

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETO PELO VOLUME DE  
PASTA COM EMPREGO DE CINZA VOLANTE**

Fernando Antonio Piazza Recena

Porto Alegre  
2011

# **MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETO PELO VOLUME DE PASTA COM EMPREGO DE CINZA VOLANTE**

Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte da Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia. Orientação: Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

**FERNANDO ANTONIO PIAZZA RECENA**

Porto Alegre

2011

# **MÉTODO DE DOSAGEM DE CONCRETO PELO VOLUME DE PASTA COM EMPREGO DE CINZA VOLANTE**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Construção civil, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de setembro de 2011.

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela USP  
Orientadora

Profa. Fernanda Macedo Pereira (CIENTEC/ULBRA)  
Dra. pela UFRGS  
Coorientadora

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

## **BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Vladimir Antonio Paulon (UNICAMP)**  
Dr. pela USP e Livre docência pela UNICAMP

**Prof. André Luiz Bortolacci Geyer (UFG)**  
Dr. pela UFRGS

**Prof. Ruy Alberto Cremonini (UFRGS)**  
Dr. pela USP

**Profa. Ângela Borges Masuero**  
Dra. pela UFRGS



## AGRADECIMENTOS

Agradecer não é apenas um compromisso de educação ou uma manifestação de civilidade, mas sim, antes de tudo, uma demonstração de que ninguém convive conosco por acaso. O grande e principal agradecimento deve ser feito à vida, ao criador em suas mais diversas formas de manifestação.

Por mais que tenhamos cuidado sempre há o risco de cometermos injustiças pelo esquecimento.

O mais simples seria dizer apenas agradeço a todos que me ajudaram, mas dessa maneira estaríamos cometendo a injustiça por minimizar a colaboração daqueles que efetivamente representaram a diferença.

Assim, o grande e primeiro agradecimento deve ser feito a uma amiga, responsável direta pela realização desse trabalho, pelo incentivo, pelo apoio, pela viabilização e, principalmente, pela amizade, Professora Denise Carpena Coitinho Dal Molin orientadora dessa Tese.

Em seguida à amiga e colega de CIENTEC Professora Fernanda Macedo Pereira, coorientadora, que se dispôs a conversas diárias sobre o trabalho, pela revisão e pela dedicação.

À CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia, instituição à qual dediquei inteiramente minha vida profissional em seus 35 anos, com especial atenção ao Laboratorista Nelson Postal pelo apoio na caracterização dos cimentos e adições.

À PUC RS – Pontifícia Universidade Católica, onde exerço atividade docente, que franqueou o Laboratório de Materiais de Construção Civil para que fosse desenvolvida a parte prática da pesquisa e pelo apoio irrestrito do Laboratorista José Eduardo Gerhardt da Luz.

À ULBRA – Universidade Luterana do Brasil pelas análises que empregaram o (MEV) Microscópio Eletrônico de Varredura.

À CONCREPEDRA – Concreto e Pedreiras empresa para a qual presto consultoria e onde nasceu a ideia principal da pesquisa e onde as primeiras experiências foram realizadas, nas pessoas de seu Diretor Fábio Melro Zandoná e dos Engenheiros Adriano Fontana, Eduardo Tenn Pass e André Van Der Lan.

À PRÉ-CONCRETOS ENGENHARIA que, além de fornecer os agregados para o trabalho, também permitiu que testes fossem realizados em sua produção, nas pessoas de seu Diretor Engenheiro José Paulo Grings e da Engenheira Fernanda Dutra.

À COMPANHIA DE CIMENTO ITAMBÉ pelo apoio e o fornecimento do cimento.

À Engenheira Ana Carolina Kamura de Lucca pela ajuda inestimável na formatação do texto e ao acadêmico Ricardo Girardi pelo apoio fundamental no desenvolvimento e produção dos concretos em estudo.

Aos colegas do Departamento de Materiais de Construção Civil da CIENTEC, Rita de Cássia Barbosa Fernandes, Adair Paulo Dorneles Severo, João Gilberto Veiga Ramos, Abílio Saraiva e José Wilson Klunk, pois o conhecimento que me conduziu à realização desse trabalho é fruto de uma vida que em seu aspecto técnico foi compartilhada com essas pessoas.

Não te irrites, por mais que te fizerem...  
Estuda, a frio, o coração alheio.  
Farás, assim, do mal que eles te querem,  
teu mais amável e sutil recreio...  
Todos estes que aí estão  
Atravancando o meu caminho  
Eles passarão  
Eu passarinho

Mário Quintana

## RESUMO

RECENA, F. A. P. Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O presente trabalho foi desenvolvido como intuito de estabelecer uma metodologia de dosagem de concreto com uso de cinza volante, objetivo e racionalizado, visando à redução do consumo de cimento e a intensiva utilização de um resíduo poluente, contribuindo para o incremento na sustentabilidade da construção civil pela redução no consumo de clínquer e da liberação de dióxido de carbono para a atmosfera. Foi estabelecida como premissa basilar a hipótese de ser possível relacionar diretamente a trabalhabilidade de um concreto com seu volume de pasta, sendo este tanto menor quanto menor for o volume de vazios da estrutura granular representada pela composição de agregados. Foram empregados quatro agregados, duas areias naturais e duas britas. A mistura das areias foi definida pela menor massa unitária e os agregados graúdos, de maneira a ser obtido o menor volume de vazios. Com a composição de agregados otimizada é definido o volume ótimo de pasta no traço de melhor trabalhabilidade por verificar um dado índice de consistência com o menor teor de água sobre o total de materiais secos. Considerando a cinza volante parte integrante da pasta foram avaliados diferentes critérios para a definição das proporções a serem incorporadas à pasta, tendo como balizamento o volume ótimo de pasta. Foi desenvolvida uma metodologia de cálculo de traços não convencional uma vez que o parâmetro de entrada é a percentagem de substituição de cimento por cinza e não mais a relação água/cimento. Para fins de validação do método proposto foi desenvolvido um estudo baseado no estabelecimento de um paradigma representado por uma dosagem experimental de concreto, sem emprego de cinza volante, que permitiu o cálculo de traços de referência. Com os mesmos materiais e idêntico proporcionamento entre agregados foram desenvolvidas dosagens pelo método proposto que permitiram o cálculo de traços com base nas mesmas resistências à compressão e a comparação através do consumo de cimento calculado em cada situação. É o resultado da presente pesquisa, então, um método de dosagem, no qual a cinza volante é um insumo indispensável, baseado em conceitos diferentes daqueles adotados até então estabelecidos pelos critérios tradicionais da tecnologia do concreto.

*Palavras-chave: concreto, dosagem, cinza volante.*



## ABSTRACT

RECENA, F. A. P. Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego de cinza volante. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Concrete mix-proportioning method by cement paste volume using fly ash

This study was developed in order to create and a streamlined methodology of concrete mix proportioning using fly ash to reduce the cement content and an intensive use of a pollutant contributing to the increase of sustainability in construction through reducing consumption of clínquer and the release of carbono dioxide to the atmosphere. It was established as a basic premissa the possibility of connecting directly the workability of concrete with the volume of cement paste used determinate by the most dense aggregate-packing by the smaller volume of voids in the granular structure obtained in composition of many aggregates as necessary. It was used four commercial aggregates, two natural sands and two kind of crushed stone which were commonly found in a construction materials market around Porto Alegre. The sand were mixed according to the mixture that resulted in lower bulk density and coarse aggregate to be obtained the lower volume of voids as possible, being rightly measured. With the composition of aggregate optimized the optimum volume of cement paste that give the best workability with the lower water requirement will be definite. Considering fly ash as a part of the binder it was developed different criteria for define the amount of fly ash to be incorporate in binder having as foundation the volume admitted as responsible for the best workability mixture. To calculation the concrete mix proportions, was adopted an innovative methodology from the percentage replacement of cement by fly ash and no more by the water/cement ratio. The development of the proposed study was based on creating a paradigma represented by a mix-proportioning without fly ash which allowed the calculation of mix proportions of reference. With the same materials and same proportions between the aggregate, were calculated mix proportions to attend the same compressive strength to compare by the cement content of each situation. Thereby the rresults from this study a mix-proportioning method of concrete using fly ash as an imperative input, based in diferentes concepts of given for traditional concrete technology.

Keywords: Concrete, mix-proportioning, fly ash

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: relação existente entre o consumo de água e o volume de pasta seca.....	61
Figura 2: relação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos real do concreto sem cinza .....	75
Figura 3: relação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos corrigido do concreto sem cinza .....	75
Figura 4: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto sem cinza .....	76
Figura 5: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto sem cinza .....	77
Figura 6: relação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos real do concreto com cinza .....	79
Figura 7: relação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos corrigido do concreto com cinza .....	79
Figura 8: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto com cinza .....	80
Figura 9: relação entre % de substituição e relação água/cimento.....	80
Figura 10: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto com cinza .....	81
Figura 11: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão ....	83
Figura 12: corpos de prova prismáticos após a desforma .....	105
Figura 13: verificação da evolução da frente de carbonatação avaliada em corpos de prova com 25 semanas de idade .....	105
Figura 14: verificação da evolução da frente de carbonatação com 118 semanas de idade	106
Figura 15: aspectos a serem considerados em um procedimento de dosagem de concreto .....	120
Figura 16: equipamento montado .....	133
Figura 17: equipamento desmontado.....	134
Figura 18: êmbolo dentro do cilindro permitindo a leitura na régua.....	134
Figura 19: representação gráfica da calibração do equipamento para determinação do teor de argamassa .....	142
Figura 23: cimento empregado no estudo visto ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes .....	148
Figura 20: difratograma obtido da análise da cinza 4195. ....	156
Figura 21: difratograma obtido da análise da cinza 2680. ....	157
Figura 22: difratograma obtido da análise da cinza 3140. ....	157

Figura 24:cinza 2680 vista ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes .....	158
Figura 25:cinza 3140 vista ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes .....	159
Figura 26:cinza 4195 vista ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes .....	160
Figura 27:curva que relaciona o fator de adensamento da mistura de areia média e areia fina .....	162
Figura 28: método gráfico para determinar a proporção entre as britas .....	163
Figura 29: equipamento empregado na mistura dos concretos.....	170
Figura 30: equipamento empregado no ensaio de remoldagem simplificado .....	171
Figura 31: conjunto montado sobre a mesa de consistência.....	171
Figura 32:relação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 47% de argamassa, calculado em massa .....	178
Figura 33:relação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 49% de argamassa, calculado em massa .....	178
Figura 34:relação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 51% de argamassa, calculado em massa .....	178
Figura 35:relação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 53% de argamassa, calculado em massa .....	179
Figura 36: curva de Abrams do concreto de referência.....	194
Figura 37:relação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos .....	195
Figura 38: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão .	198
Figura 39: método gráfico para identificação do traço de melhor reologia.....	199
Figura 40: curva de Abrams para o concreto com adição .....	202
Figura 41: relação entre a relação água/cimento e a % de adição.....	203
Figura 42:relação entre relação água/cimento e percentagem de água sobre o total de materiais secos.....	203
Figura 43 :relação entre o consumo de cimento e a resistência característica à compressão .....	206
Figura 44: relação entre % de substituição e resistência à compressão .....	212

Figura 45:relação entre resistência à compressão e teor de água sobre o total de materiais secos .....	212
Figura 46 : relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante .....	212
Figura 47: relação entre $f_{ck}$ e consumo de cimento .....	215
Figura 48: relação entre resistência à compressão e % de substituição .....	217
Figura 49:relação entre resistência à compressão e teor de água sobre o total de materiais secos .....	217
Figura 50: relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante .....	217
Figura 51: relação entre consumo de cimento e $f_{ck}$ .....	220
Figura 52: relação entre resistência à compressão e % de substituição .....	222
Figura 53:relação entre resistência à compressão e teor de água sobre o total de materiais secos .....	222
Figura 54: relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante .....	222
Figura 55: relação entre consumo de cimento e $f_{ck}$ .....	225
Figura 56: relação entre resistência à compressão e % de substituição .....	226
Figura 57:relação entre resistência à compressão e teor de água sobre o total de materiais secos .....	227
Figura 58: relação entre consumo de cimento e $f_{ck}$ .....	229
Figura 59: relação entre resistência à compressão e % de substituição .....	231
Figura 60:relação entre resistência à compressão e teor de água sobre o total de materiais secos .....	231
Figura 61 : relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante .....	231
Figura 62: relação entre consumo de cimento e $f_{ck}$ .....	234
Figura 63: relação entre resistência à compressão e % de substituição .....	236
Figura 64: relação entre consumo de cimento e $f_{ck}$ .....	238
Figura 65: relação entre % de adição e resistência à compressão.....	243
Figura 66: relação entre % de adição e teor de água sobre o total de materiais secos .....	243
Figura 67: relação entre % de substituição e relação água/cimento.....	245

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: expectativa de produção de cinza volante na região sul do Brasil até 2014 (ROHDE, 2006).....	21
Tabela 2: esquema de dosagem de concreto com emprego de cinza volante adotado pela CIENTEC.....	43
Tabela 3: valores do índice de redução de água em função do volume de pasta seca .....	61
Tabela 4: resultados obtidos por Lyse, relacionando diferentes traços e diferentes cimentos com o abatimento pelo tronco de cone a partir de um mesmo consumo de água (LYSE, 1932).....	63
Tabela 5: variações máximas verificadas no experimento de Lyse em comparação com a amplitude prevista pela norma brasileira citada para cada nível de abatimento pelo tronco de cone (LYSE, 1932).....	63
Tabela 6: coeficientes de correlação obtidos da relação entre consumo de cimento e resistência à compressão observados em uma série histórica .....	70
Tabela 7: parâmetros estatísticos da amostra.....	70
Tabela 8: parâmetros de dosagem do concreto produzido sem cinza.....	74
Tabela 9: correção do teor de água sobre o total de materiais secos para um mesmo abatimento pelo tronco de cone do concreto sem cinza .....	74
Tabela 10: valores de consumo de cimento para diferente resistência características à compressão do concreto sem cinza.....	76
A tabela 11 relaciona resumidamente os valores dos parâmetros obtidos experimentalmente. ....	77
Tabela 11: parâmetros de dosagem do concreto produzido com cinza.....	77
Tabela 12: correção do teor de água sobre o total de materiais secos para um mesmo abatimento pelo tronco de cone do concreto com cinza .....	78
Tabela 13: valores de consumo de cimento para diferente resistência características à compressão do concreto com cinza.....	81
Tabela 14: consumo de cimento corrigido.....	83
Tabela 15: resultados obtidos dos ensaios físicos realizados sobre argamassas produzidas com um mesmo traço e diferentes relações a/c.....	95
Tabela 16: resistência à compressão de argamassas produzidas com um mesmo traço e diferentes relações a/c.....	95
Tabela 17: resultados dos ensaios físicos realizados em argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços .....	96
Tabela 18: resistência à compressão de argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços .....	96

Tabela 19: resultados dos ensaios físicos realizados sobre argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços .....	98
Tabela 20: resistência à compressão de argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços .....	98
Tabela 21: características das argamassas empregadas na segunda repetição do estudo .	99
Tabela 22: resultados dos ensaios físicos realizados sobre argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços .....	99
Tabela 23: resistência à compressão de argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços .....	100
Tabela 24: volume de pasta calculado em cada argamassa empregada na segunda repetição do estudo .....	102
Tabela 25: valores de absorção de água por capilaridade de argamassas empregadas na segunda repetição do estudo.....	102
Tabela 26: valores de massa específica calculado sobre corpos de prova, considerando o volume aparente.....	103
Tabela 27: evolução da frente de carbonatação avaliada em corpos de prova prismáticos referentes o trabalho realizado como segunda repetição do estudo .....	104
Tabela 28: massa específica dos materiais considerados no estudo .....	136
Tabela 29: fatores de correção individuais do teor de argamassa.....	140
Tabela 30: calibração do equipamento para determinação do teor de argamassa.....	141
Tabela 31: caracterização química do cimento empregado no estudo .....	147
Tabela 32: parâmetros físico mecânicos do cimento empregado no estudo .....	147
Tabela 33: massa específica e massa unitária.....	149
Tabela 34: material fino passante na peneira de 75 µm, pôr lavagem .....	150
Tabela 35: distribuição granulométrica das areias .....	150
Tabela 36: distribuição granulométrica das britas .....	151
Tabela 37: massa específica e superfície específica das cinzas volantes empregadas no estudo .....	152
Tabela 38: desvio relativo máximo da superfície específica das amostras de cinza em relação ao valor médio amostral.....	153
Tabela 39: índice de atividade pozolânica .....	154
Tabela 40: análise química quantitativa das cinzas .....	155
Tabela 41: diâmetro das partículas das cinzas .....	155
Tabela 42: fator de adensamento das misturas de areia.....	162
Tabela 43: volume de vazios de misturas de brita em relação à proporção de brita e brita 1 na mistura.....	163
Tabela 44: resultados do estudo relacionando teor de argamassa e trabalhabilidade.....	172

Tabela 45: elementos de variação das resistências à compressão obtidas no estudo para identificação do melhor teor de argamassa .....	174
Tabela 46: valores de índice de remoldagem e teores de argamassa .....	175
Tabela 47: valores de abatimento pelo tronco de cone e teores de argamassa.....	175
Tabela 48: estimativa de H para um mesmo abatimento pelo tronco de cone .....	177
Tabela 49: consumo de cimento de traços calculados com diferentes teores de argamassa e com o teor de água sobre o total de materiais secos corrigida para um mesmo abatimento pelo tronco de cone.....	180
Tabela 50: influência da distribuição granulométrica na trabalhabilidade .....	181
Tabela 51: influência da distribuição granulométrica na trabalhabilidade, repetição .....	182
Tabela 52: relação entre trabalhabilidade e módulo de finura de diferentes concretos .....	184
Tabela 53: resistência de dosagem .....	191
Tabela 54: características do concreto de referência.....	193
Tabela 55: traço calculado para concreto classe C15.....	197
Tabela 56: parâmetros de dosagem e consumo de cimento para os traços de referência .	198
Tabela 57: resumo dos resultados do concreto produzido com adição de cinza volante....	201
Tabela 58: traço calculado para um concreto C15.....	205
Tabela 59: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência .....	206
Tabela 60: valores medidos do expoente x.....	207
Tabela 61: quantidade de materiais empregados na produção de concreto no laboratório	209
Tabela 62 : resumo das características do concreto produzido com a cinza 3140, com correção do volume .....	211
Tabela 63: traço calculado para um concreto C 15 .....	213
Tabela 64: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços calculados .....	215
Tabela 65: resumo das características do concreto produzido com a cinza 3140, sem correção do volume .....	216
Tabela 66: traço calculado para concreto C15.....	218
Tabela 67: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência .....	219
Tabela 68: resumo dos resultados obtidos com o concreto com adição de cinza volante 2680 com correção de volume .....	221
Tabela 69: traço calculado para um concreto C15.....	223
Tabela 70: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência .....	224

Tabela 71: resumo dos resultados obtidos com o concreto com adição de cinza volante 2680 sem correção de volume .....	226
Tabela 72: traço calculado para um concreto C15 .....	228
Tabela 73: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência .....	228
Tabela 74: resumo das características do concreto produzido com a cinza 4195 com correção do volume .....	230
Tabela 75: traço calculado para um concreto C15 .....	232
Tabela 76: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência .....	233
Tabela 77: resumo das características do concreto produzido com a cinza 4195 sem correção do volume .....	235
Tabela 78: traço calculado para um concreto C15 .....	237
Tabela 79: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência .....	237
Tabela 80: resumo dos traços calculados com a cinza 4195 sem correção do volume .....	238
Tabela 81: resumo dos traços simplificados calculados com a cinza 4195 sem correção do volume .....	239
Tabela 82: traço calculado por interpolação a partir da % de substituição, com a cinza 4195, sem correção do volume .....	241
Tabela 83: resumo das características do concreto produzido com adição da cinza 4195.	242
Tabela 84: traço calculado para concreto C 40 a partir da adição de cinza.....	245
Tabela 85: traços finais obtidos do estudo realizado com a cinza a cinza 4195 com correção do volume e traço adicional calculado pela relação entre a resistência característica à compressão e o consumo de cimento .....	247
Tabela 86: resumo dos consumos de cimento obtidos das diferentes maneiras de cálculo de traços .....	253



## LISTA DE ABREVIATURAS

IR - índice de remoldagem

s – abatimento pelo tronco de cone

s – *desvio padrão*

Ex – exemplar

fcm – resistência à compressão média

fcj – resistência à compressão a j dias de idade

fck – resistência característica à compressão

% ci – percentagem de cimento

C – consumo teórico de cimento

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul

Cin – cinza volante

Cim – cimento

a/c – relação água/cimento

a/agl – relação água/aglomerante

% subst. - % de substituição de cimento por cinza volante

% ad – percentagem de adição de cinza volante sobre o cimento

r<sup>2</sup> - coeficiente de correlação

si – abatimento pelo tronco de cone inicial

sf – abatimento pelo tronco de cone final

H – percentagem de água sobre o total de materiais secos de um concreto

Hi – percentagem de água sobre o total de materiais secos inicial de um concreto

Hf - percentagem de água sobre o total de materiais secos final de um concreto

1:m – traço unitário em massa de um concreto

m – quantidade de agregados no traço unitário em massa de um concreto

$\alpha$  - teor de argamassa de um concreto

a – quantidade de agregado miúdo em massa no traço unitário de um concreto

p - quantidade de agregado graúdo em massa no traço unitário de um concreto

V – volume

M – massa

B0 – brita de graduação comercial 0

B1 – brita de graduação comercial 1

mesp. – massa específica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	24
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	24
<b>2 O USO DE CINZA VOLANTE</b> .....	26
2.1 CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER HISTÓRICO .....	26
2.2 O EMPREGO DE CINZA VOLANTE EM CONCRETO .....	29
2.3 PROCEDIMENTOS EMPREGADOS PELA CIENTEC PARA DOSAGEM DE CONCRETOS COM EMPREGO DE CINZA VOLANTE.....	40
<b>3 REVISÃO CONCEITUAL SOBRE CRITÉRIOS BÁSICOS DE DOSAGEM</b> .....	46
3.1 CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER GERAL SOBRE TRABALHABILIDADE.....	46
3.1.1 Fatores condicionantes da trabalhabilidade .....	47
3.1.2 Avaliação da trabalhabilidade .....	50
3.2. A TRABALHABILIDADE NO PROCESSO DE DOSAGEM .....	53
3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA DE INGE LYSE.....	62
3.3.1 Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento .....	69
3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA DE DUFF ABRAMS .....	85
3.4.1 Confirmação prática da proposta .....	94
<b>4 CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER GERAL SOBRE PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM DE CONCRETO</b> .....	110
4.1 PARÂMETROS A SEREM QUANTIFICADOS NUM PROCESSO DE DOSAGEM .....	118
4.1.1 Estimativa ou cálculo do teor de água sobre o total de materiais secos.....	121
4.1.2 Interação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos na definição de traços.....	122
4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ARGAMASSA.....	123
4.2.2 Proposição de uma metodologia de caráter objetivo .....	131
4.2.3 Aperfeiçoamento do método “Alemão Simplificado” .....	132
4.2.4 Outras aplicações para o equipamento desenvolvido .....	141
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	143
5.1 MATERIAIS EMPREGADOS NO ESTUDO .....	146
5.1.1 Cimento .....	146
5.1.2 Agregados .....	149
5.1.3 Cinza volante .....	151
5.2. ESTUDO PRELIMINAR .....	161
5.2.1 Proporcionamento dos agregados. ....	161
5.3 CÁLCULO DO TEOR DE ARGAMASSA .....	164

5.3.1 Otimização do teor de argamassa e identificação do traço de maior trabalhabilidade .....	167
5.4 comprovação prática através da reprodução de concretos preparados com as diferentes alternativas de mistura de agregados .....	169
5.4.1 Definição dos traços .....	169
5.4.2 Materiais empregados.....	169
5.4.3 Procedimento adotado .....	170
5.4.4 Resultados.....	171
5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A QUANTIDADE DE ÁGUA ADICIONADA ÀS MISTURAS .....	187
5.6 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PROPOSTO .....	191
5.6.1 Concreto de referência.....	192
5.6.2 Definição do traço de melhor comportamento reológico.....	198
5.6.3 Adição de cinza volante ao concreto de referência .....	199
5.6.4 Cálculo do expoente a ser empregado na fórmula usada para corrigir o valor de H..	206
5.7 Aplicação do princípio em estudo .....	207
5.7.1 Dosagem realizada com o emprego da cinza 3140.....	211
5.7.2 DOSAGEM REALIZADA COM O EMPREGO DA CINZA 2680.....	221
5.7.3 DOSAGEM REALIZADA COM O EMPREGO DA CINZA 4195.....	229
5.8 CÁLCULO DE TRAÇOS A PARTIR DA RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE CIMENTO E RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO .....	246
5.9 OUTRAS APLICAÇÕES DO PROCEDIMENTO PROPOSTO .....	247
5.9.1 Na dosagem de concretos auto-adensáveis .....	247
5.9.2 Na dosagem de concretos para fabricação de peças pré-moldadas .....	249
5.9.3 Na dosagem de concretos para compactação com rolos .....	250
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>252</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	253
6.2 SUGESTÃO PARA A CONTINUIDADE DO ESTUDO .....	256
6.3 MENSAGEM FINAL DO AUTOR .....	257
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>258</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O uso de cinza volante em concreto é um tema recorrente e por demais conhecido, sendo um expediente largamente empregado que permite ser auferida, na maioria das vezes, alguma vantagem econômica, além de outros benefícios técnicos relacionados com resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade.

Segundo Mehta (2004), o emprego de cinza volante em substituição ao cimento Portland permite esperar ser reduzida a demanda de água, ser incrementada a trabalhabilidade, ser reduzida a corrosão da armadura em concreto armado, ser minimizada a probabilidade de fissuração por efeito térmico e secagem, além de aumentar a durabilidade de uma maneira geral, mitigando a reação álcali sílica e inibindo a reação com sulfatos.

Com relação à preservação do meio ambiente, não há necessidade de expor o caráter poluente desse material, como de resto igualmente se torna desnecessário apresentar razões para justificar o emprego de cinza volante em concretos e argamassas.

Ainda segundo Mehta (2004), o emprego de elevado volume de cinza volante em concreto constitui uma solução holística para o problema representado pela demanda de concreto no futuro de forma sustentável, sem custos adicionais, reduzindo simultaneamente o impacto no meio ambiente causado pela atividade de duas indústrias fundamentais para o desenvolvimento econômico da humanidade, a indústria cimenteira e a geração de energia via combustão de carvão fóssil.

Silva (2010) cita o emprego de adições minerais, em particular o de cinza volante, como fundamental quanto ao aspecto de sustentabilidade na cadeia da construção civil pela redução no consumo de energia e pela diminuição da emissão de CO<sub>2</sub>.

Nos últimos anos, o consumo de cinza volante na produção de cimento pozolânico ou dos vários tipos de cimentos resistentes a sulfatos, na produção de cal hidráulica, na produção de argamassas industrializadas, em fábricas de pré-moldados ou em concreteiras tem aumentado sobremaneira, permitindo considerar a cinza volante um coproduto, visto ser empregada como um insumo cada vez com mais intensidade.

Sucedem que os novos investimentos na área de energia, reforçando a matriz energética do Estado do Rio Grande do Sul sobre o carvão mineral, determinarão um aumento significativo na oferta desse coproduto, o qual deverá ter um destino ecologicamente correto e, tanto quanto possível, economicamente viável.

A produção de cinzas originárias da combustão do carvão, nos Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, na geração de energia elétrica varia entre 10000 e 15000 toneladas por dia (ROHDE, 2006).

A entrada em operação de novas unidades térmicas de carvão na atual década deverá gerar aproximadamente 2000 MW de energia. Desse total já foram viabilizados 550 MW em favor da Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE) e TRACTEBEL Energia S. A. através de leilão realizado em dezembro de 2005 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (ROHDE, 2006).

Para permitir uma quantificação do potencial de produção anual de cinzas volantes originadas na queima de carvão mineral como combustível em termelétricas no sul do Brasil são apresentados os dados da tabela 1.

Tabela 1: expectativa de produção de cinza volante na região sul do Brasil até 2014 (ROHDE, 2006)

Situação	Termelétrica	Cinza volante (t/ano)	Estado
Em operação	Presidente Médici – Fases A e B	1500000	RS
	São Jerônimo	5000	RS
	Charqueadas	295000	RS
	Jorge Lacerda I, II, III e IV.	1500000	SC
	Figueira	50000	PR
Em construção	Presidente Médici fase C	1000000	RS
	Jacuí I	1000000	RS
Em projeto	Seival	1000000	RS
	USITESC	1500000	SC
	CT-SUL	1200000	RS

Como o grande emprego da cinza volante se verifica na indústria cimenteira, o aumento de consumo estará ligado diretamente ao aumento na produção de cimento que dependerá de novos investimentos a serem concebidos a partir do aquecimento da indústria da construção civil.

Está estimada em 20 bilhões de toneladas a produção anual mundial de cimento, o que corresponde a um consumo *per capita* de três toneladas. Sendo considerada uma taxa de crescimento anual na produção de cimento variando entre 8% a 10% é possível imaginar o incremento anual esperado na produção desse material e sua repercussão no meio ambiente, tendo em vista que para cada tonelada de clínquer produzida é liberada na atmosfera uma massa equivalente de dióxido de carbono (PEDROSO, 2008).

