao processo de britagem e outras ao tipo de rocha de origem, ambas influenciando a curva granulométrica e a forma de suas partículas. Portanto, torna-se necessário entender estas características para, posteriormente, compreender como elas afetam as misturas de concreto, com o objetivo de encontrar meios de corrigir e ajustar os parâmetros das areias de

britagem, impedindo resultados indesejáveis na sua utilização na produção de concretos.

Os processos de britagem para a obtenção de areia artificial afetam a forma, a curva granulométrica e a proporção de material pulverulento, em particular quando comparados aos agregados naturais. Estes fatores podem interferir no desempenho do concreto. Portanto, deve-se selecionar a tecnologia de britagem apropriada, visando assegurar que a areia produzida apresente formas cúbicas com classificação uniforme, sob condições controladas (NANTHAGOPALAN; SANTHANAM, 2011).

De maneira controversa, diversos autores (MENDES, 1999; GONÇALVES, 2005) afirmam que a areia artificial seria apenas um resíduo na produção de agregado graúdo, não sendo um material comercialmente viável para produção em larga escala. Isso porque suas características técnicas são responsáveis por alterar drasticamente o comportamento reológico do concreto comumente produzido com areia natural, devido à quantidade de material pulverulento presente. Este ponto de vista, não compartilhado por vários outros autores, indica a necessidade de novas pesquisas que esclareçam as características de concretos com areia artificial.

Segundo Bastos (2002) e Drago *et al.* (2009), a areia artificial de origem basáltica é constituída por grãos angulosos, com textura superficial, mais áspera e com maior teor de finos, o que favorece a obtenção de concretos menos trabalháveis, isto é, que exigem uma maior demanda de água. Conforme os autores, esse problema pode ser amenizado consideravelmente com o simples controle da percentagem dos elementos finos da areia artificial britada.

2.2.2.1 Material fino das areias artificiais (passantes na peneira #200)

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos no intuito de viabilizar a substituição da areia natural por areia artificial na produção de concretos e argamassas. Porém, na maioria dos casos, os trabalhos fazem uma composição, no traço para concretos, contendo parte de areia natural e outra parte com areia artificial. Esta composição é feita buscando o melhor resultado

devido a alguns fatores que, segundo a Almeida *et al.* (2007), podem ser listados:

- a areia natural melhora a trabalhabilidade do concreto, devido à forma arredondada dos grãos e textura lisa da superfície;
- a composição das duas areias reduz a quantidade de material pulverulento na quantidade total de agregados miúdos, evitando os problemas causados pelo comum excesso de finos presentes nas areias de britagem;
- em locais onde a areia de britagem já é utilizada em proporções significativas, a maioria das pedreiras produtoras não teriam capacidade de produzir quantidade suficiente de pó de pedra para atender a demanda de mercado das centrais de concreto, caso fosse usado 100% de areia de britagem na produção do concreto.

Hudson (1999), *apud* Quiroga e Fowler (2005), afirmaram que o material fino, com diâmetro menor de que 150 microns (#100) poderia atuar no concreto fresco, como lubrificante, desde que apresentasse forma cúbica ou bem regular.

Neville (1997) sustentou que não existe uma curva granulométrica ideal, mas que se deve procurar uma solução que combine requisitos físicos com aspectos econômicos, fazendo-se uso dos agregados disponíveis. Dessa maneira, não é recomendado impor limites rígidos na determinação de uma boa curva granulométrica, dificultando, assim, uma padronização eficiente para todos os casos. Ainda, segundo o mesmo autor, um exemplo prático que demonstra a dificuldade de se estabelecer uma curva ideal, é o fato de que os agregados de diferentes origens, mesmo que nominalmente com a mesma granulometria, apresentam variações na distribuição dos tamanhos de partículas dentro de uma mesma fração, bem como em outras propriedades, como forma e textura das partículas.

Na FIGURA 7, pode ser observada a curva granulométrica para o material passante na peneira de abertura 150 μm , obtidos em estudo do efeito da forma das partículas realizado por Weidmann (2008). Neste estudo, o autor

avaliou a composição granulométrica para uma areia natural e duas areias artificiais, sendo, estas duas últimas, de mesma origem mineralógica, mas britadas com britadores diferentes, originando grãos arredondados ou lamelares.

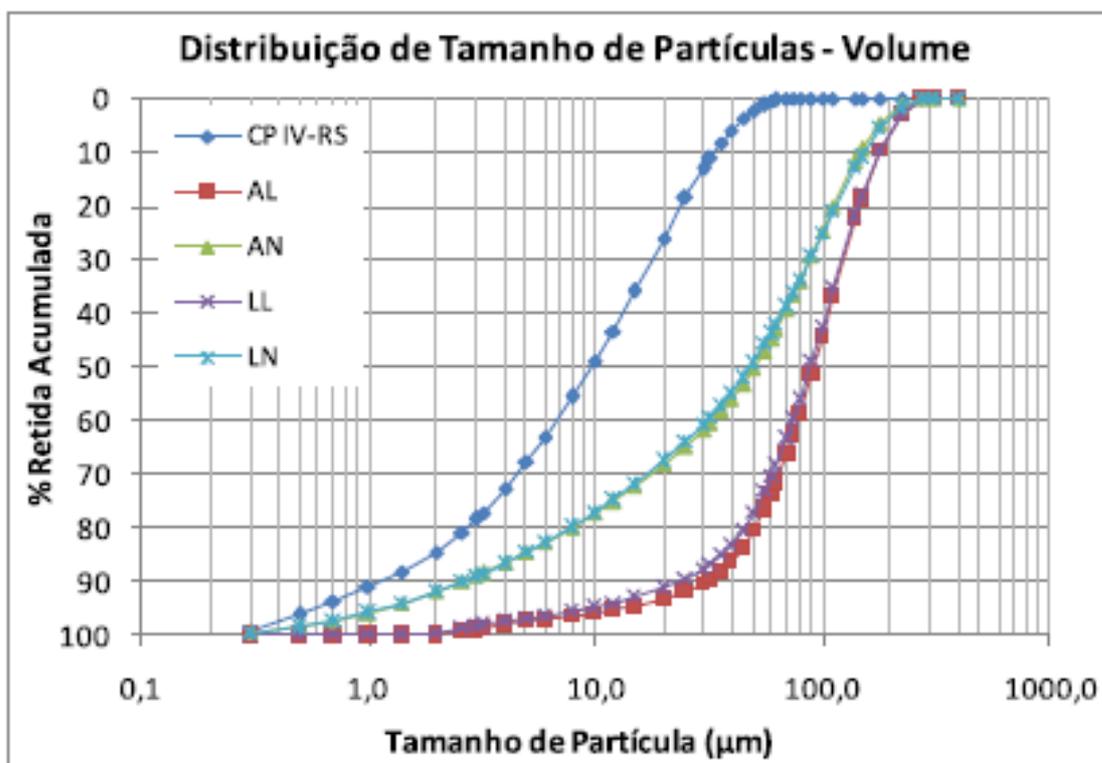


FIGURA 7. CURVAS GRANULOMÉTRICAS, OBTIDAS POR GRANULOMETRIA A LASER, DA FRAÇÃO PASSANTE NA PENEIRA DE 150 µM

Notas: AL - arredondado lavado; AN – arredondado não lavado; LL - Lamelar lavado; LN - Lamelar não lavado; CP IV-RS - cimento utilizado

Fonte: Weidmann (2008)

A ASTM C 33 (2013), assim como a brasileira NBR 7211:2009, limita a quantidade de material pulverulento que pode ser usado na produção de concretos. Segundo Stewart *et al.* (2006) este limite, em versão anterior da norma, foi baseado no uso de agregados naturais pela possível presença de argilominerais na sua menor fração. No entanto, os agregados miúdos de britagem podem possuir uma quantidade ainda maior de material passante na peneira de 0,075 mm, quando comparados aos agregados naturais. No caso das

areias de britagem, este material pulverulento pode ser composto de partículas com o tamanho de argilas, e não composto de argilo-minerais efetivamente.

Em suma, materiais muito finos podem afetar o desempenho do concreto em uma forma positiva ou negativa; as discussões, portanto, sobre agregados contendo materiais muito finos são de grande importância. Em estudo de 2003, Topçun e Ugurlu comentaram que, em sua realidade, lavar a areia artificial, no intuito de retirar este material pulverulento, tem sido o único caminho para resolver esta questão até o momento. Esta afirmação baseou-se principalmente, na opinião discutível que os materiais deste tipo são considerados como material argilo-minerais (TOPÇU e UGURLU, 2003).

No entanto, nos últimos anos, muitos estudos têm sido levados a efeito, para entender o exato comportamento deste material. Como resultados, tem sido demonstrado que, caso o teor do material pulverulento seja mantido em determinados limites, pode contribuir para um melhor desempenho do concreto (DAMO, 2011).

A pesquisa da Universidade do Texas, feita por Quiroga e Fowler (2004), afirmaram que as experiências mundiais têm mostrado que o concreto de boa qualidade, com trabalhabilidade adequada, pode ser produzido com areias artificiais com até 20% de finos. Na verdade, as especificações de muitos outros países permitem limites mais altos do que a norma ASTM C 33 (2013), que é de 7%.

Buest Neto (2006) constatou, que os teores elevados de material pulverulento nas areias artificiais provocaram grande influência nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, concluindo que: (a) concretos com a mesma resistência à compressão axial, com teor elevado de material pulverulento proporcionam menor exsudação; (b) a presença de material pulverulento proporciona melhores resistências mecânicas aos concretos com areia artificial e; (c) a retração por secagem dos concretos com teor elevado de material pulverulento é elevada.

2.2.3 Empacotamento das partículas

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 (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A distribuição granulométrica também pode influenciar na demanda de água necessária para produzir uma mistura com trabalhabilidade adequada aos processos de aplicação e adensamento. A demanda de água da mistura está relacionada à área superficial e à densidade de empacotamento das partículas; quanto maior a área superficial e menor a densidade de empacotamento, maior será a demanda de água. Assim, mantendo-se a área superficial constante, quanto mais estreita for a distribuição granulométrica das partículas, maior será a demanda de água para se obter uma mistura com trabalhabilidade adequada (AIQIN *et al.*, 1999).

Diversas propriedades dos materiais estão fortemente associadas ao empacotamento das partículas que o constituem. Em particular, empacotamentos densos são de alto interesse no processamento de materiais aplicados aos mais diversos setores tecnológicos como concretos. O estudo do empacotamento de partículas está intimamente relacionado à definição do problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados (DESTEFANI e HOLANDA, 2011). No caso dos produtos cimentícios, a otimização do empacotamento das partículas pode ser feito por meio de adições minerais. Via de regra, as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20 a 70% em massa do material cimentício total (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Em geral, as mudanças nas propriedades de produtos cimentícios confeccionados com aditivos minerais podem ser atribuídas aos efeitos físicos e químicos. Os efeitos físicos podem ser divididos em três: diluição do cimento Portland, efeito *filler* e nucleação. Como já apresentado, o *filler* é uma adição mineral finamente dividida sem atividade

química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico. Neste contexto, pó de sílica, pó de pedra e calcário são materiais considerados como *filler* (NEVILLE, 1997).

2.3 Propriedades do concreto fresco

A composição granulométrica dos agregados influencia diretamente a coesão, exsudação, segregação e aspereza da mistura do concreto, sendo esta afirmativa um consenso na literatura. Areias muito finas, apesar de proporcionarem misturas coesivas, apresentam elevada superfície específica, aumentando a demanda de água. Além disso, o aumento da demanda de água tende a aumentar o custo do concreto para manter a mesma resistência e trabalhabilidade (DAMO, 2011).

Em estudo realizado com a adição de pó proveniente de corte de rocha de granito em concretos, Gonçalves e colaboradores (2002) observaram que houve um incremento na coesão e na consistência, e a diminuição na exsudação nas misturas. Este comportamento deu-se, principalmente, devido ao efeito das pequenas partículas de pó difundidas pela mistura, que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água. Isso pode ser comprovado pela dificuldade apresentada na homogeneização da mistura. Paul *et al.* (2003) *apud* Lang (2006) observaram que, até certo limite, quanto mais alta a percentagem de material mais fino do que 75 mm na areia britada, menor será a taxa de exsudação típica.

A segregação excessiva pode ocorrer em concretos pouco coesivos devido à facilidade de deslocamento dos agregados em relação à pasta fresca. A adição de finos aumenta a coesão do concreto, portanto o aumento do teor de cimento ou o uso de adições tornam o concreto menos sujeito à segregação (BUEST NETO, 2006). Na FIGURA 8, pode ser visto um exemplo de concreto com segregação.

Em estudo com areias britadas de variadas origens, com ou sem finos, Quiroga e Fowler (2004) concluíram que os aditivos químicos podem ser

utilizados para melhorar a trabalhabilidade ou reduzir a demanda da água de misturas de concreto com teor de finos até 20% do agregado miúdo, sem afetar outras características do concreto tais como o tempo de pega, resistência e retração por secagem. Com dosagens acima do máximo recomendado pelos fabricantes, os tempos de pega foram retardados.



FIGURA 8. CONCRETO COM LEVE SEGREGAÇÃO

Fonte: O autor (2015)

De modo geral, os superplastificantes provocaram o retardo nos tempos de pega dos concretos e a sua extensão dependeu do tipo e da dosagem do superplastificante, do tipo de cimento e da temperatura (LANG, 2006). Como resultados desta pesquisa, os tempos de início e fim de pega, foram decrescentes no sentido das misturas com maior relação a/c e menor teor de cimento. Além disso, todas as misturas de areia artificial não lavadas mostraram tempos de pega consideravelmente mais baixos que seus pares de areias artificiais lavadas.

2.3.1 Exsudação

Segundo Neville (1997), a exsudação conhecida como separação da água, é uma forma de segregação, em que parte da água de mistura tende a

subir para a superfície de um concreto recém-aplicado. É resultado do fato que os constituintes sólidos da mistura são incapazes de reter a água quando tendem a descer, pois, de todos os constituintes, a água é a que tem menor massa específica. O processo de exsudação pode causar: o enfraquecimento da aderência pasta agregado e parte da armadura; o aumento da permeabilidade e formação de nata de cimento sobre a superfície de concreto. Na FIGURA 9, está apresentado um desenho esquemático do processo de exsudação.

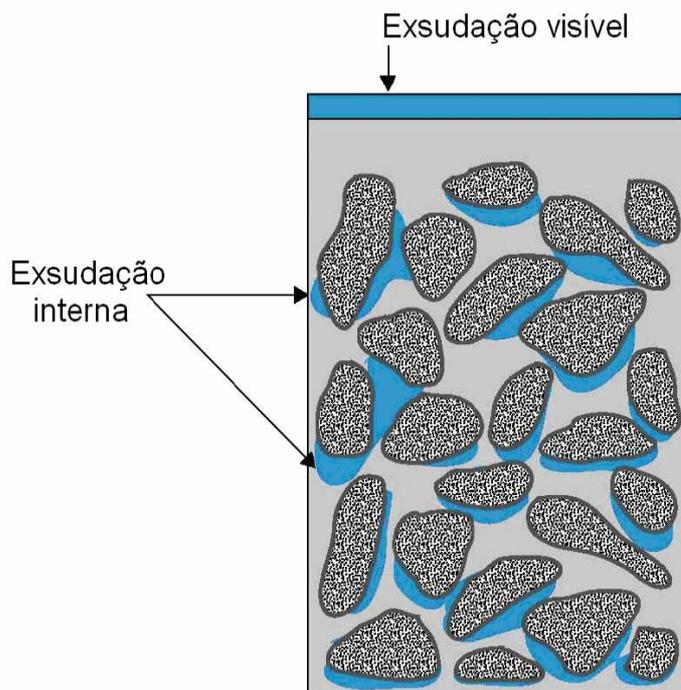


FIGURA 9. EXSUDAÇÃO NO CONCRETO

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

A água de exsudação pode influenciar a qualidade do concreto. Quando a água exsudada é remisturada ao concreto durante a fase de acabamento, a sua superfície pode formar uma camada pouco resistente e de pouca aderência; caso ocorra evaporação de água da superfície do concreto com velocidade antes do fenômeno de exsudação, pode ocorrer fissuração por retração plástica (BUEST NETO, 2006).

De acordo com ACI 302.1R (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2004), a taxa de exsudação pode ser reduzida com as seguintes medidas:

- a) emprego de granulometria contínua e o incremento de agregados com elevada porcentagem de material retido nas peneiras #100 e #200 (0,15 mm e 0,075 mm);
- b) aumento do teor de ar incorporado (limitar em no máximo 3%, nos casos de pisos de concreto com acabamento mecânico);
- c) emprego de cimentos mais finos, ou substituição de parte do cimento por uma adição de elevada finura (ex: sílica ativa);
- d) redução do abatimento de tronco de cone ao mínimo necessário, sendo o valor compatível com os equipamentos de lançamento;
- e) redução do teor de água de amassamento da mistura, com a incorporação de aditivos redutores de água (aditivos plastificantes e/ou superplastificantes).

2.3.2 Trabalhabilidade

Especificamente em concretos convencionais, por meio do ensaio do abatimento do tronco de cone, é possível avaliar o abatimento do concreto em centímetros e sua aparência logo que retirado o cone, o que avalia a consistência. No entanto, o concreto precisa ter trabalhabilidade e coesão suficiente para que possa ser bombeado e vibrado no seu destino, o que não fica claro no abatimento do tronco de cone. Diante disto, é possível que os concretos com pouca quantidade de finos sejam aparentemente coesos na retirada do tronco de cone, mas não coesos o suficiente para serem bombeados e vibrados sem que haja segregação (DAMO, 2011).

No estudo feito por Drago (2009), os concretos foram confeccionados para uma consistência pré-estabelecida, com valores de abatimento na faixa de (80 ± 10) mm. Observou-se que, quanto maior o teor de areia de britagem adicionado à mistura, maior foi a quantidade de água necessária para a manutenção do abatimento dentro da faixa determinada. Esse fato é explicado pelo maior teor de finos da areia de britagem, em comparação à areia natural, e pela forma dos grãos, mais rugosos e angulosos.

Um concreto com um agregado muito lamelar apresenta menor trabalhabilidade, o que não acontece com um agregado mais cúbico ou arredondado; este faz com que o concreto fique mais trabalhável, pois seus grãos irão ter melhor interação e, conseqüentemente, apresentarão menor porcentagem de vazios no concreto. A consequência desse fenômeno é que as pilhas de areia natural têm um ângulo de repouso da ordem de 37°, enquanto que as pilhas de britas e de areia de britagem (pó de pedra) alcançam mais de 45° (MENOSSI, 2004).

Na TABELA 4 estão apresentados os valores de abatimento alcançados em estudo realizado por Menossi, 2004, onde houve a substituição de areia natural por artificial. Os resultados são tabulados em função do teor de substituição de areia natural por areia artificial, e os concretos mantiveram constante a relação a/c igual a 0,70.

TABELA 4. VALORES DO ABATIMENTO DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND COM RELAÇÃO A/C ATÉ 0,70 E DE SUAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO.

Nº traço	Teor de Substituição	Abatimento (mm)	Resistência a compressão aos 28 dias (MPa)
1	0 %	70	18,80
2	25 %	60	21,70
3	50 %	50	24,00
4	75 %	40	28,90
5	100 %	25	31,20

Fonte: Menossi (2004)

Com base nos dados apresentados na TABELA 4, observou-se que o traço 5, com 100% de areia artificial, apresentou, em todas as idades, a maior resistência; em contra partida, apresentou um abatimento mais baixo. Essa alta resistência não está associada somente a um abatimento baixo, mas, também, com a presença dos finos, que proporcionam uma maior compacidade no concreto, diminuindo assim sua porosidade, o que o torna mais resistente. O concreto com adição de pó de pedra apresentou um ganho de resistência em todos os traços.

2.4 Propriedades do concreto endurecido

Não há um critério para avaliar a resistência à abrasão do concreto que seja unânime na literatura, apesar da NBR 12042 (1992) definir um ensaio padrão para determinar o desgaste superficial por abrasão em material inorgânico, mas não específico para concreto. Essa ausência de um critério está relacionada ao fato de que a resistência à abrasão do concreto não é um fator controlado no desempenho do pavimento ou piso industrial. Geralmente, esta característica está relacionada a outras exigências, como a resistência à compressão, que acaba servindo de balizador para as outras características do concreto.

Lang (2006) concluiu que o módulo de elasticidade dos concretos aos 28 dias, com areia artificial lavada, é menor do que aquele com areia artificial não lavada. Isto é, os resultados dos ensaios mostraram que sob mesma tensão, as deformações das amostras de concreto, com areia artificial lavada, são maiores do que com a areia artificial não lavada. O percentual de diferença entre o módulo de elasticidade dos concretos entre os dois tratamentos apresentou tendência de crescimento, da mistura rica para a pobre. A substituição da areia padronizada do IPT, ou natural, por areia artificial não provocou influência significativa no módulo de elasticidade dos concretos, promovendo, entretanto, uma redução de até 9% na resistência à tração por compressão diametral, e de até 5% na resistência à tração na flexão. A redução da resistência à tração nos concretos contendo areia artificial foi explicada pelo autor pela formação de uma zona de interface pasta-agregado, mais fraca e causada pela menor finura da areia artificial classificada (GONÇALVES, 2005).