Em 1990, os fornos para produção de cimento liberavam para a atmosfera algo em torno de 940 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Em 2005, a estimativa feita dava conta de ter sido emitido 1,74 bilhão de toneladas do gás que, mantidas as projeções de crescimento de produção de cimento, representará 2,84 bilhões de toneladas até o ano de 2030 (PEDROSO, 2008).

Considerando apenas o aspecto ecológico, a conclusão óbvia sobre a estimativa feita sugere a necessidade imperativa de redução da produção de clínquer, o que é um pensamento tão romântico quanto ser possível imaginar uma redução no consumo de cimento pela humanidade.

A tendência observada é de aumento no consumo de cimentos compostos ternários, os quais têm agregados ao clínquer na etapa de moagem, além de gesso, calcário moído e materiais pozolânicos, podendo a matéria prima empregada na produção de cimentos do tipo Portland pozolânico representar, em caso extremo, não mais de 40% do total do cimento (ABNT NBR 5736:1991).

Não seria utopia pensar em reduzir o consumo de clínquer no cimento assim como o próprio consumo de cimento em concretos ou até mesmo em adotar resistências mais baixas onde fosse possível, desde que resguardada a durabilidade, ou sua obtenção em prazos mais dilatados.

Embora a viabilidade técnica das medidas aventadas no parágrafo anterior, ecologicamente responsáveis, esteja perfeitamente comprovada, sua adoção em larga escala depende ainda de uma mudança de paradigma. O emprego de resistências menores nos projetos pressupõe a adoção de medidas adicionais no sentido de garantir a durabilidade das estruturas através da proteção do concreto. O atingimento da resistência prevista no projeto em idades maiores determina uma alteração na velocidade das obras e uma logística diferenciada com relação à manutenção do escoramento e reaproveitamento de fôrmas. O potencial de resistência de concretos produzidos com cimentos pozolânicos pode ser esperado em prazos mais amplos, até 120 dias, o que, dependendo do tipo de estrutura, pode representar uma condição absolutamente aceitável.

Não pode ser considerado como contribuição à sustentabilidade o emprego de um cimento ecologicamente correto se o projeto prevê o atingimento de uma resistência elevada em curto espaço de tempo, condição que, para ser atendida, determina a elevação do consumo de cimento.

Muitas vezes o emprego de um cimento de alto rendimento pode significar menor consumo de clínquer por metro cúbico de concreto produzido do que o emprego de um cimento pozolânico, por exemplo, em uma muito elevada percentagem se isto for necessário para que sejam atendidas exigências de resistência à compressão, condição que, de certa maneira, contraria as características do cimento pozolânico que não desenvolve resistências iniciais elevadas.

Além da redução de consumo de clínquer na obtenção de cimentos compostos ternários, esforços devem ser empregados no desenvolvimento de técnicas de dosagem de concretos que permitam o cálculo de traços com consumos menores de cimento para uma mesma resistência esperada.

Para tanto, devem ser estudadas composições de agregados que privilegiem a trabalhabilidade com o intuito de propiciar redução na demanda de água, permitindo haver redução de cimento, mantida a relação água/cimento. Para o atingimento desse objetivo é imprescindível o emprego de aditivos plastificantes e superplastificantes, devendo representar o desenvolvimento desses um esforço importantíssimo para a consecução do objetivo final, qual seja, a redução da emissão de carbono pela indústria da construção civil.

Urge, portanto, que sejam desenvolvidos esforços no sentido de viabilizar o uso de resíduos na produção de concreto, em particular a cinza volante no sul do Brasil, em especial no Rio Grande do Sul, principalmente por concreteiras e indústrias de pré-moldados. Para tanto, é necessário abandonar o procedimento adotado até então caracterizado pela adição da cinza volante ao concreto, norteadas por considerações empíricas, e avaliação da eficácia a partir apenas do impacto sobre a resistência à compressão.

A dosagem de concretos com adições, em geral, é feita em analogia a procedimentos clássicos e o percentual de adição é definido apenas com o objetivo de ser atingida uma determinada resistência à compressão. Este pode ser considerado como o principal parâmetro objetivo, e a viabilização de operações de bombeamento de concretos com baixo consumo de cimento, como principal fator subjetivo.

Esses proporcionamentos são feitos sem critérios definidos e rotinizados, não havendo uma técnica documentada objetiva e comprovada experimentalmente que permita concluir pela



mais adequada quantidade de cinza a ser empregada na composição do aglomerante composto resultante, sem que um precioso tempo seja despendido em interações entre tentativa e erro.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Como objetivo principal da pesquisa, é posto o desenvolvimento de um método de dosagem de concretos com cinza volante em quantidades otimizadas, oferecendo à comunidade técnica uma metodologia alternativa para o cálculo de traços de concreto.

Em sendo atingido o objetivo da pesquisa, decorre, como consequência natural, a contribuição para a redução da emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, através do consumo de um resíduo na obtenção de misturas que permitam o atingimento de resistências estabelecidas em projeto com menor consumo de cimento.

Como contribuições adicionais a pesquisa apresenta:

- a) um equipamento simples para ser usado;
  - na determinação do teor de argamassa, baseada em um critério objetivo e reprodutível em qualquer ambiente, independentemente do operador,
  - na determinação do melhor proporcionamento entre agregados graúdos baseada na minimização do volume de vazios da mistura,
  - na determinação da massa específica e da massa unitária de agregados graúdos com o auxílio apenas de uma balança,
- b) a relação existente entre consumo de cimento e resistência à compressão, cuja aplicação representa uma poderosa ferramenta para correção de traços, em função de desvios observados na resistência à compressão obtida em uma produção, podendo ser empregado também como um procedimento alternativo de dosagem de concreto.

## 1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

No capítulo 1 são feitas considerações sobre a importância do trabalho e apresentados os objetivos principal e secundários.

Algumas considerações históricas são apresentadas no capítulo 2, baseadas nas informações obtidas da bibliografia disponível e na própria experiência do autor, apresentando o consagrado emprego de cinza volante na obtenção de composições aglomerantes. Nesse capítulo 2 são igualmente apresentados procedimentos de dosagem de concreto com o emprego de cinza volante, adotados como rotina na CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul bem como outros sugeridos em publicações internacionais.

No capítulo 3 são apresentadas algumas considerações sobre trabalhabilidade e os fatores condicionantes, e sobre a forma de quantificar a trabalhabilidade e sua importância num procedimento de dosagem.

Considerando a importância do resgate de informações sobre os estudos fundamentais desenvolvidos no passado e que regem os preceitos da tecnologia do concreto até os dias de hoje, em continuidade, no mesmo capítulo 3, são apresentadas considerações sobre os trabalhos de Inge Lyse (1932) e de Duff Abrams (1918), sendo tecidas algumas considerações críticas sobre os conceitos apresentados pelos pesquisadores. Nesse mesmo capítulo, são apresentados os resultados de um pequeno trabalho prático desenvolvido em laboratório, com a finalidade de argumentar sobre a possibilidade de condicionar a resistência mecânica de um concreto de uma forma mais ampla antes à sua porosidade, sendo a relação água/cimento apenas um parâmetro de controle. Ainda nesse capítulo é apresentada a relação existente entre consumo de cimento e resistência à compressão e sua potencialidade como ferramenta para cálculo e correção de traços em plantas que apresentem mais de um traço em sua grade de produção, especialmente as empresas de serviços de concretagem.

O capítulo 4 versa fundamentalmente sobre o procedimento de dosar concreto, elencando os parâmetros a serem quantificados no processo, relação água/cimento, teor de argamassa e percentagem ou teor de água sobre o total de materiais secos. É apresentado um método de caráter eminentemente objetivo para quantificação do teor de argamassa através de um equipamento que também pode ser empregado na determinação da massa específica e massa unitária de agregados graúdos e na obtenção do melhor proporcionamento entre diferentes agregados graúdos. Considerações de caráter geral sobre os princípios de alguns métodos clássicos de dosagem de concreto são igualmente apresentadas nesse capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta o programa experimental, relacionando os materiais empregados no estudo, apresentando suas características físicas e mecânicas e o estudo desenvolvido na determinação do melhor proporcionamento dos agregados. É apresentado um roteiro de dosagem pelo método proposto e uma comparação direta com um procedimento clássico através da avaliação do consumo de cimento calculado para traços de mesma resistência à compressão. São estudados concretos considerando três tipos diferentes de cinza volante com o intuito de evidenciar a flexibilidade do procedimento proposto.

No capítulo 6 são formuladas considerações de caráter geral com conclusões e sugestões para a continuidade do desenvolvimento da metodologia proposta.

## 2 O USO DE CINZA VOLANTE

### 2.1 CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER HISTÓRICO

Pode ser considerado milenar o conhecimento da alteração promovida sobre as características aglomerantes de cales aéreas pela adição de pozolanas na obtenção de misturas aglomerantes com maior resistência mecânica e de maior resistência à ação da umidade, conseqüentemente, de maior durabilidade.

Os romanos utilizavam tufo vulcânico do Vesúvio acumulado na região de Puzzuoli, próxima a Nápoles, sendo a partir desse evento estendido o nome de pozolana a qualquer material natural ou artificial dotado de mesma propriedade, qual seja a de reagir com a cal hidratada para formar compostos cimentícios oriundos da interação química que ocorre entre sílica e cal em presença de umidade (PRISZKULNIK, 1981).

Os gregos, por sua vez, adotavam em misturas com cal um material pozolânico identificado como "terra de Santorin" (SANTAMARIA, 1981).

Novos registros sobre o emprego de misturas de cal com pozolana aparecem em meados do século XVIII com os relatos referentes à reconstrução do farol de Eddystone, experiência que desencadeou o desenvolvimento do cimento Portland, como hoje conhecido, culminando com o início de sua produção industrial a partir da instalação da primeira fábrica na Alemanha, em 1855 (DUMET; PINHEIRO, 2000).

O surgimento do cimento Portland inicia uma fase de franco desenvolvimento do fenômeno hidráulico, cujo ápice ocorre entre o final do século XIX e início do século XX em função da evolução das técnicas de fabricação, envolvendo o controle da temperatura e a otimização da moagem e do desenvolvimento de métodos de ensaio. O conhecimento da composição química do clínquer permitiu a introdução de alterações, explorando o caráter hidráulico do aglomerante até o limite das leis que regem os princípios físico-químicos (SANTAMARIA, 1981).

Marcos Vitrúvio em "De Architectura", segundo o exposto por Priszkulnik (1981), descreve pozolana como:

[...] um pó que efetua naturalmente coisas admiráveis, encontrando-se nas regiões situadas em volta do monte Vesúvio, quando misturado com cal e com pedras contribui não só para a solidez dos edifícios ordinários, mas também consegue endurecer debaixo de água nos molhes que se constroem no mar.

Segundo a mesma fonte, o emprego de pozolanas no Brasil teve seu início associado à construção de barragens para o aproveitamento hidrelétrico de Jupirá, tendo sido usadas inicialmente cinzas volantes decorrentes da queima de carvão mineral como combustível nas termelétricas de Charqueadas e Candiota no estado do Rio Grande do Sul. Posteriormente foram empregadas pozolanas obtidas da calcinação de argilas de depósitos holocênicos do próprio local.

No Estado do Rio Grande do Sul, o desenvolvimento de cimentos pozolânicos teve início na década de 60, a partir de estudos realizados pelo então Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul (ITERGS), Gobetti e Scarrone (1969), visando o aproveitamento de um resíduo abundante, a cinza volante produzida pela usina termelétrica de Charqueadas, instalada no município gaúcho de mesmo nome.

A partir de então as duas fábricas existentes à época, a Companhia de Cimento Portland Gaúcho, hoje pertencente ao grupo Votorantin, e a fábrica de cimento Sol Nascente, hoje CIMPOR, passaram a produzir cimentos pozolânicos, obtidos a partir da mistura, no moinho, de clínquer e esta cinza volante.

Segundo informações verbais obtidas de funcionários da Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul - CIENTEC, a primeira grande obra executada com concreto usinado em Porto Alegre foi o complexo de pontes que permitem a travessia do Guaíba, na década de 1950. Naquele tempo a produção de concreto usinado era incipiente e consumia o cimento que se apresentava à disposição no mercado, sem exigências maiores, visto que as resistências adotadas eram baixas, viabilizando, inclusive, o emprego de agregados naturais de baixo desempenho, como o seixo rolado da região, além de o concreto ser produzido com abatimentos pelo tronco de cone baixos, em geral entre 50 e 70 mm, e lançado de forma convencional.

Com o progresso, o desenvolvimento da cidade transformou-a em um mercado atraente para o setor, sendo registrada a instalação de várias concreteiras em um curto espaço de tempo. Paralelamente, resistências mais elevadas foram sendo adotadas, obrigando a que as concreteiras buscassem materiais de melhor qualidade, não somente para atendimento às exigências do mercado, mas, e principalmente, para garantir condições de competitividade frente à concorrência mais e mais acirrada.

O início das operações de bombeamento, que exigiu uma melhor seleção dos agregados, inclusive com limitação da dimensão máxima característica, interferiu nos procedimentos de dosagem dos concretos, principalmente por exigir misturas de maior abatimento pelo tronco de cone e com mais elevado teor de argamassa.

Com o desenvolvimento de cimentos de características distintas daquelas verificadas nos cimentos até então empregados, principalmente com relação à finura, alguns problemas de bombeabilidade foram registrados na medida em que, com o aumento do rendimento dos cimentos, os consumos puderam ser diminuídos. O emprego de adições, particularmente a cinza volante disponível em Porto Alegre, foi desde então uma alternativa para correção do teor de finos de maneira a adequar a mistura às operações de bombeamento.

Em um determinado período, o cimento produzido no Rio Grande do Sul foi desclassificado para classe 25, o que obrigou até as concreteiras que ainda trabalhavam com o cimento pozolânico, a procurarem alternativas. Foi nesta época que o cimento produzido especialmente para a indústria de artefatos de cimento amianto sofreu adaptações e passou a ser consumido para a produção de concreto em algumas concreteiras.

Como o cimento produzido no Estado apresentava baixo rendimento, em comparação com outros tipos de cimento, as concreteiras começaram a importar o insumo de outros centros onde este se apresentava com maior rendimento em termos de resistência mecânica, o que garantia menores consumos de cimento por metro cúbico de concreto, para mesmas resistências.

Assim, concreteiras passaram a trabalhar com cimento Portland comum oriundo do Paraná (cimento Itambé e cimento Rio Branco), de São Paulo (cimento Itaú, cimento Eldorado e cimento Serrana). Para concreto produzido em obra a CIENTEC realizou dosagens experimentais empregando cimentos oriundos de Minas Gerais (cimento Ciminás), do Rio de Janeiro (cimento Irajá) e do vizinho Uruguai (cimento Artigas e cimento ANCAP), para citar os mais representativos, visto que, em determinados momentos, trabalhou-se inclusive com cimentos vindos de Pernambuco e de países europeus.

A evolução deste quadro configurou uma indústria cimenteira no Rio Grande do Sul que disponibilizava ao mercado de granel cimento Portland comum tipo I, em seguida tipo I-S, e cimento Portland especial para pré-moldados, precursor do cimento de alta resistência inicial tipo V. Em sacos, obtinha-se o tradicional cimento Portland pozolânico novamente da classe 32, para o atendimento mais dirigido ao varejo. Posteriormente o cimento CP I-S foi substituído pelo cimento CP II-Z e atualmente, além do cimento pozolânico é disponibilizado

ao mercado apenas cimento Portland tipo V (ARI), inclusive com adição de pozolanas, em fábrica, na obtenção de características de resistência à ação de sulfatos.

Paralelamente à necessidade de facilitar as operações de bombeamento de concretos dimensionados para atendimento de resistências características à compressão baixas, assim como 15, 18 e 20 MPa, ainda muito utilizados na década de 80 do século passado, e já com o objetivo de economizar, começaram a ser desenvolvidos os primeiros estudos visando a substituição de parte do cimento por cinza volante, ou sua simples adição na obtenção de um cimento composto preparado na própria usina.

A substituição de cinza volante deveria ser feita em percentagens que não comprometessem o rendimento original do cimento matriz, ou adicionada em quantidades que agregassem vantagens no aspecto trabalhabilidade, principalmente para facilitar a operação de bombeamento, visando principalmente à preservação do equipamento.

Os resultados foram bastante positivos o que justificou o interesse das concreteiras pela técnica e, em pouco tempo, muitas concreteiras da grande Porto Alegre e do interior do Estado do Rio Grande do Sul substituíam cimento por cinza ou simplesmente a adicionavam ao concreto.

Essa prática de incorporar adições minerais ao cimento diretamente na betoneira durante a preparação do concreto é citada como comum nos Estados Unidos (SILVA, 2010).

Segundo Price (1981), já na década de 1980 é citado o emprego de pozolanas pelas companhias de concreto pré-misturado nos EUA, com forte direcionamento para o emprego de cinzas volantes.

Produtores de blocos e tubos de concreto, na mesma época, empregavam cinzas volantes para melhorar a trabalhabilidade, a resistência e para baixar o custo. Cita ainda Price (1981) que “os benefícios para a Nação, sob a forma de aumento da produção cimenteira e o emprego de um produto residual são de imensa importância”.

## 2.2 O EMPREGO DE CINZA VOLANTE EM CONCRETO

Caleja (1981) cita a importância econômica de empregar cinza volante na fabricação de cimento e, somada a esta, a importância ambiental relacionada com o consumo de um resíduo poluente. Ainda sob o aspecto econômico, ressalta o autor citado a economia de combustível direta e indireta por estar sendo utilizado um resíduo que também consumiu

energia em sua produção, além da economia relativa aos custos decorrentes de sua disposição final.

Djanikian (1981) informa que:

[...] a reação da cal com a pozolana corresponde à formação de mais cimento dentro da massa endurecida, o que faz com que o concreto tenha muito mais resistência na medida em que passa o tempo. Os produtos da interação cal/pozolana são do mesmo tipo que os de hidratação dos compostos anidros do clínquer. O silicato de cálcio que se forma é do tipo tobermorítico (CSH).

Apresenta, ainda Djanikian (1981), como qualidades do cimento pozolânico, a menor permeabilidade, a maior resistência a águas agressivas, esgotos, águas industriais, água do mar e águas ácidas, o menor calor de hidratação e, em consequência, a menor tendência à fissuração de origem térmica, a maior resistência à tração, as maiores resistências em longo prazo e a maior durabilidade.

Soares (1981) cita, em adição, como características positivas dos cimentos pozolânicos a inibição da reação álcali agregado, ganhos de trabalhabilidade e a contribuição para a redução do processo de exsudação.

Mehta e Monteiro (2008) informam como vantagens do emprego de adições minerais ao concreto o fortalecimento da zona de transição na interface pasta/agregado e a redução de custos pela economia de cimento.

A velocidade com que a cal é fixada condiciona o comportamento resistente do aglomerante em curto prazo. O mecanismo consiste de uma difusão muito lenta dos íons cálcio através do hidrato tobermorítico até o interior das partículas do material pozolânico. A partícula pozolânica é atacada de fora para dentro e recobre-se de produtos de reação que, ao protegerem o núcleo da partícula, dificultam a difusão (DJANIKIAN, 1981).

O entendimento do fenômeno, que caracteriza uma típica reação de superfície, justifica a importância da finura do material pozolânico no desempenho da reação.

Segundo Santamaria (1981), o primeiro composto hidráulico foi a cal hidráulica, caracterizando o descobrimento do fenômeno hidráulico com o emprego de cimentos naturais obtidos a partir de margas que eram submetidas a um tratamento térmico e posteriormente moídas grosseiramente. O surgimento do cimento Portland define a fase que poderia ser chamada de desenvolvimento do fenômeno hidráulico, caracterizada pela obtenção de materiais ricos em compostos hidráulicos de elevada saturação de cal,



praticamente sem cal livre, e com uma grande quantidade de produtos desconhecidos à época. Essa fase definida como de desenvolvimento do fenômeno hidráulico perdurou no tempo, permitindo que fossem aprimoradas as técnicas de queima e moagem, tendo como objetivo a fabricação em escala industrial de um silicato tricálcico praticamente puro, partindo-se apenas de dois componentes, sílica e cálcio.

O que na época é referido por Santamaria (1981) como supercimentos, que nada mais representavam do que os cimentos como hoje produzidos, determinavam situações de instabilidade química como efeito da hidratação por consequência da grande quantidade de energia latente acumulada no estado anidro, permitindo classificar o material como termodinamicamente instável. A hidratação determina a liberação de grande quantidade de hidróxido de cálcio, composto solúvel de grande atividade química, originalmente combinada no produto anidro.

A nova fase que se sucede poderia ser denominada de fase de estabilização do fenômeno hidráulico ou, mais precisamente, fase de estabilização e ampliação do fenômeno hidráulico. A estabilização pode ser entendida como a própria fixação do hidróxido de cálcio por meio de adições de caráter ácido, capazes de combinar em condições ambientes, primeiramente representadas pelas pozolanas naturais. A ampliação do fenômeno hidráulico, por sua vez, pode ser entendida como a extensão do universo de alternativas como o aproveitamento de outros materiais com características pozolânicas.

O emprego de pozolanas nos cimentos Portland ou diretamente em aglomerados deve ser entendido não somente como o aproveitamento de alguns recursos naturais ou o consumo de resíduos industriais, mas como uma forma de aproveitamento da energia potencial representada pelo hidróxido de cálcio na formação de compostos hidratados de formação tardia com características cimentantes por um lado e, por outro, como uma forma de definir um comportamento particularizado com relação a ataques externos na relação do material com o ambiente, no qual se encontra inserido, ou com os próprios agregados empregados na produção de concretos. Dessa maneira, o consumo de hidróxido de cálcio nas reações pozolânicas pode ser entendido como uma forma de controlar a instabilidade química do cimento Portland.

O desenvolvimento do cimento Portland aos moldes de como hoje é produzido a partir da segunda metade do século XIX, fez com que o emprego de pozolanas em adição à cal, principalmente na produção de argamassas, caísse em desuso. A retomada do emprego de pozolanas em adição ao cimento Portland ocorreu na segunda metade do século XX, a partir do conhecimento mais profundo das reações pozolânicas e suas vantagens.



Ainda segundo Santamaria (1981), ao contrário do senso comum de aceitar como de melhor desempenho as pozolanas com mais elevado teor de sílica, podem ser encontradas pozolanas de desempenho satisfatório com apenas 40% de sílica e até 15% de não queimados.

Convém citar ainda Mehta e Monteiro (2008) quanto à obtenção do produto a partir da queima de carvão previamente pulverizado em usinas termelétricas modernas. Quando o carvão pulverizado passa pela zona de queima, onde ocorrem elevadas temperaturas, a matéria volátil e o carbono são queimados enquanto que as impurezas minerais, argila, quartzo e feldspato fundem. A matéria fundida é transportada rapidamente para zonas de baixa temperatura onde solidifica na forma de partículas esféricas de vidro. A maior parte desse material é carregada pela corrente de exaustão do gás, sendo captada por precipitadores eletrostáticos, por separação ciclônica e filtragem.

Rohde (2006) cita ser o emprego da cinza volante como adição ao cimento Portland e ao concreto a utilização mais extensiva, mais difundida e a mais simples em todo o mundo, sendo sua utilização mais intensiva retardada pela deficiência da disseminação do efetivo conhecimento entre os usuários, além das diferenças encontradas no produto.

As diferenças encontradas no produto, como citado por Rohde (2006), estão ligadas às características do carvão e ao regime de queima, principalmente com relação à temperatura do sistema.

Mehta e Monteiro (2008) citam ser a superfície específica das pozolanas comuns, de baixo teor de cálcio, medida pelo permeabilímetro de Blaine, variável entre 2000 cm<sup>2</sup>/g e 3000 cm<sup>2</sup>/g.

Já Silva (2010) apresenta um intervalo de variação da superfície específica mais amplo, indo até 8000 cm<sup>2</sup>/g.

Como a reação pozolânica é uma reação de superfície, a ampla variação na superfície específica admitida para o material pode representar, independentemente da constituição química, um forte fator de variação de seu desempenho como pozolana.

Deve ser agregado ao entendimento das causas das variações existentes entre diferentes cinzas volantes o fato de nem sempre estas apresentarem a forma esférica clássica como citado por Mehta e Monteiro (2008).

Efetivamente as diferentes formas observadas nas partículas das cinzas volantes estudadas e as diferentes superfícies específicas medidas são elementos fundamentais na definição do

desempenho do material como pozolana, inclusive com relação à trabalhabilidade de concretos produzidos em igualdade de condições.

Segundo Cannon (1968), a finura da cinza volante é geralmente reconhecida como um dos principais fatores que afetam sua qualidade, podendo contribuir para a resistência do concreto pela redução direta da água, pelo incremento do volume de pasta na mistura e pela reação pozolânica. Afirmou ainda Cannon (1968) ser mais econômico o uso da cinza na medida em que as exigências de resistência diminuem.

Segundo Silva (2010):

Pozolanas são todos os alumino silicatos reativos naturais, predominantemente na forma vítrea, que se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com os íons  $\text{Ca}^{2+}$ , levando à precipitação de silicatos de cálcio hidratados.

Segundo ainda a mesma autora:

[...] paralelamente podem ser formados aluminatos e sílico aluminatos dependendo da composição química da pozolana.

Isoladamente esses materiais classificados como pozolanas não possuem qualquer capacidade aglomerante, mas em presença de água reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento Portland, formando compostos cimentantes.

Nos Estados Unidos são menos comuns cimentos com adições, estando o emprego de pozolanas, como de resto qualquer adição mineral, mais difundido em adição a cimentos puros diretamente na betoneira durante a preparação do concreto. Em outros países como Brasil, França e Alemanha, é mais comum a incorporação de adições minerais na etapa de moagem durante a fabricação de cimentos Portland (SILVA, 2010).

Segundo Davis, Carlson e Kelly (1937):

Cinzas volantes com baixo teor de carbono e elevada finura apresentam alto grau de atividade pozolânica, podendo ser comparadas à maioria das pozolanas naturais. Quando cinzas volantes são usadas em moderadas percentagens em substituição ao cimento Portland podem ser produzidos concretos que exibem qualidades iguais e, em alguns aspectos, superiores àquelas exibidas por concretos produzidos sem o emprego de cinzas volantes.

Davis, Carlson, e Kelly (1937) definem cinza volante como o resíduo da queima de carvão mineral como combustível. Ao passar pela zona de elevada temperatura no interior de uma caldeira, o carbono é queimado e o resíduo permanece em suspensão na forma de

partículas fundidas. Essas partículas ainda em suspensão são rapidamente carregadas para zonas de temperaturas mais baixas onde solidificam para formar a cinza volante com muitas partículas na forma esférica, sendo captadas por precipitadores antes de ganharem a atmosfera. Citam ainda os mesmos autores que, como as cinzas volantes podem ser obtidas de diferentes carvões, há diferenças na composição química, embora sempre sejam os principais componentes a sílica, a alumina, o óxido de ferro e o óxido de cálcio.

O componente presente em maior concentração será sempre a sílica, assim como sempre haverá carbono mesmo que em pequenas quantidades.

Seguindo ainda o apresentado por Davis, Carlson e Kelly (1937), para construções pesadas em concreto, cinzas volantes podem ser empregadas em substituição ao cimento Portland em percentagens tão elevadas como 50%, pela vantagem de diminuir o calor de hidratação. A melhora na trabalhabilidade dos concretos é atribuída à forma esférica da cinza, sendo os resultados obtidos a partir da simples mistura da cinza volante ao cimento Portland tão ou até mais eficiente do que a mistura obtida da moagem conjunta dos dois materiais.

A baixa resistência inicial obtida em concretos produzidos com a substituição de cimento Portland por cinza volante levou vários projetistas a concluir que cinza volante é somente desejável ou econômica em concreto massa, nos quais a resistência não é o fator mais importante (CANNON, 1968). Lovewell e Washa<sup>1</sup> (1958) apud Cannon (1968) desenvolveram um método de dosagem que permitia a obtenção de resistências equivalentes aos 28 dias de idade a partir da adição de cinza volante em quantidades superiores ao cimento retirado.

Já naquela época era sabido ser menor a resistência inicial obtida em concretos produzidos com substituição de cimento Portland por cinza volante em comparação com concretos de mesma consistência sem substituição, e mais elevada resistência final (DAVIS, CARLSON e KELLY, 1937).

Essa última situação apresentada considera em primeiro lugar a atividade química da pozolana, explorando sua capacidade de formar novos compostos cimentantes, permitindo o atingimento das resistências esperadas com menores consumos de cimento e com menor geração de calor durante o processo de hidratação.

---

<sup>1</sup> LOVEWELL, C. E.; WASHA, G. W. Proportioning concrete Mixtures using fly ash. **ACI Journal Proceedings**, Detroit, v. 54, n. 12, p. 1093-1102, Jun. 1958.

Em outras situações a pozolana é empregada primordialmente como elemento determinante da alteração do comportamento reológico de concretos produzidos com baixos consumos de cimento, melhorando sua trabalhabilidade.

Misturas com baixos consumos de cimento em geral apresentam deficiências em sua trabalhabilidade e notada tendência à segregação se a tentativa de aumentar a trabalhabilidade considerar apenas o acréscimo de água. A melhoria da trabalhabilidade de concretos produzidos a partir de baixos consumos de cimento, que inclui a redução da tendência à segregação, pode ser obtida pela adição de pozolanas, ou especificamente cinza volante, explorando o benefício físico decorrente do aumento do volume de pasta pela adição desse material em complementação àqueles advindos das reações pozolânicas.

Concretos magros, de baixos teores de cimento, sempre exigem uma quantidade maior de água para uma determinada condição de trabalhabilidade, já que, como o aumento da trabalhabilidade está relacionado diretamente com o aumento do volume de pasta, este é aumentado pelo acréscimo de água. Em se tratando de uma mistura com baixo teor de finos, essa prática intuitiva introduz efeitos colaterais negativos. Esses efeitos tanto podem estar relacionados com baixa capacidade da mistura em reter água, como com a retração e a segregação, assim como com a diminuição do rendimento do material, já que a adoção de elevadas relações água/cimento determina a redução da resistência mecânica. A diminuição da durabilidade igualmente pode ser considerada como um desses efeitos colaterais.

Se a melhoria da trabalhabilidade é obtida a partir do aumento do volume de pasta, em misturas pobres este pode ser obtido pela incorporação de uma pozolana. Os níveis requeridos de trabalhabilidade poderão, então, ser atingidos pela preservação da coesão e da retenção de água adequadas à quantidade de água empregada na mistura, representada pela percentagem de água sobre o total de materiais.

Ainda considerando misturas de baixo consumo de cimento, é possível esperar que o aumento no teor de material fino determine uma melhor trabalhabilidade com menor demanda de água o que significará, também, ganho de resistência mecânica, pela reação pozolânica, e se desse procedimento resultar redução da relação água/cimento.

Em concretos bombeados, a melhoria nas condições de trabalhabilidade determina maior facilidade nas condições de bombeamento, representando menor nível de desgaste do equipamento.

Diante do exposto, além dos benefícios que sempre decorrem do estabelecimento de reações pozolânicas, esse material é igualmente empregado pelos benefícios inerentes às

alterações das características de natureza física na mistura, principalmente aquelas de menor consumo de cimento, estando sempre relacionadas com o aumento do volume de pasta e com a conseqüente melhoria na trabalhabilidade.

Em concretos de elevado consumo de cimento, sem deficiência de trabalhabilidade, a adição de uma pozolana deverá ser procedida com vistas à exploração de sua atividade química traduzida pela maior quantidade de silicatos neoformados. Se não houver alteração no consumo de cimento, o aumento na resistência mecânica, introduzido pelo emprego da pozolana, deve compensar a perda de resistência ocasionada pelo inevitável aumento na relação água/cimento decorrente da elevação na demanda de água em função da elevação na superfície específica da mistura. A resistência mecânica, então, passa a ser regulada não mais pela relação água/cimento, mas sim pela relação água/aglomerante, já que, nessas condições, o concreto passa a ser produzido com uma mistura aglomerante de comportamento similar ao comportamento de um cimento Portland pozolânico (CP IV), conforme previsto pela NBR 5736 (ABNT, 1991b), ou de um cimento Portland composto (CP II Z), dependendo do teor de pozolana incorporado.

Em concretos de mais elevado consumo de cimento, a existência de uma maior reserva de hidróxido de cálcio viabiliza a incorporação de uma maior quantidade de pozolana, sendo o limite estabelecido pelo nível de coesão da mistura. Se a quantidade de pozolana empregada determinar um aumento excessivo na coesão, a trabalhabilidade estará sendo comprometida, exigindo o emprego de uma maior quantidade de água o que pode determinar a redução da resistência mecânica por um aumento da relação água/cimento capaz de eclipsar o ganho auferido pela reação pozolânica.

A ação química de uma pozolana pode ainda ser relacionada com aspectos referentes à durabilidade dos aglomerados de cimento Portland. É reconhecida a eficácia da adição de pozolanas na minimização dos efeitos relativos ao ataque por sulfatos, constituindo-se esse num efeito positivo, ou na facilitação da evolução da frente de carbonatação, sempre que a relação água/cimento for superior a 0,5, o que pode ser considerado em princípio um efeito indesejável, desde que a quantidade empregada de pozolana não seja suficiente para diminuir a porosidade do material. Quimicamente ainda é possível dispor da pozolana oferecendo-a como reagente para a mitigação da reação que pode ocorrer entre agregados e os álcalis do cimento.

Não é objetivo desse trabalho o estudo pormenorizado dos efeitos da adição de pozolanas sobre a durabilidade de concretos, visto tratar-se de um tema por demais estudado. Os efeitos da adição de pozolanas sobre a durabilidade do concreto devem ser avaliados de

forma particularizada por estarem condicionados ao tipo e eficiência da pozolana, à sua quantidade em relação à quantidade de cimento empregado e ao nível de consumo de cimento no concreto.

Por certo, a opção pelo emprego de pozolanas como adição ao concreto deve ser fruto da cotação entre as melhorias esperadas e algum prejuízo decorrente de efeitos colaterais que eventualmente possam ocorrer com a introdução de alguma característica negativa no produto final.

Os cimentos Portland podem ser considerados materiais termodinamicamente instáveis, tendo em vista a enorme quantidade de energia latente acumulada em sua forma anidra. Essa energia é manifestada tanto pelo calor liberado durante o processo de hidratação como pela relativa instabilidade química da pasta hidratada. O entendimento da citada instabilidade química, parte da constatação da enorme quantidade de cal, na forma de hidróxido de cálcio, liberada durante a hidratação.

Esse composto solúvel, que pode representar até 25% do volume da pasta hidratada, embora possa ser considerado um subproduto da hidratação dos silicatos bicálcico ( $C_2S$ ) e tricálcico ( $C_3S$ ), é de fundamental importância tanto no processo de hidratação como na manutenção de algumas características da pasta hidratada. É devida ainda a esse composto, juntamente com os álcalis, a proteção química exercida pelo concreto às armaduras de reforço em peças de concreto armado ou protendido (BICZÓK, 1972).

O início do processo de hidratação é lento, mas experimenta acentuado aumento em sua velocidade a partir do estabelecimento do ambiente alcalino promovido pela crescente liberação do hidróxido de cálcio na medida em que vão sendo desenvolvidas as reações de hidratação, fundamentalmente do  $C_3S$  (BICZÓK, 1972);

Após a hidratação desses compostos, cujo resultado é a formação de hidratos de sílica e cálcio, representados pela sigla “C-S-H”, o pH da fase aquosa deve ser mantido elevado para garantia de sua estabilidade, o que é obtido pela presença do hidróxido de cálcio e dos álcalis (BICZÓK, 1972).

Em concreto armado o hidróxido de cálcio forma em reação com o óxido de ferro existente na superfície das barras que compõem a armadura de reforço um óxido duplo de ferro e cálcio chamado de ferrato de cálcio, que constitui a chamada capa passivadora responsável pela proteção química exercida pelo concreto sobre a armadura. Essa capa passivadora, responsável pela integridade das armaduras de reforço, somente estará estabilizada e

íntegra para exercer a proteção sobre a armadura, se imersa em um meio alcalino, também garantido pela presença do hidróxido de cálcio e dos álcalis (HELENE, 1986).

Por se tratar de uma base forte, o hidróxido de cálcio é suscetível à reação com ácidos. Naturalmente essa reação ocorre com o ácido carbônico oriundo da interação do dióxido de carbono do ar com água, determinando como produto o carbonato de cálcio. Esse processo é conhecido como **carbonatação** cuja evolução, por determinar a formação de um sal, vai reduzindo progressivamente o pH do meio, estabelecendo também, segundo Biczók (1972), a redução da estabilidade química do **C-S-H**, mas principalmente a ruptura da capa passivadora, desprotegendo as armaduras de reforço dos processos de corrosão.

Esse mesmo hidróxido de cálcio poderá interagir, em presença de água, com sulfatos, através de uma reação de troca de base e formar sulfato de cálcio ou gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). O aumento na concentração de gesso desencadeará a formação de etringita com a incorporação ao cristal, para sua formação, de 32 moléculas de água com expressivo aumento de volume. Esse aumento de volume, que pode representar 227%, culmina por destruir a pasta hidratada, caracterizando o ataque por sulfatos a que estão submetidos os aglomerados de cimento Portland (NEVILLE, 1997).

A reação pozolânica, amplamente conhecida, e que vem sendo explorada em seus aspectos positivos desde o tempo dos romanos, tem como interveniente imprescindível novamente o hidróxido de cálcio. A interação do hidróxido de cálcio com a sílica reativa da pozolana, sempre em presença de água, redundará na formação de compostos semelhantes àqueles representados pelo **C-S-H** que serão responsáveis pelo ganho de resistência das misturas ao longo do tempo quando a pozolana é empregada como adição ao cimento Portland ou pela economia de cimento quando a pozolana for empregada em substituição.

A estabilização do hidróxido de cálcio através da reação com a pozolana o indisponibiliza para reação com sulfatos, na primeira etapa da reação quando há a formação de gesso, aumentando a resistência do aglomerado de cimento Portland a esse ataque.

A reação álcali agregado, representada nesse caso pela interação dos álcalis do cimento Portland com formas de sílica reativa presente em alguns tipos de agregados, pode ser mitigada pela presença de pozolanas na mistura. Essa mitigação ocorrerá pelo aumento da quantidade de um dos reagentes na mistura, a pozolana, determinando o estabelecimento de uma imensa quantidade de centros de nucleação, dissipando em uma infinidade de pequenos focos as tensões que apresentariam grande magnitude se ocorressem de forma concentrada em grãos de agregados reativos.



Segundo Mehta e Monteiro (2008), é possível proceder à substituição de cimento por cinza volante para reduzir o teor de álcalis no concreto e minimizar a probabilidade de ocorrência de reação pela redução do teor efetivo de álcalis e pela formação de produtos menos expansivos com alta relação sílica/álcalis. Esta afirmação é corroborada por Neville (1997), que informa ser possível haver redução ou eliminação da expansão devida à reação álcali/agregado pela adição ao concreto de sílica reativa finamente dividida.

Quanto maior a área superficial do agregado reativo menor a quantidade de álcalis disponível por unidade de área, sendo menor a quantidade de gel a ser formado.

Essas informações são por demais conhecidas dentro da química dos cimentos e algumas consubstanciam o entendimento dos processos que determinam o aparecimento de manifestações patológicas clássicas. Sua citação pretende, mesmo que sem aprofundamento particularizado, realçar, além da própria importância do hidróxido de cálcio, a relevância de seu controle na melhoria de algumas características dos concretos de cimento Portland, ressaltando a importância sob alguns aspectos do emprego de pozolanas como adição ou substituição ao cimento em aglomerados de cimento Portland.

As formas de estabilização do hidróxido de cálcio ou de minimização dos efeitos sobre a pasta hidratada de sua instabilidade química podem ser consideradas como a estabilização e a amplificação do efeito hidráulico (SANTAMARIA, 1981).

A adição de pozolanas ao clínquer durante o processo de moagem na obtenção de cimentos pozolânicos, ou ao cimento Portland durante a produção de aglomerados, impõem-se como a maneira mais barata e de mais fácil controle encontrada para minimizar os efeitos da instabilidade do hidróxido de cálcio e da própria instabilidade termodinâmica do composto anidro, na medida em que é possível regular a liberação de calor de hidratação, a vulnerabilidade à ação de sulfatos e à reação álcali agregado, além de possibilitar ganhos de resistência a partir da reação pozolânica.

Evidentemente que o efeito da adição de pozolana sobre as características dos cimentos então ditos pozolânicos estará diretamente relacionada com a quantidade de adição e com a qualidade da pozolana empregada, representada primordialmente pelo grau de calcinação e superfície específica.

É possível depreender do até então exposto haver quantidades convenientes, quantidades adequadas e quantidades ótimas de adição de pozolana a uma matriz de cimento Portland, a partir da observação do fenômeno sob a ótica econômica ou sob a ótica técnica, estando



sempre envolvidos aspectos relativos a questões de economia, durabilidade ou de resistência mecânica.

Em princípio, é possível supor haver para cada cimento, tomado como matriz, uma quantidade ótima de cinza que, em reação com o hidróxido de cálcio disponível, maximize o ganho de resistência mecânica, através dessa reação pozolânica.

A reação desencadeada pela presença de cinza na mistura aglomerante poderá diminuir a reserva alcalina a níveis baixos o suficiente para permitir uma mais intensa evolução da frente de carbonatação, no início do processo. Em uma primeira avaliação, este fato poderá representar um aspecto negativo do emprego de aglomerantes compostos com cinza volante, a partir de determinadas percentagens de substituição (COSTA, GEYER e RECENA, 1992).

Em contrapartida, é possível considerar ser expressivamente maior o número de aspectos positivos relacionados com o emprego de cinza volante na produção de aglomerantes. Isto se dá, não somente pelo aspecto econômico, mas com vistas à obtenção de alguns benefícios técnicos assim como, no aspecto mecânico, o aumento da resistência mecânica em idades mais avançadas. Em termos físicos, o aumento da coesão em concretos de baixo teor de cimento poderá representar aumento da trabalhabilidade, viabilizando as operações de bombeamento além da diminuição da permeabilidade, por representar aumento no volume de pasta. Quanto ao aspecto químico, é possível obter resistência ao ataque por sulfatos e a mitigação da reação álcali agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008, NEVILLE, 2007, DE LUCCA, 2010 e FURNAS, 1997).

A introdução de mais um insumo no processo produtivo exige um maior cuidado no controle da qualidade do concreto, gerando indiretamente algum custo adicional, o que deve ser levado em conta no momento da opção pela iniciativa.

### 2.3 PROCEDIMENTOS EMPREGADOS PELA CIENTEC PARA DOSAGEM DE CONCRETOS COM EMPREGO DE CINZA VOLANTE

Quando é utilizada uma pozolana na produção de qualquer aglomerado de cimento Portland surge uma questão inevitável relacionada ao entendimento do conceito vinculado aos termos adição e substituição, na medida em que a mesma quantidade de pozolana pode ser considerada como uma substituição se referenciada a uma quantidade de aglomerante e como uma adição, caso venha a ser proporcionada a partir de uma quantidade de cimento.

Sob certos aspectos, a quantidade de pozolana empregada na fabricação de um cimento pozolânico deverá ser entendida como uma substituição já que ao final estará sendo oferecido ao mercado, em embalagens comerciais de mesma massa, um tipo de cimento Portland no qual parte do clínquer foi substituído por pozolana. Já em um concreto, o emprego de uma pozolana sugere sempre algo a mais na mistura, permitindo supor tratar-se de uma adição.

Abstraindo da questão semântica, o termo a ser empregado deverá considerar a operação feita.

Se a um concreto é incorporada uma pozolana, é possível entender essa operação como uma adição na comparação direta com o concreto produzido com o mesmo traço e com os mesmos materiais nas mesmas quantidades, mas sem a incorporação da pozolana. Como a pozolana integra a pasta, sua adição a um concreto definirá neste um novo aglomerante pozolânico.

Se a comparação for estabelecida entre dois traços reproduzidos nas mesmas condições, com as mesmas quantidades de mesmos agregados e com a mesma massa de aglomerante, naquele em que o aglomerante não é representado apenas por cimento Portland, mas sim com uma mistura com cinza volante estará sendo estabelecida uma substituição.

Assim, se um concreto tem parte da massa de seu cimento substituído por pozolana o traço em massa será mantido, e terá sido realizada efetivamente uma substituição.

A metodologia empregada na dosagem de cinza em um concreto, por falta de um roteiro específico, dependia, até então, quase que exclusivamente da criatividade do tecnologista, sendo sempre uma extensão de métodos clássicos de dosagem.

A CIENTEC vem, ao longo do tempo, aplicando uma metodologia baseada simplesmente na substituição de cimento por cinza, em massa, em percentuais crescentes, nos traços definidos para a composição da curva de Abrams no desenvolvimento de dosagens experimentais. Esse procedimento altera simultaneamente duas variáveis, o traço ou, em outras palavras, o volume de pasta, e o teor de pozolana em cada mistura. O cálculo de traços a partir da dosagem feita segue basicamente o roteiro clássico, no entanto a curva de Abrams é construída a partir da relação água/aglomerante.

Conhecida, então, a relação água/aglomerante e a percentagem de água sobre o total de materiais secos é possível calcular o traço em massa (aglomerante/agregados) que será

desdobrado a partir de uma percentagem de substituição de cimento por cinza. Essa percentagem de substituição será variável em função do nível de resistência requerido, sendo obtida de uma curva auxiliar que relaciona a relação água/aglomerante com a percentagem de substituição empregada em cada traço experimental.

Paralelamente é possível realizar uma verificação, calculando a percentagem de substituição em função da resistência à compressão, através de outra curva elaborada a partir dos valores verificados em cada traço e a correspondente percentagem de substituição.

Esse procedimento de uso consagrado na CIENTEC vem sendo adotado já de algum tempo sempre com bons resultados e sua aplicação praticamente não altera a rotina empregada no desenvolvimento de uma dosagem experimental clássica.

No entanto, não é possível afirmar ser este o procedimento mais adequado para a obtenção de misturas de mais elevado rendimento, sendo entendido este como equivalente ao menor consumo de cimento.

Outra técnica passível de utilização objetiva a definição de uma matriz quadrada normalmente definida pelos mesmos traços experimentais empregados na elaboração da curva de Abrams, em qualquer método de dosagem experimental, aos quais são agregadas quantidades definidas de cinza volante. A cada um dos quatro traços experimentais podem ser adicionadas três percentagens da cinza volante em estudo, ou feitas substituições de cimento por cinza em massa, com ou sem correção de volume, já que a massa específica da cinza é significativamente menor do que a do cimento.

A substituição direta de cinza por cimento em massa, sem correção de volume, simplifica sobremaneira o cálculo de traços, já a outra alternativa exige uma operação adicional. No entanto, há que ser considerado que nas duas alternativas haverá alterações na reologia da mistura por se tratarem de materiais com finuras diferentes, com superfícies específicas diferentes e o que é mais importante, com uma morfologia de grãos igualmente diferenciada. No caso de a pozolana ser simplesmente adicionada, dependendo das características específicas da pozolana usada, haverá aumento no volume de material fino, com aumento na superfície específica da mistura, podendo haver aumento na demanda de água para uma mesma trabalhabilidade.

Em qualquer uma das alternativas de incorporação da cinza volante às misturas, são obtidos dezesseis traços para formar a referida matriz. Os quatro dimensionados com o emprego de

cimento apenas e, a partir de cada um, outros três com três percentagens variáveis de adição ou de substituição de cimento por cinza volante.

A matriz assim formada permite o cálculo de cinco curvas de Abrams, uma a partir dos traços sem adição, três com cada uma das percentagens de adição estabelecidas e uma mais, em diagonal, considerando simultaneamente os quatro traços e as quatro percentagens de adição ou substituição.

Com o intuito apenas de ilustração cabe observar a matriz teórica apresentada na tabela 2, montada a partir de quatro traços:

Tabela 2: esquema de dosagem de concreto com emprego de cinza volante adotado pela CIENTEC

traço	% de adição			
1:3,00	0	15	30	45
1:4,50	0	15	30	45
1:6,00	0	15	30	45
1:7,50	0	15	30	45

O cálculo dos traços pretendidos com uso de cinza pode ser procedido, então, a partir de quatro curvas diferentes, da alteração da proporção de cinza em cada traço e considerando percentagens variáveis, em diagonal, permitindo, dessa maneira, definir por comparação direta com os mesmos traços calculados apenas com cimento, o traço de menor consumo de cimento que será, via de regra, o de menor custo.

Se o trabalho for desenvolvido a partir de adições, o cálculo de traços deverá considerar uma curva de Abrams que represente a relação entre resistência mecânica e relação água/cimento. Caso o estudo venha a ser desenvolvido a partir de substituições, o cálculo será facilitado a partir da consideração da relação entre resistência mecânica e relação água/aglomerante.

Deverão ainda ser consideradas duas outras curvas, uma relacionando relação água/cimento ou água/aglomerante com a percentagem de água sobre o total de materiais secos e outra, que permita identificar a percentagem de cinza a ser adicionada ou substituída, em cada traço.

A definição da quantidade de cinza poderá ser estimada, então, a partir de uma curva estabelecida entre a relação água/cimento ou água/aglomerante com a percentagem de adição ou substituição, respectivamente, ou relacionando a quantidade de cinza,

incorporada por substituição ou por adição, diretamente com a resistência à compressão obtida em cada traço experimental.

Os dois procedimentos apresentados como de uso corriqueiro pela CIENTEC estão baseados em critérios empíricos, com desenvolvimento simplista, na primeira alternativa, ou trabalhoso e demorado, na segunda.

## 2.4 OUTRAS PROPOSTAS PARA DOSAGEM DE CONCRETOS COM EMPREGO DE CINZA VOLANTE

N. Su e B. Miao (2003) propõem um método de dosagem em que é determinada a melhor composição de agregados de maneira a obter o maior empacotamento possível. A esse esqueleto granular são incorporadas diferentes quantidades de aglomerante obtidas a partir de uma massa fixa de cimento,  $200 \text{ kg/m}^3$ , à qual são adicionadas misturas equânimes de cinza volante e escória de alto forno, sendo obtidas misturas com diferentes volumes de pasta e diferentes rendimentos.

O mesmo expediente de dosagem, que altera o volume de pasta, foi empregado por Tutikian e Dal Molin (2008) para dosagem de concretos auto adensáveis.

Khokhar, Roziere, Turcry, Grondin e Loukili (2010) estudaram a otimização de misturas com elevados teores de cinza volante a partir do emprego de aditivos superplastificantes para viabilizar a trabalhabilidade de misturas de baixas relações água/aglomerantes, nas quais o consumo de aglomerante é definido pelo volume final de vazios obtido a partir da aplicação a equação de Bolomey para composição dos agregados, sendo consideradas diferentes porcentagens de substituição de maneira a manter constante o volume de pasta.

Gopalan e Haque (1990) informam que a percentagem de substituição de cimento por cinza deve levar em conta a otimização dos materiais disponíveis visando à otimização da resistência, do abatimento e da trabalhabilidade do concreto, sugerindo que o projeto de um concreto com cinza volante deva ser feito com base em uma matriz de misturas experimentais.

Gopalan e Haque (2011) vinculam o nível ótimo de substituição de cimento por cinza à quantidade de cimento na mistura citando haver dois fatores conflitantes a serem considerados no projeto de concretos com cinza volante, a possibilidade de haver redução na demanda de água de uma mistura com reflexos positivos na resistência do concreto e a

baixa atividade química da cinza volante que poderá impactar negativamente a resistência, principalmente nas primeiras idades.

Citam ainda Gopalan e Haque (2011) serem três os princípios a serem seguidos no projeto de concretos com cinza volante, a substituição parcial de cimento por cinza em massa ou em volume, a adição de cinza volante como um agregado miúdo e a substituição parcial tanto do cimento como do agregado miúdo por cinza volante.

### 3 REVISÃO CONCEITUAL SOBRE CRITÉRIOS BÁSICOS DE DOSAGEM

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER GERAL SOBRE TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade é uma característica do concreto que pode ser definida com maior ou menor grau de precisão, com maior ou menor riqueza de detalhes, mas devendo sempre sugerir a maior ou menor facilidade com que um concreto pode ser misturado, transportado, lançado e adensado. Igualmente deverão estar contemplados na definição aspectos relacionados com eficácia, produtividade e dispêndio de energia.

A correta ideia de trabalhabilidade deve ser obtida a partir da observação das características reodinâmicas do concreto, ou seja, a partir da maior ou menor capacidade de movimentação do concreto frente a uma ação dinâmica representada por algum processo de adensamento.

Segundo Ferreira (2004), “Trabalhabilidade é a propriedade que apresenta um material de ser facilmente preparado e aplicado em obra”.

Segundo referências levantadas por Petrucci (1979), é possível citar:

- a) Troxell e Davis<sup>2</sup> (1956 apud PETRUCCI, 1979): “Trabalhabilidade é o conjunto de propriedades que englobam facilidades de colocação e resistência à segregação”;
- b) Blanks, Vidal, Price e Russel<sup>3</sup> (1940 apud PETRUCCI, 1979): “A trabalhabilidade é a facilidade com que um dado conjunto de materiais pode ser misturado para formar o concreto e, posteriormente, ser transportado e colocado com um mínimo de perda de homogeneidade”;
- c) Lea e Desh<sup>4</sup> (1956 apud PETRUCCI 1979): “Trabalhabilidade é a facilidade com que o material concreto flui, enquanto, ao mesmo tempo, coerente e resistente à segregação”.

---

<sup>2</sup> TROXELL, G.; DAVIES, H. **Composition of properties of concrete**. New York: McGraw-Hill, 1956.

<sup>3</sup> BLANKS, R. F.; VIDAL, E. N.; PRICE, W. H.; RUSSELL, F. M. The properties of concrete mixes. **ACI Journal Proceedings**, Detroit, v. 36, n. 44, p. 433-476, Apr. 1940.

<sup>4</sup> LEA, F.; DESCH, C. **The chemistry of Cement and concrete**. London: Arnold, 1956.

Petrucci (1979) conclui, “Trabalhabilidade é a propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda de sua homogeneidade”.

Neville (1997) considera ser muito simplista dizer apenas que a trabalhabilidade determina a facilidade de aplicação e a resistência à segregação de um concreto e cita Granville, Collins e Matthews<sup>5</sup> (1997) que definem trabalhabilidade como o “trabalho interno útil necessário para produzir adensamento total”.

Para Metha e Monteiro (2008), “trabalhabilidade do concreto fresco determina a facilidade com a qual um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva”. Paralelamente os mesmos autores enfatizam o fato de que a trabalhabilidade “representa várias e diversas características do concreto fresco de difícil avaliação quantitativa”, ressaltando, ainda, que a inadequada trabalhabilidade poderá ser fator de aumento de custo ou determinante de perda de durabilidade do concreto caso não seja atingido um grau de adensamento mínimo para determinar baixa porosidade.

As tantas definições apresentadas são coincidentes quando fazem referência à facilidade de manuseio do concreto, de adensamento e acabamento, mas nem todas fazem alusão direta ou indiretamente à economia, ou à durabilidade.

Considerando que trabalhabilidade é um conceito subjetivo e depende de como o concreto será empregado, mais trabalhável será aquela mistura que apresentar, para um mesmo índice de trabalhabilidade, a menor demanda de água.

### 3.1.1 Fatores condicionantes da trabalhabilidade

Um concreto tanto poderá ser dosado de maneira a dispensar qualquer processo de adensamento como poderá ser tão consistente que a única e eficiente forma de adensamento seja a compactação por rolos.

Na comparação direta, os dois exemplos citados representam concretos de plasticidades completamente diferentes, mas tanto um como o outro, perfeitamente trabalháveis, cada um diante das condições de contorno envolvidas em cada situação de aplicação.

O exemplo apresentado bem serve para configurar o entendimento de que a trabalhabilidade não pode ser percebida de forma absoluta, pois estará sempre subordinada

---

<sup>5</sup> GRANVILLE, W. H.; COLLINS, A. R.; MATTHEWS, D. D. The grading of aggregates and workability of concrete. **Road Research Tech**, London, n. 5, 1947.



às características de cada concretagem e às exigências feitas ao concreto em seu estado plástico.

Dentre os principais fatores condicionantes da trabalhabilidade de um concreto é possível relacionar:

#### 3.1.1.1 Condições de trabalho

Um concreto cujo padrão estabelecido de trabalhabilidade representar dificuldades para o seu lançamento e para seu correto adensamento pode não somente aumentar o risco de acidentes como exigir um tempo maior na execução da concretagem. Aspectos como a segurança e a velocidade esperada de uma operação de concretagem devem ser considerados juntamente com o tamanho da equipe e o volume de concreto a ser lançado.

O aumento da trabalhabilidade pode significar redução de equipe e do tempo de concretagem, o que pode inclusive ser associado à diminuição de riscos para a segurança dos operários.

A situação limite, representada pela otimização auferida nessas atividades, pode ser considerada quando for empregado concreto auto adensável.

#### 3.1.1.2 Tipo de misturador

Sabidamente misturadores intermitentes de gravidade e eixo inclinado, que representam quase que a totalidade dos equipamentos empregados na produção de concretos, inclusive englobando as betoneiras montadas em caminhões, tem baixa eficiência em misturar concretos de menor plasticidade, mais secos como popularmente entendido.

Dependendo da quantidade de finos da mistura, concretos dosados para uma elevada fluidez poderão sofrer alguma segregação no momento da descarga, observada pela maior concentração de agregado graúdo na porção de concreto referente à primeira descarga.

A maior eficiência desse tipo de equipamento de mistura está sempre associada ao emprego de uma quantidade adequada de água em um determinado volume de produto a ser misturado.

Assim a mistura mais eficiente promovida por um determinado tipo de equipamento estará condicionada diretamente à plasticidade do material ou, em outras palavras, indiretamente à sua trabalhabilidade.

### 3.1.1.3 Equipamentos de transporte

O conceito associado a essa variável fica perfeitamente internalizado na medida em que a operação de bombeamento pode ser considerada como uma forma de transportar o concreto dentro de uma obra. Intuitivamente é sabido por quem lida com concreto em obra ser necessário um abatimento pelo tronco de cone superior a 100mm para uma melhor operação do equipamento, inclusive na prevenção de seu desgaste.

Para cada sistema de transporte é possível imaginar uma trabalhabilidade adequada à preservação das características desejadas do concreto, minimizando os efeitos negativos da segregação.

Caminhões caçamba ou tombadeira são, com frequência, empregados para transportar concretos de elevada consistência, como aqueles usados para a concretagem de placas de pavimentação, representados por abatimentos pelo tronco de cone da ordem de 20 a 40 mm. Já concretos de mais elevada plasticidade, passíveis de sofrerem segregação, devem necessariamente ser transportados por equipamentos dotados de agitação.