No trabalho de Topçu e Ugurlu (2003), observou-se uma diminuição da permeabilidade, absorção e porosidade do concreto com a adição de material pulverulento. As melhorias nas propriedades do concreto foram mais evidentes para os valores máximos de 7 - 10% de material pulverulento. Caso a percentagem de material de fino supere 10%, as propriedades do concreto permanecem constantes ou se alteram de uma forma negativa.

Çelik e Marar (1996) afirmaram que a permeabilidade à água do concreto diminui quando o teor de pó aumenta. Isto pode ser explicado pelo fato de que quanto maior o teor de pó adicionado ao concreto, mais passagens da água e canais serão bloqueados, o que leva a uma redução em sua permeabilidade.

A durabilidade, para Papayianni *et al* (2005), foi afetada por diversos parâmetros do concreto, sejam controláveis ou não. Embora os aditivos não reajam por ação química nos produtos hidratados, eles afetam a microestrutura do gel do cimento e do concreto. A porosidade e a exsudação diminuem significativamente e, em menor intensidade, a retração por secagem e as deformações por fluência. Assim, além do aumento da resistência, há também um aumento da durabilidade do concreto.

2.4.1 Resistência à abrasão

A abrasão é um desgaste devido à ação repetida de fricção e polimento. Em pisos e pavimentos, a abrasão resulta do desgaste devido ao tráfego, como pode ser visto na FIGURA 10. Uma resistência à abrasão adequada é de extrema importância para pisos industriais, obras hidráulicas com escoamento de água em superfícies de concreto e pavimentos, do ponto de vista da segurança, da estética, do conforto e da produtividade industrial.

De maneira semelhante, Rodrigues *et al.* (2006) definiram a resistência ao desgaste à abrasão como “[...] a capacidade de o concreto resistir a esforços abrasivos, de caráter superficial, a que ele estará submetido ao longo de sua vida.” Sendo assim, a resistência ao desgaste é caracterizada pelo desprendimento do material superficial do piso, podendo ser grãos de areia ou pó de cimento. Segundo Rodrigues *et al.* (2006), entre as causas deste tipo de manifestação patológica estão a baixa resistência do concreto e o baixo crescimento da resistência do concreto após 28 dias de idade. Na TABELA 5 está apresentada a resistência mínima à compressão de acordo com a classe do piso.

TABELA 5. RESISTÊNCIA MÍNIMA À COMPRESSÃO PARA DIFERENTES USOS DE CONCRETO SUJEITO AO DESGASTE SUPERFICIAL.

Classe do piso	Resistência mínima à compressão (Mpa)
1, 2 e 3 (pedestres e rodas pneumáticas)	21
4, 5 e 6 (Trafego de veículos)	24
7 (trafego com rodas rígidas)	24
7 (overlay aderido)	35
8 (overlay não aderido)	28
9 (Superplano)	28

Fonte: Rodrigues *et al.* (2006)

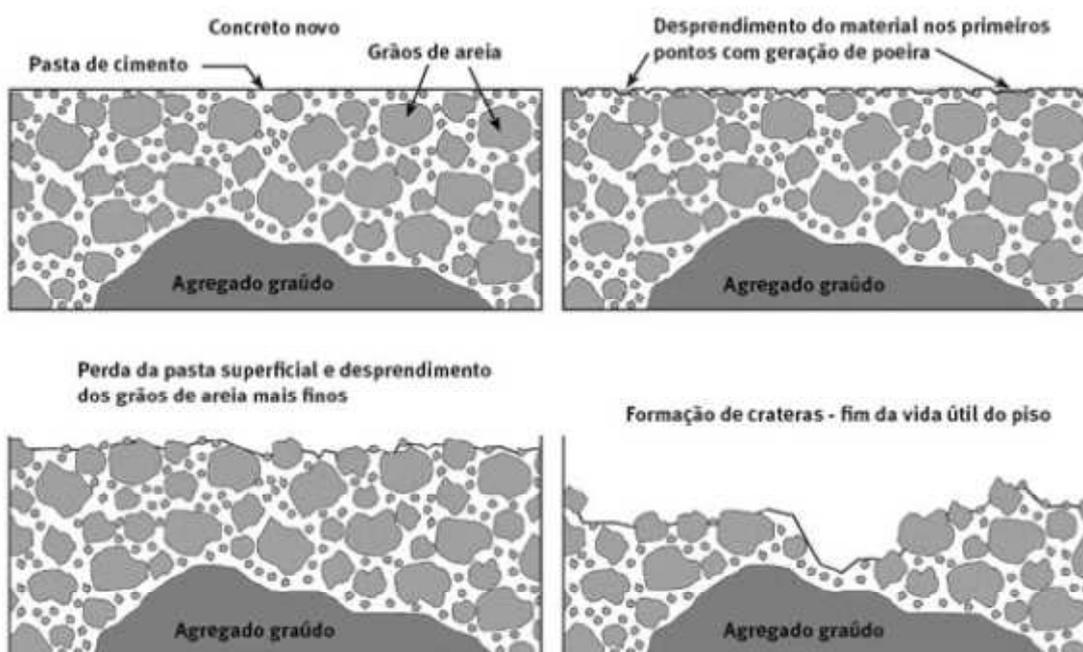


FIGURA 10. PROCESSO DE PERDA DE MATERIAL POR ABRASÃO, COM FORMAÇÃO DE POEIRA EM SUPERFÍCIES DE CONCRETO

Fonte: Oliveira e Lula (2006)

Segundo Silva (2000), o uso de sílica ativa em concretos de alto desempenho é potencialmente benéfico, pois melhora várias propriedades, em particular, a resistência à abrasão. O autor concluiu que a resistência à abrasão dos concretos de elevado desempenho apresentou uma melhoria de cerca de 50% acima dos valores obtidos nos concreto sem sílica ativa.

Segundo McDonald (1980), citado por Kormann (2002), o desempenho do concreto é inversamente proporcional ao tempo de exposição aos agentes causadores da abrasão. Portanto, é necessária a realização de ensaios específicos, para que se possa estimar sua resistência frente a agentes abrasivos. Isto porque a avaliação na prática pode demorar a acontecer, além não ser um método seguro para verificação do desempenho dos mesmos.

Ghafoori e Tays (2010) avaliaram a influência do consumo de cimento, tempo de cura e adição de aceleradores na resistência à abrasão do concreto. Pode-se verificar que o consumo de cimento apresentou um impacto considerável. Para quatro tipos de concreto, com consumo de 386, 445, 505, 564 kg/m³ a resistência à abrasão dos três últimos, utilizando-se ensaio ASTM C 779, foi respectivamente 29%, 89% e 53% maiores do que aquela observada para o menor consumo (386 kg/ m³), mantendo-se uma relação *a/c* e *slump* constantes.

A resistência à compressão é um fator que afeta a resistência à abrasão do concreto (SIDDIQUE, 2003; LI, 2006). Outros fatores que influenciam a resistência à abrasão do concreto são: teor de cimento, relação *a/c*, trabalhabilidade, ar incorporado, tipo de acabamento e condições de cura. A relação entre a resistência à compressão e à abrasão parece ser linear, e o coeficiente de correlação é próximo a 1,0. No trabalho de Kormann (2002) constatou-se que o material com maior resistência à abrasão apresentou também a maior resistência à compressão. Porém, utilizando-se aditivos redutores de água, em que a resistência característica do concreto chega a 100 MPa, a pasta passou a ser a parte resistente à abrasão. A resistência à abrasão também é afetada pelas condições e profundidade de cura, pela trabalhabilidade do concreto e pela dimensão máxima do agregado (SILVA, 2000).

Segundo Hewlett (1998) *apud* Buest Neto (2006), a exsudação, pode ter efeitos diversos no concreto. Conforme já apresentado, se a água de exsudação for remisturada superficialmente durante o processo de acabamento, o resultado será uma superfície pouco resistente à abrasão.

Em pesquisa recente sobre a influência de finos na resistência à abrasão, os altos valores de coeficiente de correlação indicam que a profundidade de desgaste tem uma forte relação com as propriedades de resistência à tração, compressão, assim como o módulo de elasticidade. Geralmente, um aumento na resistência e no módulo de elasticidade deve conduzir a um aumento da resistência à abrasão do concreto (SINGH e SIDDIQUE, 2012).

De uma forma geral, confirmando os estudos apresentados, as recomendações feitas no manual do ACI International (1999), consideram que um concreto resistente à abrasão deve incluir agregados com maior diâmetro possível e de boa resistência à compressão, com sua máxima quantidade e menor relação a/c.

Em termos de utilização de finos, no trabalho de Rashad (2013), os resultados dos testes indicaram que a resistência à compressão, resistência à tração e resistência à abrasão de misturas de concretos aumentaram com o teor de substituição de agregados miúdo por metacaulin. Na mesma direção, LI (2006) apresentou resultados em que a adição de partículas muito finas acarretou um aumento da resistência à abrasão.

Segundo Kurma e Sharma (2014), a incorporação de materiais pozolânicos (em substituição ao cimento) no traço de concretos melhorou a resistência à abrasão. Enquanto as adições de resíduos de carvão não fornecem resultados muito satisfatórios, a adição de sílica ativa mostrou o máximo de benefícios em termos de resistência à abrasão.

Visando avaliar perdas típicas de massa em ensaio de abrasão, o trabalho de Kormann (2002) apresentou resultados com perda média de massa variando de 2,03% até 6,40%, para os corpos de prova (CP) submetidos ao ensaio de abrasão submerso. O ensaio utilizado seguiu a ASTM C1138:1997, com duração de 72 horas, sendo o mesmo ensaio utilizado nesta pesquisa. Os CPs constituídos de um concreto referência foram moldados por completo e, após o acabamento superficial e antes da pega do concreto referência, foi feita uma cavidade de forma côncava, de aproximadamente 20 cm x 5 cm, para que

a aplicação do concreto de reparo fosse executado, e assim realizada a avaliação dos sistemas de reparos.

Seguindo na mesma linha de ensaios realizados com materiais de reparo, sendo feito pela adição de alguns materiais à base de borracha, o trabalho de Freitas (2007), teve como resultado a perda de massa variando entre 4,80% a 5,92%, com o concreto referência apresentando uma resistência à compressão de 32,7 MPa. Galvão (2010) utilizou alguns polímeros como aditivo no concreto para execução de reparos no CP submetido ao ensaio de abrasão submerso, e obteve resultados variando de 3,94% a 8,54% de perda de massa, tendo o concreto referência uma perda de 6,57% e uma resistência a compressão de, aproximadamente, 34 MPa.

Testes similares foram realizados para comparar concretos convencionais e concretos com aditivos e adições do tipo sílica ativa e fibras de aço, para a Barragem Kinzua (ACI INTERNATIONAL, 1999 *apud* KORMANN, 2002). Perdas de massa menores do que 6,5% foram consideradas de bom desempenho a efeitos de abrasão, valores obtidos em concreto convencional com $f_{ck_{28}}$ de 52 MPa.

2.4.1.1 Normas de referência para a resistência à abrasão do concreto

Segundo o documento da Eletrobrás (2003), para estruturas sujeitas à abrasão, o concreto deve ter uma resistência característica mínima de 28 MPa aos 28 dias de idade e, complementa que “(...) *quando usado na soleira do vertedouro, deverá ter relação água/cimento equivalente máxima igual a 0,45. A espessura desta camada não deverá ultrapassar 0,30 m*”.

No estudo de concretos para pisos, deve-se caracterizá-lo como um concreto diferente do empregado em estruturas convencionais, em geral edifícios residenciais ou comerciais. Isto pois apresenta distintas formas de aplicação, possuindo uma grande área superficial em contato com o ar, o que permite uma perda de água muito mais severa. Além disso, o acabamento feito gera características mecânicas na superfície distintas daquelas do restante da

massa de concreto. Como parâmetros mínimos de dosagem para um concreto utilizado em piso, segundo a NBR 7583 (1986), tem-se:

- consumo de cimento: 320 kg/m³;
- teor de argamassa entre 49% e 52%;
- abatimento mínimo entre 80 mm e 100 mm;
- ar incorporado inferior a 3%.

A fixação do consumo mínimo de cimento está associada à resistência superficial do piso, pois na fase de acabamento deve haver uma quantidade de pasta suficiente para o fechamento e o alisamento superficial, embora este fator não seja o único responsável pela resistência à abrasão. Resumidamente, a resistência superficial pode ser correlacionada diretamente com a resistência à compressão, mas pode ser fortemente afetada pela exsudação do concreto, que levaria a uma maior relação água-cimento na superfície, gerando, portanto, uma menor resistência superficial. A fixação do consumo mínimo de cimento é, muitas vezes polêmica, pois não é suportada por uma quantidade significativa de dados (RODRIGUES e MONTARDO, 2002).

Na NBR 12042:1992 está prescrito o método para a determinação do desgaste por abrasão de materiais inorgânicos. O desgaste do corpo de prova deve se dar a partir do atrito entre sua superfície de uso e a superfície de um anel de ferro fundido, que é continuamente abastecido com um material abrasivo. O desgaste por abrasão é determinado pela perda de espessura do corpo de prova.

Existem vários tipos de ensaios para abrasão do concreto, em diversos países. Pode-se citar os ensaios normatizados da American Standards – ASTM, que apresenta seis diferentes métodos de análise de resistência à abrasão do concreto, podendo ser recomendadas as ASTM C 1138:1997 e ASTM C 779:2012. Uma dificuldade para a utilização destes métodos de ensaio para

avaliar a resistência à abrasão é o tempo de ensaio, que é de 72 h (HORSZCZARUK, 2005); como preconizado no método do *U. S. Corps of Engineers* intitulado “*Abrasion – Erosion Resistance of Concrete*”, LCEC 17; na norma chinesa GB/T16925-1997 (método de teste para a resistência à abrasão do concreto e seus produtos); na norma egípcia ES:269-2/2003 e na norma indiana IS: 1237.

Na NBR 6118:2014 responsável por definir os procedimentos para projeto de estruturas de concreto, não define um parâmetro claro para a resistência à abrasão, apenas correlaciona indiretamente a resistência à abrasão com as classes de agressividade, pela da relação a/c. Portanto não há, até o presente momento, uma norma brasileira que defina como dimensionar uma peça estrutural sujeita ao desgaste superficial, ou que estabeleça qual tipo de ensaio deve ser realizado para avaliar se determinado concreto encontra-se apto para ser utilizado, levando-se em consideração a resistência à abrasão do material.

2.4.2 Resistência à compressão

O trabalho de Gonçalves (2005) foi elaborado de forma a comparar uma areia padrão (IPT), com uma areia natural e uma areia artificial, sendo a areia artificial de 2 tipos, um tipo com material pulverulento oriundo da produção (AA) e outra sendo classificada, retirado parte deste material pulverulento (AAC). Como resultado, com a substituição da areia IPT pela areia artificial ocorreu um aumento na resistência à compressão das misturas avaliadas. Este incremento na resistência à compressão foi atribuído ao maior empacotamento promovido pela utilização da areia artificial. Com relação à substituição da areia IPT por AAC, houve uma redução na resistência à compressão. Esta redução foi de 17% para a mistura com relação a/c = 0,4 e de 12% para a mistura com relação a/c = 0,5. A redução do teor de finos da areia artificial, devido à classificação, promoveu uma redução na resistência à compressão em relação às misturas contendo a areia artificial com finos. Neste mesmo trabalho, Gonçalves afirmou que a redução na resistência à compressão foi atribuída à redução do empacotamento das misturas contendo AAC, e ao aumento do módulo de finura, podendo formar uma zona de interface pasta - agregado maior. Portanto, neste

estudo foi possível observar que o material pulverulento aumentou a resistência à compressão do concreto, em relação à utilização de uma areia com menos material pulverulento, tendo a AAC um valor de 1,6% de material pulverulento, enquanto a AA tinha um valor de 14,4% de material pulverulento.

Um importante parâmetro a ser observado é a mudança de comportamento de uma areia de britagem em concretos com diferentes consumos de cimento. As areias de britagem, por possuírem maior teor de finos, podem exercer influência mais relevante na resistência à compressão de concretos com menor consumo de cimento, pois os finos contidos possibilitam o preenchimento de vazios na mistura e um possível refinamento de poros, que proporcionam maiores valores de resistência. Já, em concretos mais ricos, um elevado teor de material pulverulento pode acabar prejudicando a resistência, pois o cimento também atua como material fino e, um excesso deste, pode acabar aumentando a demanda de água (DAMO, 2011). Este mesmo autor completa que, sob a influência do teor de material pulverulento, quando comparados os concretos com areia de basalto VSI lavada e original, pode-se perceber que o consumo de cimento para a areia com maior teor de material pulverulento foi 10% menor para a resistência de 35 MPa e apenas 4,4% menor para 43 MPa. Este comportamento inverte-se na medida em que se aumenta a resistência, onde o concreto com areia original passa a consumir mais cimento, chegando a um consumo de 14,8% maior do que aquele para a areia lavada. Esta mesma tendência foi observada nos consumos de água por metro cúbico de concreto, onde para concretos com menor quantidade de cimento, as areias não lavadas apresentaram um menor consumo de água.

No trabalho de Lang (2006), comparando concretos com areia artificial lavada e não lavada, foi possível constatar que a areia não lavada teve uma resistência à compressão maior em todas as idades e com variações na relação a/c, e esta resistência maior foi creditada devido ao efeito *filler* e à nucleação heterogênea do material pulverulento na mistura.

Segundo Damo (2011), para o teor de material pulverulento, os resultados indicam que o teor ideal irá depender da quantidade de cimento presente no

concreto. Para os resultados obtidos, para resistências em torno de 35 MPa, areias lavadas não trariam nenhum benefício econômico, pelo contrário, aumentariam o consumo de cimento. Do ponto de vista das pedreiras, submeter areias de britagem ao processo de lavagem só seria vantajoso para concretos de maiores resistências. Cabe aqui observar que o material pulverulento das areias foi retirado por intermédio de um único processo no qual, de acordo com os ensaios de granulometria a laser, foi eliminada a fração mais fina do material pulverulento. Assim sendo, não se pode descartar a possibilidade desta fração mais fina, retirada ao lavar, possuir algum efeito semelhante ao da microssílica que, quando presente, pode vir a auxiliar na resistência dos concretos.

Drago (2009) verificou em seu experimento que a simples substituição de areia natural por areia artificial, com valor elevado de finos, resultou em diminuição da compressão em relação ao concreto referência, de acordo com o aumento do percentual de substituição de areia artificial. Este experimento visava manter a mesma trabalhabilidade do concreto, ocorrendo assim, um aumento na relação a/c , o que explica em parte esta perda de resistência. Neste mesmo trabalho foi feito outro experimento, fixando-se a relação a/c ; nesta situação a substituição de areia natural por artificial acarretou em aumento da resistência à compressão em relação ao concreto referência.

2.5 Trabalhos relacionados

Muitos trabalhos foram realizados sobre a utilização de areia artificial para produção de concretos; porém poucos trabalhos foram feitos sobre sua resistência à abrasão, ou relacionando estas duas características, na tentativa de entender quais os efeitos da adição de material pulverulento na resistência à abrasão do concreto.

Entre os estudos feitos sobre a utilização de areia artificial podem ser citados os seguintes trabalhos:

- Lang (2006), que tinha como objetivo comparar a areia britada lavada e não lavada para uso em concreto, através da análise do desempenho de concretos

com o uso desses materiais. Seus objetivos específicos, por sua vez, eram: determinar as características físicas das areias britadas; verificar a diferença das areias antes e após a lavagem; construir diagramas de dosagem para as areias britadas; verificar o comportamento do concreto com as areias britadas no estado fresco; verificar o comportamento do concreto com as areias britadas no estado endurecido.

- Damo (2011), que tinha como objetivo analisar experimentalmente a substituição parcial e integral do agregado miúdo natural por agregado miúdo de britagem, de diferentes origens geológicas e provenientes de diferentes equipamentos de cominuição, em concretos de cimento Portland. E como objetivos específicos: analisar o desempenho da composição de areias de britagem com areias naturais finas para o uso em concreto de cimento Portland; verificar a influência do teor de material pulverulento e da forma dos grãos, considerando cada tipo de rocha e características particulares de cada agregado miúdo; estudar o benefício trazido pelo uso de britadores do tipo “VSI” na produção de areias de britagem destinadas a concretos de cimento Portland, bem como o comportamento dos diferentes tipos de rocha submetidas a este processo. Através desses estudos, o autor visou contribuir para o entendimento da influência do método de cominuição dos agregados, para buscar um melhor aproveitamento do pó de pedra nas pedreiras com um mínimo de desperdício de materiais e, por fim, para que se possa produzir areias de britagem de boa qualidade;

- Klein (2008), que tinha como objetivo principal: estudar a viabilidade técnica da substituição da areia natural pela areia de britagem, em concreto auto-adensável (CAA). E como objetivos específicos realizar uma análise comparativa da auto-adensabilidade apresentada por argamassas e concretos; produzir CAA, com areia de britagem, e resistência à compressão maior ou igual a 30 MPa ($f_{c28} \geq 30$ MPa); produzir CAA, com areia de britagem, e com consumos de cimento entre 300 e 380 kg/m³, considerando, para este cálculo, tanto as adições minerais durante a produção do concreto, como as adições já incorporadas ao cimento utilizado.