### 3.1.1.4 Forma de lançamento

A colocação do concreto em fôrmas pode ser procedida de várias maneiras, desde aquela extremamente convencional que emprega pás e enxadas, passando pelo bombeamento do material diretamente dentro da forma até encontrar uma situação limite que prevê o emprego de motoniveladoras no lançamento de concretos a serem compactados com rolos.

Novamente, para cada situação, o concreto deverá apresentar uma trabalhabilidade adequada à metodologia de lançamento adotada.

### 3.1.1.5 Energia de adensamento

Fontes vibratórias de alta frequência e baixa amplitude condicionam à entrada em ressonância de agregados miúdos, sendo particularmente recomendadas para o adensamento de concretos de menor plasticidade assim como aqueles concretos de elevada consistência empregados na produção de peças pré-moldadas.

A baixa frequência e grande amplitude condicionará a entrada em ressonância com a fonte do agregado graúdo, sendo empregada em concretos plásticos, de uso convencional.

Com isto, haverá sempre uma trabalhabilidade adequada ao sistema de adensamento disponível, ou recomendado, para uma determinada situação, o que poderá representar

redução do tempo despendido na operação e maior eficácia no processo, com melhores resultados finais.

#### 3.1.1.6 Fôrmas e armadura

A densidade de armadura assim como a forma das peças ou a existência de estrangulamentos são fatores que podem determinar a maior ou menor fluidez do concreto. Para uma mesma energia de adensamento, concretos de menor trabalhabilidade exigirão maior dispêndio de energia, havendo uma maior probabilidade de ocorrência de falhas.

Fôrmas mais bem constituídas poderão suportar energias de adensamento mais intensas, o que permite o emprego de concretos de menor plasticidade. Uma exigência maior de adensamento, como no caso de pré-moldados, como tubos ou peças para pavimentação, em que deve ser empregado um concreto de muito baixa plasticidade, determina o emprego de fôrmas mais robustas, normalmente exigindo o emprego de aço em sua fabricação.

#### 3.1.1.7 Forma dos grãos do agregado

A esfera é o sólido de menor superfície e sobre um plano horizontal caracteriza-se por representar o equilíbrio indiferente visto não alterar, em função do seu movimento, a posição relativa ocupada em relação ao plano sobre o qual está assente, podendo ser movimentada com um mínimo de dispêndio de energia.

Grãos esféricos imersos em uma matriz plástica responderão de forma mais eficiente a qualquer energia introduzida por um processo qualquer de adensamento em função da maior mobilidade relativa advinda de sua forma.

Equipamentos modificadores da forma dos grãos de agregados vem sendo usados em pedreiras com o intuito de agregar valor ao produto, viabilizando a obtenção de concretos que apresentem melhor comportamento reológico a partir do emprego de agregados graúdos com forma menos lamelar.

#### 3.1.2 Avaliação da trabalhabilidade

Não se pode pensar de forma absoluta em trabalhabilidade boa ou ruim para concretos que apresentem condições de contorno diferentes, ou que sejam produzidos com materiais diferentes ou até mesmo produzidos a partir de traços diferentes.

A observação direta dos concretos, sem a consideração das condições de contorno, não é suficiente para afirmar ser um concreto mais ou menos trabalhável do que o outro.

De uma maneira geral a avaliação da trabalhabilidade é procedida indiretamente a partir da quantificação de parâmetros obtidos pela aplicação de algum método para medida da consistência do concreto. Vários são os métodos identificados na bibliografia, o que sugere ter sido a medida da trabalhabilidade sempre uma preocupação.

A título de informação são apresentados os métodos submetidos à classificação proposta por Petrucci (1979), como segue:

- a) ensaios de escorregamento sem limitações: abatimento pelo tronco de cone; ensaio de escorregamento (flow test); mesa de Graff, ensaio de espalhamento;
- b) ensaios de escorregamento com limitações: ensaio de remoldagem de Powers; ensaio de remoldagem modificado; ensaio VEBE;
- c) ensaios de penetração: ensaio de Graff; ensaio de Irribarren; ensaio de Kelly; ensaio de Humm.

Mehta e Monteiro (2008) acrescentam ao rol citado o ensaio de fator de compactação e o ensaio Tattersall.

Por sua praticidade de aplicação, sem exigências de treinamentos especiais, associado ao baixo custo do equipamento empregado e à possibilidade de realização em condições adversas de obra, mais comumente essa avaliação é feita através de ensaio de abatimento pelo tronco de cone caracterizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998b), que, na verdade, permite apenas medir a consistência, sendo a trabalhabilidade estimada de forma indireta pela observação da coesão do concreto, durante a realização do ensaio. O grande mérito do ensaio de abatimento pelo tronco de cone está em permitir a verificação do comportamento relativo entre diferentes unidades de produto, ou seja, diferentes betonadas de um mesmo concreto, gerando informações valiosas quanto à homogeneidade da produção.

Assim, valores diferentes de abatimento pelo tronco de cone obtidos no concreto de diferentes unidades de produto em uma mesma produção indicarão, certamente, diferentes níveis de trabalhabilidade, sugerindo haver alterações na dosagem, principalmente com relação à quantidade de água empregada.

Um concreto produzido com mesmos materiais, mesmo traço, na mesma central, misturado pelo mesmo equipamento e pelo mesmo tempo deverá apresentar mesma trabalhabilidade, devendo ser obtido o mesmo abatimento pelo tronco de cone.

Já dois concretos produzidos em situações diferentes que apresentem o mesmo abatimento pelo tronco de cone não necessariamente apresentarão a mesma trabalhabilidade.

O ensaio de abatimento pelo tronco de cone é um ensaio estático cujo resultado depende de fatores intrínsecos do concreto como a quantidade de água, o teor de argamassa, a dimensão máxima característica do agregado graúdo e a continuidade da distribuição granulométrica. Quanto a aspectos externos, a coleta da amostra, além da própria habilidade do operador para a realização do ensaio, podem representar fatores de alteração importantes.

Em contraponto ao abatimento pelo tronco de cone é possível citar como um método de maior precisão aquele concebido por Powers, tanto em sua versão original como na modificada (PETRUCCI, 1979).

Sua precisão advém do fato de ser um método baseado em um efeito dinâmico produzido por um adensamento mecânico que transforma o tronco de cone abatido de concreto, obtido originalmente a partir da execução do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, em um cilindro, recebendo por isso o nome de “remoldagem de Powers”, contemplando o efeito obtido e homenageando seu criador. O método, como originalmente concebido, prevê a realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone do concreto em estudo dentro de uma panela de aço. Essa panela que abriga o tronco de cone abatido de concreto é disposta sobre a mesma mesa de remoldagem empregada para a avaliação do índice de consistência de argamassas e descrita pela NBR 7215 (ABNT,1996), sendo aplicados golpes com a mesa até que uma haste de referência, encostada na superfície superior do tronco de cone de concreto, atinja uma marca indicativa de ter sido transformado o tronco de cone abatido de concreto original, em um cilindro. A ação dinâmica pode ser quantificada pelo número de golpes aplicados através da mesa, sendo esse número de golpes o índice de remoldagem e, quanto menor, mais reodinâmico o concreto e, portanto, mais trabalhável.

Uma modificação desse método substituiu a mesa de remoldagem por uma mesa vibratória, sendo considerado como índice de remoldagem o tempo necessário para a remoldagem do tronco de cone abatido de concreto no mesmo cilindro, já que a panela é a mesma.

A perda de coesão, ocasionada por falta ou excesso de água, determina sempre, em paralelo, perda de trabalhabilidade.

O excesso de água na mistura determinará a instabilização da pasta, havendo o escoamento desta e da água que não pode ser retida, permitindo o contato entre os grãos

do agregado. O aumento do atrito interno gerado pelo contato direto entre os grãos do agregado representará perda de trabalhabilidade.

No caso de misturas muito secas, a falta de água impedirá a formação de pasta com a viscosidade necessária para permitir a aglomeração dos diversos grãos do agregado.

Assim, maior trabalhabilidade somente poderá ser considerada existir em concretos quando ocorrer concomitantemente elevada plasticidade, traduzida por um grande abatimento, sem perda de coesão.

Esse fenômeno é bem percebido no ensaio de remoldagem quando ocorre perda de coesão. O aumento do atrito interno da mistura impede a movimentação relativa entre os diversos grãos do agregado graúdo, exigindo uma mais elevada energia de adensamento.

Esse método de remoldagem foi empregado originalmente por Petrucci (1979), para a determinação do teor de argamassa, tendo sido incorporado ao método ITERS de dosagem experimental como descrito por Boggio (2000).

### 3.2. A TRABALHABILIDADE NO PROCESSO DE DOSAGEM

O objetivo final de uma dosagem de concreto acaba por ser, em resumo, o cálculo de um traço que, ao ser reproduzido, garanta a obtenção de um concreto que atenda a requisitos de natureza física, mecânica e econômica, pré-estabelecidos em projeto.

Um concreto fica corretamente caracterizado no momento em que é definido o teor de argamassa mais adequado para os materiais escolhidos e o proporcionamento entre os agregados, quando forem empregados outros além de uma areia e uma brita.

No relatório de dosagem emitido pela CIENTEC, consta um item cujo título é “Trabalhabilidade”, no qual são apresentados os resultados dos ensaios realizados com a finalidade de determinar o teor de argamassa e o melhor proporcionamento entre os diferentes agregados, já que as determinações feitas visam a obtenção de uma mistura que apresente as condições requeridas de trabalhabilidade e o menor teor de argamassa possível.

A trabalhabilidade, na maioria dos métodos de dosagem, como confirmado por Boggio (2000), sempre fica atrelada ao teor de argamassa, já que este deverá garantir a coesão necessária para que seja possível adicionar a quantidade de água determinante do abatimento pelo tronco de cone requerido, sem segregação.

No entanto, assim como pode ser estabelecido um teor ótimo de argamassa em uma determinada mistura, também é possível supor haver um teor ótimo de pasta.

O teor de pasta é definido pelo traço, consequência da interação entre relação água/cimento, determinada em função de uma resistência a ser atingida, e a percentagem de água sobre o total de materiais secos, definida pela quantidade de água a ser adicionada para verificação de uma trabalhabilidade pretendida. Assim o volume de pasta pode ser considerado como decorrente de um procedimento de dosagem quando da definição de um traço.

Se for admitido que em um concreto bem dosado alterações na trabalhabilidade podem ser produzidas por alterações no volume de pasta, quando mais não seja por alterações no conteúdo de água, e que alterações no volume de pasta também interferem na coesão da mistura, então a redução no volume de pasta em traços mais fracos poderia ser compensada pela elevação do teor de argamassa para manutenção de um nível adequado de coesão. Assim não estaria errado pensar na elaboração de uma curva de Abrams a partir da reprodução dos traços experimentais com teores crescentes de argamassa a partir do traço de maior volume de pasta.

Embora em algumas situações em dosagens desenvolvidas na CIENTEC os traços sejam desdobrados com teores variáveis de argamassa o usual, na expressão mais simples de uma mistura, quando o concreto é concebido a partir do emprego de apenas uma areia e um agregado graúdo, é que sua seja feita pela definição do teor de argamassa e de um índice de consistência.

Desse concreto, assim estabelecido, podem ser obtidos diversos traços a partir da alteração da proporção entre cimento e areia, o que determinará a formação de uma família.

Uma família de traços será, então, o conjunto de traços calculados a partir de um concreto produzido com os mesmos materiais, mesmo teor de argamassa, mesma proporção entre os agregados, e mesma trabalhabilidade, representada por um índice a ser obtido a partir da aplicação de um método para quantificação da consistência.

Normalmente a especificação mais simples exigida de um concreto remete ao cálculo de um traço que atinja uma resistência à compressão especificada dentro de uma faixa de plasticidade que caracterize uma trabalhabilidade representada por um índice que, na prática, quase que exclusivamente, representa a medida da consistência pelo abatimento pelo tronco de cone.

O atingimento da resistência mecânica pretendida estará condicionado à garantia de obtenção de uma mesma relação água/cimento a cada reprodução do traço. Por sua vez, a mesma trabalhabilidade estará condicionada à verificação de uma mesma consistência, sendo, em ambos os casos, fundamental que os materiais sejam mantidos os mesmos a cada nova reprodução do traço.

Na verdade, a consistência será função de uma quantidade de água, mas a trabalhabilidade, além da consistência, dependerá da coesão da mistura, função da quantidade de finos existentes, da relação entre agregado miúdo e graúdo e da continuidade da composição granulométrica da mistura.

Dois traços iguais, nos quais seja desejável a mesma consistência, obtidos de dois concretos produzidos com os mesmos materiais, mas com teores de argamassa diferentes poderão demandar, para a obtenção da mesma consistência, quantidades de água diferentes.

A visão clássica sobre o exemplo citado induz à consideração de os dois traços possuírem mesma trabalhabilidade. Se em um deles a obtenção da consistência foi possível com um consumo menor de água não estará errado considerar ser essa mistura a de maior trabalhabilidade, representando essa interpretação uma quebra de paradigma.

A verificação de uma determinada consistência com o menor consumo possível de água deve ser o objetivo maior de um procedimento de dosagem já que estará privilegiando no mínimo a economia, na medida em que demandará um menor consumo de pasta e, conseqüentemente, de cimento.

Definidos os materiais, um estudo de dosagem deverá ser intenso na definição do melhor proporcionamento entre eles. Se o concreto estiver sendo estudado a partir do emprego de apenas um agregado miúdo e um agregado graúdo, o que deverá ser buscado é o teor de argamassa com o qual seja possível obter a trabalhabilidade desejada com o menor consumo de água, não sendo incorreto definir para cada traço um diferente teor de argamassa. Os traços a serem calculados a partir da dosagem deverão apresentar teores diferentes de argamassa definidos por interpolação a partir do estabelecimento da relação entre o principal parâmetro de entrada, a relação água/cimento, e o teor de argamassa.

É comum associar um maior teor de argamassa com um maior consumo de água, assim como também para alguns profissionais, em uma simplificação precipitada, o maior teor de argamassa a uma maior retração.



Essas afirmações são feitas a partir do entendimento de ser maior a superfície específica da mistura a partir do emprego de uma maior quantidade de material fino, o agregado miúdo e, portanto, maior o consumo de água para uma mesma plasticidade.

Muitas vezes o aumento na quantidade de material fino, ou simplesmente o aumento do teor de argamassa, altera tanto o comportamento reológico da mistura que permite a obtenção da plasticidade requerida com menos água, contrariamente ao que se tem como senso comum.

Levando ao extremo, seria possível supor que, para cada quantidade de cimento empregado, ou para cada traço, existe um teor de argamassa que conduziria à obtenção de uma mesma plasticidade com o menor consumo de água, já que traços diferentes de um mesmo concreto são obtidos pela alteração da proporção entre cimento e agregado miúdo, o que pode alterar o comportamento reológico de cada mistura.

Sem dúvida o estabelecimento de uma quantidade definida de brita para cada proporção entre cimento e areia, ou seja, um teor diferente de argamassa em cada traço representaria um acréscimo significativamente maior no tempo de desenvolvimento de estudo de dosagem.

Na prática esse não é um expediente observado na rotina dos estudos de dosagem e somente seria justificado a partir da garantia da absoluta igualdade dos materiais a serem empregados na produção do concreto ao longo do período de produção.

Observa-se, no entanto, uma tendência ao superdimensionamento do teor de argamassa de maneira a serem absorvidas estas variações esperadas principalmente em se tratando de agregados miúdos naturais como as areias de rio, em função da variação verificada em sua composição granulométrica condicionada pelas condições de extração relacionadas por sua vez com o nível do manancial e, conseqüentemente, com o local específico de lavra.

O beneficiamento de agregados britados pelo emprego de equipamentos modificadores de forma, além de produzirem grãos mais cúbicos, garantem maior homogeneidade na composição granulométrica. Paralelamente, o emprego de areias de cava, de grande homogeneidade em sua composição granulométrica, em mistura com areias de rio permite minimizar a influência das variações da composição granulométrica dessas areias de rio, permitindo serem adotados teores de argamassa muito próximos do valor definido como adequado.

Tradicionalmente no desenvolvimento de uma dosagem, definido o teor de argamassa, a continuidade do estudo passa pelo estabelecimento da curva de Abrams.

A trabalhabilidade pretendida nos traços experimentais condiciona a quantidade de água a ser empregada em cada mistura, permitindo ser calculada a relação água/cimento.

Após a reprodução dos traços experimentais, estabelecidos arbitrariamente, será possível relacionar a relação água/cimento com a percentagem de água sobre o total de materiais secos (H) e com a resistência mecânica, modelada matematicamente pela curva de Abrams.

O traço pretendido será calculado, então, em função da relação água/cimento e da quantidade de água necessária para a obtenção de uma determinada trabalhabilidade, traduzida por um abatimento pelo tronco de cone especificado. O desdobramento do traço será feito a partir do conhecimento do teor de argamassa e, quando forem usados mais agregados, do seu proporcionamento previamente estabelecido .

O valor do teor de água sobre o total de materiais secos "H" pode ser obtido por interpolação entre os valores experimentais verificados diretamente durante a reprodução dos traços estipulados para a definição da curva de Abrams.

Em uma família de traços o aumento do valor do abatimento pelo tronco de cone, que pode ser entendido de forma simplificada como o próprio aumento de trabalhabilidade, ocorrerá pelo simples aumento da quantidade de água, limitado este aumento à fronteira da segregação.

Assim posto, uma interpretação superficial poderá sugerir ser a trabalhabilidade dependente única e exclusivamente da quantidade de água adicionada ao concreto. Esse conceito universalizado deve ser limitado pelos parâmetros oferecidos pela lei de Abrams, já que o aumento na quantidade de água não poderá ser tão grande que determine a segregação do concreto assim como a quantidade de água não poderá ser reduzida a quantidades tão pequenas que impeçam o adequado adensamento.

Um concreto segregável jamais poderá ser considerado como de boa trabalhabilidade por mais fluido que se apresente. Um concreto que não puder ser adequadamente adensado por meio dos equipamentos disponíveis, tampouco poderá ser considerado trabalhável.

A alteração da relação entre cimento e areia em diferentes traços de uma família, na manutenção de um mesmo teor de argamassa, modifica o atrito interno da mistura por alterar a quantidade de material fino, alterando, conseqüentemente, sua coesão, sua trabalhabilidade e a demanda de água para um mesmo abatimento pelo tronco de cone.

Concretos com maior consumo de cimento apresentarão maior coesão em função da maior quantidade de material fino, o cimento, por determinar uma maior superfície específica na mistura. A diminuição da coesão, representada pela diminuição da consistência da mistura e consequente elevação do abatimento pelo tronco de cone, que poderá inclusive estar determinando maior trabalhabilidade, somente será obtida pelo emprego de uma maior quantidade de água.

Já concretos de baixo consumo de cimento tendem a segregar com maior facilidade diante de pequenos acréscimos de água justamente por falta de material fino para garantir o volume de pasta necessário para manter os grãos do agregado unidos, de forma a impedir sua separação.

Se a reduzida quantidade de finos determina o aumento do ângulo de atrito interno da mistura, contribuindo para a redução da trabalhabilidade, a diminuição desse atrito interno ocorrerá pelo aumento do volume de pasta já que esta funciona como lubrificante, facilitando o movimento relativo entre os grãos dos agregados.

Se ocorrer perda da coesão e conseqüentemente da trabalhabilidade, decorrente da adição excessiva de água, esta somente poderá ser restituída pelo aumento na quantidade de cimento, definindo um novo patamar de coesão para aquela maior quantidade de água.

Em qualquer concreto, mas especialmente naqueles de muito baixo consumo de cimento, definidos como magros, a trabalhabilidade ainda poderá ser aumentada pelo aumento no teor de ar aprisionado ou intencionalmente incorporado à mistura por meio de aditivos específicos.

Alterações na quantidade de água, na quantidade de água e cimento, na quantidade de água, cimento e ar ou alterações a serem feitas por quaisquer combinações entre esses elementos determinarão alterações no volume de pasta, não sendo possível desvincular o conceito de trabalhabilidade do volume de pasta presente na mistura.

Adições que poderão ser ativas, como a cinza volante, podem ser empregadas como agentes modificadores do comportamento reológico da mistura, a um baixo custo, na medida em que sejam consideradas também como constituintes da pasta.

Em termos econômicos, a dosagem deverá visar sempre à obtenção de um traço que atenda às especificações desejadas com o menor consumo de cimento possível, visto ser o cimento o insumo de maior repercussão no custo final do concreto.

Considerando que a trabalhabilidade, sob uma nova ótica, é uma função do volume de pasta e que esta é formada por cimento, água e ar, podendo ainda ser composta com adições, é possível dizer que o concreto mais econômico para uma dada resistência mecânica e uma dada trabalhabilidade será aquele que for obtido como menor volume de pasta possível.

Por outro lado, se a trabalhabilidade é dependente do volume de pasta, é possível admitir haver um volume ótimo de pasta que garanta as condições reológicas necessárias para a verificação de uma dada trabalhabilidade, obtido com o menor consumo de água possível.

O menor custo será obtido com o concreto cujo traço unitário apresentar o maior  $m$ , ou seja, a maior quantidade de agregado por unidade em massa de cimento. Isso pode ser obtido pelo aumento da relação água/cimento e/ou pela redução do  $H$ , como sugere a equação 1:

$$1 + m = \frac{100x^{a/c}}{H} \quad (\text{equação 1})$$

A perspectiva de ser possível obter um traço para uma dada resistência de referência com uma relação água/cimento mais elevada fica condicionada ao rendimento específico do cimento empregado. Cimentos considerados de mais elevado rendimento permitirão o cálculo de traços com mais elevadas relações água/cimento, determinando traços de menor consumo de cimento.

A redução da quantidade de água ( $H$ ) em um concreto para uma determinada trabalhabilidade somente poderá ocorrer a partir da otimização da reologia da mistura, evitando sempre a elevação da superfície específica.

A influência da superfície específica de uma mistura sobre demanda de água pode ser entendida a partir do seguinte exemplo.

Um cubo com 1 cm de aresta apresenta uma superfície lateral de 6 cm<sup>2</sup>. Se esse prisma for separado por um plano médio haverá a exposição de duas novas superfícies, cada uma de 1 cm<sup>2</sup> na formação de dois prismas. Por sua vez se esses dois novos prismas forem simultaneamente divididos por um novo plano restarão quatro prismas com a exposição de mais duas superfícies de 1 cm<sup>2</sup> cada uma, sendo a superfície lateral do conjunto de quatro prismas de 8cm<sup>2</sup>.

Se forem admitidas mais divisões dos sólidos formados a partir do cubo inicial, a cada uma delas aumentará o número de prismas e a superfície total resultante da soma das superfícies laterais de todos os prismas aumentará, mas a massa do conjunto de prismas será a mesma do cubo inicialmente considerado, o que caracteriza o conceito de superfície específica.

Essa afirmação sugere ser conveniente a concepção de misturas com a menor superfície específica possível para que uma dada trabalhabilidade possa ser obtida com uma baixa demanda de água.

A interpretação superficial do anteriormente exposto conduziria à conclusão de ser tanto maior a quantidade de água requerida para uma determinada trabalhabilidade quanto maior a superfície específica de uma mistura. Na verdade a trabalhabilidade, bem como a demanda de água em uma mistura, deve ser associada a um comportamento reológico que pode ser melhorado, em algumas situações, a partir do aumento da superfície específica, contrariamente à conclusão observada no parágrafo anterior.

Assim, em algumas situações, a melhoria da trabalhabilidade pode ser obtida pelo aumento do teor de argamassa ou dando maior continuidade à granulometria do agregado, ou até mesmo pelo aumento da quantidade de material fino. Se a distribuição granulométrica do agregado conduzir a um menor volume de vazios, também será necessário menor volume de pasta o que determina menor consumo de água.

Por essa razão traços de maior consumo de cimento podem, até certo limite, ser trabalhados com menos água do que traços fracos que, por apresentarem menor quantidade de cimento, apresentam menor superfície específica, mas elevado ângulo de atrito interno.

De qualquer maneira em traços extremos o aumento na demanda de água decorrerá da necessidade de diminuir a coesão ou o ângulo de atrito interno.

Esse conceito pode ser visualizado a partir da observação das informações colhidas da análise de dosagens experimentais realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da CIENTEC.

Foram consideradas apenas dosagens cuja curva de Abrams foi obtida com o emprego de mesmos traços de referência, a saber, em massa, 1:3,50, 1:5,00, 1:6,50 e 1:8,00. O traço 1:3,50 foi tomado como referência, sendo a quantidade de água empregada estabelecida

como a unidade (1). A quantidade de água empregada nos demais traços foi expressa de forma relativa ao valor de referência, conforme os dados apresentados na tabela 3.

Tabela 3: valores do índice de alteração de água em função do traço

1:m	Índice de redução de água										Média	Desvio padrão
1:3,50	1,00											
1:5,00	0,96	0,96	0,94	0,98	0,98	0,90	0,94	1,00	0,87	0,95	0,95	0,04
1:6,50	0,99	1,00	0,94	1,00	1,00	0,98	0,94	1,04	0,84	0,97	0,97	0,05
1:8,00	1,05	1,04	0,96	1,10	1,05	0,96	0,99	1,00	0,86	1,02	1,00	0,07

A figura 1 expressa graficamente o comportamento relatado.

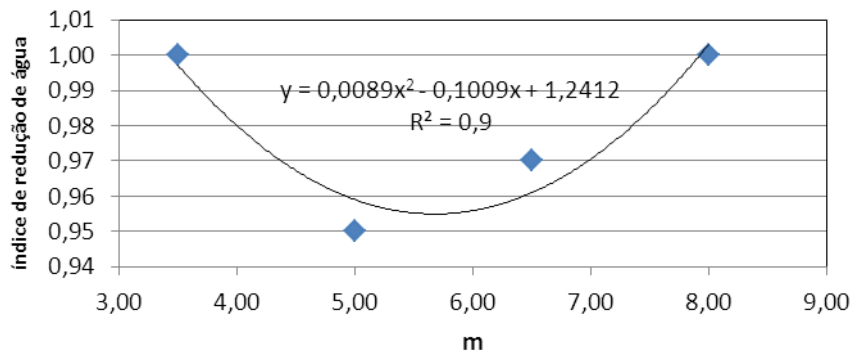


Figura 1: relação existente entre o consumo de água e o volume de pasta seca

É possível verificar que para a obtenção de mesmo abatimento pelo tronco de cone nos traços 1:5,00 e 1:3,50, foram necessárias quantidades distintas de água representando no traço 1:5,00 o equivalente a 95% daquela adotada no traço de referência.

As dosagens consideradas nesse estudo foram desenvolvidas com diferentes materiais, agregados e cimentos além de diferentes aditivos, o que permite apenas considerar o gráfico apresentado como a representação de uma tendência, e não a expressão do resultado de um estudo dirigido.

A representação gráfica do fenômeno apresentada já foi sugerida por Dafico (1997), também citado por Boggio (2000), de maneira a que o modelo linear empregado tradicionalmente para a representação da lei de Lyse possa ser substituído por uma curva polinomial de segundo grau cujas constantes dependem das características dos materiais, das proporções de sua mistura além do nível de trabalhabilidade instituído.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA DE INGE LYSE

A interação do leitor com o texto proposto por Lyse (1932) permite observar que o referido pesquisador admitia ser possível entender o desenvolvimento da resistência do concreto sob uma ótica diversa daquela apresentada por Abrams (1918).

Os conceitos básicos propostos por Lyse (1932) podem ser assim enunciados:

- a) A consistência do concreto permanece próxima da constância independentemente da riqueza da mistura se o tipo e graduação dos agregados e a quantidade de água por unidade de concreto fresco permanecem constantes;
- b) Se riqueza da mistura for entendida como conteúdo de cimento, o texto usado para apresentar o conceito poderá ser entendido de maneira que, se mantidos os agregados, para uma mesma quantidade de água por unidade de concreto fresco, a consistência permanece praticamente constante independentemente do traço considerado.
- c) A relação existente entre a relação água/cimento e a resistência do concreto é linear.

Até onde é possível entender, o trabalho original de Lyse (1932) foi baseado em traços dimensionados de maneira que a massa de agregado graúdo representasse aproximadamente duas vezes a massa de agregado miúdo, determinando, portanto, uma proporção de 2:1. A manutenção dessa proporção determinou que os diferentes traços apresentassem diferentes teores de argamassa, decrescentes com a redução do consumo de cimento.

Lyse (1932) baseava ainda suas conclusões na afirmação de que mantida a quantidade de água, mantida ficava a quantidade de sólidos por unidade de concreto, de maneira que uma alteração na quantidade de cimento determinava uma alteração correspondente na quantidade de agregados, permanecendo inalterada a consistência da mistura.

Não cabe questionar ou tentar verificar a abrangência das assertivas propostas por Lyse (1932) por vários motivos, mas principalmente pela alteração ocorrida ao longo do tempo nos cimentos, fundamentalmente sobre a finura, e na mudança na concepção dos traços visto que as condições de transporte e lançamento determinaram alterações nos conceitos que eram empregados na definição do teor de argamassa e no próprio proporcionamento entre agregados graúdos.

Os resultados obtidos por Lyse (1932) estão apresentados de forma resumida na tabela 4.