- Menossi (2004), que tinha como objetivo: mostrar a viabilidade em se substituir até 100% a areia natural por pó de pedra na mistura do concreto. E objetivos específicos: ensaios de caracterização em todos os materiais envolvidos; avaliar a resistência à compressão axial do concreto aos 7, 28 e 91 dias; avaliar sua consistência pelo abatimento do tronco de cone “abatimento”; avaliar a existência de atividade pozolânica da porção inferior à 0,075mm; avaliar a reatividade do pó de pedra com álcalis do cimento; avaliar a perda de abatimento nos instantes iniciais dos concretos produzidos com pó de pedra; avaliar o módulo de deformação.

- Quiroga and Fowler (2004), que tinham os objetivos: investigar o estado da arte sobre o efeito das características dos agregados, como forma, textura e classificação sobre o desempenho do concreto no estado fresco e endurecido; investigar o estado da arte sobre o uso de areias artificiais, com o percentual de material pulverulento na produção de concreto para diferentes aplicações; investigar o impacto de aditivos químicos e minerais no concreto com material pulverulento; investigar características relevantes do material pulverulento que permitam a sua adequação para concreto; avaliar diversos métodos de dosagem para aperfeiçoar a utilização em concreto com altos índices de material pulverulentos; desenvolver diretrizes para considerar o efeito da forma e textura dos agregados e material pulverulento; avaliar a forma e textura dos agregados utilizando técnicas de análise de imagem e correlacioná-los com a densidade de empacotamento de agregados e do desempenho nas argamassas e no concreto.

Entre estudos feitos sobre a resistência à abrasão do concreto podem ser citados os seguintes trabalhos:

- Silva (2011) que tinha como objetivo avaliar a influência dos principais fatores controláveis constituintes do traço do concreto com relação ao fenômeno do desgaste superficial por abrasão, a partir da análise dos resultados de ensaios de parâmetros mecânicos, de dureza superficial, de exsudação e de resistência à abrasão. Como objetivos específicos o trabalho procurou analisar o efeito do tipo de cimento, da variação do consumo de água, do teor de substituição de

sílica ativa e do teor de adição de microfibras de polipropileno sobre a resistência à compressão e à tração na flexão, dos concretos proporcionados para pisos; analisar o efeito do tipo de cimento, da variação do consumo de água, do teor de substituição de sílica ativa e do teor de adição de microfibras de polipropileno na dureza superficial, na exsudação e na resistência à abrasão, dos concretos proporcionados para pisos; verificar a existência de correlações entre os resultados dos ensaios mecânicos, de dureza superficial e de exsudação com a resistência à abrasão dos concretos.

- Kormann (2002) que tinha como objetivo: pesquisar materiais para reparo e o desenvolvimento de metodologias para aplicação em estruturas aparentes e submersas de concreto, sujeitas a fluxo d'água em alta velocidade e regiões de variação de nível d'água.

- Freitas (2007) onde os objetivos foram a caracterização das propriedades mecânicas do concreto com incorporação de partículas de borracha vulcanizada, e a verificação da possibilidade de utilização deste compósito como material de reparo em patologias geradas por desgaste superficial (abrasão) em superfícies hidráulicas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo está apresentado o plano de experimentos, realizado visando à obtenção de parâmetros para comprovar a viabilidade técnica da utilização dos finos de britagem (material pulverulento), oriundos da areia artificial, como parte do agregado miúdo na produção de concretos convencionais, avaliando sua resistência à abrasão.

3.1 Materiais empregados

Os materiais empregados para os ensaios de argamassa e concreto apresentaram a mesma origem, ou seja, foram produzidos na mesma central de britagem (FIGURA 11), com os agregados sendo gerados de forma simultânea. A data de coleta, porém, ocorreu em dias diferentes para cada material. Todo o agregado utilizado, nas frações graúdas, miúdas e finos, foi de origem calcária.



FIGURA 11. CENTRAL DE PRODUÇÃO DE AREIA E BRITA, JAZIDA RIO BONITO, CAMPO LARGO-PR

Fonte: O autor (2014)

3.1.1 Agregado Miúdo

Os materiais empregados foram secos em estufas, e sua utilização só foi realizada após a estabilização de sua temperatura com a do ambiente.

3.1.1.1 Areia

Na TABELA 6, estão relacionados os ensaios normatizados utilizados para a determinação das características relevantes dos agregados miúdos para esta pesquisa. Os ensaios foram executados no laboratório da concreteira Concrebrás, responsável por fornecer todos os dados sobre a granulometria da areia, conforme TABELA 7. Na FIGURA 12 está apresentada a curva granulométrica da areia utilizada em todos os ensaios desta pesquisa.

TABELA 6. NORMAS UTILIZADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ARTIFICIAL

Norma	Título	Determinação
ABNT NBR NM 248:2003	Agregados - Determinação da composição granulométrica.	Granulometria
NBR 7218:2010	Determinação do teor de argila em torrões nos agregados – Método de ensaio.	Teor de argila em torrões
NBR NM 46:2003	Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.	Material Pulverulento
NBR NM 52:2009	Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Chapman	Massa específica e SSS
NBR NM 30:2001	Agregado miúdo – Determinação da absorção de água	Absorção

Fonte: O autor (2015)

TABELA 7. GRANULOMETRIA DA AREIA ARTIFICIAL ITAMBÉ

Análise granulométrica			
Abertura # (mm)	Massa (g)	% Retido	% Acumulado
50		0,00%	0,00%
38		0,00%	0,00%
32		0,00%	0,00%
25		0,00%	0,00%
19		0,00%	0,00%
12,5		0,00%	0,00%
9,5		0,00%	0,00%
6,3		0,00%	0,00%
4,8		0,00%	0,00%
2,4	44	4,40%	4,40%
1,2	395	39,50%	43,90%
0,6	236	23,60%	67,50%
0,3	143	14,30%	81,80%
0,15	102	10,20%	92,00%
0,075	50	5,00%	97,00%
Fundo	30	3,00%	100,00%
Total	1000		
Módulo Finura		2,90	
D MÁX		2,40	mm
Massa Especifica Seca		2,79	kg/dm ³
Massa Especifica SSS		2,80	kg/dm ³
Massa Unitária		1,37	kg/dm ³
Material Pulverulento		3,0%	
Teor Argila		0,00%	

Fonte: Autor (2014)

3.1.1.1 Material pulverulento

O material pulverulento utilizado neste estudo foi obtido no processo de produção da areia artificial na jazida Rio Bonito, na cidade de Campo Largo.

O processo de produção da areia artificial utilizada é por via úmida. Após a rocha passar por um britador de impacto, foi adicionada água ao processo. Na sequência o material é introduzido em uma sequência de peneiras, separando a

brita e a areia do material pulverulento, que fica em suspensão na água utilizada no processo.

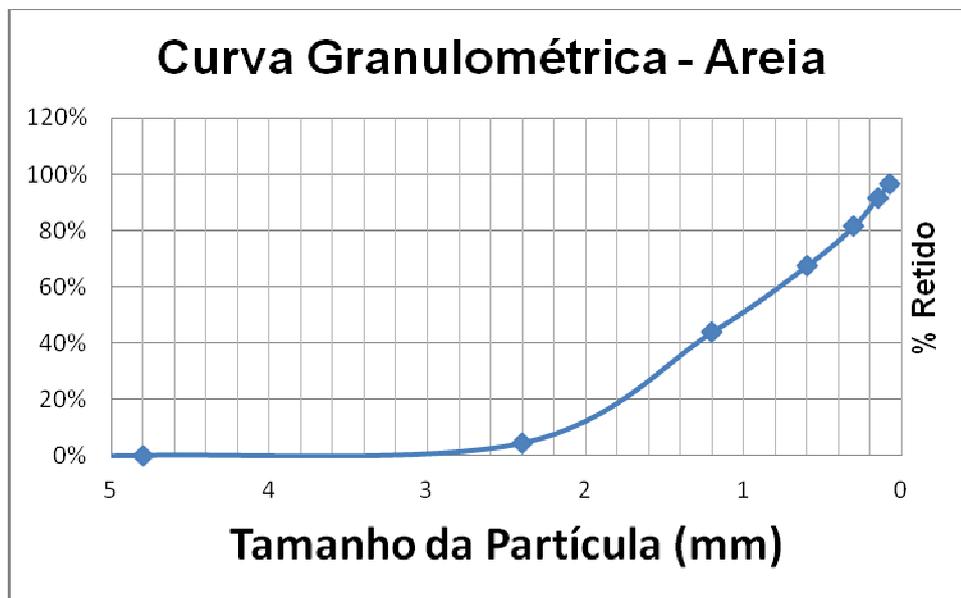


FIGURA 12. CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO

Fonte: O autor (2015)

A água foi utilizada por recirculação e, portanto, no momento em que é adicionada ao processo, acaba carreando o material pulverulento. A água contendo o material em suspensão é direcionada até uma bacia de decantação (FIGURA 2).

Após a decantação, o material fino foi coletado e utilizado. Foi efetuada a secagem em estufa, por 72 h, com temperatura, em torno de 60 °C. Após a secagem, devido à formação de grandes torrões, com diâmetro variando entre 20 a 100 mm, era necessário destorroar o material manualmente. Na sequência, para os ensaios com argamassa, foi realizado o peneiramento do material na Peneira #200 (0,075 mm) (FIGURA 13). Posteriormente, foi realizado novo peneiramento, utilizando-se peneira #10 (2,0 mm) em substituição à peneira #200, de forma a comparar se o peneiramento pode influenciar na trabalhabilidade de uma argamassa de mesmo traço, a partir dos ensaios *flow table* e cone de Kantro.



FIGURA 13. MATERIAL PULVERULENTO DURANTE PROCESSO DE PENEIRAMENTO

Fonte: O autor (2014)

Por se tratar de material muito fino, não foi possível determinar o tamanho das partículas pelo método convencional do peneiramento, sendo necessário realizar a curva granulométrica pelo ensaio a laser, conforme pode ser observado na TABELA 8. A curva granulométrica pode ser visualizada na FIGURA 15. Este ensaio foi realizado no laboratório LAMIR, da Universidade Federal do Paraná, localizado no Centro Politécnico, em Curitiba.

Na FIGURA 14 é possível observar o formato dos grãos do material pulverulento utilizado. Visualmente os grãos apresentaram um formato mais cúbico, do que lamelar.

TABELA 8. GRANULOMETRIA DO MATERIAL PULVERULENTO

Análise granulométrica				
Malhas (Tyler)	Abertura (mm)	massa (g)	%retido	%acumulado
5	4	1,94	2,42%	2,42%
9	2	1,03	1,29%	3,71%
16	1	0,68	0,85%	4,56%
32	0,5	0,71	0,89%	5,45%
60	0,25	1,73	2,16%	7,61%
Laser	0,18	0,46	0,57%	8,19%
Laser	0,09	11,87	14,83%	23,02%
Laser	0,063	7,38	9,22%	32,24%
Laser	0,043	4,72	5,90%	38,14%
Laser	0,036	2,44	3,05%	41,19%
Laser	0,028	4,41	5,51%	46,70%
Laser	0,02	6,59	8,24%	54,94%
Laser	0,01	11,8	14,75%	69,68%
Laser	0,006	6,33	7,91%	77,59%
Laser	0,003	6,58	8,22%	85,82%
Laser	0,001	7,23	9,04%	94,85%
Laser	0	4,12	5,15%	100,00%
	Total	80,02		

Fonte: Autor (2014)

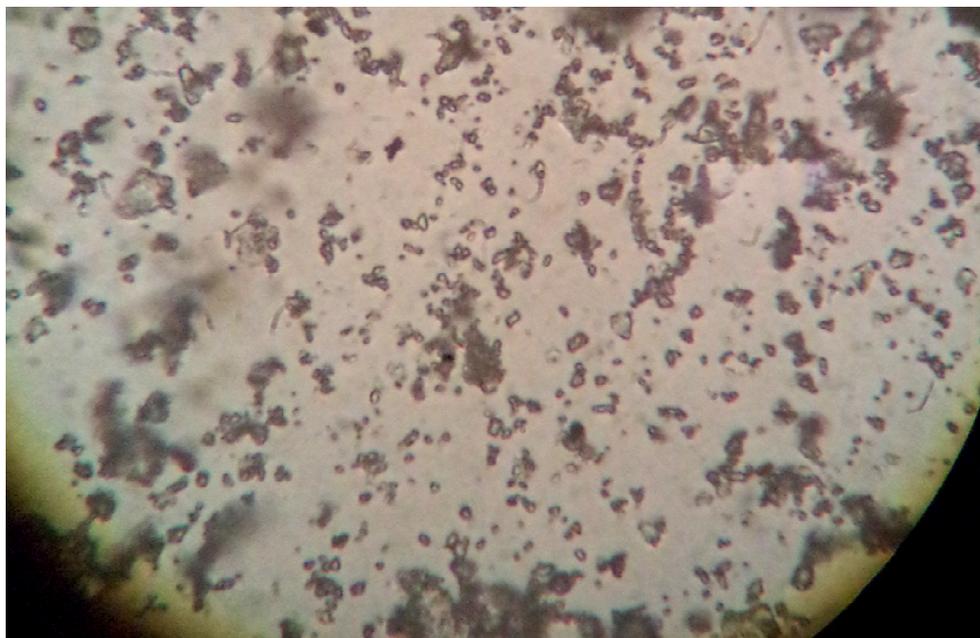


FIGURA 14. FORMATO DOS GRÃOS DE MATERIAL PULVERULENTO.
FOTOMICROGRAFIA AMPLIADA 1000X

Fonte: O autor (2015)

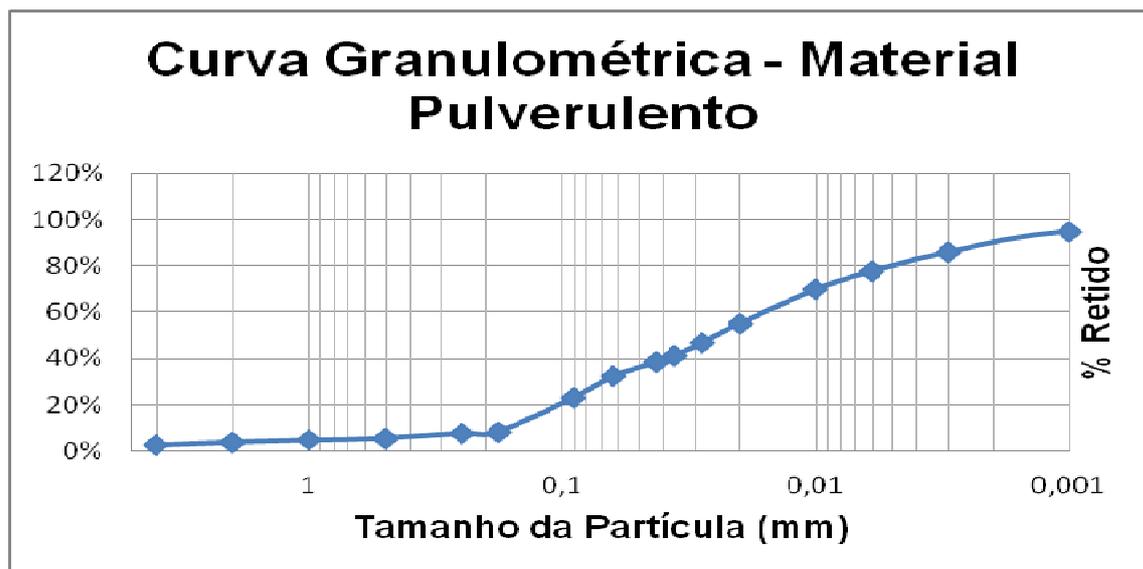


FIGURA 15. CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL PULVERULENTO

Fonte: O autor (2015)

3.1.2 Agregado graúdo

Na TABELA 9 estão relacionados os ensaios normatizados utilizados para a determinação das características relevantes do agregado graúdo para esta pesquisa. Os ensaios foram executados no laboratório da concreteira Concrebrás, responsável por fornecer todos os dados sobre a granulometria da brita 1, conforme apresentado na TABELA 10.

TABELA 9. NORMAS UTILIZADAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

Norma	Título	Determinação
ABNT NBR NM 248:2003	Agregados - Determinação da composição granulométrica	Granulometria
NBR 7218:2010	Determinação do teor de argila em torrões nos agregados – Método de ensaio	Teor de argila em torrões
NBR NM 46:2003	Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.	Material Pulverulento
NBR NM 53:2009	Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.	Absorção, massa específicas SSS e seca

Fonte: O autor (2015)

TABELA 10. GRANULOMETRIA BRITA 1

Análise Granulométrica			
Abertura # (mm)	Massa (g)	% Retido	% Acumulado
50		0,00%	0,00%
38		0,00%	0,00%
32		0,00%	0,00%
25		0,00%	0,00%
19	591	11,82%	11,82%
12,5	2346	46,92%	58,74%
9,5	1429	28,58%	87,32%
6,3	543	10,86%	98,18%
4,8	4	0,08%	98,26%
2,4		0,00%	98,26%
1,2		0,00%	98,26%
0,6		0,00%	98,26%
0,3		0,00%	98,26%
0,15		0,00%	98,26%
0,075		0,00%	98,26%
Fundo	87	1,74%	100,00%
Total	5000		
Modulo Finura		6,94	
D MÁX		25,00	mm
Massa Especifica Seca		2,81	Kg/dm ³
Massa Especifica SSS		2,80	Kg/dm ³
Absorção		0,04%	
Massa Unitária		1,45	Kg/dm ³
Material Pulverulento		1,30%	
Teor Argila		0,00%	

Fonte: Autor (2014)

3.1.3 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP-V-ARI RS. A análise química e física deste material pode ser observada na TABELA 11.

TABELA 11. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (A) E FÍSICAS (B) DO CIMENTO CP-V-ARI RS

Data	QUÍMICAS (A)									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	4,42	18,7	2,6	60,4	4,75	2,84	3,34	0,81	0,6	0,64
3	4,34	18,8	2,64	60,5	4,77	2,9	3,1	0,95	0,82	0,69
7	4,35	18,5	2,61	60,1	4,63	2,85	3,12	0,87	0,66	0,6
9	4,28	18,4	2,59	60,2	4,63	2,88	3,03	0,93	0,7	0,62
13	4,26	18,7	2,76	61,2	4,53	2,89	3,05	0,93	0,88	0,59
15	4,22	18,4	2,65	60	4,37	2,82	2,97	0,67	0,68	0,58
17	4,29	18,8	2,58	60,4	4,61	2,75	3,23	1,15	0,98	0,62
21	4,21	19	2,62	60,7	4,55	2,74	3,08	0,81	0,76	0,6
23	4,31	18,6	2,58	60,1	4,58	2,86	3,13	0,64	0,64	0,6
27	4,26	18,5	2,61	60,1	4,39	2,86	2,84	0,53	0,79	0,63
29	4,29	18,5	2,65	60,3	4,33	2,83	2,99	0,81	0,67	0,63
31	4,29	18,5	2,66	60	4,49	2,8	3,05	0,81	0,75	0,61
Média	4,29	18,6	2,63	60,3	4,55	2,84	3,08	0,83	0,74	0,62
Sd	0,06	0,18	0,05	0,35	0,14	0,05	0,13	0,16	0,11	0,03
Min	4,21	18,4	2,58	60	4,33	2,74	2,84	0,53	0,6	0,58
Max	4,42	19	2,76	61,2	4,77	2,9	3,34	1,15	0,98	0,69

Data	FÍSICAS (B)										
	Exp. Quente	Tempo de Pega (h:min)		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão (MPa)			
	mm	Início	Fim	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
1	0	02:20	03:00	28,5	4.040	0,8	3,9	22	37	43	52
3	0,5	02:50	03:30	27,4	4.020	0,9	3,5	23	37	43	51
7	0,5	02:55	03:45	27,4	4.040	0,6	3,7	22	37	42	50
9	0,5	02:35	03:00	27,6	3.980	0,5	3,6	24	37	42	50
13	1	02:40	03:15	27,8	3.980	0,6	3,9	21	36	43	49
15	0,5	02:20	03:00	28	4.130	0,4	3,6	23	35	42	49
17	0,5	02:50	03:30	28,4	4.100	0,8	3,6	22	35	41	49
21	0	02:45	03:30	27,8	4.110	0,5	3,6	22	35	41	49
23	0,5	03:20	04:00	28	4.100	0,5	3,3	22	37	42	51
27	1	02:40	03:15	28,2	4.050	0,5	3,5	23	37	42	50
29	0	02:40	03:15	28,5	4.090	0,6	3,4	22	37	43	51
31	0	02:40	03:15	28,2	4.090	0,6	3,3	22	36	42	50
Média	0,42	02:43	03:21	28	4.061	0,6	3,6	22	36	42	50
Sd	0,36	00:16	00:19	0,39	50,17	0,2	0,2	0,6	1	0,8	0,9
Min	0	02:20	03:00	27,4	3.980	0,4	3,3	21	35	41	49
Max	1	03:20	04:00	28,5	4.130	0,9	3,9	24	37	43	52

Fonte: Itambé Cimentos (2014)

3.1.4 Aditivo plastificante

Foram utilizados dois tipos de aditivos redutores de água ao longo da pesquisa: um aditivo considerado plastificante e outro considerado superplastificante, ambos da fabricante Grace.