Tabela 4: resultados obtidos por Lyse, relacionando diferentes traços e diferentes cimentos com o abatimento pelo tronco de cone a partir de um mesmo consumo de água (LYSE, 1932)

Traço desdobrado em massa			$\alpha$ (%)	Abatimento pelo tronco de cone obtido em cada traço em misturas feitas com cinco diferentes cimentos (polegadas)				
Cimento	Agregado			A	B	C	D	E
	Miúdo	Graúdo						
1,00	1,64	3,26	44,75	2 <sup>1/2</sup>	1 <sup>1/2</sup>	3	2 <sup>1/2</sup>	3
1,00	2,19	4,35	42,31	2 <sup>1/4</sup>	1 <sup>1/2</sup>	5 <sup>3/4</sup>	2 <sup>1/2</sup>	3 <sup>1/4</sup>
1,00	2,74	5,43	40,79	3 <sup>3/4</sup>	1 <sup>1/2</sup>	5	2	3 <sup>1/2</sup>
1,00	3,29	6,51	39,72	3	1 <sup>1/2</sup>	2 <sup>1/2</sup>	3	3

Admitindo uma polegada corresponder a 25,4 mm, é possível calcular a variação máxima verificada no abatimento pelo tronco de cone entre os quatro traços estudados para cada cimento, como apresentado na tabela 5. Na mesma tabela 5, é feita uma comparação com a variação máxima admissível pela NBR 7212 (ABNT, 1984) a partir do valor mínimo observado.

Tabela 5: variações máximas verificadas no experimento de Lyse em comparação com a amplitude prevista pela norma brasileira citada para cada nível de abatimento pelo tronco de cone (LYSE, 1932)

Cimento	Varição máxima entre os valores experimentais (mm)	Varição máxima admitida pela NBR 7212 (mm)
A	38,1	10
B	0	10
C	82,6	20
D	25,4	10
E	12,7	10

A análise do apresentado na tabela 5 permite inferir que em apenas duas situações, as correspondentes aos concretos produzidos com os cimentos B e E, seria possível admitir como de mesmo abatimento pelo tronco de cone os concretos produzidos com os quatro traços estudados, segundo a faixa de variação proposta pela NBR 7212 (ABNT, 1984).

Uma questão ainda pode ser colocada:

**Se os quatro traços apresentam diferentes teores de argamassa, mesmo naqueles em que o abatimento pelo tronco de cone possa estar indicando a mesma consistência seria possível afirmar possuírem a mesma trabalhabilidade?**



Acreditava Lyse (1932) ser o cimento o fator mais importante na definição da resistência do concreto, argumentando que a resistência do concreto aumentaria a partir do aumento do número de partículas de cimento para um mesmo conteúdo de água de uma mistura, já que o aumento no consumo de cimento correspondente a uma alteração no traço não determinaria mudança no nível de consistência da mistura final.

Em resumo: Se traços diferentes de um mesmo concreto não apresentam variações na consistência independentemente do teor de cimento na mistura para uma mesma quantidade de água, então a resistência do concreto pode ser relacionada direta e linearmente com o consumo de cimento.

Na verdade a alteração da quantidade de cimento numa mistura, mantida a quantidade de água, significa em última análise alterar a relação água/cimento o que também pode ser entendido como alterar a densidade da mistura a partir da alteração na densidade da pasta.

A proposta de Lyse (1932) se contrapunha à lei de Abrams basicamente quanto à modelagem matemática da relação existente entre a relação água/cimento e a resistência do concreto, centrando o entendimento da variação da resistência em função da densidade da mistura.

A observação da equação 1 permite concluir que, sendo  $H$  constante, fica estabelecida uma relação direta entre o traço  $(1+m)$  e a relação água/cimento. Lyse propunha a constância de  $H$  para consubstanciar a afirmação de poder ser a relação existente entre consumo de cimento e resistência modelada matematicamente por uma equação do primeiro grau, sendo talvez esse o real objetivo de seu trabalho.

No mesmo artigo apresentado por Lyse (1932), Withey questiona a promulgada linearidade entre a relação água/cimento e a resistência do concreto, levantando a questão de ser de pequena abrangência o princípio apresentado.

Matematicamente não é possível discordar uma vez que toda reta é uma curva cujo centro é um ponto impróprio. O entendimento dessa afirmação passa pela concepção de um arco de comprimento tão pequeno quanto o ângulo que o gerou, ou seja, uma curva, visível como tal, sempre poderá ser reduzida a um conjunto de segmentos de reta.

Esse entendimento por si só explicita a pequena abrangência do princípio apresentado por Lyse (1932), limitando sua expectativa de ser aplicado como um novo método de dosagem, contrapondo-se ao método concebido por Abrams, o que poderia ser admitido sob a consideração de que as variações decorrentes dessa simplificação pudessem ser

absorvidas pelas variações esperadas na resistência do concreto em condições normais de produção comercial.

A mesma crítica pode ser feita com relação à suposta manutenção da mesma consistência de concretos produzidos com diferentes traços desde que mantida a mesma percentagem de água sobre o total de materiais secos, já que no próprio trabalho apresentado por Lyse (1932) é possível verificar que, mesmo para os padrões atuais, o valor do abatimento pelo tronco de cone obtido experimentalmente não pode ser considerado igual nem tampouco representar a mesma trabalhabilidade.

A NBR 7212 (ABNT,1984) estabelece como variação para abatimentos pelo tronco de cone compreendidos entre 100 e 150 mm, 20 mm para mais ou para menos, mas sem qualquer dúvida um mesmo concreto, com abatimentos de 80 mm e 120 mm, jamais poderá ser admitido como apresentando mesma trabalhabilidade.

Conrow, apud Lyse (1932), alerta que a condição apregoada contraria o fato de ser o aumento da finura de uma mistura fator demandante de uma maior quantidade de água para a manutenção de uma mesma consistência. A afirmação pode ser mais bem assimilada a partir da consideração de haver maior superfície específica em traços mais fortes, ou seja, com mais elevados consumos de cimento, independentemente de estar fixado o teor de argamassa ou em traços como concebidos por Lyse (1932) em que o proporcionamento entre agregado miúdo e agregado graúdo respeita uma mesma relação de 1:2. O aumento do consumo de cimento em qualquer alternativa será sempre condicionante da substituição de um material de elevada finura por outros, os agregados, que sempre apresentarão uma desproporcionalmente menor superfície específica.

Faz ainda o mesmo autor uma observação no sentido de que o princípio estabelecido por Lyse (1932) poderia apenas ser aplicado sobre traços com pequena variação no consumo de cimento, caracterizando ser limitado seu raio de ação.

Observações feitas por MacMillan, em Lyse (1932), referem-se ao fato de os dados apresentados não se alinharem perfeitamente, questionando, dessa maneira, implicitamente a conclusão apresentada por Lyse (1932), embora reconhecendo a importância de qualquer procedimento que represente simplificação ou agilização, devendo ser aproveitado ao máximo dentro dos limites de sua aplicabilidade. Cita ainda ser possível estabelecer, para qualquer conjunto de materiais, uma relação básica para projetos de misturas que seja simples e que envolva menos erros do que os verificados na medida dos materiais. Ressalta, ainda, ter ele próprio produzido dados com leves variações em relação aos apresentados por Lyse (1932) quanto à constância no conteúdo de água para diferentes

misturas de mesma consistência, informando terem sido necessário incrementos de água para um constante esforço de remoldagem na medida em que a mistura ficava mais magra.

Assim, não é possível desconsiderar a possibilidade de efetivamente haver variações significativas na demanda de água entre traços de um mesmo concreto para um mesmo valor de abatimento pelo tronco de cone, conseqüentemente, determinando valores diferentes de abatimento pelo tronco de cone para uma mesma quantidade de água.

Como é admitida uma grande variação na medida desse abatimento, em algumas situações de aplicação restrita a um pequeno intervalo, uma determinada quantidade de água, mesmo definindo diferentes valores para o abatimento pelo tronco de cone, poderá ser adotada de forma constante já que as variações no abatimento poderão ser absorvidas pela tolerância de medida oferecida pela NBR 7212 (ABNT, 1984).

A adoção do critério exposto no parágrafo anterior, respeitando suas limitações, pode facilitar sobremaneira o cálculo dos traços no estabelecimento de uma família, embora na prática sempre ocorram variações.

Em geral na produção de concreto não há a verificação direta e precisa da quantidade de água adicionada em cada betonada, sendo esta avaliada indiretamente através da medição do abatimento pelo tronco de cone.

Esse procedimento simplificado de controle determina a introdução de correções não homologadas na quantidade de água em cada betonada com repercussão significativa na resistência, em função da conseqüente alteração introduzida na relação água/cimento.

Mesmo que a argumentação até então oferecida represente a realidade de quem produz concreto, particularmente concreteiras, não é suficiente para justificar a imprecisão implícita do processo de produção. A mesma argumentação pode bem ser usada para justificar a falta de controle sobre o abatimento pelo tronco de cone que se observa no transcorrer de uma concretagem.

Concretos produzidos a partir da reprodução de um traço calculado com base em um teor de água sobre o total de materiais secos superdimensionado, em função da aplicação direta da lei de Lyse (1932), demandarão correções representadas pela redução na quantidade de água para verificação do abatimento pelo tronco de cone previsto, igualmente com reflexos sobre a resistência mecânica. Essa situação representará por um lado um ganho de resistência, mas por outro, um custo mais elevado e, dependendo do volume de água envolvido na correção, redução no volume de concreto produzido.

O caso contrário pode representar uma maior preocupação, pois a redução da resistência mecânica sempre representará um risco.

Como as maiores distorções ocorrem em traços situados nos extremos da curva de Abrams, concretos dosados para o atendimento a resistências mais elevadas são sempre mais vulneráveis por terem a relação água/cimento definida por um tramo da curva de desenvolvimento mais vertical, determinando que pequenas variações na relação água/cimento possam ser responsáveis por significativas alterações na resistência mecânica.

A conclusão a que se pode chegar conduz à necessidade de considerar com mais rigor as variações que podem ocorrer no teor de água sobre o total de materiais secos, conferindo um caráter mais objetivo a esse parâmetro.

Essa conclusão fica consubstanciada a partir do entendimento de serem os conceitos originais propostos por Inge Lyse, limitados como os interpretam Cremonini e Lima (1988), ao considerarem a lei de pequena abrangência. Essa afirmação é corroborada por outros, conforme discorrido a seguir, com base no trabalho apresentado por Lyse (1932) *Test on consistency and strength of concrete having constant water content*<sup>6</sup> nos anais da 35<sup>th</sup> Annual Meeting, realizado pela *American Society for Testing Materials (ASTM)* no ano de 1932, como depreendido das observações feitas por pesquisadores contemporâneos constantes do citado trabalho original de Lyse :

- a) Conrow: os princípios apresentados somente podem ser aplicados sobre uma variação limitada na riqueza da mistura;
- b) Young e Ross: o método de água constante é aproximadamente correto dentro de certos limites;
- c) Withey: o método desenvolvido permite uma boa aproximação para a dosagem de concretos que não sejam muito diferentes do traço inicial de projeto.

Por simplificação, a teoria proposta por Lyse (1932), em algumas situações, é extrapolada, sendo aplicada de forma ampla.

No Brasil é frequente a utilização da expressão **Lei de Lyse**, quando o teor de água sobre o total de materiais secos é considerado constante no cálculo de traços de uma mesma família para um mesmo abatimento pelo tronco de cone, para qualquer proporcionamento entre os materiais, embora Lyse ( 1932) não tenha feito essa afirmativa (DAFICO, 1997).

---

<sup>6</sup> Tradução livre: ensaio sobre consistência e resistência do concreto produzido com conteúdo constante de água.

A interpretação simplificada da lei de Lyse, então, como enunciada por Boggio (2000), a seguir apresentada, permite supor ser igual o teor de água sobre o total de materiais secos para um mesmo valor de abatimento pelo tronco de cone em diferentes traços de um mesmo concreto:

[...] fixado o tipo de materiais constituintes do concreto, a quantidade de água necessária, para conseguir uma dada trabalhabilidade, é constante e independe da relação  $m$  (agregado/cimento).

A flexibilização do conceito permitiria uma interpretação mais adequada se a expressão **para conseguir uma dada trabalhabilidade** fosse substituída por **para conseguir uma trabalhabilidade definida por uma faixa aceitável**.

É possível admitir, então, que uma trabalhabilidade variável dentro de uma faixa definida por valores de abatimento pelo tronco de cone aceitáveis, em diferentes traços de um mesmo concreto, possa ser obtida com teores de água aproximadamente iguais.

A flexibilidade admitida na interpretação dos resultados do ensaio de abatimento pelo tronco de cone por si só não corrobora a Lei de Lyse como apresentada por Boggio (2000).

Ainda segundo Dafico (1997), não parece haver argumento consistente para que seja utilizada uma modelagem linear na representação da relação existente entre o traço ( $m$ ) e a relação água/cimento pela inevitável alteração do teor de água sobre o total de materiais secos diante de alterações havidas na relação água/cimento.

Essa afirmação pressupõe igualmente não ser possível considerar linear a relação existente entre o teor de água sobre o total de materiais secos e a relação água/cimento.

Sugere também Dafico (1997) ser mais adequado o emprego de uma expressão polinomial na representação da relação entre o teor de água sobre o total de materiais secos e a relação água/cimento.

O que pode ser depreendido da argumentação apresentada é que a verificação dos conceitos formulados por Lyse apresentam pequena amplitude.

Matematicamente qualquer conjunto de pontos representantes de eventos que relacionem dois parâmetros dependentes pode ser associado a diferentes funções, inclusive aquela representada por uma reta. A escolha da função que melhor modela uma nuvem de pontos experimentais estará condicionada sempre à análise do coeficiente de correlação.

Se uma dosagem for conduzida a partir da adoção de traços muito próximos, a curva de ajustamento pode ser substituída por uma reta, no entanto a possibilidade de cálculo de traços ficará restrita aos limites de aplicação da relação o que pode ser entendido como uma relação de pequena abrangência.

A afirmação apresentada por Lyse (1932) de ser linear a relação entre a relação água/cimento e a resistência à compressão e entre a relação água/cimento e o traço suscitou uma investigação sobre a possibilidade de haver alguma relação estável entre resistência à compressão e consumo de cimento.

A investigação foi procedida sobre os dados históricos armazenados pela CIENTEC referentes a dosagens experimentais realizadas ao longo do tempo e, da mesma forma como foi procedida à verificação da relação existente entre a relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos, foi possível modelar matematicamente a relação existente entre o consumo de cimento e a resistência à compressão.

### 3.3.1 Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento

Diante das afirmações postas por Lyse (1932), particularmente com relação à linearidade entre resistência e relação água/cimento, que permite inferir haver uma mesma relação entre a resistência e o consumo de cimento, foi desenvolvido um trabalho de pesquisa sobre todas as dosagens desenvolvidas pela CIENTEC no ano de 2009, indistintamente, considerando concretos estudados com diferentes agregados graúdos, tanto em tamanho como em natureza mineralógica. Igualmente foram considerados concretos estudados com diferentes composições entre agregados graúdos, diferentes areias e ainda concretos desenvolvidos com o emprego de cinza volante.

O procedimento de análise foi sempre o mesmo, através da relação entre a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) e o consumo de cimento dos traços calculados para cada caso.

Assim foram considerados traços obtidos de 23 curvas de Abrams que relacionados com os respectivos consumos de cimento permitiram o traçado de curvas que apresentaram os coeficientes de correlação apresentados na tabela 6.

Tabela 6: coeficientes de correlação obtidos da relação entre consumo de cimento e resistência à compressão observados em uma série histórica

evento	r <sup>2</sup>	evento	r <sup>2</sup>	evento	r <sup>2</sup>
1	0,964	9	0,992	17	0,995
2	0,971	10	0,994	18	0,978
3	0,988	11	0,999	19	0,998
4	0,970	12	0,986	20	0,999
5	0,981	13	0,995	21	0,994
6	0,954	14	0,996	22	0,998
7	0,999	15	0,983	23	0,995
8	0,994	16	0,996	-	

A tabela 7 apresenta um resumo dos parâmetros estatísticos avaliados, permitindo concluir pela homogeneidade dos dados levantados.

Tabela 7: parâmetros estatísticos da amostra

Parâmetro avaliado	Valor obtido
Média	0,998
Valor máximo	0,999
Valor mínimo	0,954
Desvio padrão	0,012
Coeficiente de variação (%)	1,202

O estabelecimento dessa relação constitui uma poderosa ferramenta na medida em que permite observar variações no comportamento quanto à resistência à compressão de concretos produzidos com traços diferentes de uma mesma família, calculados a partir de uma mesma curva de Abrams.

Embora redundante, convém frisar que a amplitude da relação proposta tem como limites o universo definido por um conjunto específico de materiais, uma idade e uma mesma trabalhabilidade, estimada indiretamente pelo abatimento pelo tronco de cone.

A redução do coeficiente de correlação pode ser atribuída à variação no abatimento pelo tronco de cone, ou seja, quanto mais afastados da curva de ajustamento, que representa a própria curva de Abrams, estiverem situados os pontos experimentais obtidos do trabalho desenvolvido em laboratório, menor o coeficiente de correlação.

O traço em massa é o quociente dado pela equação 2, de maneira que variações no denominador representarão diferenças nos traços e, conseqüentemente, diferenças no consumo de cimento.

$$1 + m = \frac{100 \times a/c}{H} \quad (\text{equação 2})$$

Esse fato sugere sempre ser necessária especial atenção durante a colocação de água nas misturas experimentais durante o desenvolvimento de procedimentos de dosagem para que todos os traços experimentais sejam obtidos como o mesmo abatimento pelo tronco de cone, minimizando assim o distanciamento da curva de ajustamento dos pontos experimentais.

Se por alguma razão esse objetivo não for atingido e mesmo que a homogeneidade pretendida não seja verificada, resta ainda a alternativa de corrigir o teor de água sobre o total de materiais secos visando a obtenção de um mesmo abatimento pelo tronco de cone de maneira que todos os traços a serem calculados possam apresentar o mesmo índice de consistência. A citada correção pode ser procedida por meio da equação 3.

$$H_f = H_i \left( \frac{s_f}{s_i} \right)^x \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$x$  = expoente a ser determinado;

$H_1$  e  $H_2$  = teores de água sobre o total de materiais secos inicial e final;

$s_1$  e  $s_2$  = abatimentos pelo tronco de cone correspondentes, respectivamente, à  $H_1$  e  $H_2$ .

A equação 3 apresenta como expoente uma incógnita que pode assumir valores de 0,10 ou 0,15 em se tratando de concretos produzidos respectivamente com cimentos dos tipos CP II e CP V ou CP IV, respectivamente, conforme Recena (2007).



Sempre que interessar é possível sua estimativa a partir de valores experimentais obtidos durante a reprodução dos traços de referência no desenvolvimento da dosagem experimental. Basta para isso que a água seja colocada em duas etapas, permitindo para cada etapa o conhecimento de um teor de água sobre o total de materiais secos e um abatimento pelo tronco de cone, sendo, então, aplicada a seguinte expressão deduzida da equação 3 anteriormente apresentada:

$$x = \frac{\log\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{\log\left(\frac{s_1}{s_2}\right)} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

$x$  = expoente a ser determinado;

$H_1$  e  $H_2$  = teores de água sobre o total de materiais secos inicial e final;

$s_1$  e  $s_2$  = abatimentos pelo tronco de cone correspondentes, respectivamente, à  $H_1$  e  $H_2$ .

A primeira grande informação passível de ser obtida através da aplicação da relação exposta, é a verificação do cálculo dos diferentes traços obtidos de um procedimento de dosagem.

A partir dos traços calculados, é possível montar uma curva que relacione a resistência média à compressão em uma determinada idade com o consumo de cimento do traço calculado para a verificação dessa resistência, ou que relacione esse consumo de cimento diretamente com a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ). A observação da curva e dos pontos empregados em sua construção permite identificar qualquer erro cometido, já que o traço mal calculado determinará a estimativa de um consumo de cimento que não estará representado sobre a curva, sugerindo ser necessário rever o procedimento.

Uma segunda alternativa de emprego dessa relação será a verificação ao longo do tempo de distorções que possam ocorrer em traços reproduzidos por uma central de concreto, seja em fábricas de pré-moldados ou em empresas de serviços de concretagem.

Nesse caso, o controle deverá ser feito periodicamente usando valores da resistência característica à compressão estimada ( $f_{ck,est.}$ ) ou da resistência média calculadas com os valores obtidos no autocontrole para cada traço dentro de um período de tempo.

A plotagem dos pontos constituídos pela interação do consumo de cimento praticado com o valor da resistência à compressão de referência, seja o  $f_{ck}$  estimado ou a resistência média, permitirá visualizar qualquer anomalia referente a qualquer alteração na resistência. A identificação dessas variações permite que o traço seja ajustado, apenas pelo reposicionamento do consumo de cimento. Esse reposicionamento poderá ser decorrente de alteração na relação água/cimento ou na percentagem de água sobre o total de materiais secos.

### 3.3.1.1 Verificação do conceito proposto

Para exemplificar a relação exposta, foi tomada uma dosagem realizada pela CIENTEC na qual foram estudados concretos com os mesmos materiais, cimento e agregados, um com adição de cinza volante e outro apenas com o cimento. Nos dois estudos foi mantido o mesmo proporcionamento entre os agregados e o mesmo teor de argamassa.

#### 3.3.1.1.1 Concreto sem cinza

As características do concreto estudado podem ser observadas a seguir:

As curvas de Abrams calculadas para 7 e 28 dias de idade são definidas pelas equações 5 e 6:

$$- \log f_{c_7} = 2,0284 - (a/c \times 1,1091) \quad (\text{equação 5})$$

$$- \log f_{c_{28}} = 2,1947 - (a/c \times 1,1338) \quad (\text{equação 6})$$

A tabela 8 relaciona resumidamente os valores dos parâmetros obtidos experimentalmente.

Tabela 8: parâmetros de dosagem do concreto produzido sem cinza

Traço em massa	Relação água/cimento	Consumo teórico de cimento	Limite de resistência (MPa)	
			7 dias	28 dias
1:3,00	0,41	531	43,1	54,3
1:4,50	0,52	389	34,0	41,6
1:6,00	0,64	306	24,0	28,5
1:8,00	0,93	232	12,5	14,1

O concreto foi estudado com um teor de argamassa de 52%, em massa, tendo sido obtidos os abatimentos pelo tronco de cone apresentados na tabela 9:

Tabela 9: correção do teor de água sobre o total de materiais secos para um mesmo abatimento pelo tronco de cone do concreto sem cinza

H (real)	Abatimento pelo tronco de cone medido (mm)	H (corrigido)
10,2	125	10,1
9,38	105	9,57
9,14	115	9,20
10,3	150	10,0

Por H (real) deve ser entendida a percentagem de água sobre o total de materiais secos que determinou o abatimento pelo tronco de cone apresentado pelo concreto de cada traço no momento da moldagem dos corpos de prova destinados ao ensaio de compressão. Já o H (corrigido) representa o valor transposto para um abatimento pelo tronco de cone de 120 mm.

Com os valores calculados da relação água/cimento em cada traço e os correspondentes valores da percentagem de água sobre o total de materiais secos, real e corrigido, foram estabelecidas curvas que evidenciam o comportamento não linear da relação estabelecida entre os dois parâmetros.

As curvas apresentadas nas figuras 2 e 3 representam a relação existente entre a relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos real e corrigido, respectivamente. Para o cálculo dos traços cujos consumos foram relacionados com a resistência à compressão foram adotados valores corrigidos para o teor de água sobre o total de materiais secos obtidos da curva apresentada na figura 3.

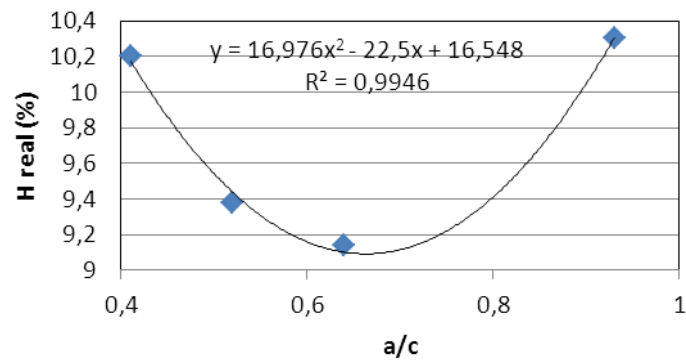


Figura 2: interação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos real do concreto sem cinza

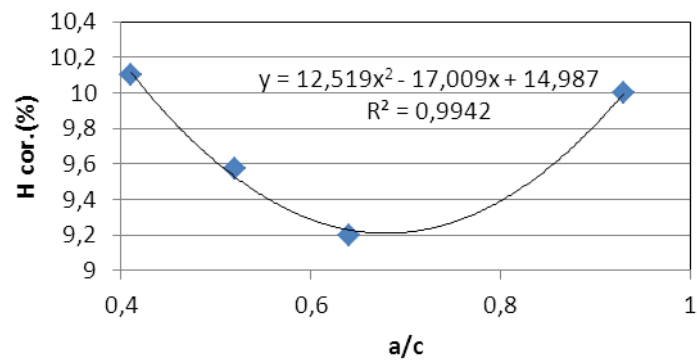


Figura 3: interação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos corrigido do concreto sem cinza

A observação das curvas apresentadas pelas figuras 2 e 3 permite constatar que a correção exercida sobre os valores obtidos experimentalmente praticamente não altera o comportamento da relação ou a precisão da curva representativa desta.

O gráfico apresentado na figura 4 relaciona a resistência à compressão, obtida experimentalmente a partir do ensaio de corpos de prova moldados com os quatro traços experimentais, com o respectivo consumo teórico de cimento.

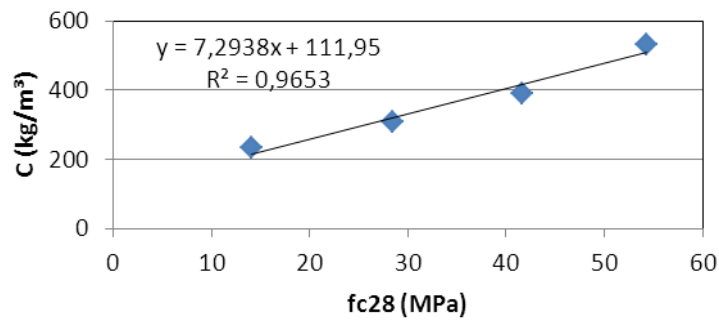


Figura 4: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto sem cinza

Com os dados experimentais fornecidos pelo procedimento de dosagem foi possível calcular traços para diferentes resistências características à compressão ( $f_{ck}$ ) considerando um desvio padrão de dosagem de 2,0 MPa, conforme orientação do demandante do serviço.

O gráfico apresentado na figura 5 relaciona a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) e o consumo teórico de cimento, calculado para cada traço, obtido a partir dos valores apresentados na tabela 10 a seguir apresentada:

Tabela 10: valores de consumo de cimento para diferente resistência características à compressão do concreto sem cinza

fck (MPa)	C (kg/m³)
15,0	247
20,0	275
22,0	287
25,0	307
30,0	343
35,0	382

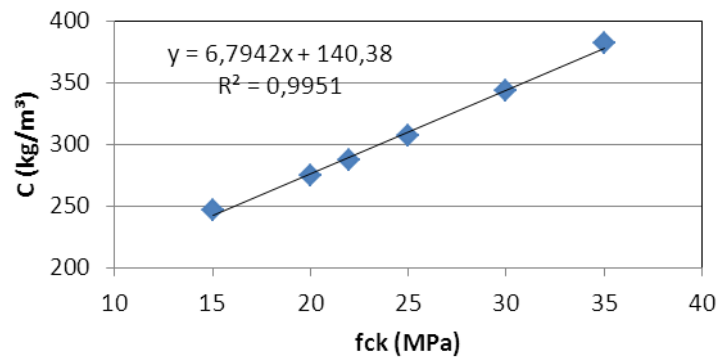


Figura 5: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto sem cinza

### 3.3.1.1.2 Concreto com cinza

As características do concreto estudado podem ser observadas a seguir:

As curvas de Abrams calculadas para 7 e 28 dias de idade são definidas pelas equações 7 e 8:

$$- \log fc_7 = 2,6718 - (a/c \times 2,7490) \quad (\text{equação 7})$$

$$- \log fc_{28} = 2,5714 - (a/c \times 2,2137) \quad (\text{equação 8})$$

A tabela 11 relaciona resumidamente os valores dos parâmetros obtidos experimentalmente.

Tabela 11: parâmetros de dosagem do concreto produzido com cinza

Traço em massa	% de substituição de cimento por cinza	Relação água/aglom.	Consumo teórico de cimento	Limite de resistência (MPa)	
				7 dias	28 dias
1:2,50	10	0,37	537	43,3	55,8
1:3,50	20	0,44	373	32,2	41,3
1:4,00	30	0,49	291	20,9	30,9
1:5,50	40	0,56	224	13,2	21,1

O concreto foi estudado com um teor de argamassa de 52%, em massa, tendo sido obtidos os abatimentos pelo tronco de cone apresentados na tabela 12 que segue:

Tabela 12: correção do teor de água sobre o total de materiais secos para um mesmo abatimento pelo tronco de cone do concreto com cinza

H (real)	Abatimento pelo tronco de cone medido (mm)	H (corrigido)
10,5	115	10,6
9,72	115	9,76
9,86	125	9,82
10,1	140	9,98

Da mesma forma que no concreto produzido sem cinza volante, por H (real) deve ser entendida a percentagem de água sobre o total de materiais secos que determinou o abatimento pelo tronco de cone apresentado pelo concreto de cada traço no momento da moldagem dos corpos de prova destinados ao ensaio de compressão. Igualmente o H (corrigido) representa o valor transposto para um abatimento pelo tronco de cone de 120 mm.

Com os valores calculados da relação água/cimento em cada traço e os correspondentes valores da percentagem de água sobre o total de materiais secos, real e corrigido, foram estabelecidas curvas que evidenciam o comportamento não linear da relação estabelecida entre os dois parâmetros, apresentadas respectivamente nas figuras 6 e 7.

Como no concreto estudado sem cinza, os valores do teor de água sobre o total de materiais secos adotados para o cálculo dos traços foram obtidos a partir da curva que relaciona a relação água/cimento com o valor corrigido do teor de água sobre o total de materiais secos, apresentada na figura 6.

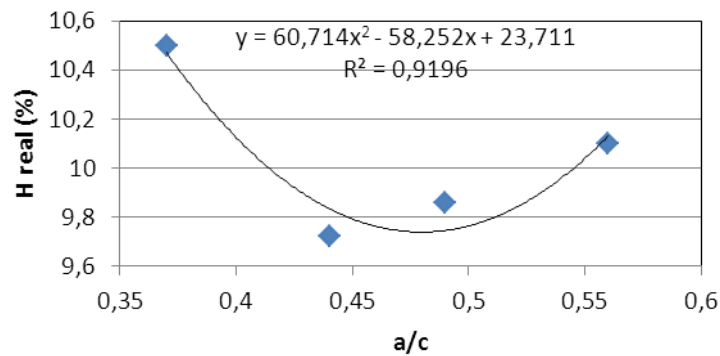


Figura 6: interação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos real do concreto com cinza

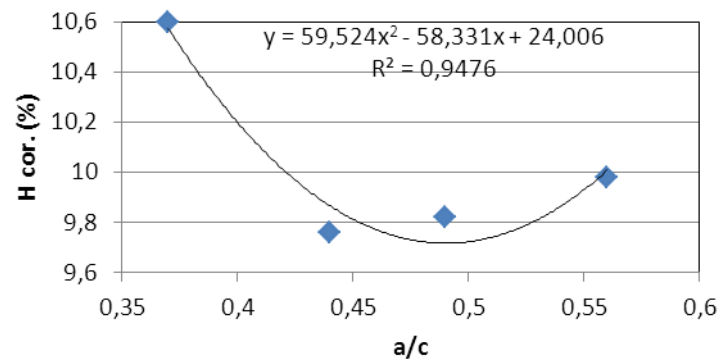


Figura 7: interação entre relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos corrigido do concreto com cinza

Nesse caso a correção exercida sobre os valores do teor de água sobre o total de materiais secos obtidos experimentalmente alteraram o comportamento da relação, evidenciando um coeficiente de correlação mais baixo.

O gráfico apresentado na figura 8 relaciona a resistência à compressão obtida experimentalmente a partir do ensaio de corpos de prova moldados com os quatro traços experimentais com o respectivo consumo teórico de cimento.



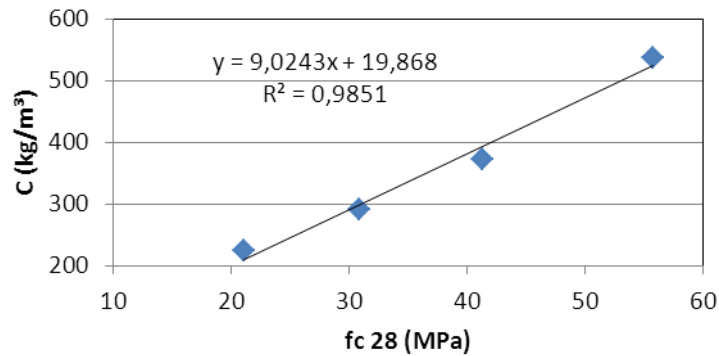


Figura 8: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto com cinza

Com os dados experimentais fornecidos pelo procedimento de dosagem foi possível calcular traços para diferentes resistências características à compressão ( $f_{ck}$ ), considerando um desvio padrão de dosagem de 2,0 MPa, conforme orientação do demandante do serviço.

Neste caso, porém, para o cálculo dos traços deve ser considerado outro parâmetro, o teor de substituição de cimento por cinza volante. Esta variável é obtida da interação entre a relação água/cimento e a percentagem de substituição que pode ser visualizada no gráfico da figura 9.

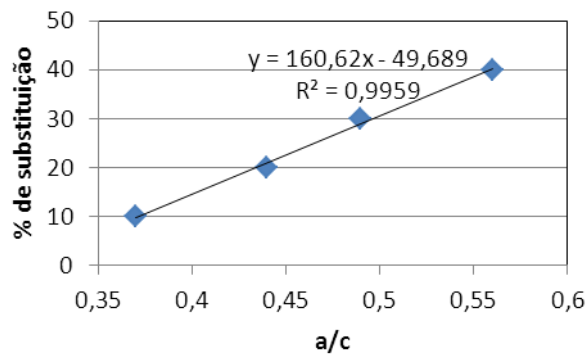


Figura 9: interação entre % de substituição e relação água/cimento

O gráfico apresentado na figura 10 relaciona a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) e o consumo teórico de cimento, calculado para cada traço, obtido a partir dos valores apresentados na tabela 13.

Tabela 13: valores de consumo de cimento para diferente resistência características à compressão do concreto com cinza

fck (MPa)	C (kg/m <sup>3</sup> )
15,0	208
20,0	246
22,0	254
25,0	289
30,0	331
35,0	350

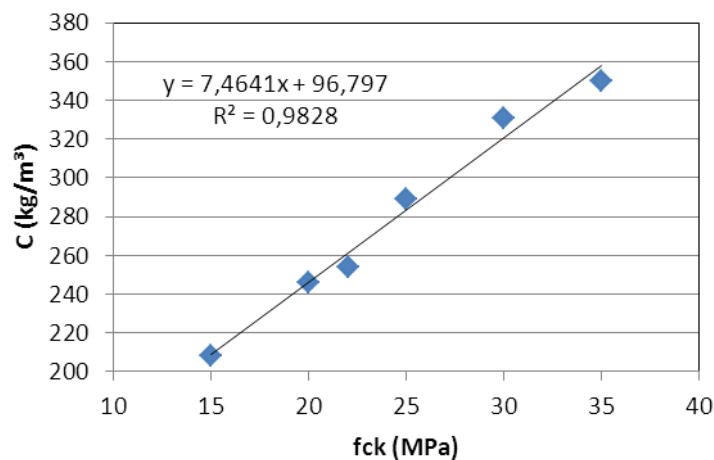


Figura 10: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão do concreto com cinza

### 3.3.1.2 Exemplo de aplicação do conceito proposto

Como exemplo de correção de traços em unidade dosadora será considerada essa última situação em que o concreto foi produzido com o emprego de cinza volante.

Admitindo-se que em um determinado momento, por alguma alteração na qualidade do cimento, ao longo do procedimento de controle da resistência do concreto produzido, é observado que o valor do  $f_{ck}$  estimado calculado a partir do ensaio dos exemplares moldados durante a produção não está sendo atingido. Essa situação de per si representa uma condição que conduz a não aceitação automática de uma estrutura, devendo o concreto ser reposicionado em relação à situação limite.

Para exemplificar, é considerada uma situação hipotética em que os resultados do autocontrole de uma central estejam conduzindo ao cálculo de valores de resistência

característica à compressão inferiores aos valores de referência para os quais os traços reproduzidos pela central foram calculados.

Admitindo que o maior volume de concreto produzido por essa central seja aquele referente a um traço calculado para a verificação de um concreto de  $f_{ck}$  igual a 25,0 MPa, e admitindo, ainda, que os resultados obtidos a partir do ensaio de exemplares moldados com o concreto referente a esse traço estejam conduzindo ao cálculo de um  $f_{ck}$  estimado de 22,0 MPa, inferior portanto ao valor de referência, o que pode ser entendido como um deslocamento da curva **resistência x consumo** para baixo.

Nessas condições a correção nos traços ficará condicionada ao reposicionamento da curva por seu deslocamento para cima a fim de compensar a perda de resistência observada.

Tomando então a curva representativa dessa relação **resistência x consumo** (equação 9):

$$C = 7,4641 \times f_{ck} + 96,797 \quad (\text{equação 9})$$

e considerando que para um  $f_{ck}$  igual a 25,0 MPa corresponde um consumo de cimento de 289 kg/m<sup>3</sup>, mas que em realidade permite ser verificado um  $f_{ck}$  de apenas 22,0 MPa, é possível calcular um novo termo independente, maior, que reposicionará a curva em um patamar mais elevado, assim como demonstrado nas equações 10 a 11:

$$289 = (7,4641 \times 22,0 \text{MPa}) + X \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$$X = 289 - (7,4641 \times 22,0 \text{MPa}) \quad (\text{equação 11})$$

Sendo, então,  $X = 124,78798$  e a nova curva representada pela equação 12.

$$C = (7,4641 \times f_{ck}) + 124,7898 \quad (\text{equação 12})$$

Através da equação 11 é possível calcular os consumos de cimento corrigidos para cada  $f_{ck}$ , conforme está apresentado na tabela 14 que segue:

Tabela 14: consumo de cimento corrigido

$f_{ck}$ (MPa)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
15	237
20	274
22	289
25	311
30	349
35	386

O gráfico apresentado na figura 11 permite visualizar a curva original e sua transposição para um patamar mais elevado, representando a correção realizada.

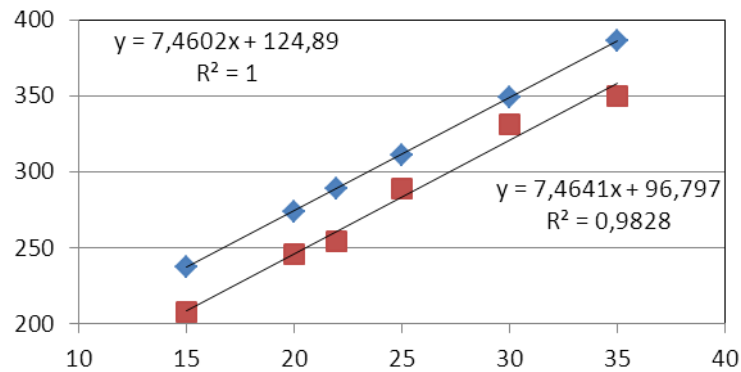


Figura 11: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

O exemplo apresentado admite uma variação ampla com o intuito de permitir a visualização da transposição da curva original para um patamar mais elevado. A observação da mesma inclinação representa a manutenção da relação entre os consumos originais e aqueles decorrentes da correção e a respectiva resistência características à compressão.

Se a correção a ser feita no traço significar uma pequena variação no consumo de cimento esta poderá ser procedida mediante a apenas a alteração na relação água/aglomerante, sendo mantida a mesma percentagem de água sobre o total de materiais secos.

Em algumas situações extremas o aumento no consumo de cimento poderá representar um valor mais elevado, exigindo, também, um ajuste na percentagem de água sobre o total de materiais secos, para a manutenção de um mesmo nível de trabalhabilidade. O novo traço, então, deverá considerar, além de uma nova relação água/aglomerante, um novo **H**.

O novo valor da percentagem de água sobre o total de materiais secos poderá ser obtido diretamente da curva que relaciona esse parâmetro com a relação água/aglomerante.

Como alternativa esse parâmetro poderia igualmente ser obtido de uma nova curva a ser construída relacionando essa quantidade de água, expressa em termos percentuais, diretamente com o consumo de cimento.

A relação estabelecida entre o  $f_{ck}$  e o consumo de cimento foi desenvolvida primordialmente para verificação da homogeneidade de traços adotados por uma central, permitindo um diagnóstico imediato de sua coerência. Paralelamente o princípio apresentado permite que sejam feitas correções imediatas e de caráter emergencial. No entanto, algumas experiências tem sido desenvolvidas revelando ser possível interpolar qualquer traço entre dois outros conhecidos. Embora carecendo de mais intensa verificação a possibilidade de ser viável a dosagem de concretos a partir da reprodução de apenas dois traços deve ser admitida.

A correção da trabalhabilidade, estimada através da medição do abatimento pelo tronco de cone, pode ser realizada pela alteração da percentagem de água sobre o total de materiais secos. Essa correção poderá ser balizada por meio de curvas que relacionem a relação água/cimento ou água aglomerante com o teor de água sobre o total de materiais secos ou ainda, relacionando diretamente o teor de água sobre o total de materiais secos com o consumo de cimento.

Por sua vez a nova relação água/aglomerante é determinada através do quociente entre a quantidade de água empregada na produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto em cada traço pelo consumo de cimento já corrigido.

Essa nova relação água/aglomerante estará relacionada a outro valor de H cuja interação permitirá o cálculo do traço corrigido novamente considerando o conceito traduzido pela já apresentada equação 13:

$$H_f = H_i \left( \frac{sf}{si} \right)^x \quad (\text{equação 13})$$

O procedimento sugerido permite realizar pequenos reposicionamentos de traços que, em geral, não devem determinar significativas alterações no teor de água sobre o total de materiais secos.

Diante do que foi exposto é possível afirmar:

“para um mesmo conjunto de materiais, mesmo proporcionamento entre agregados graúdos, mesmo teor de argamassa e mesmo abatimento pelo tronco de cone, a relação entre resistência à compressão e consumo de cimento é traduzida por uma função linear”.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA DE DUFF ABRAMS

Duff A. Abrams, em 1924, publica no Boletim nº 1, pelo *Structural Materials Research Laboratory* do *Lewis Institute* de Chicago/EUA, o trabalho iniciado em 1914 e publicado inicialmente em 1918 nos anais da Reunião Anual da Associação de Cimento Portland, ocorrida em dezembro daquele ano em New York/EUA, intitulado *Design of concrete Mixtures*.

Esse trabalho estabeleceu os conceitos adotados até os dias de hoje para a dosagem de concretos trabalháveis, através do estabelecimento da relação existente entre o valor definido, na época, pelo quociente entre o volume de água e o volume de cimento empregados na mistura, chamado originalmente de fator água/cimento, e a resistência à compressão do concreto. Atualmente esse parâmetro passou a ser referido como relação água/cimento e calculado não mais em volume, mas sim em massa.

O enunciado da chamada **lei de Abrams** teve por base a primeira conclusão do trabalho cuja tradução permite a seguinte redação:

Para um determinado concreto, materiais e condições de ensaio, a quantidade de água de mistura usada determina a resistência do concreto enquanto a mistura apresentar uma plasticidade trabalhável.

Com o passar do tempo o conceito passou a ser decifrado à luz da evolução natural da tecnologia do concreto já que a referência original de Abrams considerava uma relação entre volumes de água e de cimento. Os estudos realizados em evolução permitiram

enunciar a lei com base em uma relação entre massas, e com o emprego de diferentes termos como apresentado por Helene e Terzian (1992) e Petrucci (1979):

Dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades do concreto endurecido variam na relação inversa da relação água/cimento.

Por sua vez Neville (1997) cita que:

Quando o concreto é plenamente adensado, admite-se que sua resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento.

Neville (1997) considera como variável determinante da resistência de um concreto, em paralelo ao exposto indiretamente pela lei de Abrams, o grau de adensamento, confirmando a abrangência da lei de Abrams para concretos para os quais é possível obter o grau máximo de adensamento.

Na prática, Neville (1997) admite ser atingido o máximo grau de adensamento quando não houver mais do que 1% de ar aprisionado, e admite que essa quantidade de ar não possa ser retirada do concreto pelos processos usuais de adensamento.

Neville (1997) ainda apresenta o conceito de resistência relativa, atribuindo valores a esse parâmetro através do quociente entre a resistência efetivamente obtida sobre um concreto com um determinado grau de adensamento, passível de obtenção na prática, e a resistência potencial da mistura quando obtido seu máximo grau de adensamento.

Essas observações introduzem conceitos adicionais à lei formulada por Abrams em 1918, valorizando o conceito apresentado de forma implícita que ancora a dependência biunívoca entre relação água/cimento e resistência mecânica com o grau de adensamento da mistura. Assim, a verificação de uma determinada resistência mecânica prevista para um concreto, se dosado a partir da curva que representa a lei de Abrams, estará condicionada ao atingimento do mesmo grau de adensamento obtido no concreto reproduzido para o estabelecimento das constantes  $A$  e  $B$  da equação 14 que modela matematicamente a chamada lei de Abrams.

$$f_c = \frac{A}{B^{a/c}} \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

R = resistência à compressão;

A e B = constantes relativas aos materiais empregados no estudo;

a/c = relação água/cimento.

Diante do exposto, é possível definir mais uma variável de fundamental importância não citada de forma explícita nos enunciados de lei de Abrams, o grau de adensamento da mistura obtida.

A importância dessa variável, cujo conceito é de fácil e intuitivo entendimento, está em poder representar uma analogia facilitadora à compreensão da dependência entre resistência mecânica e relação água/cimento.

A redução da resistência mecânica com o aumento da relação água/cimento pode ser entendida como consequência da diminuição da quantidade de sólidos por unidade de volume de pasta, o que ocasiona, pelo aumento da porosidade, a redução da densidade.

Neville (1997) cita, ainda, tratar-se a equação de Abrams de um caso específico da lei promulgada por Ferret em 1896, modelada através da equação 15, com a explícita consideração da densidade da pasta quando incorpora, ao conceito, os vazios com ar:

$$f_c = K \left( \frac{c}{c + a + v} \right)^2 \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

$f_c$  = resistência à compressão;

K = constante;

c = volume absoluto de cimento;

a = volume absoluto de água;

v = volume absoluto de vazios com ar.

Mehta e Monteiro (2008) não apresentam um enunciado formal para a Lei de Abrams, embora referencie o trabalho do qual resultou a expressão que a representa, a modelagem matemática do princípio observado.



Acrescentam Mehta e Monteiro (2008), no entanto, ao afirmarem existir uma relação inversa entre porosidade e resistência válida para sólidos e que, para materiais homogêneos, pode ser expressa pela equação 16:

$$S = S_0 e^{-kp} \quad (\text{equação 16})$$

Onde:

S = resistência do material relacionada a uma determinada porosidade;

p = porosidade intrínseca do material;

S<sub>0</sub> = resistência característica do material para uma porosidade zero;

K = constante.

Reforçam a tese apresentada sobre a importância da densidade no desenvolvimento da resistência em uma pasta de cimento Portland, os conceitos definidos por Powers, citado por Mehta e Monteiro (2008), estabelecidos a partir do estudo que permitiu relacionar a resistência à compressão verificada aos 28 dias de idade de três diferentes argamassas com a relação entre a proporção gel/vazios e o total de vazios do sistema ou, de outra forma, com a relação entre o total de sólidos da pasta, representados pelos produtos da hidratação e o total de vazios do sistema.

O conceito implícito na relação observada também pode ser empregado no entendimento do crescimento da resistência ao longo do tempo na medida em que a evolução do grau de hidratação das pastas de cimento Portland conduz ao aumento da relação entre sólidos e vazios, caracterizando redução da porosidade.

Em última análise, sob essa ótica, a resistência mecânica de um aglomerado de cimento Portland não pode ser desvinculada da porosidade da pasta, em nível microscópico, e do próprio aglomerado, em nível macroscópico.

Em nível macroscópico, um concreto qualquer, mesmo que produzido a partir de uma baixa relação água/cimento, se por deficiência de adensamento ou mal proporcionamento, apresentar uma grande quantidade de vazios, terá comprometida sua resistência mecânica.

Não é possível deixar de citar, ainda, a relação existente entre resistência mecânica e os demais parâmetros passíveis de quantificação, ou estimativa, em aglomerados de cimento Portland, com as características da zona de transição.

Dessa maneira é incorporada ao sistema mais uma variável representada pelas características da zona de transição definidas por sua densidade e estado de fissuração. Essa variável terá implicações diretas não somente na resistência mecânica, mas também na permeabilidade e na durabilidade do aglomerado de forma tão mais expressiva quanto mais elevado o nível de resistência do material.

A zona de transição é representada pela região responsável pela continuidade entre as outras duas fases macroscópicas do concreto, representando uma verdadeira transição entre a fase agregado e a fase pasta. Essa terceira fase, de observação microscópica, tem fundamental importância na definição das propriedades dos aglomerados de cimento Portland. É formada por um **material** qualitativamente similar àquele definido como pasta, mas com características físico-mecânicas diferenciadas, determinadas pela mais elevada relação água/cimento, assim como a maior porosidade e a mais intensa micro fissuração.

Simplificadamente a zona de transição, na verdade, pode ser entendida como uma região da pasta hidratada alterada por uma relação água/cimento mais elevada do que aquela admitida na pasta propriamente dita e, por apresentar maior porosidade, permite ali a formação de cristais de maiores dimensões, notadamente os de hidróxido de cálcio.

Sua formação pode ser mais facilmente entendida a partir dos fenômenos mecânicos envolvidos no processo de adensamento por vibração a que é submetido mais comumente o concreto.

O aumento da densidade de um material é obtido pela diminuição do tamanho e da quantidade de defeitos existentes em um concreto, tal como verificado imediatamente após sua colocação na forma.

Esses defeitos são representados por espaços vazios decorrentes da falta de continuidade entre as três fases componentes do concreto e por inúmeras bolhas formadas pelo ar que fica aprisionado na massa durante o processo de mistura, em quantidade tão maior quanto maior a coesão da mistura.

O adensamento obtido por vibração promove a movimentação relativa entre os constituintes do concreto, permitindo que as partículas ocupem os espaços vazios, desalojando o ar para, com isso, aumentar a densidade do concreto.

O movimento vibratório de uma partícula determina sua movimentação com pequena amplitude em todas as direções em ciclos muito curtos com o surgimento de pressão negativa alternadamente ao longo de toda sua superfície.

Desconsiderando o ar, a água é o componente de menor densidade de um concreto e, sendo esta empregada em uma quantidade sempre maior que o mínimo necessário para promover a hidratação do cimento, para garantir a obtenção de uma determinada trabalhabilidade na mistura. A água excedente, livre, estará sempre pressionada e induzida a migrar para regiões de menor pressão.

É possível identificar como regiões de menor pressão a própria superfície do concreto, onde o material estará submetido à ação da pressão atmosférica, qualquer espaço vazio existente assim como bolhas de ar ou qualquer região onde ocorra pressão negativa durante o processo de vibração assim como a interface do concreto com as fôrmas ou da pasta com os grãos de agregado e com a armadura no caso de concretos armados, quando esta é submetida inadequadamente à ação do vibrador no intuito de fazer da armadura um elemento de transmissão da vibração.

Zonas de menor pressão poderão ainda ser representadas por falhas de concretagem remanescentes, caso o adensamento não seja eficiente o suficiente para sua eliminação, ou por falhas decorrentes de uma dosagem imperfeita.

A água em seu deslocamento para a superfície do concreto, durante o processo de exsudação, poderá esbarrar em obstáculos como grãos de agregados e formar, na parte de baixo dessas barreiras, depósitos, que representarão solução de continuidade e comprometerão a interação pasta/agregado. A decorrência desse fenômeno será, além do prejuízo da resistência mecânica do aglomerado, o comprometimento de outras características como a permeabilidade e, em consequência, a durabilidade.

Embora sucinta, a explanação oferecida visa a permitir o entendimento de ser direta a relação entre a quantidade de água empregada em um concreto e sua porosidade, com consequência em seu comportamento mecânico paralelamente à vinculação clássica proposta por Abrams entre a relação água/cimento e a resistência mecânica, como de resto com as demais características de um concreto.

A preferência por empregar pelo menos quatro traços para a composição da curva de Abrams, pode ser atribuída ao fato de ser sempre possível geometricamente traçar uma curva passando por três quaisquer pontos representados em um plano, o que poderia mascarar distorções que sempre podem ocorrer em qualquer procedimento experimental, tão mais importantes quanto maior a variação na consistência do concreto produzido com cada um dos traços experimentais.

Como em geral a trabalhabilidade em estudos de dosagem é avaliada pelo abatimento pelo tronco de cone, as variações inerentes ao próprio procedimento de ensaio poderão gerar distorções na curva de Abrams, o que determinará conseqüentemente distorções nos traços calculados. Essa afirmação sugere a necessidade de rotinizar os procedimentos durante a reprodução dos traços experimentais de maneira a obter um abatimento pelo tronco de cone homogêneo em todos os traços do estudo. A rotinização sugerida deverá permitir a observação de um mesmo tempo de mistura, a manutenção de uma mesma sequência de colocação dos materiais na betoneira e de um tempo de adição de água sem grandes variações.

Interrupções para efetuar correções na quantidade de água intercaladas com a realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone devem ser evitadas, sendo, nesse momento de extrema importância a experiência do tecnologista responsável pela condução do trabalho na obtenção de resultados confiáveis e de baixa variabilidade.

Esse conhecimento deverá nortear a definição dos traços experimentais com base nas características dos materiais a serem empregados, principalmente com relação ao desempenho do cimento, em função da resistência a ser atingida pelo concreto, de maneira a permitir que o cálculo do traço pretendido possa ser fruto de uma interpolação no universo definido pelos limites representados pelos dois traços extremos.

Uma vez definido o melhor proporcionamento possível de ser obtido com os materiais eleitos para o trabalho, o que se traduz em sua expressão mais simples pela adequada definição do teor de argamassa, quando são empregados apenas uma areia e um agregado graúdo, a trabalhabilidade requerida fica definida exclusivamente pela quantidade de água adicionada à mistura expressa como teor de água sobre o total de materiais secos (H).

A água é adicionada em quantidade tal que permita a obtenção de resultados em um ensaio que possam traduzir a mesma trabalhabilidade em todos os traços. Quanto maior a homogeneidade do concreto nos traços experimentais, com relação à medida desse parâmetro, menor a distorção na curva de Abrams, valendo dizer menor a distância entre os pontos experimentais e a curva de ajustamento, sendo, portanto, mais confiável o resultado obtido, o traço calculado.

Conhecida a quantidade de água empregada e a massa de materiais secos em cada traço é possível calcular a relação água/cimento e a percentagem de água sobre o total de materiais secos.

Em massas iguais de um concreto expresso em diferentes traços, o emprego de uma mesma quantidade de água permitirá que sejam observados diferentes valores para o abatimento pelo tronco de cone em cada traço, podendo todos estar dentro da faixa de variação admitida. Em termos práticos, de forma simplista, estará sendo considerada uma mesma trabalhabilidade, o que de fato não é verdade, pois, em havendo diferentes volumes de pasta em cada traço, ficam estabelecidos diferentes comportamentos reológicos.

Como se tratam de diferentes traços e, conseqüentemente, diferentes quantidades de cimento em cada um, a mesma quantidade de água determina diferentes relações água/cimento.

A maior amplitude na variação na relação água/cimento será obtida por uma maior variação nos traços considerados, o que determina a abrangência da curva resultante que, quanto maior, mais traços possibilitará sejam calculados em atendimento a uma maior amplitude de resistências.

Se a variável a ser quantificada fosse apenas a resistência à compressão, numa visão simplista, seria possível supor bastar proceder à reprodução de um mesmo traço com diferentes teores de água, com diferentes relações água/cimento.

A alteração na relação água/cimento, nesse caso, seria obtida pela alteração na quantidade de água, ou seja, pela alteração no teor de água sobre o total de materiais secos. Esse procedimento determinaria em cada traço um diferente abatimento pelo tronco de cone, que ao sugerir haver diferentes trabalhabilidades, permitiria relacionar a trabalhabilidade com o volume de pasta em cada mistura.

Então, se a quantidade de água tem pequena variação para um mesmo abatimento pelo tronco de cone em traços de uma mesma família, a única maneira de alterar de forma significativa o valor da relação água/cimento nos traços experimentais de uma dosagem é variando a quantidade de cimento, o que vale dizer mudando o traço.

A densidade de um concreto varia em função do traço, o que é facilmente entendido, pois a manutenção de um mesmo teor de argamassa em traços diferentes determina uma diferente relação cimento/areia, definindo em cada traço diferentes volumes de pasta já que a quantidade de água deverá apresentar variação de pequena amplitude para um mesmo abatimento pelo tronco de cone.

Os traços extremos de uma dosagem sempre demandarão uma maior quantidade de água sobre o total de materiais secos, em relação a um teórico traço de reologia ótima, o qual

deverá permitir a obtenção do mesmo abatimento pelo tronco de cone com o menor consumo de água.

Esse traço teórico, de menor consumo de pasta, será o traço de maior trabalhabilidade, de melhor interação dinâmica entre os constituintes do concreto.

Assim, se o produto do estudo de dosagem for admitido como sendo a própria curva de Abrams, estabelecida pela dependência existente entre resistência mecânica e relação água/cimento, estará sendo considerada, nessa relação, de forma implícita, a densidade do concreto.

Tanto será menor a densidade de um concreto quanto maior a quantidade de água empregada em sua produção. É claro que para uma massa fixa de mistura, o aumento na quantidade de água determinará um aumento em seu volume e assim, não sendo alterada a quantidade dos materiais secos, o resultado será a mesma massa de materiais secos em um volume maior de mistura, resultando em um aglomerado de menor densidade.

Depois de endurecida, a mistura terá perdido uma grande quantidade de água, mas permanecerão na massa endurecida poros e canais formados pela água em seu movimento de exsudação.

A interpretação clássica condicionará a menor resistência mecânica desse aglomerado ao aumento da relação água/cimento, mas, em outra forma de observar o fenômeno, não é possível dissociar essa diminuição de resistência da redução da densidade, causada pelo aumento da quantidade do material mais leve na mistura, a água, ou pela presença de falhas decorrentes do insuficiente volume de pasta para preenchimento dos vazios deixados pelo agregado.