O aditivo plastificante utilizado foi da linha Mira qual, de acordo com o fabricante, é um aditivo polifuncional desenvolvido como redutor de água de alta eficiência. Em altos teores, tem com a propriedade de não promover importantes retardos no tempo de início de pega, sendo que, não é apresentado nesta pesquisa que comprove tal propriedade. Esta propriedade é importante para produção de concreto visando à utilização na execução de pisos. Este aditivo apresenta uma massa específica igual a $1,16 \text{ g/cm}^3$, tendo, em sua fórmula, componentes que permitem um melhor acabamento superficial e de controle de exsudação.

O aditivo superplastificante utilizado foi da linha Tec-Flow, a base de policarboxilatos, usado como redutores de água de alta eficiência. A massa específica deste material foi de $1,10 \text{ g/cm}^3$.

3.2 Parâmetros gerais analisados

3.2.1 Estudo com argamassa

A primeira etapa desta pesquisa consistiu em entender o comportamento da adição de material pulverulento em sua mistura à base de material cimentício, assim como em determinar o comportamento de um aditivo plastificante em uma mistura com grande quantidade de material fino. A análise foi efetuada a partir de estudos em argamassa, variando o teor da fase fina do agregado.

O traço Inicial da argamassa utilizada foi elaborado a partir do traço de concreto disponibilizado por uma concreteira, sendo este traço de concreto utilizado em larga escala para execução de pisos em concreto. Este traço será mais bem detalhado na parte de dosagem de concreto, no item 3.2.2.1. A

quantidade de material pulverulento variou 0%, 6%, 12% e 18%, em substituição em peso do agregado miúdo.

O estudo em argamassa no estado fresco foi realizado utilizando-se como parâmetros os ensaios de consistência *flow table* NBR 13276:2005 e cone de Kantro, ilustrado na FIGURA 16.

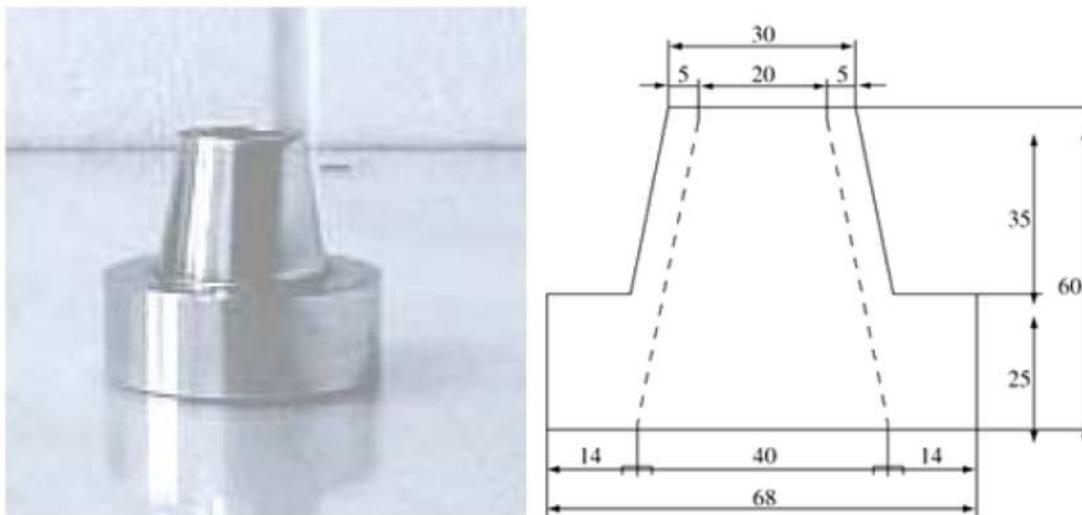


FIGURA 16. VISTA GERAL E DIMENSÕES DO CONE DE KANTRO UTILIZADO NOS ENSAIOS

Fonte: Castro e Liborio (2004)

Os ensaios foram executados inicialmente em duas etapas. Na primeira etapa (ET1), a quantidade de plastificante foi definida com base apenas no peso de cimento na intenção de avaliar a perda de trabalhabilidade da argamassa, a partir dos dois ensaios mencionados.

Na segunda etapa (ET2), a quantidade de aditivo plastificante foi definida com base no peso de cimento + o peso de pó (material pulverulento). Nesta etapa, esperou-se compreender como o aditivo age sobre o pó, ou seja, se apresenta efeito similar àquele que possui sobre o cimento. Todos os traços para estas duas etapas encontram-se descritos na TABELA 12.

Posteriormente, em uma terceira etapa (ET3) dos ensaios com argamassa, foi realizada a substituição do aditivo plastificante pelo aditivo

superplastificante. Nesta etapa, também se adicionou sílica ativa em todos os traços, na substituição proporcional de 8,0% do peso de cimento. A quantidade de aditivo foi baseado na soma do peso de cimento, material pulverulento e sílica ativa. Os traços para esta etapa encontram-se descritos na TABELA 13.

TABELA 12. TRAÇOS DA ARGAMASSA - 1º E 2º ETAPAS

Identificação amostras	AREIA (kg)	PÓ (kg)	CIMENTO (kg)	ÁGUA (kg)	PLASTIFICANTE (kg)	
					ET1	ET2
C1	100%	0%	100%	100%	-	-
	1,5000	0,0000	0,5226	0,3264	-	-
C2	94%	6%	100%	100%	-	-
	1,4100	0,0900	0,5226	0,3264	-	-
C3	88%	12%	100%	100%	-	-
	1,3200	0,1800	0,5226	0,3264	-	-
C4	82%	18%	100%	100%	-	-
	1,2300	0,2700	0,5226	0,3264	-	-
C5	100%	0%	100%	100%	-	-
	1,5000	0,0000	0,5226	0,3264	0,0031354	0,0031354
C6	100%	0%	100%	100%	-	-
	1,5000	0,0000	0,5226	0,3264	0,0062708	0,0062708
C7	100%	0%	100%	100%	-	-
	1,5000	0,0000	0,5226	0,3264	0,0094063	0,0094063
C8 / CP1	94%	6%	100%	100%	-	-
	1,4100	0,0900	0,5226	0,3264	0,0031354	0,0036754
C9 / CP2	94%	6%	100%	100%	-	-
	1,4100	0,0900	0,5226	0,3264	0,0062708	0,0073508
C10 / CP3	94%	6%	100%	100%	-	-
	1,4100	0,0900	0,5226	0,3264	0,0094063	0,0110263
C11 / CP4	88%	12%	100%	100%	-	-
	1,3200	0,1800	0,5226	0,3264	0,0031354	0,0042154
C12 / CP5	88%	12%	100%	100%	-	-
	1,3200	0,1800	0,5226	0,3264	0,0062708	0,0084308
C13 / CP6	88%	12%	100%	100%	-	-
	1,3200	0,1800	0,5226	0,3264	0,0094063	0,0126463
C14 / CP7	82%	18%	100%	100%	-	-
	1,2300	0,2700	0,5226	0,3264	0,0031354	0,0047554
C15 / CP8	82%	18%	100%	100%	-	-
	1,2300	0,2700	0,5226	0,3264	0,0062708	0,0095108
C16 / CP9	82%	18%	100%	100%	-	-
	1,2300	0,2700	0,5226	0,3264	0,0094063	0,0142663

Fonte: O autor (2015)

Na quarta e última etapa (ET4), foi realizado apenas o ensaio de Cone de Kantro, analisando a diferença na utilização do material pulverulento peneirado na peneira #200 (abertura 0,075 mm), em comparação ao material peneirado na peneira #10 (abertura 2,0 mm). Os traços utilizados nesta etapa foram os mesmos descritos na TABELA 13, da ET3.

De modo a diminuir a interferência do laboratorista, foi elaborado um protocolo de ensaio, com a mistura dos materiais e a execução das etapas apresentando a seguinte sequência:

- todo material seco era colocado na argamassadeira, misturando-se por 30 s;
- com uma espátula o material aderido à cuba era raspado e nova homogeneização dos materiais secos era levada a efeito por 30 s;
- na sequência, adicionava-se, aproximadamente, 90% de água, misturando-se por 30 s;
- a seguir, era adicionado o aditivo plastificante juntamente com o restante da água, e por mais 30 s era realizada a homogeneização;
- novamente com o auxílio da espátula era realizada a raspagem do material aderido à cuba, que era misturado por mais 60 s.

O primeiro ensaio de consistência realizado foi o *flow table* (FIGURA 17) executado conforme a NBR 13276:2005. Inicialmente foi realizado o enchimento do cone em três camadas adensadas. Retirou a forma do cone e, na sequência, iniciaram-se os 30 golpes na mesa. Ao final foi medido o diâmetro do espalhamento em três direções diferentes.

TABELA 13. TRAÇOS DA ARGAMASSA – 3ª ETAPA

Identificação amostras	AREIA (kg)	PÓ (kg)	CIMENT O (kg)	ÁGUA (kg)	SUPER PLASTIFICANT E (kg)	SÍLICA ATIVA (kg)
S1	100%	0%	92%	100%	0,30%	8,00%
	1,5000	0,0000	0,4808	0,3264	0,0015577	0,0384640
S2	100%	0%	92%	100%	0,60%	8,00%
	1,5000	0,0000	0,4808	0,3264	0,0031156	0,0384640
S3	100%	0%	92%	100%	0,90%	8,00%
	1,5000	0,0000	0,4808	0,3264	0,0046734	0,0384640
S4	100%	0%	92%	100%	1,20%	8,00%
	1,5000	0,0000	0,4808	0,3264	0,0057696	0,0384640
S5	94%	6%	92%	100%	0,30%	8,00%
	1,4100	0,0900	0,4808	0,3264	0,0018278	0,0384640
S6	94%	6%	92%	100%	0,60%	8,00%
	1,4100	0,0900	0,4808	0,3264	0,0036556	0,0384640
S7	94%	6%	92%	100%	0,90%	8,00%
	1,4100	0,0900	0,4808	0,3264	0,0054834	0,0384640
S8	94%	6%	92%	100%	1,20%	8,00%
	1,4100	0,0900	0,4808	0,3264	0,0073112	0,0384640
S9	88%	12%	92%	100%	0,30%	8,00%
	1,3200	0,1800	0,4808	0,3264	0,0020978	0,0384640
S10	88%	12%	92%	100%	0,60%	8,00%
	1,3200	0,1800	0,4808	0,3264	0,0041956	0,0384640
S11	88%	12%	92%	100%	0,90%	8,00%
	1,3200	0,1800	0,4808	0,3264	0,0062934	0,0384640
S12	88%	12%	92%	100%	1,20%	8,00%
	1,3200	0,1800	0,4808	0,3264	0,0083912	0,0384640
S13	82%	18%	92%	100%	0,30%	8,00%
	1,2300	0,2700	0,4808	0,3264	0,0023678	0,0384640
S14	82%	18%	92%	100%	0,60%	8,00%
	1,2300	0,2700	0,4808	0,3264	0,0047356	0,0384640
S15	82%	18%	92%	100%	0,90%	8,00%
	1,2300	0,2700	0,4808	0,3264	0,0071034	0,0384640
S16	82%	18%	92%	100%	1,20%	8,00%
	1,2300	0,2700	0,4808	0,3264	0,0094712	0,0384640

Fonte: O autor (2015)



FIGURA 17. EXECUÇÃO DO ENSAIO FLOW TABLE

Fonte: O autor (2014)

O segundo ensaio realizado foi o cone de Kantro, conforme a FIGURA 19. Neste ensaio foi realizado o preenchimento do cone em uma única camada. No momento que se retirava o cone, dava-se início à contagem do tempo, realizando-se três medições do diâmetro do espalhamento em períodos diferentes: 30 s, 90 s e 150 s.



FIGURA 18. EXECUÇÃO DO ENSAIO DE CONE DE KANTRO

Fonte: O autor (2014)

Nos dois ensaios realizados foi possível observar o efeito do material pulverulento na trabalhabilidade da argamassa, definindo-se o efeito do aditivo plastificante em relação ao material pulverulento.

3.2.2 Estudo com concreto

3.2.2.1 Dosagens

Utilizando-se como base o traço de concreto considerado referência (CR), foram elaborados os demais traços em massa utilizados neste estudo. O traço

CR foi baseado no estudo de traço comercial, e correspondeu a 1: 3,16: 3,80: 0,62: 0,008. A resistência característica f_{ck} do traço foi de 30 MPa, aos 28 dias, com um *slump* de 100 ± 20 mm e com consumo de cimento de 280kg/m^3 . Este traço é comumente utilizado na execução de pisos industriais em larga escala, portanto servindo de parâmetro para estudo de resistência à abrasão.

No traço referência estudado, o agregado miúdo foi composto por areia natural (29%) e areia artificial (71%). Como o interesse deste estudo é apenas em areia artificial, foi realizada a substituição total da areia natural por artificial.

A partir deste traço foi elaborado o planejamento de todos os ensaios executados, como pode ser observado na TABELA 14. Esta etapa do estudo teve como objetivo analisar o impacto da adição de material pulverulento no concreto. A variação da quantidade de material pulverulento utilizada no concreto seguiu os mesmos percentuais utilizados no estudo com argamassas, ou seja, 0%, 6%, 12% e 18% de substituição em relação à quantidade de agregado miúdo.

Outro parâmetro analisado na pesquisa foi a relação a/c, que é colocado como parâmetro especificado em algumas normas e recomendações, como foi anteriormente apresentado. Foi realizada a variação de três relações a/c, 0,45, 0,55 e 0,65.

O abatimento do concreto foi mantido constante, sendo realizados os ajustes necessários pela utilização de um percentual maior de aditivo plastificante ou caso necessário, utilizando-se um aditivo superplastificante para manter o abatimento constante.

3.2.2.2 Resistência à compressão

Para os ensaios com os concretos, a metodologia para determinação da resistência à compressão seguiu a descrição do ensaio da NBR 5739:2007, onde os corpos de prova (CPs) foram moldados de acordo com os procedimentos da NBR 5738:2003.

Para cada traço foram moldados 9 corpos de prova, com dimensões iguais a (10 x 20) cm, sendo rompidos 3 corpos de prova após 7 dias, outros 3 após 14 dias, e os 3 últimos aos 28 dias, explicitando, dessa forma, a evolução de ganho de resistência do concreto.

3.2.2.3 Resistência à abrasão

Os ensaios de abrasão foram realizados de acordo com o método submerso, conforme ASTM C 1138:1997. Os ensaios foram executados em corpos de prova de concreto com diâmetro de 30 cm e altura de 10 cm (FIGURA 19). A utilização da norma americana como referência, deve-se à falta de uma norma brasileira que contemple este ensaio e/ ou que seja específica para analisar e balizar definições de resistência à abrasão do concreto. Este ensaio foi utilizado em outras duas dissertações do Programa de Pós Graduação em Engenharia da Construção Civil, o que permite comparações para validação externa (KORMANN, 2002; FREITAS, 2007).



FIGURA 19. FORMA PARA A MOLDAGEM DOS CPS PARA ENSAIO DE ABRASÃO

Fonte: O autor (2014)

TABELA 14. RESUMO DA DOSAGEM PARA TRAÇOS DE CONCRETO UTILIZADOS NESTE ESTUDO

Nº do ensaio	Característica do traço	Consumo material (Kg) por m ³ de concreto							
		Cimento	Brita	Areia	Pó	Água	Aditivo	A/C	Slump
ENS. 1	Concreto Referencia (CR)	100%	100%	100%	0%	100%	0,8%		
		280,00	1065,00	887,00	0,00	175,00	2,24	0,63	10+-2
ENS. 2	0 % de pó na areia	100%	100%	100%	0%	72%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	887,00	0,00	126,00		0,45	10+-2
ENS. 3	6 % de pó na areia	100%	100%	94%	6%	72%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	833,78	53,22	126,00		0,45	10+-2
ENS. 4	12 % de pó na areia	100%	100%	88%	12%	72%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	780,56	106,44	126,00		0,45	10+-2
ENS. 5	18 % de pó na areia	100%	100%	82%	18%	72%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	727,34	159,66	126,00		0,45	10+-2
ENS. 6	0 % de pó na areia	100%	100%	100%	0%	88%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	887,00	0,00	154,00		0,55	10+-2
ENS. 7	6 % de pó na areia	100%	100%	94%	6%	88%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	833,78	53,22	154,00		0,55	10+-2
ENS. 8	12 % de pó na areia	100%	100%	88%	12%	88%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	780,56	106,44	154,00		0,55	10+-2
ENS. 9	18 % de pó na areia	100%	100%	82%	18%	88%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	727,34	159,66	154,00		0,55	10+-2
ENS. 10	0 % de pó na areia	100%	100%	100%	0%	104%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	887,00	0,00	182,00		0,65	10+-2
ENS. 11	6 % de pó na areia	100%	100%	94%	6%	104%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	833,78	53,22	182,00		0,65	10+-2
ENS. 12	12 % de pó na areia	100%	100%	88%	12%	104%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	780,56	106,44	182,00		0,65	10+-2
ENS. 13	18 % de pó na areia	100%	100%	82%	18%	104%	0,8% +-		
		280,00	1065,00	727,34	159,66	182,00		0,65	10+-2

Fonte: O autor (2015)

Segundo Horszczaruk (2005) o método ASTM C 1138 (1997) se mostrou adequado para a determinação da resistência à abrasão de concreto com uma resistência à compressão aos 28 dias, em suas pesquisas.

O método do ensaio baseou-se na medida da perda de massa ocasionada nos CPs pela fricção de esferas de aço inseridas em meio aquoso e dispostas sobre a superfície do CP, em função do tempo de exposição. O ensaio preconiza pesagens dos CPs antes e após a realização do ensaio, visando-se avaliar a perda de massa em função do tempo.

De acordo com a já citada ASTM C 1138 (1997), este método de teste pretende simular qualitativamente o comportamento da água em movimento espiral contendo sólidos suspensos e transportados, os quais produzem a abrasão no concreto. O teste permite comparar de forma indireta a resistência do concreto à abrasão de concretos diferentes. Para o desgaste é necessário o uso de cargas abrasivas, que são 70 bolas de aço com diâmetro variando de 12,6 a 25,4 mm, com textura lisa e sem marcas de emenda de molde. O equipamento é apresentado na FIGURA 20.

O corpo-de-prova permanece em ensaio por 72 h, sendo efetuadas medições de sua massa no intervalo de 24 h, totalizando 4 medições (incluindo a medição a zero, caracterizando a massa inicial). As medições correspondem à massa do CP saturado no ar e massa submersa.



FIGURA 20. EQUIPAMENTO PARA ENSAIO À ABRASÃO DO CONCRETO

Fonte: O autor (2014)

3.2.2.4 Resistência à tração

A resistência à tração pode ser medida por 3 diferentes ensaios normalizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão. Nesta pesquisa foi utilizado o ensaio de tração por compressão diametral.

O ensaio de tração por compressão diametral é o mais utilizado para quantificar a tração no concreto. Para sua realização, um CP cilíndrico de (10 x 20) cm é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa com o auxílio de duas hastes de madeira sendo aplicada uma força até sua ruptura por tração indireta (FIGURA 21).

O ensaio de resistência à tração por compressão foi realizado segundo a ABNT NBR 7222:2010 e no 28º dia de idade em 3 CPs para cada traço.

Os CPs foram moldados seguindo o mesmo procedimento da NBR 5738:2003. O ensaio foi realizado no Laboratório Daher - Tecnologia em Engenharia Ltda.

A resistência à compressão e a resistência à tração estão intimamente relacionadas, não havendo, porém, uma proporcionalidade direta (METHA e MONTEIRO, 2008). Segundo NEVILLE (1997), quando ocorre um aumento na resistência à compressão também ocorre um aumento na resistência à tração, porém numa taxa menor. Ou seja, ocorre uma redução da relação resistência a tração / resistência à compressão à medida que ocorre um incremento na resistência à compressão. A relação entre resistência à tração uniaxial e resistência à compressão gira em torno de 7% a 11% (METHA e MONTEIRO, 2008)



FIGURA 21. CP ROMPIDO DURANTE ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

Fonte: O autor (2014)

3.2.2.5 Abatimento

O método utilizado para medir a consistência da mistura foi o de abatimento de tronco de cone (slump test) realizado segundo a NBR NM 67:1998. Este ensaio é o mais utilizado para medir a trabalhabilidade de um concreto considerado convencional.

Para o abatimento do concreto, cada traço foi verificado, analisando-se a necessidade de adição de aditivo plastificante ou superplastificante, simultaneamente, foi verificada a superfície do concreto, para garantir teor de argamassa que permita a colocação e a vibração adequadas durante a moldagem dos corpos de prova. Esta verificação constante foi realizada no intuito de chegar ao abatimento do concreto do traço original, verificando-se a possibilidade de obter-se concreto com trabalhabilidade igual ou maior, mesmo adicionando-se material pulverulento ao traço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do estudo com argamassas

O estudo com argamassas serviu de base para o entendimento do efeito do pó e, a partir destes ensaios, foi possível elaborar o plano de experimentos para o estudo com concreto. Deve-se ressaltar que em estudos descritos na literatura, a maioria dos autores afirma que o pó diminui a trabalhabilidade do concreto, o que indica a necessidade de se analisar previamente os efeitos do pó com os aditivos utilizados. No estudo com argamassa foi possível realizar a análise da trabalhabilidade adicionando-se material pulverulento e variando a quantidade de aditivo plastificante e superplastificante.