Durante o processo de adensamento, na medida em que a água vai sendo deslocada, os canais formados podem vir a ser fechados, mas após o adensamento, durante o processo de sedimentação, que ocorre naturalmente, a água vem ter à superfície da peça através do estabelecimento de uma rede de canais de drenagem.

Muitos desses canais permanecem abertos à livre movimentação da água após o endurecimento do concreto, tendo relação direta com a densidade e claro, com a durabilidade.

Esta versão talvez possa ser encarada como o entendimento em nível macroscópico da relação determinada pela maior quantidade de água empregada no amassamento, com a densidade do concreto e, conseqüentemente, com sua resistência em todos os aspectos.

O entendimento em nível microscópico dessa relação parte da análise procedida sobre a pasta de cimento Portland. O aumento da relação água/cimento, em um dado volume de pasta, significará menor quantidade de sólidos por unidade de volume, determinando a redução da densidade da pasta.

Parte da água empregada na produção de um concreto será consumida na reação de hidratação do cimento, parte permanecerá adsorvida na superfície sólida da pasta ou dispersa nos interstícios do **C-S-H**, outra parte permanecerá retida em poros ao depositar-se em zonas de menor pressão, mas outra parte significativa dessa água será literalmente expulsa, caracterizando o fenômeno de exsudação.

Para melhor entendimento desses conceitos apresentados e visando evidenciar a existência da relação entre densidade e resistência mecânica, foi realizado um ensaio comparativo de concepção simples, como a seguir é apresentado. A inclusão de um trabalho prático no contexto de uma revisão conceitual está justificado, por um lado, em função de fornecer dados para melhor entendimento das questões teóricas colocadas e, por outro, por não ser parte integrante do desenvolvimento experimental relativo ao objetivo principal do trabalho.

#### 3.4.1 Confirmação prática da proposta

O estudo consistiu da comparação de argamassas de cimento e areia preparadas com um mesmo traço e diferentes relações água/cimento com outras, preparadas com traços diferentes e mesma relação água/cimento.

Foram moldados corpos-de-prova para serem submetidos a ensaios visando à determinação da resistência à compressão em analogia à NBR 7215 (ANBT, 1996), porosidade aparente, absorção de água e massa específica segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005).

Em outra etapa do trabalho foram moldados também, simultaneamente a corpos de prova cilíndricos, corpos de prova prismáticos segundo a NBR 13279:2005, para a realização dos ensaios físicos e para a verificação da evolução da frente de carbonatação em argamassas preparadas com a mesma relação água/cimento e diferentes traços.

A tabela 15 apresenta os resultados obtidos nos ensaios físicos e a tabela 16, os resultados de resistência à compressão, a que foram submetidos corpos de prova moldados com argamassas produzidas com um mesmo traço e diferentes relações água/cimento.

Tabela 15: resultados obtidos dos ensaios físicos realizados sobre argamassas produzidas com um mesmo traço e diferentes relações a/c

Traço em massa (1: m)	Relação (a/c)	H (%)	Índice de consistência (mm)	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
1:3	0,4	10,0	163	2,17	12,3	5,67
1:3	0,5	12,5	261	2,03	17,4	8,59
1:3	0,6	15,0	325	1,98	19,4	9,79
1:3	0,7	17,5	374	1,97	23,2	11,8

Tabela 16: resistência à compressão de argamassas produzidas com um mesmo traço e diferentes relações a/c

Traço em massa (1: m)	Relação água/cimento	Resistência à compressão (MPa)					Desvio relativo máximo (%)
		Corpo-de-prova				Média	
		1	2	3	4		
1:3	0,4	51,6	54,0	49,2	53,6	51,4	5,0
1:3	0,5	37,0	39,1	37,7	38,6	38,5	3,9
1:3	0,6	26,1	28,6	27,4	26,2	27,1	5,5
1:3	0,7	21,1	22,9	21,6	21,6	21,8	5,0

A observação dos resultados obtidos confirma os preceitos apresentados por Abrams por relacionar de forma inversamente proporcional a resistência à compressão com a relação água/cimento. O aumento da porosidade aparente, a maior absorção de água e a diminuição da massa específica podem ser relacionados diretamente com a elevação da relação água/cimento.

Como a elevação da relação água/cimento em argamassas de mesmo traço é obtida pelo aumento do volume absoluto de água na mistura, ocorre paralelamente a elevação do índice de consistência conforme registrado na tabela 15. Ou seja, a elevação da percentagem de água sobre o total de materiais secos diminui a consistência da mistura, elevando o índice de consistência, a fluidez, não tendo sido verificada perda de coesão em nenhuma das misturas estudadas.



Considerando ter havido aumento no índice de consistência com o aumento do teor de água sobre o total de materiais secos, é possível dizer que esse aumento está diretamente ligado ao aumento do volume de pasta.

A partir dos preceitos depreendidos da lei de Abrams é possível esperar que argamassas preparadas com traços diferentes, mas com mesma relação água/cimento, desde que apresentem condições de serem adensadas adequadamente, apresentem valores de resistência à compressão e de porosidade aparente aproximadamente iguais.

Em consequência, os valores esperados para o teor de absorção de água e para massa específica devem igualmente apresentar alguma homogeneidade, devendo estar situados em uma faixa que possa caracterizar uma mesma ordem de grandeza.

O estudo teve continuidade com a preparação de quatro argamassas com diferentes traços e mesma relação água/cimento, escolhida aleatoriamente.

A tabela 17 relaciona os resultados obtidos nos ensaios físicos e a tabela 18, os resultados obtidos no ensaio realizado visando a determinação da resistência à compressão.

Tabela 17: resultados dos ensaios físicos realizados em argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços

Traço em massa (1: m)	Relação (a/c)	H (%)	Índice de consistência (mm)	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
1:2	0,6	20,0	368	1,99	20,8	10,4
1:3	0,6	15,0	320	2,05	18,4	8,96
1:4	0,6	12,0	228	2,03	16,2	7,96
1:5	0,6	10,0	140	2,07	15,0	7,26

Tabela 18: resistência à compressão de argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços

Traço em massa	Relação (a/c)	Resistência à compressão (MPa)					Desvio relativo máximo (%)
		Corpo-de-prova				Média	
		1	2	3	4		
1:2	0,6	28,3	28,5	26,9	28,6	28,1	4,3
1:3	0,6	33,3	31,6	31,9	32,4	32,3	3,1
1:4	0,6	22,9	24,1	24,8	22,8	23,7	4,6
1:5	0,6	24,2*	22,8	21,3	22,9	22,3	4,5

(\*) Corpo de prova desconsiderado para o cálculo da média por diferir mais de 6,0 % em relação à média original, segundo a NBR 7215:1996.

Os resultados obtidos apresentaram um comportamento diferente do suposto inicialmente, visto serem os valores determinados para a massa específica crescentes a partir do traço mais forte, de maior consumo de cimento.

Coerentemente os valores de porosidade aparente e absorção de água apresentaram comportamento análogo, decrescendo, e não permitindo serem considerados como de mesma ordem de grandeza.

Os valores obtidos para a resistência à compressão igualmente não confirmaram a expectativa.

Como os valores obtidos revelaram um comportamento não esperado o ensaio foi repetido, levando em consideração, inclusive, a possibilidade de ter ocorrido alguma perturbação não controlada durante seu desenvolvimento.

Independentemente da suspeita apresentada no parágrafo anterior, surge como hipótese para a variação observada na resistência à compressão a possibilidade de ter sido diferente a energia de adensamento aplicada na moldagem de cada série de corpos-de-prova, tendo em vista a grande variação obtida no índice de consistência.

Assim, a argamassa de maior plasticidade teria exigido, de forma inconsciente do moldador, menor energia para o adensamento dos corpos de prova, embora o menor valor de resistência mecânica obtido a partir dos traços mais fracos (1:4 e 1:5) não seja coerente com os valores de porosidade aparente, absorção de água e massa específica.

#### 3.4.1.1 Primeira repetição do estudo

Como no primeiro estudo foram verificados índices de consistência elevados e considerando a possibilidade de a plasticidade condicionar a energia de adensamento, o trabalho foi repetido a partir da reprodução de argamassas de mesmo traço mas com o emprego de uma quantidade de água menor, sendo obtida uma relação água/cimento de 0,5, havendo redução do volume de pasta.

Considerando, ainda, tratar-se de um estudo eminentemente comparativo, essa primeira repetição foi procedida como emprego de uma amostra diferente de cimento.

Os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos estão apresentados nas tabelas 19 e 20, respectivamente.

Tabela 19: resultados dos ensaios físicos realizados sobre argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços

Traço em massa (1: m)	Relação (a/c)	H (%)	Índice de consistência (mm)	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
1:2	0,5	16,7	331	2,00	23,7	11,9
1:3	0,5	12,5	266	2,05	19,2	9,40
1:4	0,5	10,0	154	2,11	16,2	7,70
1:5	0,5	8,33	129	2,12	14,9	7,06

Tabela 20: resistência à compressão de argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços

Traço em massa	Relação (a/c)	Resistência à compressão (MPa)					Desvio relativo máximo (%)
		Corpo-de-prova				Média	
		1	2	3	4		
1:2	0,5	28,6	29,5	29,0	28,6	28,9	2,1
1:3	0,5	22,1*	27,5	27,4	28,0	27,6	1,4
1:4	0,5	26,2	26,3	25,0	25,6	25,8	3,1
1:5	0,5	20,3	20,8	20,6	21,0	20,7	1,9

(\*) Corpo de prova desconsiderado para o cálculo da média por diferir mais de 6,0 % em relação à média original, segundo a NBR 7215:1996.

Os resultados obtidos informam ter ocorrido um comportamento similar ao observado anteriormente com relação aos parâmetros físicos avaliados.

O traço de menor consumo de cimento e menor volume de pasta, conseqüentemente, apresentou uma resistência à compressão nitidamente menor, o que pode ser atribuído à insuficiência de pasta para completo preenchimento dos vazios existentes entre os grãos do agregado.

A observação do mesmo comportamento determinou uma nova repetição do estudo, mas, paralelamente à moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, foram também moldados corpos-de-prova prismáticos segundo a NBR 13279:2005, para garantir a aplicação da mesma energia de compactação. Esses corpos-de-prova foram empregados na determinação da massa específica, da porosidade aparente e da absorção de água, além da verificação da evolução da frente de carbonatação.

### 3.4.1.2 Segunda repetição do estudo

Essa segunda repetição foi desenvolvida com outra amostra de cimento com o intuito de desvincular cada etapa da anterior permitindo a interpretação dos resultados de forma individualizada e independente, sendo obtido diferentes níveis de resistência em cada situação, estando o objetivo do trabalho desenvolvido centrado na avaliação do comportamento das argamassas com relação aos parâmetros físicos considerados, sendo, portanto, as variações verificadas na resistência mecânica decorrentes dos diferentes desempenhos dos cimentos empregados.

#### a) Ensaios físicos e mecânicos

As características das argamassas empregadas na segunda repetição do estudo estão relacionadas na tabela 21.

Tabela 21: características das argamassas empregadas na segunda repetição do estudo

Traço em massa (1: m)	Relação (a/c)	H (%)	Índice de consistência (mm)
1:2	0,5	16,7	339
1:3	0,5	12,5	267
1:4	0,5	10,0	164
1:5	0,5	8,33	130

Os resultados dos ensaios físicos, estão relacionados na tabela 22. A tabela 23 apresenta os resultados obtidos no ensaio mecânico, a resistência à compressão.

Tabela 22: resultados dos ensaios físicos realizados sobre argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços

Traço em massa	Relação água/cimento	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		Porosidade aparente (%)		Absorção de água (%)	
		CP prismático	CP cilíndrico	CP prismático	CP cilíndrico	CP prismático	CP cilíndrico
1:2	0,5	2,01	2,01	20,3	20,2	10,1	10,0
1:3	0,5	2,01	2,06	17,3	16,5	8,60	8,04
1:4	0,5	2,01	2,08	16,0	15,3	7,95	7,35
1:5	0,5	1,91	2,11	17,0	13,8	8,91	6,56

Observação: Os resultados apresentados no quadro representam a média dos valores obtidos no ensaio de quatro corpos-de-prova.

Tabela 23: resistência à compressão de argamassas produzidas com uma mesma relação a/c e diferentes traços

Traço em massa	Resistência à compressão (MPa)				Média	Desvio relativo máximo (%)
	Corpo-de-prova (cilíndrico)					
	1	2	3	4		
1:2	34,7	37,3	36,5	34,2	35,7	4,5
1:3	36,3	35,4	34,9	35,8	35,6	2,0
1:4	23,8*	34,0	30,9*	34,8	34,4	1,2
1:5	29,0	29,2	28,5	29,1	28,9	1,4

(\*) Corpo de prova desconsiderado para o cálculo da média por diferir mais de 6,0 % em relação à média original.

Embora tenha sido obtido um nível de resistência diferente, seu desenvolvimento apresentou comportamento análogo, sendo de mesma ordem de grandeza nas argamassas produzidas com os traços 1:2 e 1:3. A interpretação do desempenho do traço 1:4 quanto à resistência à compressão fica prejudicada em função da variação observada nos resultados individuais. No traço 1:5, de menor volume de pasta, a resistência à compressão é inferior.

A primeira informação fornecida pela análise dos resultados sugere que a energia de compactação possa condicionar os parâmetros físicos estudados, uma vez que é possível observar comportamentos diferentes desses parâmetros medidos sobre corpos de prova prismáticos e cilíndricos.

No caso da moldagem com energia constante, o grau de adensamento será proporcional à trabalhabilidade da argamassa. Como é possível observar na tabela 21, a argamassa produzida com o traço 1:2 apresenta o maior índice de consistência o que garante uma maior facilidade de adensamento. A argamassa produzida com o traço 1:5, por ser a menos trabalhável, apresentou adensamento insuficiente, permitindo a existência de falhas ao término do processo.

Como apresentado na tabela 22, a massa específica calculada sobre os corpos-de-prova prismáticos assume o menor valor para a argamassa de traço 1:5, enquanto os valores obtidos com os demais traços podem ser considerados como de mesma ordem de grandeza.

A observação dos valores de massa específica obtidos no ensaio aplicado sobre os corpos-de-prova cilíndricos permite identificar um crescimento a partir do traço mais forte (1:2), reforçando a hipótese de que a plasticidade da argamassa condiciona a energia aplicada

pelo moldador, de menor intensidade no traço mais forte (1:2) e mais intensa no traço de menor plasticidade, o mais fraco (1:5).

Assim, nos corpos-de-prova cilíndricos o comportamento foi rigorosamente o mesmo verificado até então.

O traço de menor consumo de cimento (1:5) não apresentou o mesmo desempenho quanto à resistência à compressão, sugerindo não ter sido possível a eliminação dos defeitos ocasionados pelo volume insuficiente de pasta.

A observação dos resultados obtidos sobre corpos de prova prismáticos indica que os valores de absorção de água e porosidade aparente são maiores no traço de maior volume de pasta, decrescem levemente para tornar a subir no traço mais fraco, de menor volume de pasta. Esse comportamento diferenciado em comparação com os resultados obtidos sobre os corpos de prova cilíndricos sugere existir relação entre o desempenho das argamassas, quanto a esses parâmetros, e a energia de adensamento.

Sendo a água o componente de menor densidade, quanto maior a quantidade empregada, em termos percentuais sobre o total de materiais secos, menor a massa específica da mistura, para um mesmo grau de adensamento.

Como o agregado empregado na produção das argamassas foi a areia natural quartzosa, conhecida como **areia do Guaíba**, de baixa absorção de água, menor do que 1%, a absorção de água ocorre pela pasta, justificando ser maior a capacidade de absorção de água na argamassa de maior volume de pasta, já que a pasta é igual em todas as argamassas.

Resumidamente, nas quatro argamassas foi empregada a mesma relação água/cimento, portanto o desempenho da pasta em qualquer traço deve ser o mesmo com relação à resistência mecânica. No entanto, há uma alteração no volume de pasta, determinando o comportamento diferente com relação aos parâmetros físicos observados. Em termos práticos a porosidade da pasta é a mesma nas quatro argamassas, mas a porosidade da argamassa é diferente por haver em cada caso um diferente volume de pasta. Portanto, maior volume de um material poroso, maior volume de poros para serem preenchidos com água.

A título de informação foram calculados os volumes de pasta para cada argamassa empregada na última repetição, tendo sido obtidos os valores apresentados na tabela 24,

considerando como massas específicas do cimento e da areia os valores de 3,08 kg/dm<sup>3</sup> e 2,63 kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente:

Tabela 24: volume de pasta calculado em cada argamassa empregada na segunda repetição do estudo

Traço em massa (1: m)	Relação água/cimento (a/c)	Porcentagem de água sobre o total de materiais secos (H)	Volume de pasta em % sobre o volume de material seco
1:2	0,5	16,7	52,0
1:3	0,5	12,5	42,0
1:4	0,5	10,0	35,2
1:5	0,5	8,33	30,2

Para reforçar a hipótese levantada e comprovar os resultados obtidos foi realizado um ensaio comparativo para avaliar a absorção capilar de água ocorrida em um espaço de tempo com o emprego dos corpos-de-prova prismáticos.

Os corpos-de-prova foram posicionados na posição vertical em uma bandeja com uma lâmina de água de aproximadamente 10 mm, nível que foi mantido pelo tempo considerado no ensaio pelo acréscimo periódico de água.

O teor de absorção de água foi obtido pela diferença de massa, expressa em termos percentuais sobre a massa seca dos corpos-de-prova, sendo adotado como resultado o valor obtido aos 7 dias de idade, apresentado na tabela 25.

Tabela 25: valores de absorção de água por capilaridade de argamassas empregadas na segunda repetição do estudo

Traço em massa (1: m)	a/c	H (%)	Absorção de água (%)		
			24 horas	48 horas	7dias
1:2	0,5	16,7	3,43	3,66	3,75
1:3	0,5	12,5	3,14	3,49	3,54
1:4	0,5	10,0	2,52	2,78	2,97
1:5	0,5	8,33	3,57	3,65	3,87

O comportamento observado confirma a tendência estabelecida.

Exceção é observada nos valores obtidos na argamassa produzida com o traço mais fraco, de menor trabalhabilidade e de mais elevada porosidade por ter comprometido o adequado adensamento.

A densidade das argamassas foi mais uma vez calculada sobre os corpos-de-prova prismáticos, mas dessa feita estando os mesmos envoltos em filme de PVC com o intuito de ser possível calcular o volume dos corpos-de-prova de maneira direta através da avaliação do empuxo.

Os resultados, obtidos do ensaio de três corpos de prova, constam na tabela 26 que segue:

Tabela 26: valores de massa específica calculado sobre corpos de prova, considerando o volume aparente

Traço em massa (1: m)	a/c	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )
1:2	0,5	1,937
1:3	0,5	1,960
1:4	0,5	1,959
1:5	0,5	1,857

A observação que pode ser feita confirma as hipóteses levantadas anteriormente que podem ser formuladas de forma diferente a partir do seguinte raciocínio: Todas as argamassas foram produzidas a partir da mesma massa de materiais secos, como na argamassa de traço mais forte (1:2) foi empregado um volume maior de água, resultou um material com menor volume de sólidos por unidade de volume, de maior porosidade, portanto.

A argamassa produzida com o traço mais fraco (1:5), por sua baixa trabalhabilidade decorrente do menor volume de pasta, apresentou dificuldade de adensamento frente à energia constante aplicada no adensamento, permanecendo falhas representadas por poros abertos de grandes dimensões.

Esse volume de poros abertos de grandes dimensões não é considerado no cálculo do volume do corpo-de-prova pelo método hidrostático conforme definido pela NBR 9778 (ABNT, 2005). No momento em que o corpo-de-prova é envolto em filme impermeável o volume de poros abertos de grandes dimensões, decorrentes da dificuldade imposta ao adensamento pela baixa trabalhabilidade da argamassa, passa a ser considerado,



conduzindo à verificação de um volume maior para uma massa de argamassa aproximadamente igual.

Dessa maneira, o volume de pasta e a trabalhabilidade, traduzida em dificuldade de adensamento, podem ser relacionados diretamente com o desempenho das argamassas avaliados através da medição dos parâmetros considerados no estudo.

De outra forma é possível admitir também haver um volume de pasta que determina o mais elevado grau de adensamento, sugerindo ser esse proporcionamento o de melhor trabalhabilidade, permitindo supor ser a trabalhabilidade dependente do volume de pasta em misturas que permitam ser convenientemente adensadas.

N. Su e B. Miao (2003) verificaram a existência de uma relação direta do volume de pasta com a trabalhabilidade de concretos com baixo volume de pasta, empregando em sua constituição cinza volante associada à escória de alto forno.

#### **b) Verificação da evolução da frente de carbonatação**

A verificação da evolução da frente de carbonatação foi procedida através da aplicação de indicador colorimétrico a base de fenolftaleína, sendo o valor representativo obtido por medição direta na porção onde se verificou a maior profundidade (HELENE, 1986).

Foram empregados nessa determinação os corpos de prova prismáticos moldados na segunda repetição do estudo.

Os valores apresentados na tabela 27 referem-se ao máximo valor medido sem considerar defeitos localizados.

Tabela 27: evolução da frente de carbonatação avaliada em corpos de prova prismáticos referentes o trabalho realizado como segunda repetição do estudo

Traço em massa (1: m)	Relação água/cimento (a/c)	Porcentagem de água sobre o total de materiais secos (H)	Profundidade carbonatada (mm)(*)		
			semanas		
			25	51	118
1:2	0,5	16,7	3	3,5	7
1:3	0,5	12,5	2	3	6
1:4	0,5	10,0	4	6,5	**
1:5	0,5	8,33	10	18	**

(\*) valor máximo medido

(\*\*) medição não possível

A figura 12 apresenta, em vista, um corpo de prova de cada traço. As figuras 13 e 14, a evolução da frente de carbonatação com 25 e 118 semanas de idade, respectivamente.



Figura 12: corpos de prova prismáticos após a desforma



Figura 13: verificação da evolução da frente de carbonatação avaliada em corpos de prova com 25 semanas de idade



Figura 14: verificação da evolução da frente de carbonatação com 118 semanas de idade

As figuras 13 e 14 permitem observar o menor avanço da frente de carbonatação na superfície inferior dos corpos de prova, com exceção do corpo de prova referente ao traço 1:5, aumentando nas superfícies laterais de baixo para cima mais nitidamente nos corpos de prova referentes às argamassas produzidas com os traços 1:2 e 1:4, indicando provavelmente que a concentração de água seja progressiva a partir da superfície inferior do corpo-de-prova, sugestiva de um processo de exsudação.

O corpo de prova referente à argamassa de traço 1:5 exigiu um mais intenso acabamento na superfície superior obtido pela maior intensidade na passagem de espátula na superfície do concreto. A sucção do material mais fino e água, responsável pelo acabamento, o cimento, já que a areia empregada passa por um processo de lavagem, determinou a diminuição da porosidade naquela região, o que é perceptível pela menor evolução da frente de carbonatação em relação à superfície inferior do mesmo corpo-de-prova. Essa alteração pode também ser percebida com menor intensidade no corpo-de-prova referente ao traço 1:4.

É possível igualmente observar não haver uma linha homogênea definindo a fronteira entre as regiões carbonatadas e não carbonatadas. A irregularidade na definição do limite entre as duas regiões pode ser atribuída à presença de poros, ocasionados pelo ar aprisionado

remanescente após o adensamento, ou pela deficiência de adensamento decorrente, nos traços mais fracos, do menor volume de pasta.

Nos traços de menor volume de pasta determinante de uma menor trabalhabilidade, a profundidade carbonatada, passível de medição, é alterada pela maior porosidade apresentada pelas misturas em função de o volume de pasta ser insuficiente para o preenchimento dos vazios da areia e para garantir a trabalhabilidade necessária para o bom adensamento do material frente à energia disponível.

### 3.4.2 Considerações sobre o estudo realizado e sua relação com o concreto

É possível dizer que, em sendo o mesmo agregado empregado nas quatro argamassas e a mesma relação água/cimento, as diferenças verificadas na porosidade aparente e, conseqüentemente, nos demais parâmetros a ela vinculados, podem ser relacionadas com o volume de pasta. A resistência à compressão será a mesma desde que o volume de pasta seja suficiente para permitir o mesmo grau de adensamento com a energia disponível.

Se a trabalhabilidade das argamassas está diretamente vinculada ao volume de pasta, então é possível admitir haver, por analogia, a mesma relação em concreto.

Os vários traços empregados na construção da curva de Abrams em um procedimento convencional de dosagem de concreto apresentarão como diferença básica a alteração da relação entre cimento e areia. Mais cimento e menos areia no traço mais forte e menos cimento e mais areia na medida em que o traço vai sendo enfraquecido, determinando uma substancial alteração no volume de pasta.

Em traços mais fracos, considerados nas dosagens para abranger concretos dos quais se deseja resistências menores, pode haver inclusive um volume de pasta insuficiente para o preenchimento dos espaços vazios existentes entre os grãos de areia. Nesses casos, além de haver elevadas relações água/cimento, haverá um aumento na porosidade total do aglomerado, determinando o aparecimento de vazios, que nada mais são do que defeitos, responsáveis em conjunto com o elevado volume de vazios da pasta, pela redução na resistência do concreto.

Esses traços, ditos fracos, muitas vezes apresentam grande deficiência de trabalhabilidade ocasionada exatamente pela falta do componente responsável pela coesão e pela movimentação relativa entre os grãos dos agregados, a pasta. Como a pasta é formada por aglomerante, água e ar aprisionado ou intencionalmente incorporado, o aumento do volume

de pasta pode ser obtido pelo aumento de aglomerante, água, ar ou pela combinação de dois ou dos três componentes.

Convém citar, por oportuno, na corroboração da proposta apresentada para relacionamento da trabalhabilidade com o volume de pasta de aglomerados minerais, o já bastante conhecido efeito do emprego de aditivos incorporadores de ar sobre concretos magros, mas principalmente sobre argamassas igualmente proporcionadas segundo traços fracos.

Sem dúvida essa sempre será uma alternativa a ser considerada desde que o ganho de resistência, a ser obtido pela redução da relação água/cimento, compense a redução ocasionada pelo aumento da porosidade do material determinado pela incorporação intencional de ar.

Quando o limite de coesão é ultrapassado, a trabalhabilidade somente poderá ser restituída pelo acréscimo de algum material com capacidade de reter água e aumentar a coesão, em geral o cimento, mas eventualmente algum tipo de adição, determinando sempre o aumento do volume de pasta.

O mesmo fenômeno pode ser descrito a partir de concretos produzidos com um traço forte, ou seja, com uma grande quantidade de cimento. Concretos com essa característica, por apresentarem uma quantidade muito grande de material fino, possuem uma muito elevada coesão que pode representar dificuldade em seu manuseio, caracterizando baixa trabalhabilidade.

Concretos assim concebidos, pesados e com grande capacidade de adesão aos equipamentos, podem apresentar tão baixa trabalhabilidade a ponto de dificultar ou até mesmo inviabilizar operações de bombeamento. A diminuição da coesão nesse caso, descartando o uso de aditivos, somente poderá ser obtida pelo acréscimo de água, novamente sendo aumentado o volume de pasta.

Se assim é posto, é possível, então, admitir a existência de um ponto ótimo em que seja empregado um volume de pasta que permita a obtenção da trabalhabilidade requerida com o menor consumo de água possível, determinando menor porosidade, menor absorção de água e, conseqüentemente, maior durabilidade, além de outros benefícios paralelos como a minimização de processos de retração e sua natural consequência, a fissuração.

A proposição posta como estudo será a de estabelecer um procedimento para definição do volume ótimo de pasta que, por gerar a melhor trabalhabilidade, permita a obtenção de concretos cujas características sejam definidas pelo menor consumo de água possível.

Sobre a totalidade da massa de materiais secos empregados na produção de um dado volume de concreto, e para uma esperada trabalhabilidade, é empregada uma determinada quantidade de água expressa em termos percentuais sobre o total de materiais secos. Considerando então que sobre 100% de material seco será ajuntado H% de água, quando o material seco for expresso na forma unitária, em que o cimento é expresso pela unidade (1), a quantidade de água será representada pela relação água/cimento, sendo deduzida daí a expressão dada pela equação 17.

$$\frac{a/c}{1+m} = \frac{H}{100} \quad (\text{equação 17})$$

O traço unitário será obtido a partir do conhecimento da percentagem de água sobre o total de materiais secos e da relação água cimento, como apresentado na equação 18.

$$1+m = \frac{100x a/c}{H} \quad (\text{equação 18})$$

Claro fica que o objetivo será atingido pela redução do **H**, devendo ser dispendidos esforços na definição da melhor composição possível de ser obtida com eles, de maneira a diminuir o volume de vazios e, conseqüentemente, o volume de pasta necessário para seu preenchimento.

## 4 CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER GERAL SOBRE PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM DE CONCRETO

O significado da expressão dosagem de concreto pode ser obtido direta ou indiretamente na bibliografia técnica em diferentes versões mais ou menos completas, mas sempre relacionado com o estudo desenvolvido para obter a proporção entre cimento, agregados e água que, convenientemente misturados, conduzam à obtenção de um aglomerado que atinja algumas características pré-determinadas em especificações ou projetos de engenharia.

A definição do termo **dosagem** sugerida por Ferreira (2004) indica tratar-se de:

1. Operação de dosar, doseamento.
2. Determinação do traço de um concreto ou argamassa. **Dosagem racional**. Dosagem de um concreto estabelecida de acordo com os materiais disponíveis, de modo que empreste ao concreto a resistência desejada.