Os resultados dos ensaios *Flow Table* referentes às etapas 1 e 2, onde a quantidade de aditivo plastificante era proporcional à massa de cimento e à massa de cimento mais a de pó, respectivamente, estão apresentados na FIGURA 22. Em ambos os casos, o aumento da quantidade de plastificante levou ao aumento do espalhamento da argamassa na mesa. O ganho de espalhamento, para alguns percentuais de material pulverulento, teve uma variação linear de acordo com o aumento da quantidade de aditivo.

Comparando-se as argamassas nos extremos das quantidades utilizadas de aditivo, verificou-se que o ganho de espalhamento obtido com 1,8% de aditivo foi 20% maior em relação à ausência (0%) de aditivo nas amostras. Porém, adicionando-se 18% de finos, este ganho foi 33% maior para argamassa em que a quantidade de aditivo era proporcional apenas à massa de cimento, e 37% para argamassa com aditivo proporcional à massa de cimento mais finos, como pode ser observado na FIGURA 22.

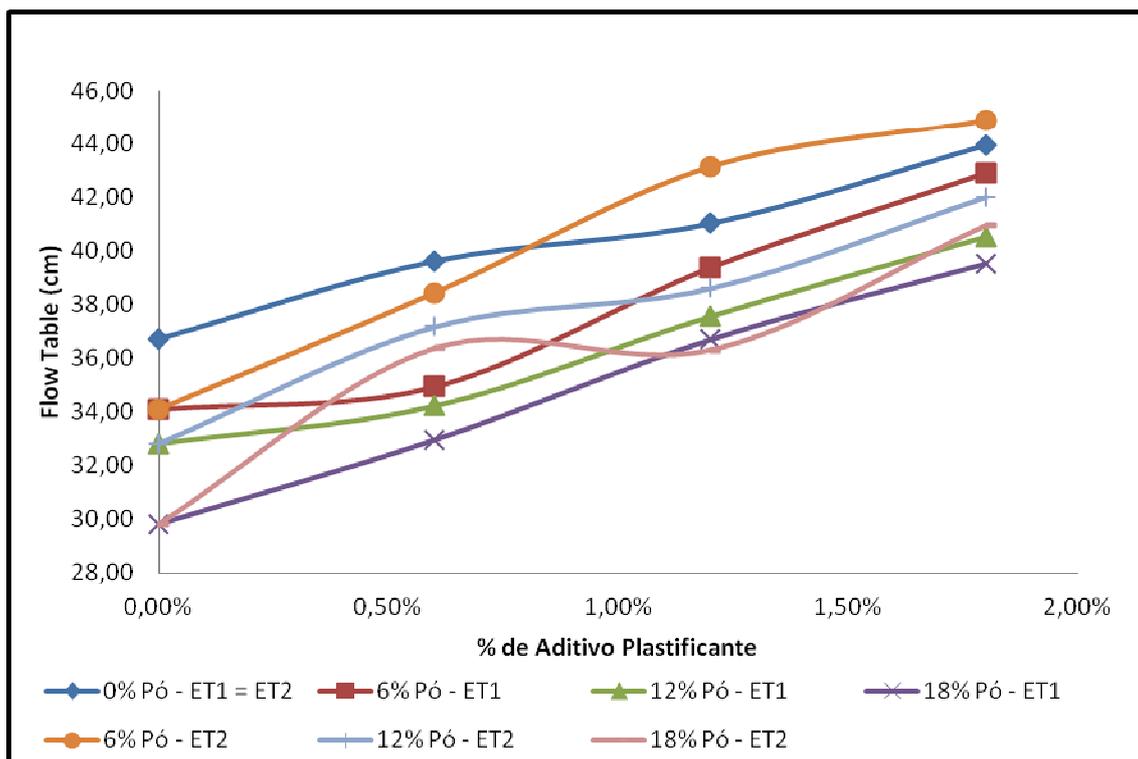


FIGURA 22. RESULTADOS PARA FLOW TABLE PARA A VARIAÇÃO DE QUANTIDADE DE FINOS NAS ETAPAS 1 E 2

Fonte: O autor (2015)

De acordo com os resultados apresentados na TABELA 15, constata-se que o aditivo plastificante, além de agir sobre o cimento, apresentou, também um efeito sobre o material pulverulento, sendo que a interação entre o aditivo e o material fino resulta em ganho de trabalhabilidade. Esta interação foi da pela análise estatística de variância ANOVA (TABELA 16), realizada utilizando-se os dados da ET2.

TABELA 15. COMPARAÇÃO DO GANHO DE ESPALHAMENTO EM RELAÇÃO À QUANTIDADE DE ADITIVOS

Percentual de Pó	Espalhamento		Percentual de ganho
	0% aditivo (cm)	1,8% aditivo (cm)	
0% Pó - ET1 = ET2	36,73	43,97	20%
18% Pó - ET1	29,83	39,53	33%
18% Pó - ET2	29,83	40,93	37%

Fonte: O autor (2015)

TABELA 16. TABELA ANOVA PARA ESPALHAMENTO NO ENSAIO *FLOW TABLE*, NA ET2

Tabela Anova							
Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO	CONCLUSÃO
% PÓ DE PEDRA (A)	164,4	3	54,8	56,4	2,90	Efeito significativo	O efeito do pó de pedra é significativo
% PLASTIFICANTE (B)	573,7	3	191,2	196,8	2,90	Efeito significativo	O efeito do plastificante é significativo
AB	35,2	9	3,9	4,0	2,19	Efeito significativo	O efeito da interação é significativo
Erro	31,0	32	0,9				
Total	851,5	47					

Fonte: O autor (2015)

Os resultados para o ensaios com o cone de Kantro, nas etapas 1 e 2, são apresentados na

FIGURA 23. Nestes ensaios, os resultados apresentaram a mesma tendência observada nos ensaios *flow table*, com algumas diferenças. É importante salientar que, apesar de não ser um ensaio normatizado no Brasil, o cone de Kantro é um ensaio de fácil execução, possibilitando a realização de diversas repetições em um curto espaço de tempo. Este ensaio é ideal quando se deseja avaliar, de forma rápida, o efeito de variações na composição de algum material do traço.

Nas etapas 1 e 2, as argamassas apresentaram visualmente segregação em grau leve, ocorrendo em geral nas amostra com 0% de material pulverulento, como pode ser observado na FIGURA 24. Por outro lado, as etapas 3 e 4, onde se utilizou aditivo superplastificante, houve, em algumas argamassas, elevado grau de segregação, principalmente com a utilização de

mais de 1% de aditivo, sendo ainda mais intensa a segregação nas argamassas que possuíam baixas quantidades de material pulverulento.

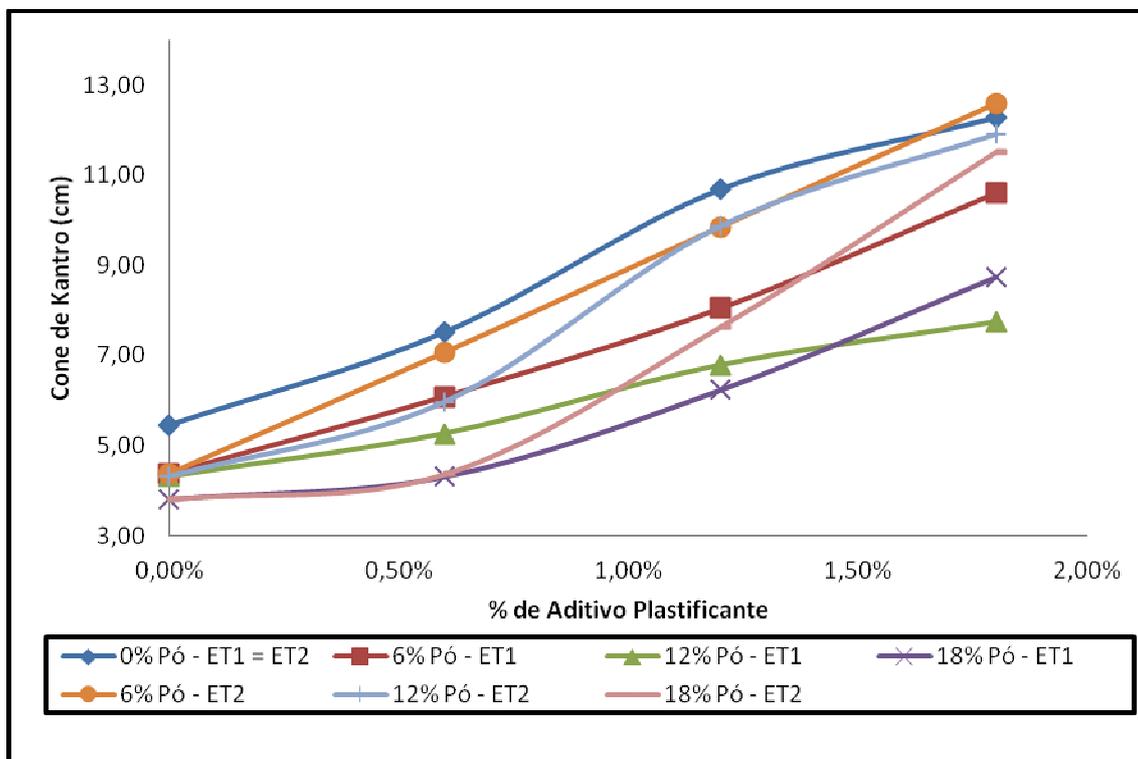


FIGURA 23. RESULTADOS PARA CONE DE KANTRO PARA A VARIAÇÃO DE QUANTIDADE DE FINOS NAS ETAPAS 1 E 2

Fonte: O autor (2015)

Nos ensaios contendo maior percentual de finos não ocorreu segregação em tão elevado grau, quanto do material sem finos. Isto porque, quanto maior a quantidade de material fino, maior é a coesão das partículas.

Na etapa 3, o ensaio de *flow table*, cujos resultados são apresentados na FIGURA 25, obteve casos que chegaram no limite do ensaio, onde o espalhamento máximo possível é de 50 cm. Notou-se uma uniformidade de comportamento do espalhamento mesmo para as quantidades mais elevadas de pó de pedra. Isso pode ser explicado, avaliando que o aditivo superplastificante agiu diretamente nos grãos de material pulverulento. Entretanto, a segregação de algumas argamassas, principalmente as com baixo teor de material pulverulento, pode levar a alguma imprecisão aos resultados do ensaio.



FIGURA 24. ENSAIO FLOW TABLE COM O MATERIAL SEGREGADO

Fonte: O autor (2015)

Apesar de algumas discrepâncias, provavelmente geradas por erro no processo do ensaio, na FIGURA 26 que indica a comparação entre as etapas 3 e 4, pode ser observado que o aditivo superplastificante teve um limite de utilização efetiva nas misturas estudadas, pois após certo percentual, não adianta aumentar seu teor, pois o espalhamento não mostrou um aumento significativo. Pela avaliação visual dos resultados da FIGURA 26, estima-se que este limite está em torno de 0,9% de teor de aditivo.

A comparação entre as etapas 3 e 4, demonstraram que não houve mudanças perceptíveis, em relação a ser peneirado na peneira #200 ou não, de modo que o material não peneirado na #200, chegou a 96,37% da média de espalhamento, em relação ao material peneirado na #200, na ET3. Desta forma, para os ensaios realizados com concretos, o material pulverulento foi utilizado no estado encontrado após a secagem e destorroado manualmente.

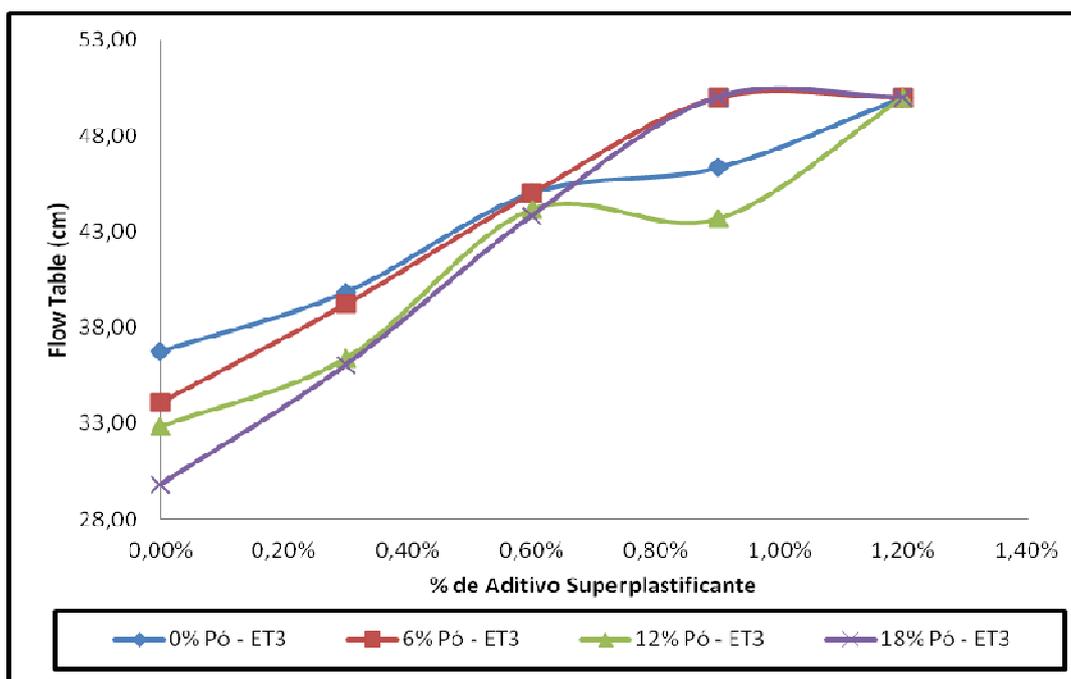


FIGURA 25. FLOW TABLE NA ETAPA 3

Fonte: O autor (2015)

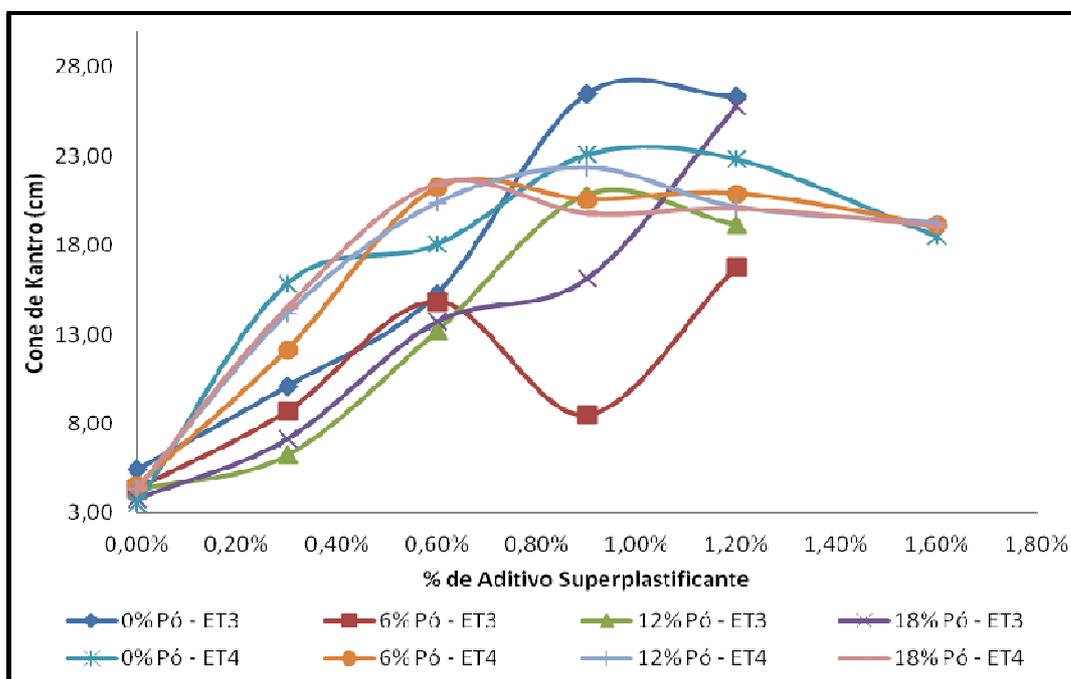


FIGURA 26. COMPARAÇÃO ENTRE ETAPA 3 E 4, PARA CONE DE KANTRO

Fonte: O autor (2015)

4.2 Resultados do estudo com concreto

Os resultados apresentados a seguir são referentes aos ensaios de resistência à compressão, à abrasão e à tração, realizados com os concretos avaliados neste estudo.

No presente estudo, procurou-se a substituição de parte do agregado miúdo artificial por pó de pedra, aumentando significativamente a superfície específica total dos materiais granular. Como apresentado na revisão bibliográfica, concretos convencionais tendem a demandar mais água para manter a consistência, e como foi expresso anteriormente foi utilizado aditivos redutores de água para compensar esse efeito. Para efeitos práticos, esse procedimento pressiona a utilização desses materiais permitindo avaliar os limites de sua aplicação. Algumas hipóteses foram efetuadas

- apesar de não ter sido efetuado o estudo do empacotamento de partículas, a distribuição granulométrica dos finos foi continua evitando a presença de vazios de adensamento indesejáveis, e segregação. Durante a mistura, avaliação da consistência e moldagem dos corpos de prova foi verificada visualmente o fechamento dos vários verificando se o teor de argamassa esteve adequado.
- os ensaios com argamassa permitiram observar que houve ação dos aditivos no agregado pulverizado, facilitando a homogeneidade de distribuição na massa, evitando ainda sua floculação.

4.2.1 Resistência à compressão e trabalhabilidade

Os ensaios para avaliação da resistência à compressão simples consideraram a moldagem e o rompimento de 3 corpos de prova por mistura e idade, o que permite avaliar o desvio padrão dos resultados, mesmo com uma quantidade limitada de repetições. Assim sendo, avaliou-se a qualidade do processo de ensaio e possíveis erros durante sua execução, a FIGURA 27 mostra um cp rompido por compressão simples.



FIGURA 27. CP ROMPIDO COM COMPRESSÃO SIMPLES

Fonte: O autor (2015)

O estudo utiliza, também, o conceito de resistência potencial, tomando como referência o maior resultado obtido, que se justifica pela menor quantidade de defeitos apresentado. Considera-se importante essa análise, já que a grande quantidade de finos deixa a mistura com coesão relativamente alta, o que pode interferir na moldagem e adensamento dos corpos de prova.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples estão apresentados na TABELA 17. Nos ensaios realizados foi possível observar que a variação da quantidade de material pulverulento interferiu na resistência à compressão dos concretos utilizados. A adição de material fino, até a concentração de 12%, levou a um aumento da resistência à compressão; a adição de concentrações maiores de finos, entretanto, não teve efeito positivo.

Os resultados obtidos com o ensaio número 2(0,45; 0%) não foram considerados adequados, optando-se pela recondução das análises. Os resultados anômalos obtidos devem-se, provavelmente, a um erro na pesagem dos materiais empregados. Outro ensaio que apresentou grande desvio foi o de número 4(0,45; 12%). Estes 2 ensaios foram refeitos, sendo apresentados os resultados de 7 e 14 dias de idade.

Nas FIGURA 28 e FIGURA 29 é possível observar que o pico de resistência, para a relação a/c 0,55 e 0,65, ocorreu com o percentual de 12% de material pulverulento. Assim, considerando-se um intervalo adequado, é possível aumentar a resistência do concreto com a adição de materiais finos, mantendo a quantidade de cimento. Também foi possível observar que a adição de material pulverulento ao traço do concreto, utilizando-se a areia artificial como é produzida, isto é, sem a necessidade de lavagem, poderia proporcionar a diminuição da quantidade de cimento, mantendo-se, entretanto, a mesma resistência à compressão.

Na TABELA 17 podem ser comparadas as resistências à compressão média e potencial para cada ensaio realizado. A resistência potencial apresentou valores médios 11%, 10% e 6% maiores em relação à resistência média, considerando-se as idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente. Como já foi mencionado, a resistência potencial corresponde ao maior valor entre os resultados obtidos para os cp's de cada ensaio. Nos ensaios realizados, a resistência potencial chegou a superar a resistência média em até 27% para as idades de 7 e 14 dias, e 15% para idade de 28 dias.

TABELA 17. RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Ensaio	% Mat. Pulv.	a/c	Resistência a Compressão								
			7 dias			14 dias			28 dias		
			Média	Desvio Padrão	Potencial	Média	Desvio Padrão	Potencial	Média	Desvio Padrão	Potencial
Ensaio 2	0%	0,45	40,73	1,13	41,80	45,27	1,14	46,20	-	-	-
Ensaio 3	6%	0,45	28,50	2,46	31,10	39,23	2,31	42,50	41,30	1,80	43,60
Ensaio 4	12%	0,45	41,37	1,10	42,90	45,87	1,27	47,40	-	-	-
Ensaio 5	18%	0,45	30,60	5,21	36,10	37,77	2,42	40,90	38,70	2,13	41,20
Ensaio 6	0%	0,55	21,73	0,85	22,90	26,03	2,11	28,90	31,90	0,57	32,40
Ensaio 7	6%	0,55	27,97	1,99	29,80	31,20	0,70	32,10	32,30	1,36	34,20
Ensaio 8	12%	0,55	26,93	3,51	31,30	33,80	1,06	34,60	38,87	1,03	40,30
Ensaio 9	18%	0,55	24,27	0,41	24,80	26,17	2,95	28,40	30,00	2,77	32,30
Ensaio 10	0%	0,65	17,93	1,81	19,50	20,00	0,57	25,30	22,73	0,37	23,20
Ensaio 11	6%	0,65	16,73	0,97	18,10	20,63	1,27	21,90	21,07	1,86	23,10
Ensaio 12	12%	0,65	24,33	2,50	27,50	24,77	2,77	27,80	26,60	1,14	28,00
Ensaio 13	18%	0,65	17,53	0,48	18,20	18,93	3,43	23,00	20,10	1,08	21,60

Os valores de desvio padrão obtidos nos ensaios de 28 dias foram considerados adequados, em geral resultando em valores abaixo de 2 MPa, que é um valor meta para a produção de concreto em larga escala.

Nas FIGURA 30 e FIGURA 31 estão apresentados os resultados obtidos para a resistência à compressão em função da relação a/c para cada idade, colocando-se no mesmo gráfico os vários teores de pó de pedra utilizados, para a resistência média e a potencial, respectivamente. Observa-se que os ensaios contendo 12% de material pulverulento apresentaram os maiores resultados de resistência à compressão para relações a/c iguais a 0,55 e 0,65, apresentando um ganho médio de 21,84% e 17,01%, respectivamente, em relação aos ensaios sem material pulverulento aos 28 dias, conforme pode ser, também, visualizado na TABELA 18.

TABELA 18. RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DOS CONCRETOS COM MATERIAL PULVERULENTO E MISTURAS SEM.

Ensaio	Material Pulverulento	Relação a/c	Média	Potencial
Ensaio 6	0	0,55	ref	ref
Ensaio 7	6%	0,55	1,25%	5,56%
Ensaio 8	12%	0,55	21,84%	24,38%
Ensaio 9	18%	0,55	-5,96%	-0,31%
Ensaio 10	0%	0,65	ref	ref
Ensaio 11	6%	0,65	-7,33%	-0,43%
Ensaio 12	12%	0,65	17,01%	20,69%
Ensaio 13	18%	0,65	-11,58%	-6,90%

Fonte: O autor (2015)

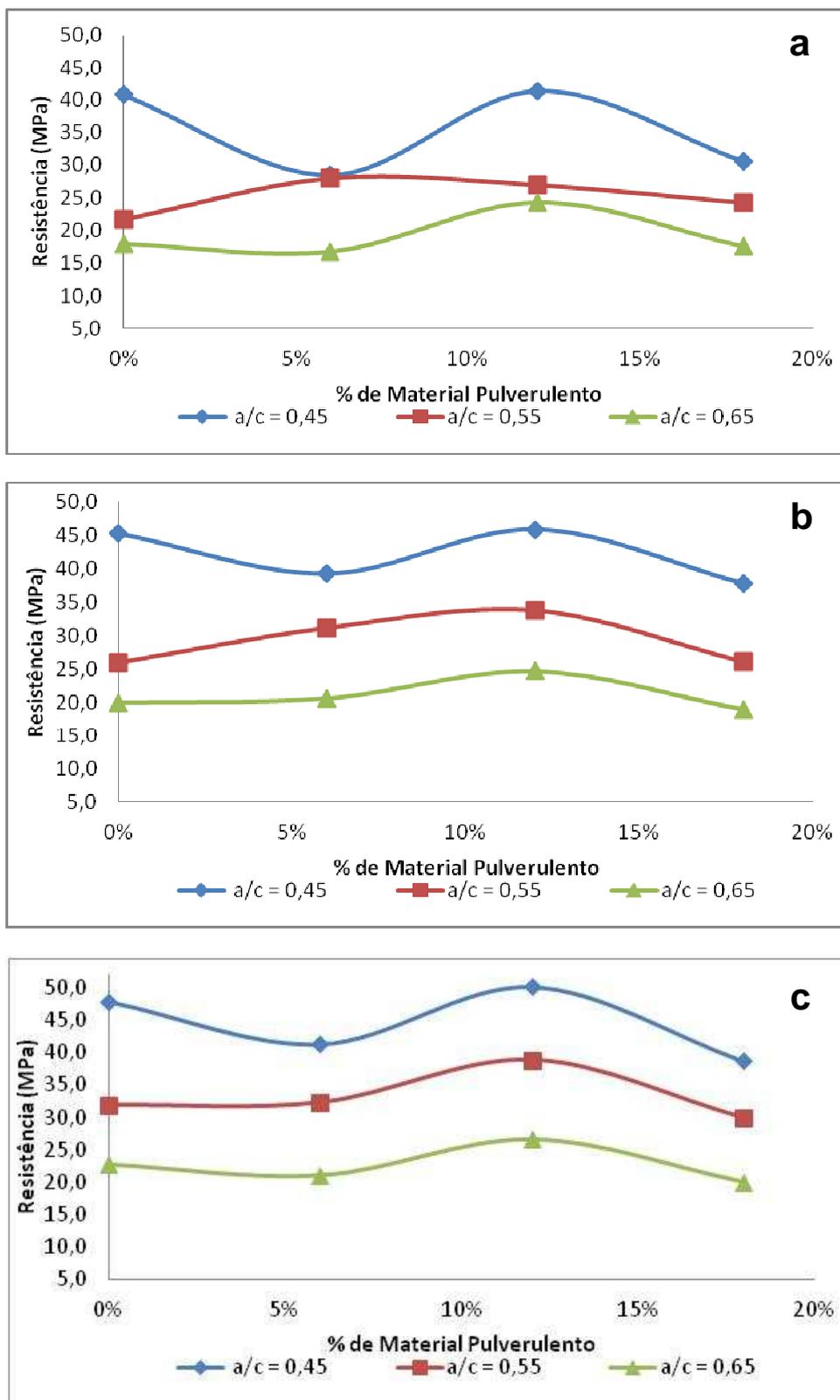


FIGURA 28. RELAÇÃO MATERIAL FINO X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO
MÉDIA: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS

Fonte: O autor (2015)

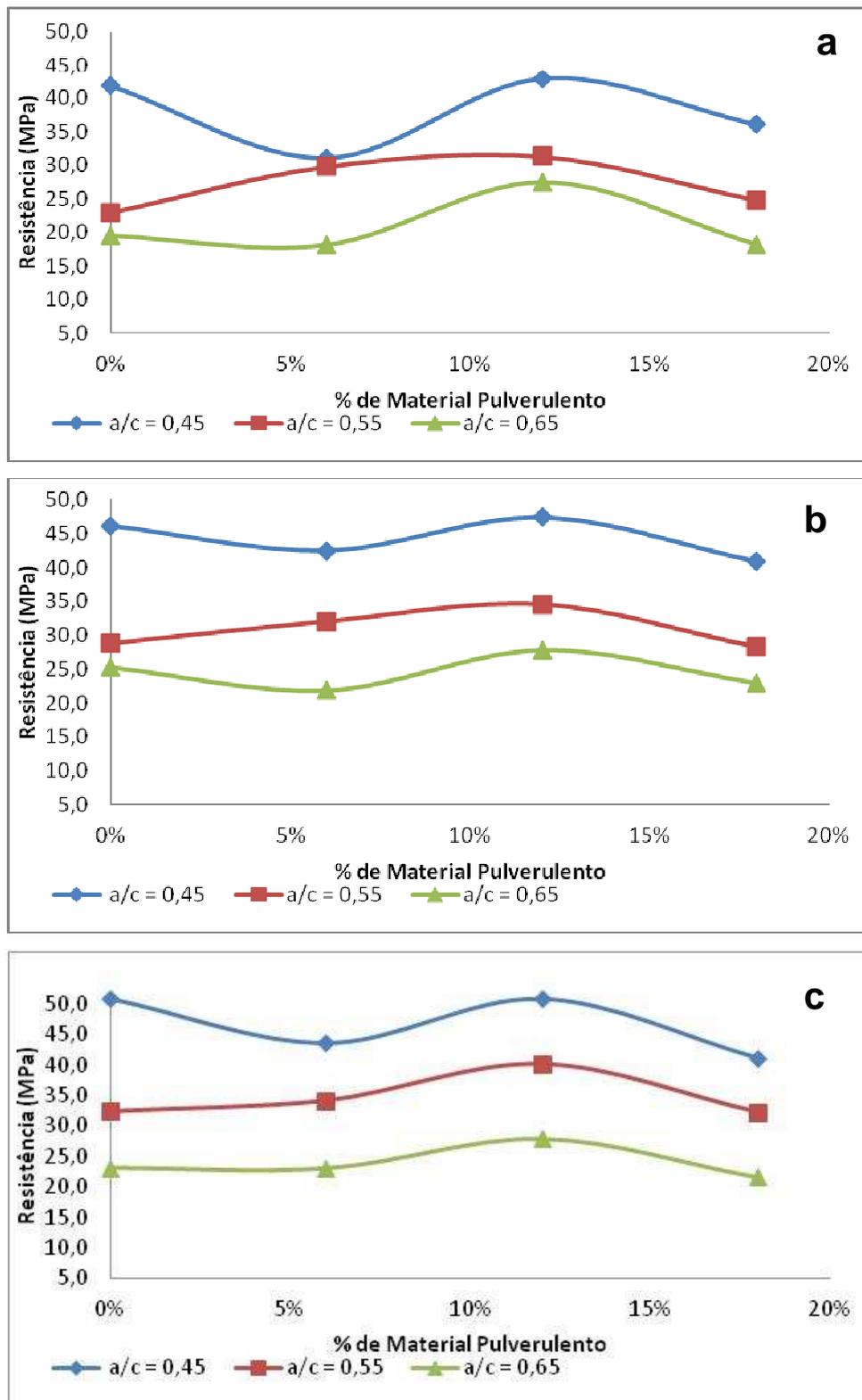


FIGURA 29. RELAÇÃO MATERIAL FINO X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POTENCIAL: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS

Fonte: O autor (2015)

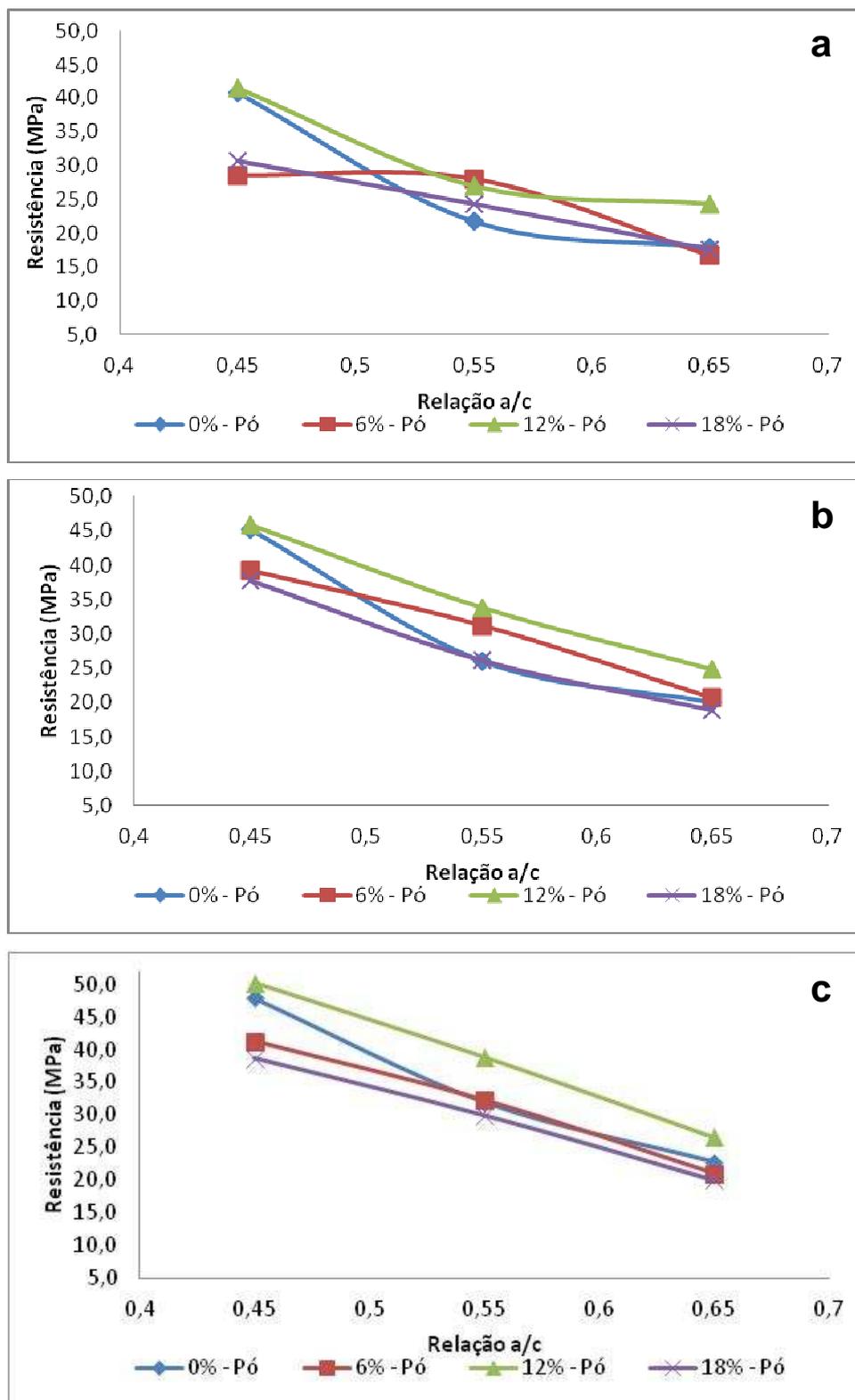


FIGURA 30. RELAÇÃO A/C X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS

Fonte: O autor (2015)

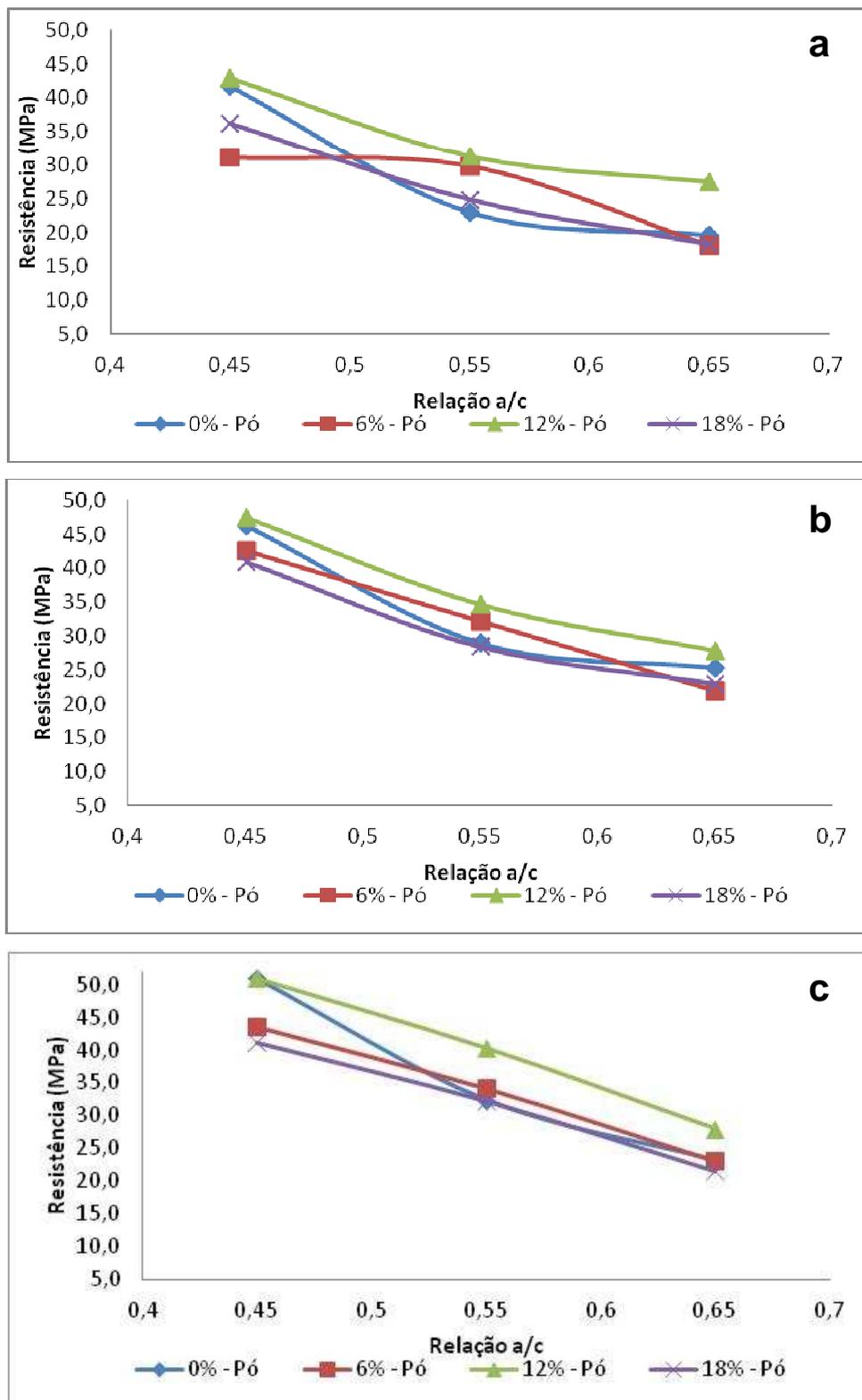


FIGURA 31. RELAÇÃO A/C X RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POTENCIAL: a) 7 DIAS; b) 14 DIAS; c) 28 DIAS

Fonte: O autor (2015)

A tabela Anova, com nível de significância de 95%, realizada com base nos dados de resistência à compressão está apresentada na TABELA 19.

TABELA 19. ANOVA PARA CONCRETO COM IDADE DE 28 DIAS

Tabela Anova							
Fonte de variação	(SQ)	GDL	(MQ)	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO	CONCLUSÃO
% Mat. Pulv. (A)	472,74	3	157,58	25,82	3,01	Efeito correspondente é significativo	O efeito do Material Pulverulento é significativo
Relação a/c (B)	711,60	2	355,80	58,30	3,40	Efeito correspondente é significativo	O efeito da relação a/c é significativo
AB	1265,95	6	210,99	34,57	2,51	Efeito correspondente é significativo	O efeito da interação é significativo
Erro	146,47	24	6,10				
Total	2631,76	35					

Notas: SQ: Soma de quadrado; GDL: Grau de liberdade; MQ: Médias quadradas; Teste F: Distribuição f de Snedecor; F Tab: Valor tabelado de f de Snedecor

Fonte: O autor (2015)

Da tabela Anova pode-se verificar que a relação a/c apresenta efeito significativo na resistência e assim como o percentual de material pulverulento. Efetuando uma comparação múltipla de média, baseado nos resultados da tabela Anova, obteve-se para o desvio padrão das médias o valor de 1,43 MPa. Tomando como limite de decisão para verificação se as médias são estatisticamente diferentes três vezes o valor do desvio padrão, obtém-se 4,28 Mpa. De modo que os valores, para relações a/c iguais a 0,55 e 0,65, de 0%, 6% e 18%, são estatisticamente semelhantes e os valores para o percentual de 12% podendo ser considerado com uma diferença significativa.

Tendo como base a resistência à compressão média aos 28 dias (100% da resistência referência), pode-se afirmar que os concretos aos 7 dias de ensaio atingiram, em média, 78% da resistência com 6% de material pulverulento, 58% com 12%, e 82% com 18%. Para a idade de 14 dias, os valores foram 96%, 92% e 93% de resistência, considerando-se concretos com

6%, 12% e 18% de material pulverulento, respectivamente. É importante salientar que, para todos os traços foi utilizado cimento CP-V ARI, de forma que os resultados estão coerentes, pois para este tipo de cimento, a maior parte da resistência se desenvolve durante as primeiras idades.

Nas FIGURA 28 e FIGURA 29 é possível observar que a resistência à compressão do concreto aumentou de acordo com o percentual de material pulverulento mesmo pressionando a mistura com uma quantidade expressiva de material fino. Entretanto, após um valor limite, a resistência à compressão foi prejudicada pelo excesso de material pulverulento, provavelmente devido ao afastamento das partículas.

O traço original, utilizado para desenvolver os demais utilizado nesta pesquisa, tinha com objetivo o *slump test* igual a 100 mm \pm 20 mm, com F_{ck} igual a 30 MPa. De modo que alguns traços ultrapassaram o valor de 40 MPa de média, enquanto a consistência do concreto foi mantida sempre igual ou superior, conforme pode ser observado na TABELA 20, em que se apresentou os aditivos utilizados e o *slump* atingido para cada ensaio realizado.

Damo (2011) comentou que, para uma relação *a/c* mais baixa do que 0,40, é possível notar uma maior resistência no concreto com o aumento da quantidade de microfinos adicionados. Isto deve estar associado a um melhor empacotamento dos grãos, proporcionado pela presença dos microfinos. Este comportamento tendem a inverter com maiores relações *a/c*, quando o efeito do empacotamento se tornou menos determinante provavelmente devido à maior disponibilidade de água para a hidratação dos grãos de cimento. Neste mesmo trabalho, areais contendo, aproximadamente, 10% de material pulverulento, alcançaram as maiores resistência à compressão. Assim, traços com *a/c* igual a 0,45, obtiveram resistência igual a 50 MPa. Traços com relação *a/c* igual a 0,50 obtiveram resistência à compressão em torno de 44 MPa, valor próximo daqueles obtidos nesta pesquisa, considerando-se concretos contendo 12% de material pulverulento. É importante salientar que o consumo de cimento no trabalho de Damo (2011), para os traços mencionados, foi em torno de 310 kg/m³, enquanto neste estudo o valor utilizado foi de 280 kg/m³.

Menossi (2004), utilizando um concreto com traço contendo a/c 0,70, areia com 13,6% de material pulverulento e consumo de cimento de aproximadamente 310 kg/m³, obteve resistência à compressão de 31,2 MPa. O presente estudo também obteve resultados próximos a este valor; coerentes, portanto, àqueles encontrados na literatura.

TABELA 20. QUANTIDADE DE ADITIVO E *SLUMP TEST* PARA OS ENSAIOS

Nº Ensaio	Mat. Pulv	Relação a/c	Plastificante	Superplastificante	Slump (mm)
Ensaio 2	0%	0,45	-	-	-
Ensaio 3	6%	0,45	1,0%	-	12
Ensaio 4	12%	0,45	2,5%	-	17
Ensaio 5	18%	0,45	-	0,5%	16
Ensaio 6	0%	0,55	0,5%	-	14
Ensaio 7	6%	0,55	0,5%	-	8
Ensaio 8	12%	0,55	1,5%	-	19
Ensaio 9	18%	0,55	-	0,5%	30
Ensaio 10	0%	0,65	-	-	14
Ensaio 11	6%	0,65	0,5%	-	21
Ensaio 12	12%	0,65	0,5%	-	20
Ensaio 13	18%	0,65	0,5%	-	21

Fonte: O autor (2015)

4.2.2 Resistência à tração

A resistência à tração, analisada neste estudo pela resistência à compressão diametral, mostrou um decréscimo conforme foi aumentado o percentual de material pulverulento no traço do concreto, como pode ser observado na FIGURA 32.

Na TABELA 21, está apresenta o resumo dos resultados obtidos para tração por compressão diametral aos 28 dias, com os diferentes percentuais de material pulverulento e diferentes relações a/c. Os resultados apresentados são referentes a 3 cp's utilizados em cada ensaio e a resistência potencial encontrada.

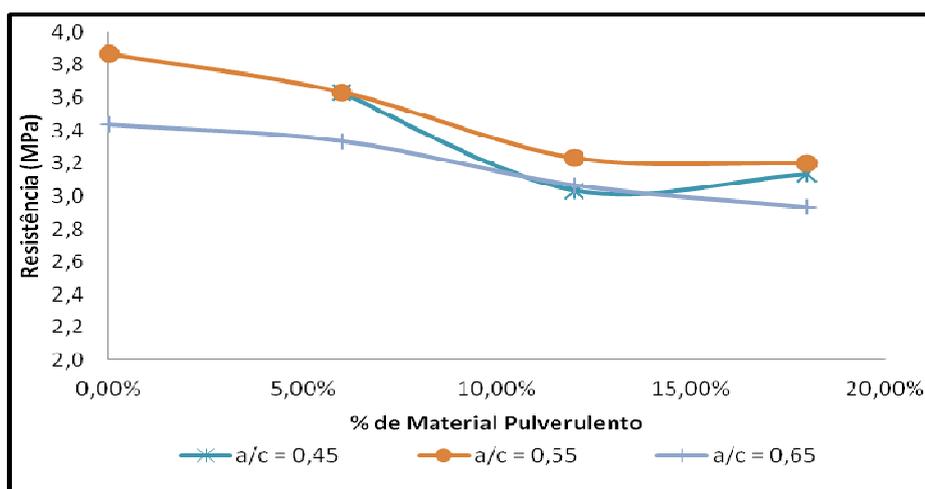


FIGURA 32. RESISTÊNCIA MÉDIA A TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Fonte: O autor (2015)

A resistência à tração, neste estudo, teve uma variação, em relação à resistência à compressão, de 8,10% no ensaio 5, até 15,82% no ensaio 11. Mehta e Monteiro (1994) indicam que a variação de resistência à tração, em relação à compressão, deve ficar em torno de 7% a 11%. É importante ressaltar que estes mesmos autores afirmaram que a relação entre as resistências aumentou conforme foi diminuída a resistência à compressão do concreto.

TABELA 21. RESULTADOS DOS CP'S PARA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Nº Ensaio	Mat. Pulv.	Relação a/c	28 dias					
			Cp1	Cp2	Cp3	Média	Desvio P.	Potencial
Ensaio 2	0%	0,45	-	-	-	-	-	-
Ensaio 3	6%	0,45	3,6	3,4	3,9	3,63	0,21	3,90
Ensaio 4	12%	0,45	3,3	3,0	2,8	3,03	0,21	3,30
Ensaio 5	18%	0,45	3,1	3,5	2,8	3,13	0,29	3,50
Ensaio 6	0%	0,55	3,7	4,2	3,7	3,87	0,24	4,20
Ensaio 7	6%	0,55	3,9	3,9	3,1	3,63	0,38	3,90
Ensaio 8	12%	0,55	3,2	3,4	3,1	3,23	0,12	3,40
Ensaio 9	18%	0,55	4,0	2,9	2,7	3,20	0,57	4,00
Ensaio 10	0%	0,65	3,5	3,4	3,4	3,43	0,05	3,50
Ensaio 11	6%	0,65	2,9	3,7	3,4	3,33	0,33	3,70
Ensaio 12	12%	0,65	2,9	3,1	3,2	3,07	0,12	3,20

Ensaio 13	18%	0,65	2,5	3,6	2,7	2,93	0,48	3,60
-----------	-----	------	-----	-----	-----	------	------	------

Concretos com a/c igual a 0,45 tiveram uma média na relação de resistências de 9,37%, enquanto os concretos com a/c igual a 0,55 e 0,65 obtiveram média de 10,59% e 14,26%. Estes resultados confirmam que, quanto maior a resistência à compressão, menor será a relação com a resistência à tração e vice-versa, isto é, quanto menor a resistência à compressão, maior será a relação entre as resistências.

Com base na TABELA 21, realizou-se uma análise de variância para verificar a influência dos fatores relação a/c e percentual de material pulverulento nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (TABELA 22).

TABELA 22. ANOVA PARA RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Tabela Anova							
Fonte de variação	(SQ)	GDL	(MQ)	Teste F	F tab	COMPARAÇÃO	CONCLUSÃO
% Mat Pulv. (A)	1,64	3	0,55	3,80	3,07	Efeito correspondente é significativo	O efeito do mat. Pulv. é significativo
Relação a/c (B)	0,39	2	0,20	1,36	3,47	Efeito correspondente não é significativo	O efeito da relação a/c não é significativo
AB	0,08	6	0,01	0,09	2,57	Efeito correspondente não é significativo	O efeito da interação não é significativo
Erro	3,02	21	0,14				
Total	37,13	32					

Notas: SQ: Soma de quadrados, GDL: Grau de liberdade, MQ: Médias quadradas, Teste F: Vistribuição f de Snedecor, F Tab: Valor tabelado de f de Snedecor

Fonte: O autor (2015)

A análise de variância confirmou o efeito da adição de material pulverulento na resistência à tração por compressão diametral, como já havia sido constatado em ensaios de resistência à compressão. Em contrapartida, a relação a/c não apresentou efeito significativo na resistência à tração dentro do

intervalo estudado. Analisando o gráfico apresentado na FIGURA 32, é possível observar que a relação para a/c 0,45 ficou muito próxima da relação a/c 0,55, enquanto a relação a/c 0,65 ficou deslocada, sugerindo que esta variável é significativa, conforme afirma Gonçalves (2005) em seu estudo.

Efetuada uma comparação múltipla de média, baseado nos resultados da tabela Anova, obteve-se para o desvio padrão das médias o valor de 0,22 MPa. Tomando como limite de decisão para verificação se as médias são estatisticamente diferentes três vezes o valor do desvio padrão, obtéve-se 0,65 MPa. Nessa análise conclui-se que independentemente da relação a/c e teor de material pulverulento, todos os valores são estatisticamente semelhantes, não se podendo considerar diferenças significativas entre os resultados obtidos, apesar da coerência obtida no gráfico da FIGURA 32.

4.2.3 Resistência à abrasão

Os resultados para os ensaios de abrasão submersa estão apresentados na TABELA 23, demonstrando a evolução da perda de percentual de massa durante o ensaio. O desgaste na superfície dos cp's ocorreu em toda a área, com exceção da região central, onde as pás de agitação limitaram a ação das esferas. O desgaste ocorreu na pasta do concreto e nos agregados graúdos, ocorrendo em alguns casos o desprendimento destes agregados. A FIGURA 33 mostra a evolução de desgaste em um cp submetido ao ensaio.

A perda média de massa para os ensaios com relações a/c iguais a 0,45 0,55 e 0,65 foi de 8,05%, 10,38% e 13,59%, respectivamente. Para estes ensaios, entretanto, não foi possível a realização de um teste de variância, devido a utilização de apenas 1 cp por traço, portanto sem repetições.

TABELA 23. EVOLUÇÃO DO PERCENTUAL DE PERDA DE MASSA DURANTE ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO

	Material pulverulento	a/c	% perda de massa			
			0 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Ensaio 2	0%	0,45	-	-	-	-
Ensaio 3	6%	0,45	0%	1,86%	4,55%	7,24%
Ensaio 4	12%	0,45	0%	1,91%	3,34%	6,06%
Ensaio 5	18%	0,45	0%	3,71%	7,52%	10,86%
Ensaio 6	0%	0,55	0%	3,16%	5,44%	8,14%
Ensaio 7	6%	0,55	0%	5,80%	11,18%	15,04%
Ensaio 8	12%	0,55	0%	3,16%	6,15%	7,63%
Ensaio 9	18%	0,55	0%	4,68%	7,98%	10,70%
Ensaio 10	0%	0,65	0%	3,04%	6,31%	8,06%
Ensaio 11	6%	0,65	0%	5,12%	9,04%	13,06%
Ensaio 12	12%	0,65	0%	4,59%	9,07%	11,97%
Ensaio 13	18%	0,65	0%	7,59%	14,09%	21,25%

Fonte: O autor (2015)

A FIGURA 34 apresenta a perda de massa ao longo do ensaio para cada traço utilizado, juntamente com a linha de tendência e o R-quadrado correspondente. Os valores de R-quadrado estão muito próximo a 1, mostrando que a perda de massa ao longo do ensaio foi linear. Porém, nos trabalhos de Kormann (2002) e Galvão (2010), a perda observada não foi linear, sendo maior nas 24 horas iniciais do ensaio. Este resultado demonstra certa homogeneidade apresentada pelo concreto, além da ausência de problemas de moldagem nos cp's. Deve-se mencionar que o acabamento superficial dos cp's na face superior foi executado apenas com uma colher de pedreiro, sendo a execução do ensaio realizada nesta face.



FIGURA 33. CP ENSAIO Nº 7 AO LONGO DO TEMPO: (a) 0 HORAS; (b) 24 HORAS; (c) 48 HORAS; (d) 72 HORAS

Fonte: O autor (2015)

Das linhas de tendência apresentadas na FIGURA 34, tem-se que o coeficiente angular da reta refere-se ao coeficiente de perda de massa a cada 24 horas no ensaio, podendo ser realizada uma classificação indicando quais foram os traços que obtiveram os melhores resultados. Ainda na mesma figura é possível observar que as massas iniciais dos cp's variaram, de modo que a melhor forma de apresentar os resultados é por perda de massa e não pelo percentual de perda. A FIGURA 35 mostra a perda de massa para os ensaios, conforme a relação a/c.

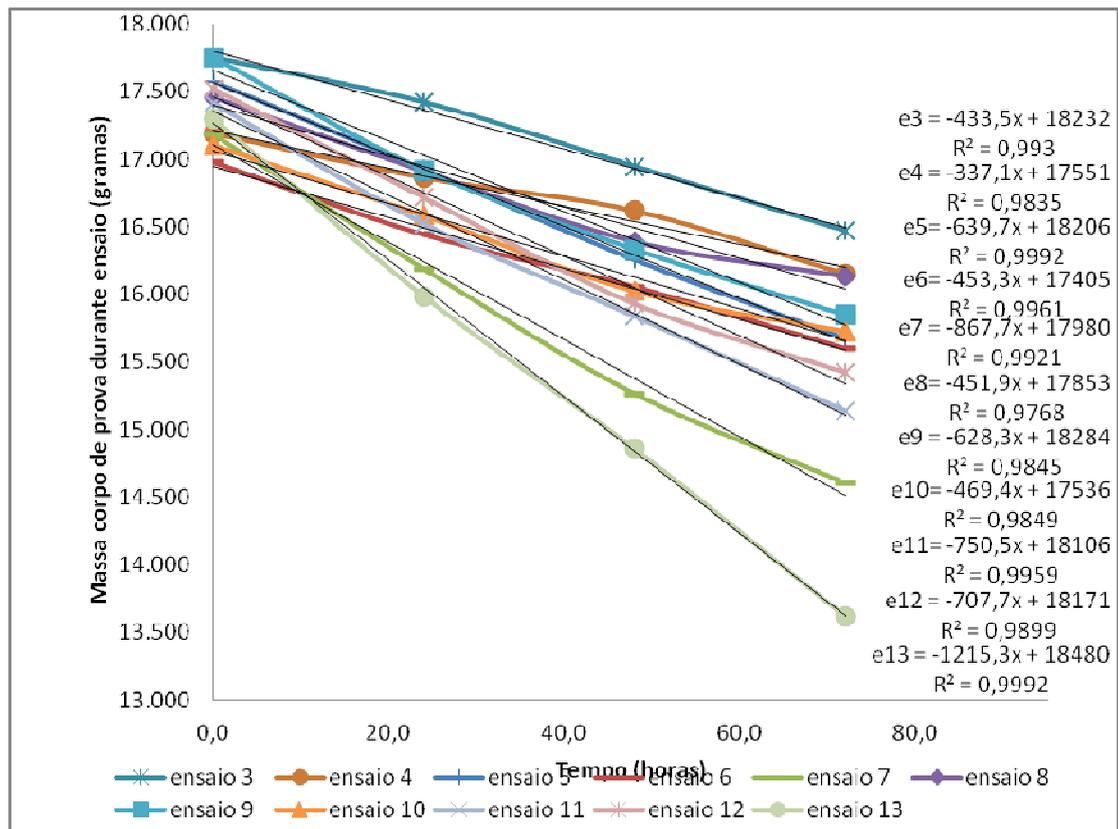


FIGURA 34. PERDA DE MASSA AO LONGO DO TEMPO DE ENSAIO DE ABRASÃO, E A LINHA DE TENDÊNCIA OBTIDA PARA CADA ENSAIO

Fonte: O autor (2015)

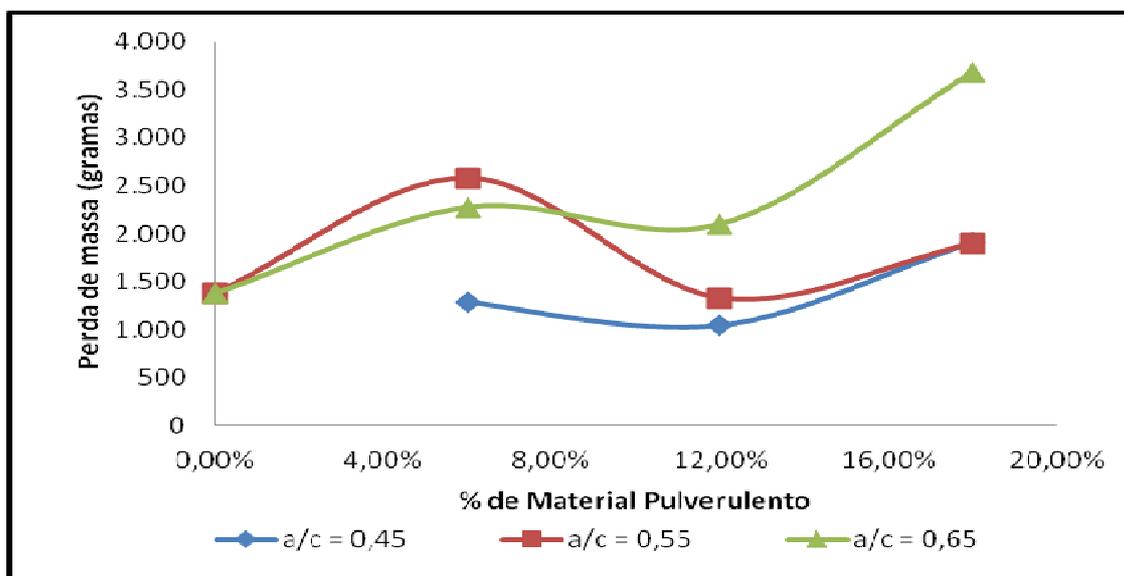


FIGURA 35. PERDA DE MASSA AO FINAL DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Fonte: O autor (2015)

Na TABELA 24 são apresentados os resultados referentes à massa dos cp's obtidas em cada etapa do ensaio para a medição realizada na situação superfície seca saturada (SSS). A TABELA 25, por sua vez, apresenta os resultados referentes à medição realizada com o cp submerso.

TABELA 24. MASSA DOS CP'S DURANTE OS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO EM MEDIÇÃO SSS

Nº Ensaio	Mat. Pulv.	Relação a/c	Massa (g)				Diferença 0-72horas
			0 horas	24 horas	48 horas	72 horas	
Ensaio 2	0%	0,45	-	-	-	-	
Ensaio 3	6%	0,45	17754	17424	16947	16468	1286
Ensaio 4	12%	0,45	17194	16865	16620	16152	1042
Ensaio 5	18%	0,45	17577	16925	16255	15668	1909
Ensaio 6	0%	0,55	16982	16445	16058	15600	1382
Ensaio 7	6%	0,55	17186	16189	15264	14602	2584
Ensaio 8	12%	0,55	17462	16911	16388	16130	1332
Ensaio 9	18%	0,55	17749	16919	16333	15850	1899
Ensaio 10	0%	0,65	17107	16587	16027	15729	1378
Ensaio 11	6%	0,65	17414	16523	15840	15140	2274
Ensaio 12	12%	0,65	17524	16720	15934	15427	2097
Ensaio 13	18%	0,65	17298	15985	14860	13622	3676

Fonte: O autor (2015)

TABELA 25. MASSA CP'S, DURANTE ENSAIOS ABRASÃO, PARA MASSA IMERSA.

Nº Ensaio	Mat. Pulv.	Relação a/c	Massa imersa (g)				Diferença 0-72horas
			0 horas	24 horas	48 horas	72 horas	
Ensaio 2	0%	0,45	-	-	-	-	-
Ensaio 3	6%	0,45	10684	10490	10210	9931	753
Ensaio 4	12%	0,45	10359	10163	10040	9745	614
Ensaio 5	18%	0,45	10540	10153	9763	9424	1116
Ensaio 6	0%	0,55	10160	9850	9199	9359	801
Ensaio 7	6%	0,55	10241	9655	9107	8717	1524
Ensaio 8	12%	0,55	10485	10164	9852	9705	780
Ensaio 9	18%	0,55	10642	10164	9821	9536	1106
Ensaio 10	0%	0,65	10245	9957	9197	9456	789
Ensaio 11	6%	0,65	10007	9777	9480	9058	949
Ensaio 12	12%	0,65	10392	9930	9467	9185	1207
Ensaio 13	18%	0,65	10243	9486	8766	8005	2238

Galvão (2010) analisou a resistência à abrasão de alguns materiais de reparo pelo método de imersão, utilizando-se como referência um concreto com fck igual a 34,3 MPa aos 28 dias, com um consumo aproximado de 388 kg/m³ de cimento e utilizando agregado miúdo natural. Obteve em seu ensaio uma perda igual a 6,57% de massa após 72 horas, resultado considerado adequado para um concreto convencional, de acordo com a ACI (ACI, 1999 apud KORMANN, 2002), em que perdas de massa menores do que 6,5% são consideradas de bom desempenho para efeitos de abrasão. Freitas (2007) analisou 2 tipos de materiais de reparo, utilizando-se como referência um concreto com fck igual a 34,2 MPa, a/c igual a 0,50 e 357 kg/m³ de cimento, sendo o ensaio de abrasão realizado em um cp com idade igual a 60 dias. O resultado obtido foi de 4,8% de perda de massa, após as 72 h de ensaio.

Nos ensaios de resistência à abrasão realizados neste estudo, o consumo de cimento foi igual a 280 kg/m³ e obteve, como resultados, percentuais de perdas que variaram de 6,06% até 21,25% ao final do ensaio. Sabendo que um concreto é considerado com boa resistência à abrasão quando apresenta percentual de perda abaixo de 6,50% de massa, houve pelo menos 1 traço que atingiu esta classificação, com outros bem próximos a isso. Como a resistência à abrasão varia conforme o tipo do agregado, comparações com os resultados de outras pesquisas apresentam dificuldade. No caso dos resultados obtidos na presente mistura, torna-se mais eficiente comparar os diversos concretos para avaliar o efeito do pó. Outra dificuldade para efetuar comparações é representada pelo fato que nos trabalhos de Galvão (2010) e Freitas (2007), o consumo de cimento foi muito superior.

Na FIGURA 36 está apresentado o efeito da variação de material pulverulento nos traços de concretos elaborados durante esta pesquisa.

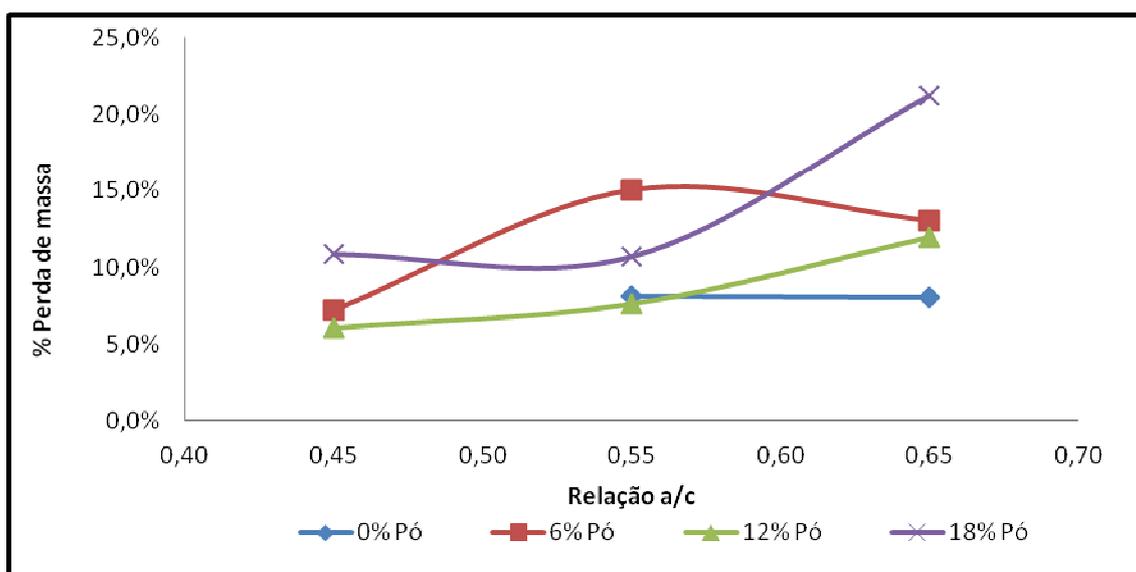


FIGURA 36. RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO, RELACIONADO AO PERCENTUAL DE MATERIAL PULVERULENTO

Fonte: O autor (2015)

Nos ensaios com 12% de material pulverulento foi observado o aumento da relação a/c proporcionou uma menor resistência à abrasão; os resultados para os demais percentuais seguiram a mesma tendência. Os melhores resultados obtidos referem-se aos traços com 0% e 12% de material pulverulento, em todas as relações a/c. Considerando também a resistência à compressão, estes percentuais de material pulverulento foram aqueles que apresentaram melhores resultados nos ensaios realizados.

Observando a FIGURA 36 nota-se que o resultado da perda por abrasão para 6% de pó na mistura com relação a/c igual a 0,55 deve conter algum erro de moldagem, pois este resultado foi consideravelmente superior às misturas com 12% e 18%.

Na TABELA 26 está apresentada a perda de massa para diferentes relações a/c e concentrações de material pulverulento, tendo como referência o resultado do ensaio para o percentual de 0%. Observou-se uma variação expressiva entre os resultados, explicada em parte pelo baixo travamento e/ou empacotamento dos agregados devido a adição do material fino aos traços, mais facilmente removidos por abrasão. De fato, segundo Neville (1997),

quando maior o percentual de agregado graúdo no concreto, maior será a resistência à abrasão.

TABELA 26. RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA, EM COMPARAÇÃO A ENSAIO COM 0% DE MATERIAL PULVERULENTO

Nº ensaio	% Material pulverulento	Relação a/c	Percentual em relação ensaios com 0% de Mat. Pulv.
Ensaio 6	0%	0,55	Ref.
Ensaio 7	6%	0,55	87%
Ensaio 8	12%	0,55	-4%
Ensaio 9	18%	0,55	37%
Ensaio 10	0%	0,65	Ref.
Ensaio 11	6%	0,65	65%
Ensaio 12	12%	0,65	52%
Ensaio 13	18%	0,65	167%

Fonte: O autor (2015)

Com base nos trabalhos citados, em que um concreto pode ser considerado de boa resistência à abrasão caso, ao final do ensaio apresente uma perda menor que 6,5% da massa inicial, é possível verificar a perda obtida neste trabalho utilizando-se os valores absolutos encontrados. Assim, considerando-se que os 11 cp's utilizados apresentaram uma massa média de 17.387g, tem-se que 6,5% é igual a 1.130 g, ou seja, uma perda média de 376 g a cada 24 h. Deve-se ressaltar que as comparações são de difícil aplicação já que os agregados utilizados influenciam significativamente na resistência à abrasão.

4.3 Comparação de resultados

A TABELA 27 apresenta um resumo dos resultados obtidos em todos os ensaios realizados com concreto, a saber: compressão simples aos 28 dias, tração média aos 28 dias, e perda de massa no ensaio de abrasão.

TABELA 27. RESUMO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS COM CONCRETO

Nº Ensaio	Mat. Pulv.	Relação a/c	Compressão média 28 dias	Tração média 28 dias	Abrasão por perda de massa
Ensaio 2	0%	0,45	47,90	-	-
Ensaio 3	6%	0,45	41,30	3,63	1286
Ensaio 4	12%	0,45	50,02	3,03	1042
Ensaio 5	18%	0,45	38,70	3,13	1909
Ensaio 6	0%	0,55	31,90	3,87	1382
Ensaio 7	6%	0,55	32,30	3,63	2584
Ensaio 8	12%	0,55	38,87	3,23	1332
Ensaio 9	18%	0,55	30,00	3,20	1899
Ensaio 10	0%	0,65	22,73	3,43	1378
Ensaio 11	6%	0,65	21,07	3,33	2274
Ensaio 12	12%	0,65	26,60	3,07	2097
Ensaio 13	18%	0,65	20,10	2,93	3676

Fonte: O autor (2015)

Em geral, os resultados dos ensaios não mostraram correlação entre si, e o material pulverulento influenciou os resultados de cada ensaio de uma forma diferente. Pôde ser observado que a resistência à compressão melhorou para certo percentual de material pulverulento. Isto pode ser explicado, considerando-se que na faixa em questão deve ter ocorrido o empacotamento das partículas. Este provável empacotamento não influenciou o ensaio de tração, que apresentou uma leve perda de resistência, de acordo com o aumento do percentual de material fino. Estatisticamente, porém, utilizando-se a comparação múltipla de média, os resultados foram considerados similares.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se avaliar a máxima adição de material pulverulento em concretos convencionais, visando entender as mudanças provocadas por estas adições nas características do concreto, utilizando-se os ensaios de resistência à compressão simples, tração pelo da compressão diametral e a resistência à abrasão pelo método submerso. Além disso, procurou-se avaliar o comportamento de aditivos plastificantes e superplastificantes, em concretos com grande quantidade de material pulverulento.

A correlação entre resistência à compressão e a resistência à abrasão não pôde ser comprovada, contrariando o que foi observado por alguns autores na literatura. Concretos com valores próximos de resistência à compressão apresentaram, por outro lado, diferenças notáveis para a resistência à abrasão. Desta forma, não foi possível caracterizar/especificar um concreto pela resistência à compressão, na expectativa de que este material apresente um bom desempenho em relação à resistência à abrasão.

Algumas conclusões acerca dos resultados obtidos no desenvolvimento desta pesquisa estão expostos na sequencia:

- a trabalhabilidade do concreto foi prejudicada com a adição de material pulverulento.. Entretanto, foi possível alcançar a consistência desejada pela adição de aditivos plastificantes em teores usuais, de modo a não elevar substancialmente o custo por m³ do concreto.
- para certa faixa de percentual de material pulverulento, foi possível produzir concretos com maior resistência à compressão, em comparação aos concretos sem adição deste material. Supondo que fosse reduzida a quantidade de cimento utilizada devido à adição do material pulverulento, seria possível obter-se a resistência desejada, tendo como vantagem a produção de um concreto mais sustentável. A sustentabilidade, neste caso, se deve ao menor consumo de cimento

assim como à utilização de materiais finos produzidos em pedreiras que, em alguns casos, vêm sendo depositados em áreas que poderiam ser melhor aproveitadas.

- como não foi possível encontrar uma correlação entre as variáveis avaliadas nesta pesquisa, isto é, resistências à compressão, tração e abrasão, torna-se imprescindível a elaboração de uma norma técnica brasileira que defina um ensaio padrão para concretos sujeitos ao desgaste superficial, definindo-se parâmetros e faixas de uso.
- os resultados obtidos com o ensaio de compressão diametral demonstraram que houve perda de resistência à tração. Esta afirmação pode ser corroborada pela análise gráfica dos resultados, em que conforme era aumentado o percentual de material pulverulento, menor foi a resistência à tração observada. Contudo, não foi possível confirmar esta tendência estatisticamente.
- Os melhores resultados da resistência à abrasão foram para os traços contendo os percentuais 0% e 12% de material pulverulento. Assim, foi possível afirmar que a presença ou não do material pulverulento no traço do concreto, considerando-se determinado percentual de adição, foi indiferente perante o desempenho à abrasão. Porém, é importante salientar que toda areia artificial quando produzida contém um percentual de material passante na peneira #200, em geral, acima de 10%. Esse material é comumente removido por lavagem, gerando, dessa forma, um custo financeiro adicional à produção, além de ocasionar impactos ambientais associados ao descarte do material removido.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____.NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro. 2003.

_____.NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007.

_____, NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

_____.NBR 7211. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2009.

_____.NBR 7218. Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis, Rio de Janeiro. 2010.

_____.NBR 7221. Agregado — Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas — Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2012.

_____.NBR 7222. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2010.

_____.NBR 7389. Apreciação petrográfica de materiais naturais para utilização como agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2009.

_____.NBR 7583. Execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico. Rio de Janeiro. 1986,

_____.NBR 9935. Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro. 2011.

_____. NBR 12042. Materiais inorgânicos. Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro. 1992.

_____.NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2005.

_____.NBR NM 30. Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro. 2001.

_____.NBR NM 45. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006.

_____.NBR NM 46. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003.

_____.NBR NM 49. Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro. 2001.

_____.NBR NM 52. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

_____.NBR NM 53. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2009.

_____,NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 1998.

_____.NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

American Concrete Institute, **ACI 302.1R-04**. Guide for Concrete Floor and Slab Construction. 2004.

AIQIN, W.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. **The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cements**. Cement and concrete research. 1999

AITCIN, P.C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**.Ed. Taylor e Francis, 2008.

ALMEIDA, S. L. M.; SILVA, V. S. **Areia artificial: Uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados**. In: II SUFFIB - SENINÁRIO: o Uso da Fração Fina da Britagem. 2005. São Paulo. Artigos em CDROM. São Paulo, (2005)

ASTM C 33, **Standard Specification for Concrete Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, 2013.

ASTM C123/C123M, **Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregate**. in: Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, 2014.

ASTM C 1138, **Standard test method for abrasion resistance of concrete (underwater method)**, in: Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, 1997.

ASTM C 779/C 779M, **Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces**, in: Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, 2012.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D. **Concretos autoadensáveis com incorporação de resíduos de britagem de rochas: desempenho no estado fresco**. 3º Congresso Ibéroamericano sobre betão auto-compactável. Madrid, 2012.

BARBOSA, M. T. G.; COURA, C. V. G.; MENDES, L. O. **Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto**. Revista Ambiente construído, Porto Alegre, v. 8, n. 8, p. 51-60, 2008.

BASTOS, S. R. B. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

Brum, I.A.S.; Oliveira Júnior, J.B.; e Santos, M.C. **Análise do plano de recuperação de áreas degradadas pela mineração areia Otomar Mineração**. In: VI Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology e XVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, volume 3, p. 340-344, Rio de Janeiro, maio 2001.

BRUNDTLAN, Comissão. **“Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: o nosso futuro comum.** Universidade de Oxford. Nova Iorque, 1987

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento portland.** Dissertação apresentada a Universidade federal do Paraná. Curitiba. 2006.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.,. **A importância da avaliação reológica de pastas com e sem sílica ativa para produção de concretos estruturais com cimento Portland para obras marítimas.** In: Seminary and Workshop for Oceanic Engineering. Rio Grande/RS. 2004.

ÇELIK, T.; MARAR, K. **Effects of crushed stone dust on some properties of concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 26. 1996.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM. **Areia artificial pode ser a opção mais barata.** internet. 2004.

DAMO, G. F., **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland.** Dissertação apresentada Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011.

DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J. N. F. **Utilização do planejamento experimental em rede simplex no estudo de resíduo de rocha ornamental como filler para obtenção de máxima compacidade.** Revista Cerâmica nº 57, p 491-498. 2011.

DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. **Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento portland.** Revista Esc. Minas, Ouro Preto, 62(3): 399-408, jul. set. 2009.

ELETROBRÁS. **Critérios de projetos civil de usinas hidrelétricas.** Rio de Janeiro. 2003.

ELKINGTON, J. **Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. New Society Publishers. Gabriola Island BC: Canada, 1998.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 132 p. 2002.

FREITAS, C. **Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação com material de reparo em superfícies hidráulicas**. Dissertação apresentada a Universidade federal do Paraná. Curitiba. 2007.

GALVÃO, J. C. A. **Uso de materiais poliméricos reciclados em estruturas de concreto para superfícies hidráulicas**. Tese apresentada a Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

GHAFOORI, N.; TAYS, M. W. **Resistance to wear of fast-track Portland cement concrete**. Construction and building materials 24, 1424-1431, 2010.

GONÇALVES, J. P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental e contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese apresentada na COPPE, na Universidade Federla do Rio de Janeiro, 2005.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. **Avaliação da influencia da utilização do resíduo de corte de granito (rcg), como adição, em propriedades mecânicas do concreto**. Ambiente construído. Porto Alegre. 2002.

HENDRINKS, C. A.; WORREL, JAGER, E. D.; BLOK, K.; RIME. P. **Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry**. Greenhouse Gas R&D. 2004.

HORSZCZARUK, E. **Abrasion resistance oh high-strength concrete in hydraulic structures**. Science direct. 2005.

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

JOHN, V. M.; ANGULO, S. C.; KAHN, H. **Controle da qualidade dos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos a partir de uma ferramenta de caracterização**. Coletânea Habitare, volume 7. 2006.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem, 2005**. Disponível em: <<http://www.placogyps.com.br/download/A%20Constru%E7%E3o%20Civil%20e%20o%20Meio%20Ambiente.pdf>>. Acesso em: 20/04/2014.

KILIÇ, A.; ATIS, C.D.; TEYMEN, A.; KARAHAN, O.; OZCAN, F., BILIM, C.; OZDEMIR, M., **The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete**. Cement & concrete composites 30 290-296. 2008.

KLEIN, N. S. **influencia da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação apresentado a Universidade Estadual de Londrina. Londrina. 2008.

KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. Dissertação apresentada a Universidade federal do Paraná. Curitiba. 2002.

KUCK, D. W. **Ciência hoje on-line**. Instituto Ciência Hoje. Rio de Janeiro. 2004.

KUMAR, G. B. R.; SHARMA, U. K. **Abrasion resistance os concrete constaining marginal aggregates**. Construction and Building materials. Vol 66. Pag 712-722. 2014.

LANG, C. L. **Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento Portland.** Dissertação apresentado a Universidade federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

Li, H.; Xiao, H. G.; Yuan, J.; Ou, J.P. **Microstructure of cement mortar with nano-particles**, Composites Part B: Eng. 35 (2004)

Li, H.; Zhang, M.H.; OU, J.P. **Abrasion Resistance of Concrete Containing Nanoparticles for Pavement**, Wear Journal, 260: 1262-1266, 2006.

LODI, V. H.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó - SC.** In: Workshop Desempenho de Sistemas Construtivos, Unochapecó, Chapecó, SC, novembro de 2006.

MARLAND, G.; ANDRES, R. J. **Global, Regional, and National CO₂ Emissions in Trends: A Compendium of Data on Global Change.** Oak Ridge, Tenn,U.S.A.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energ, 2003.

MELO NETO, A. A.; REPETTE, W. L.; CINCOTTO, M. A. **Influência do teor de ativador e da idade de exposição na retração por secagem de argamassas com cimentos de escória ativada com silicato de sódio.** USP-Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica, 13 p. Boletim Técnico São Paulo 2003..

MENDES, K. S. (1999). **Viabilidade do emprego de finos de basalto em concreto compactado a rolo** Dissertação de Mestrado. Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

MENOSSEI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. 2004.

MEHTA, P. K. **Greening of the concrete industry for sustainable development.** Concrete international. Dallas. 2002.

METHA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **CONCRETO – Estrutura, Propriedades e materiais.** São Paulo, Ed. Pini, 2008.

NAIK, T.R.; SINGH, S.S.; HOSSAIN, M.M. **Abrasion resistance of highstrength concrete made with class C fly ash,** ACI Mater. J. 92. (1995).

Oliveira, I. R.; Studart, A. R. Pileggi, R. G; Pandolfelli, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo. 2000.

NANTHAGOPALAN, P.; SANTHANAM, M. **Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand.** Cement and concrete composites nº 33. P 353-358. 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** São Paulo: PINI, 1997,

OLIVEIRA, P. S. F.; LULA, L. **Tratamento anti-pó para pisos de concreto com endurecedores de superfície químicos à base de flúor-silicatos metálicos.** Revista Pisos Industriais, 5ª ed., SP, 2006.

PAPAYIANNI, I.; TSOHOS, G.; OIKONOMOU, N.; MAVRIA, P. **Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures.** Cement and Concrete Composites. N°27. 2005.

PISKE, A. A. R. S.; CAMPOS, H. F.; PASSOS, T. R. S. T., **Boas práticas de construção e patologia em estruturas de concreto: uma visão sustentável.** Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao fim do curso de engenharia civil, UFPR. 2013.

QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. **The effects of aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete.** International Center for Aggregates Research, Austin. 2004.

RASHAD, A.; **A preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete.** Construction and Building Materials, 44, 487-495, 2013.

RODRIGUES, F. S. Sumário mineral. In: **Guia do Investidor no Brasil.** Brasília: DNPM; 2006.

RODRIGUES, P. F.; MONTARDO, J. P. **A influencia da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos.** 44º Ibracon. Belo horizonte. 2002.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Obtenção de arei artificial com base em finos de pedreiras.** Contribuição técnica elaborada para a revista Areia e Brita. Rio de Janeiro, 2002)

SBRIGHI NETO, C. **A Importância dos Conceitos Tecnológicos na Seleção dos Agregados para Argamassas e Concretos.** Revista Areia & Brita. EMC-Editores; nº 12; pg 26 e 27, 2001.

SELEEM, H.E.H.; EI-HEFNAWY, A. **Evaluating the Effects of Gravel Fine Impurities on Concrete Performance.** Journal of Engineering and Applied Science, Vol. 50, No. 6, pp. 1073-1089. 2003.

SIDDIQUE, R. **Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the abrasion resistance of concrete.** Cement and Concrete research 33, 1877-1881, 2003

SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho. Propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** Tese apresentada a Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2000.

SILVA, J. R. S. **Princípios para eficiência dos sistemas de gestão de resíduos de construção e demolição.** Dissertação apresentada a Universidade nova de Lisboa. Lisboa, 2011.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. **Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS)**, Construction and Building Materials 28, 421–426, 2012.

STEWART, J.; NOVELL, J.; JUENGER, M.; FOWLER, D.W. **Characterizing Minus No. 200 Fine Aggregate for Performance in Concrete**. Report No. 107. International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin. 2006.

TOPÇU, I. B.; UGURLU, A. **Effect of use mineral filler on the properties of concrete**. Cement and Concrete Research. Amsterdam, v. 33, p. 1071-1075, 2003.

TOPÇU, I. B.; DEMIR, A. **Relationship between methylene blue values of concrete aggregate fines and some concrete properties**. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008.

VALVERDE, F. **Agregados para a construção civil**. In: Sumário Mineral. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral - DIDEM, p. 37-41, 2006.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento portland**. Dissertação apresentada a Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2008.