Ainda a mesma fonte informa ser traço, entre outras definições:

Composição (de um concreto ou argamassa) expressa por uma relação numérica indicativa das proporções, em massa ou em volume, dos diversos componentes.

Diante das citações acima referidas é possível perceber certa intimidade entre o termo **dosagem** e os materiais concreto e argamassa. Da mesma forma o termo **traço** encontra citação própria quando relacionado diretamente com a proporção estabelecida para a mistura de materiais na produção de um concreto ou de uma argamassa.

A vinculação da palavra dosagem com resistência é também forte, sugerindo, simplificada e equivocadamente, ser o atingimento de uma resistência o único objetivo de uma dosagem.

Na verdade, o termo resistência, aplicado a concreto, sugere inconscientemente a ideia de compressão, no entanto pode ser referido à resistência mecânica de qualquer natureza, ou a resistência química, elétrica ou térmica, apenas para exemplificar.

Mais recentemente, em função do uso em larga escala, aditivos passaram a incorporar as diversas definições de dosagem como parte integrante dos concretos e, em alguns casos,



ainda, a definição contempla o emprego de adições. Em qualquer definição, no entanto, deve ainda ser feita alusão a aspectos econômicos, tendo em vista que a redução do custo do concreto é sempre um objetivo a ser atingido.

A NBR 6118 (ABNT, 2007) – Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento, em seu capítulo 8, cita:

A dosagem experimental poderá ser feita por qualquer método baseada na correlação entre as características de resistência e durabilidade do concreto e a relação água/cimento, levando-se em conta que a fixação da relação água/cimento decorrerá:

- a) da obtenção de uma resistência de dosagem  $f_c$  aos 28 dias ou na idade prevista no plano de obra para que a resistência seja atingida;
- b) das peculiaridades da obra relativas à durabilidade tais como: impermeabilidade, resistência ao desgaste, à ação de líquidos e gases agressivos, a altas temperaturas e variações bruscas de temperatura e umidade;
- c) da prevenção contra uma retração exagerada.

Por sua vez a NBR 12655 (ABNT, 2006) – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento, em seu item 3.1.30 define estudo de dosagem como:

Conjunto de procedimentos necessários à obtenção do traço do concreto para atendimento dos requisitos especificados pelo projeto estrutural e pelas condições da obra.

Já em seu item 3.1.31, define dosagem ou proporcionamento como:

Medida dos materiais componentes do concreto para produção do volume desejado.

Neville (1997) apresenta uma definição de caráter amplo:

[...] como o processo de selecionar os componentes adequados do concreto, determinar as respectivas quantidades relativas com o objetivo de se obter da maneira mais econômica possível, um concreto com certas características mínimas, especialmente a consistência, a resistência e a durabilidade.

Mehta e Monteiro (2008), embora não apresentem formalmente uma definição de dosagem, sugerem que o processo inicie com:

A seleção dos materiais componentes do concreto, [...] na busca da obtenção de concretos com certas e desejadas características de desempenho, [...] processo denominado **dosagem do concreto** através do qual é obtida a proporção ideal entre esses componentes.



Há ainda, segundo o mesmo autor, alusão explícita à importância que deve ser dada ao custo do material desenvolvido.

Recena (2007) apresenta como definição:

Por dosagem do concreto entende-se o processo através do qual são escolhidos os materiais, dentre os disponíveis, e determinado o melhor proporcionamento entre cimento, agregados, aditivos e adições, com o objetivo de obter-se um material que atenda a determinados requisitos físicos, químicos e mecânicos, ao menor custo possível.

Priszkulnik<sup>7</sup> (1977 apud BOGGIO, 2000) sugere que:

O objetivo da dosagem do concreto é a recomendação da proporção adequada de aglomerante, agregado miúdo e graúdo, água e, eventualmente, aditivos, visando a obtenção de um concreto que atenda as seguintes condições:

- a) no estado fresco: seja trabalhável e mantenha sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e adensamento;
- b) no estado endurecido: apresente, na idade especificada, as propriedades exigidas no projeto estrutural (resistências mecânicas, retração, deformação lenta) acordes com as especificações de cálculo e a aparência exigida no projeto arquitetônico;
- c) seja durável, mantendo as propriedades ao longo da vida útil prevista para a estrutura, resistindo pois, a eventuais efeitos danosos oriundos de reações entre os seus componentes, e das ações físicas e químicas do meio;
- d) seja econômico.

Para Vasconcellos<sup>8</sup> (1977 apud BOGGIO, 2000) dosar concreto é:

No sentido mais lato da palavra, quantificar seus componentes de forma que após sua correta execução (medição, mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura) e das reações de hidratação da pasta de cimento e água, resulte um material pétreo que apresente propriedades (resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade) que o capacitem a constituir-se em parte integrante e útil de uma peça isolada ou de uma estrutura.

Independentemente da definição formal de caráter puramente acadêmico é importante ressaltar que o processo de dosagem tem um entendimento fragmentado, sendo muitas vezes priorizada a determinação da curva de Abrams e o cálculo do traço propriamente dito,

---

<sup>7</sup> PRISZKULNIK, S. Aspectos reológicos do concreto fresco e sua dosagem: métodos ACI e ITERS. In: COLÓQUIO DE DOSAGEM DE CIMENTO, 1977, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1977.

<sup>8</sup> VASCONCELLOS, J. M. C. Fundamentos da dosagem racional dos concretos. Palestra proferida durante a sessão de instalação da Seção Regional de Pernambuco do IBRACON em 30 de nov. 1977 em São Paulo.

não havendo o necessário estudo dos materiais, desde sua escolha até a definição de seu melhor proporcionamento. Assim, nem sempre os traços resultantes podem ser considerados otimizados.

O processo de dosagem do concreto a ser empregado em uma obra específica deve iniciar por uma criteriosa análise do projeto estrutural para identificação das situações que podem vir a constituir gargalos de concretagem, assim como regiões densamente armadas, peças de elevado efeito parede, situações que determinem elevada altura de queda durante o lançamento ou peças de grande volume que possam justificar a elevação da temperatura do concreto.

As condições de execução do concreto são igualmente importantes, devendo ser levados em conta, com maior ou menor ênfase, a eficiência do processo de mistura, o tipo de transporte a ser adotado, a forma de lançamento, a qualidade das formas, a eficiência do equipamento de adensamento e o acabamento superficial pretendido.

O conhecimento dessas condições de contorno permite estabelecer as características desejáveis dos materiais a serem utilizados no estudo, além das propriedades requeridas para o concreto no estado fresco e no estado endurecido.

Da mesma forma, o conhecimento preciso do ambiente ao qual a estrutura estará submetida, da correta identificação do patamar de resistência a ser atingido, da definição da idade de ensaio, da escolha do plano de amostragem a ser adotado e do tamanho da amostra, além da forma de cálculo da resistência característica do concreto deve ser considerado para definição do tipo de cimento, da consistência do concreto, da dimensão máxima característica do agregado e da forma de lançamento, podendo sugerir o emprego de aditivos especiais, bem como a utilização de adições.

O passo seguinte é a escolha, dentre os materiais disponíveis, daqueles mais apropriados à obtenção de um concreto com as características necessárias para o atendimento às especificações de projeto e ainda a outras exigências de ordem subjetiva.

Como exigência subjetiva é possível citar a existência de padrões culturais internalizados por pessoas de uma determinada região geográfica, de uma empresa ou até mesmo de uma obra. Esses padrões são sempre traduzidos por hábitos, assim como o de empregar preferencialmente um agregado graúdo com uma determinada dimensão máxima característica, o de considerar ser melhor o concreto com um mais elevado teor de argamassa ou uma maior trabalhabilidade, representada por um mais elevado abatimento pelo tronco de cone.

Dosar concretos, de certa forma, pode ser entendido como a harmonização de diversas variáveis, em muito conflitantes, com o intuito de obter um material equilibrado. Esse equilíbrio deve ser entendido como a minimização da influência de cada uma das variáveis envolvidas no produto final na medida em que, se uma característica é mais intensamente privilegiada, outras poderão ser mais seriamente comprometidas. Assim, exemplificando, a maior economia em geral não estará associada à melhor trabalhabilidade, ou à maior durabilidade ou até mesmo à maior resistência mecânica.

Não estará errado pensar em dosagem como a tarefa de contrabalançar ciência e arte, contrapondo parâmetros objetivos e subjetivos. Por um lado o conhecimento específico das características de um conjunto de materiais, obtido experimentalmente, e por outro, o conhecimento empírico advindo da experiência de profissionais da área consonante com a cultura de uma determinada região ou até mesmo de uma empresa.

Após a escolha dos materiais a serem empregados, e da determinação do melhor proporcionamento entre eles, o trabalho estará restrito à elaboração da curva de Abrams, sendo essa a expressão mais simples e corriqueira de um processo de dosagem.

No caso específico de centrais de concreto, a dosagem parte de premissas em geral muito abrangentes já que os traços oferecidos deverão apresentar características que permitam sua utilização na maior quantidade possível de obras sem a necessidade de ajustes ou correções, ações que, por questões operacionais, sempre ser evitadas.

Diante dos argumentos apresentados e da procura incessante e necessária pela sustentabilidade dos processos desenvolvidos pela construção civil, uma definição para o ato de dosar o concreto poderia ser:

É o conjunto de considerações, análises e atividades desenvolvidas com o intuito de, diante de condicionantes de projeto, permitir:

- a) escolher o cimento Portland mais adequado e os agregados miúdo e graúdo de melhor qualidade dentre os disponíveis a um custo adequado;
- b) estudar o melhor proporcionamento entre eles;
- c) viabilizar a obtenção de um traço que permita a produção de um concreto com a maior economia possível;
- d) permitir a otimização das operações de concretagem, valendo-se da utilização de aditivos e adições que possam acrescentar qualidades à mistura;
- e) viabilizar o uso de resíduos de forma direta na mistura ou indiretamente incorporados ao cimento.

O roteiro básico a ser seguido no desenvolvimento de um estudo de dosagem pode ser estabelecido intuitivamente a partir da resposta a duas perguntas:

- a) quais efetivamente devem ser os objetivos a serem atingidos quando é desenvolvido um estudo de dosagem?
- b) como atingir esses objetivos?

A resposta à primeira pergunta deverá levar em consideração o atingimento de requisitos físico mecânicos previstos em projeto, a garantia da durabilidade do material, a verificação de uma trabalhabilidade compatível com as condições e recursos disponíveis para sua aplicação, adensamento e cura, e o menor custo possível.

A segunda pergunta tem como resposta o próprio roteiro a ser seguido no desenvolvimento do estudo, promovendo criteriosa escolha entre materiais de boa qualidade e disponíveis a um preço viável, estudando a melhor composição possível de ser obtida com os materiais escolhidos, tendo como objetivo último a possibilidade de trabalhar com o menor teor de argamassa possível, culminando com o cálculo da relação água/cimento a qual deverá garantir o atingimento dos objetivos propostos.

Boggio (2000) apresenta um estudo comparativo entre cinco métodos de dosagem baseados em conceitos diversos, desde a forte conotação empírica até a aplicação eminentemente experimental.

Todos os métodos estudados baseiam-se nos princípios formulados por Abrams (1918) com as alterações sofridas ao longo do tempo que determinaram a forma final apresentada por Petrucci (1978) para o cálculo da relação água/cimento determinante de uma dada resistência de referência a ser atingida numa determinada idade.

As diferenças entre os métodos estudados por Boggio (2000) residem na forma como são tratados os agregados na busca pelo melhor proporcionamento entre eles e na definição do teor de argamassa, ou na definição de traços de referência.

Definidos esses parâmetros, a evolução do estudo de dosagem ocorre pelo estabelecimento dos traços experimentais que definirão a amplitude da curva que representa a lei de Abrams.

Desdobrados os traços experimentais segundo o teor de argamassa previamente estimado e o proporcionamento previamente estabelecido entre os diferentes agregados, estes são reproduzidos em laboratório, sendo a água adicionada em quantidade que garanta o

atingimento do abatimento pelo tronco de cone requerido, condicionando o teor água sobre o total de materiais secos e a relação água/cimento em cada traço.

Com a curva de Abrams estabelecida é possível, então, calcular a relação água/cimento que determine a resistência requerida e que será empregada no cálculo do traço a partir do conhecimento da porcentagem de água sobre o total de materiais secos.

Com um caráter eminentemente objetivo o cálculo do valor do teor de água sobre o total de materiais secos pode ser feito a partir de uma curva que modela matematicamente a relação existente entre esse parâmetro e a relação água/cimento.

Conhecidos os três parâmetros fundamentais de uma dosagem, a relação água/cimento ( $a/c$ ), o teor de argamassa ( $\alpha$ ) e o teor de água sobre o total de materiais secos ( $H$ ), é possível calcular o traço cuja reprodução permitirá a obtenção do concreto que deverá atender às exigências de projeto.

A forma de apresentação dos resultados de uma dosagem experimental, além dos traços, pode variar desde a simples apresentação numérica dos parâmetros fundamentais como até na forma de um ábaco como proposto por Helene e Terzian (1992).

No trabalho desenvolvido por Boggio (2000) o elemento de comparação estipulado foi o consumo de cimento obtido para traços calculados para mesmas resistências em cada método de dosagem. Na construção das curvas de Abrams, em cada método considerado, Boggio (2000) adotou para os traços experimentais relações água/cimento fixas, condicionando o teor de água sobre o total de materiais secos. Como foram empregados os mesmos materiais, o abatimento pelo tronco de cone apresentou pequenas variações, permitindo interpretar esse comportamento como indicativo de haver sido obtida aproximadamente a mesma trabalhabilidade.

Como as relações água/cimento eram iguais nos cinco métodos as resistências obtidas apresentaram variações pequenas, podendo ser consideradas de mesma ordem de grandeza, como era de se esperar. No entanto, o resultado obtido para cada relação água/cimento em cada método representa apenas um ponto de um universo que normalmente é caracterizado por uma média e um desvio padrão. Assim as diferenças de resistência verificadas em cada método e para cada relação água/cimento considerada poderão ser fruto da variabilidade inerente à própria produção do concreto.

O exercício proposto a partir dos resultados obtidos consistiu do cálculo de traços, para a verificação de uma determinada resistência à compressão, com o emprego dos parâmetros definidos em cada um dos métodos considerados.

Contrariamente à expectativa de serem obtidas relações água/cimento semelhantes em traços calculados para uma mesma resistência através de cada um dos métodos estudados, foram determinados valores que não podem ser considerados como de mesma ordem de grandeza, variando entre valores extremos de 0,578 e 0,620.

Essa variação não pode ser atribuída exclusivamente às variações verificadas no teor de argamassa, que variaram entre 52% e 53%, já que foram empregados os mesmos materiais, mas também, como já aventado, à própria variação inerente à produção do concreto ou até mesmo a variações no ensaio dos corpos de prova.

As diferenças observadas no teor de água sobre o total de materiais secos, considerando ainda os extremos, para a verificação de um mesmo abatimento pelo tronco de cone, conduziram respectivamente a traços em massa de 1:6,26 e 1:6,78, definindo percentagens de cimento no concreto de 13,77% e 12,85%, o que representa uma variação percentual de 7,15%, calculada sobre o menor valor.

Em suas conclusões Boggio (2000) afirma que:

Os cinco métodos de dosagem estudados apresentaram respostas similares em termos de trabalhabilidade e resistência à compressão.

Estatisticamente não foram detectadas diferenças significativas entre as resistências obtidas, para as mesmas relações água/cimento, através dos diferentes métodos.

As considerações feitas, então, permitem concluir que as diferenças encontradas nos traços calculados a partir dos parâmetros determinados em cada método estão diretamente ligadas à variabilidade inerente aos métodos de ensaio e, como já aventado anteriormente, à própria variação esperada na reprodução de um mesmo traço.

Não há como desconsiderar que o método de verificação do abatimento pelo tronco de cone do concreto, por sua simplicidade, facilidade e rapidez de execução, ainda é o mais apropriado para emprego tanto em obra como em laboratório e dificilmente será substituído, mas é inadequado, por impreciso, quando pequenas variações na trabalhabilidade precisam ser quantificadas.

Diante do exposto, qualquer estudo comparativo que envolva a reprodução de traços de concreto com pequenas variações ou métodos de dosagem que tenham o abatimento pelo tronco de cone como referência, tende a apresentar variações importantes nos resultados por conta das variações inerentes ao procedimento de ensaio e à precisão da leitura do valor do abatimento.

Há que ser considerado ainda que, muitas vezes em laboratório, o valor do abatimento pelo tronco de cone pretendido não é obtido na primeira tentativa e, não raro, há a necessidade de acrescentar água ao concreto.

Sucedem que, dependendo das condições de evaporação no momento da produção do concreto e do intervalo de tempo decorrido entre o primeiro ensaio e os demais, que deve incluir a medição da água adicionada e a estimativa da quantidade adicional a ser incluída, quando a nova medição do abatimento pelo tronco de cone for realizada alguma quantidade de água já evaporou, e a água acrescida determina um valor de abatimento pelo tronco de cone inferior ao que seria obtido se a mesma quantidade de água utilizada fosse adicionada ao concreto de uma única vez.

Esse fenômeno é particularmente observado quando são empregados misturadores de eixo vertical e de contra corrente, extremamente eficientes, mas, por revolverem intensamente o concreto em uma cuba aberta, favorecem a evaporação. A cuba aberta se justifica em laboratório diante da necessidade de acompanhar o desenvolvimento do processo de mistura e a adição de água para a obtenção do abatimento pelo tronco de cone pretendido.

Em estudos cujos resultados deverão ser interpretados por comparação direta é fundamental que as condições de produção de todo concreto seja realizada da forma mais parecida possível.

#### 4.1 PARÂMETROS A SEREM QUANTIFICADOS NUM PROCESSO DE DOSAGEM

O objetivo final de um procedimento de dosagem reside na obtenção de um traço dito unitário, expresso por 1:m, onde 1 representa a quantidade de cimento e **m** a soma das parcelas de agregados miúdo (**a**) e graúdo (**p**), podendo **a** e **p** estar representando mais de um agregado miúdo ou graúdo, respectivamente.

Por ser referenciado à unidade de cimento, o traço, expresso por essa proporção “1:m”, é chamado unitário.

Assim, **a** e **p** representam, respectivamente, as quantidades em massa de agregados miúdo e graúdo a serem empregadas na mistura em relação à quantidade unitária, em massa, de cimento. Essas proporções de agregados são determinadas a partir do cálculo de um traço definido pela interação entre relação água/cimento e percentagem de água sobre os materiais secos. O desdobramento do traço condensado é feito a partir do conhecimento do teor de argamassa e do proporcionamento pré-estabelecido entre os diversos agregados considerados no estudo.

A definição de um traço, em sua expressão mais simples, fica estabelecida a partir do conhecimento do teor de argamassa, da relação água/cimento e do teor de água sobre o total de materiais secos.

O procedimento de dosagem visa, em última análise, à definição desses três parâmetros fundamentais e imprescindíveis para o cálculo de traços, ou seja, para a definição de **a** e **p**.

É possível considerar a relação água/cimento um parâmetro objetivo, perfeitamente quantificável, calculado a partir da curva de Abrams.

A percentagem ou teor de água sobre o total de materiais secos é um parâmetro a ser determinado experimentalmente a partir da adição controlada de água a tantas misturas quantas forem as estabelecidas para a definição da curva de Abrams, tendo como referência um abatimento pelo tronco de cone definido por uma faixa apropriada para as operações de concretagem previstas.

O teor de água sobre o total de materiais secos pode, por isso, igualmente ser considerado um parâmetro objetivo, mas paradoxalmente de grande variabilidade, o que lhe confere até certo ponto certa subjetividade já que se trata de um parâmetro estabelecido em função de uma trabalhabilidade pretendida, avaliada indiretamente por meio de procedimentos que, na maioria das vezes, permitem apenas a medição da consistência.

De todos os três parâmetros o que apresenta maior subjetividade é sem dúvida o teor de argamassa, pois embora sua determinação possa ser feita através do seguimento de diferentes roteiros, deve levar em conta aspectos relacionados com a cultura de uma determinada região em que o concreto será empregado, além de outros específicos de cada usuário, de interpretação eminentemente subjetiva. O aspecto cultural citado pode ser traduzido pela expectativa das pessoas quanto ao aspecto do concreto com o qual estão acostumadas a trabalhar.



Na figura 15 é apresentado um fluxograma que permite a visualização dos aspectos teóricos e de atividades a serem executadas para quantificação dos três parâmetros necessários para o cálculo de traços.

O diagrama apresentado na figura 15 foi concebido a partir da proposta postulada em aula pelo Professor Paulo Helene, recebendo algumas modificações e a definição de três áreas de interpretação em nível objetivo e em nível subjetivo.

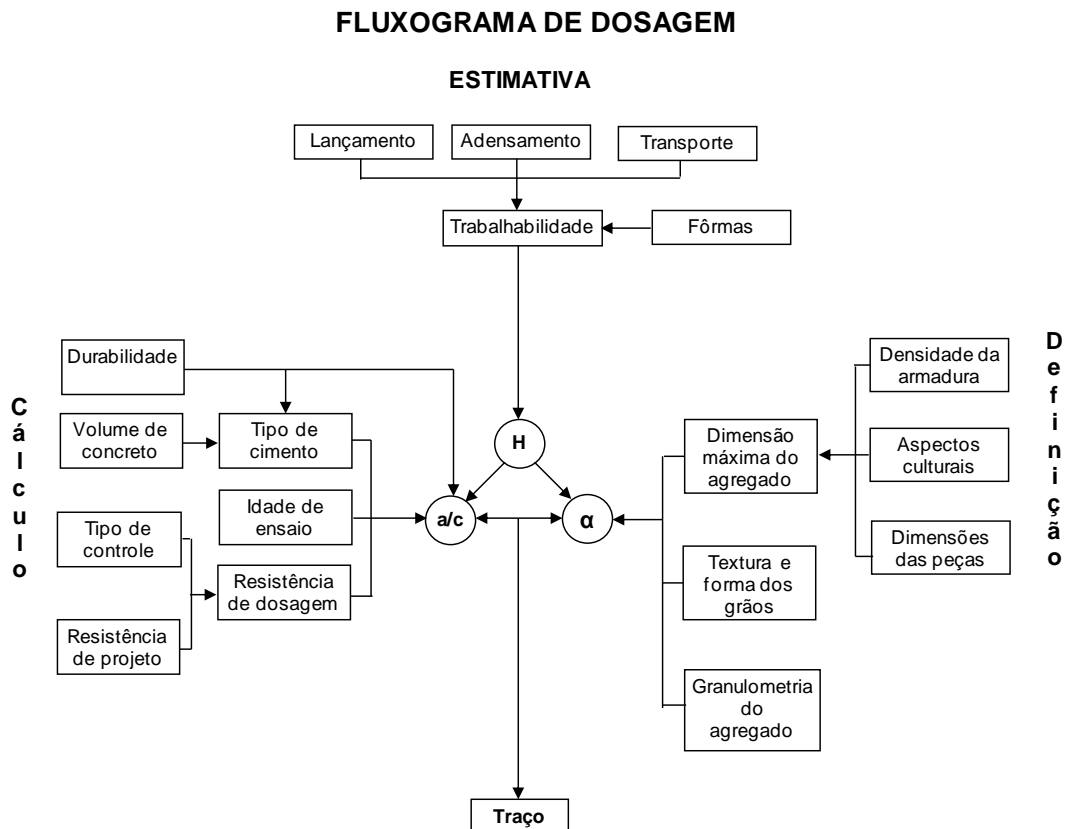


Figura 15: aspectos a serem considerados em um procedimento de dosagem de concreto

No caso específico da estimativa do teor de argamassa, mesmo quando são empregados métodos ou simplesmente roteiros de observação, dependendo do grau de exigência posto sobre o estudo, é necessário observar o comportamento reológico de concretos preparados com diferentes proporcionamentos entre os agregados, ou seja, com diferentes teores de argamassa, através de ensaios dinâmicos para avaliar o comportamento reológico da mistura. Deve ainda ser levado em consideração, com especial cuidado, a forma de transporte do concreto dentro da obra, como, por exemplo, o bombeamento, e o tipo de peça a ser concretada.

A variabilidade esperada na definição desse parâmetro, independentemente do método aplicado ou do roteiro seguido, está diretamente ligada à interpretação subjetiva da pessoa encarregada de sua estimativa.

Diferenças no teor de argamassa podem alterar o comportamento do concreto em seu estado fresco, mas também podem influenciar a própria resistência mecânica tendo em vista que uma estimativa a menor poderá ser responsável por perda de trabalhabilidade e até mesmo pela presença de vazios com diminuição da densidade do concreto. Já um valor superdimensionado poderá, ao elevar a superfície específica da mistura, aumentar a demanda de água, reduzindo o rendimento da mistura e predispondo o material a uma maior retração.

#### 4.1.1 Estimativa ou cálculo do teor de água sobre o total de materiais secos

A estimativa do teor de água sobre o total de materiais secos é feita a partir da observação do concreto em estudo através da reprodução dos traços experimentais os quais deverão apresentar um valor para o abatimento pelo tronco de cone, método universalmente adotado por sua extrema simplicidade e rapidez de execução, conhecido popularmente como *slump* e normatizado como NBR NM 67 (ABNT, 1998), situado dentro de uma faixa pré-definida.

O teor de água sobre o total de materiais secos em concretos bem dosados, ou seja, em concretos que não apresentarão alterações significativas na coesão caso venha a ser alterada a quantidade de água empregada na sua produção, determina o valor do abatimento pelo tronco de cone e pode ser relacionado diretamente com a trabalhabilidade.

A imprecisão intrínseca ao método pode ser associada tanto com a dificuldade em definir o ponto de medição na superfície superior do tronco de cone abatido, nem sempre horizontal e nem sempre plana, como com a eficiência do operador. Algumas vezes a medição é feita em mais de um ponto, sendo considerada a média dos valores obtidos, em outras, a base de medida é feita a partir de um ponto estabelecido em um plano imaginado como médio na superfície superior do tronco de cone abatido.

Essa peculiaridade do método é considerada na NBR 7212 (ABNT, 1984), em seu item 8.1.3, que prevê variações nos valores do abatimento pelo tronco de cone especificado de  $\pm 10$  mm sobre valores compreendidos entre 10 mm e 90 mm,  $\pm 20$  mm sobre valores especificados entre 100 mm e 150 mm e  $\pm 30$  mm para valores superiores a 160 mm.

Como exemplo, para um valor de abatimento de 100 mm, tomado como referência, a variação admitida permitirá considerar homogêneo ou passível de recebimento em obra o

concreto obtido de diferentes betonadas com abatimentos variáveis entre 80 mm e 120 mm, o que representa uma variação de 50% sobre o valor menor.

Uma regra prática adotada por concreteiras orienta os operadores a adicionar uma quantidade de água equivalente a 3 litros por m<sup>3</sup> de concreto para um aumento de 10 mm no abatimento, quando este for menor do que 100 mm. Quando o valor inicial do abatimento for superior a 100 mm, a adição de água deve passar a ser feita tendo como referência não mais 3 litros por m<sup>3</sup>, mas sim 2 litros por m<sup>3</sup>.

A diferença em água por m<sup>3</sup> de concreto para variar o abatimento em 40 mm será de 12 litros por m<sup>3</sup>, o que representa, em termos percentuais, uma variação de aproximadamente 6% sobre a quantidade de água original.

Um hipotético concreto com consumo de 300 kg de cimento por m<sup>3</sup>, dosado originalmente com 189 litros de água para a obtenção de um abatimento pelo tronco de cone de 100 mm, apresenta uma relação água/cimento de 0,63. A variabilidade admitida no abatimento poderá significar uma variação na relação água/cimento com amplitude de 0,61 a 0,65, considerando o valor de água estipulado necessário para a obtenção de um abatimento inicial de 100 mm.

#### 4.1.2 Interação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos na definição de traços

Conhecidos a relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos, o cálculo do traço é procedido a partir da equação 19. O teor de argamassa, também um parâmetro definido pelo processo de dosagem, será empregado posteriormente para o desdobramento do traço.

$$1 + m = \frac{100x \frac{a}{c}}{H} \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

m = representação unitária dos agregados miúdo e graúdo;

a/c = relação entre a massa de água e a massa de cimento;

H = quantidade de água a ser empregada no concreto para uma determinada consistência calculada percentualmente sobre o total de material seco da mistura.

A fórmula apresentada é obtida de uma proporção que relaciona uma quantidade de água, expressa em termos percentuais sobre o total de material seco considerado 100% da mistura, e a quantidade de água a ser adicionada ao traço unitário conforme a equação 20:

$$\frac{a/c}{1+m} = \frac{H}{100} \quad (\text{equação 20})$$

O **H** definirá o nível de consistência da mistura que, dentro do campo dos concretos trabaláveis, poderá ser associada à própria trabalabilidade, juntamente com o teor de argamassa. A resistência mecânica será definida, por sua vez, pela relação água/cimento.

O interesse econômico fica atendido no momento em que as exigências físicas e mecânicas especificadas são verificadas a partir da reprodução de um traço de concreto com o menor consumo de cimento possível, por se tratar o cimento do insumo de mais elevado custo.

De menor custo será o concreto cujo traço unitário apresentar o maior **m**, ou seja, a maior quantidade de agregado por unidade em massa de cimento. A observação da equação 8 permite concluir ser atingido esse objetivo a partir da elevação da relação água/cimento ou da redução do **H**, ou, evidentemente pela otimização das duas variáveis.

A elevação da relação água/cimento para uma dada resistência mecânica somente será possível através do emprego de cimentos de maior rendimento. Já a redução da percentagem de água sobre o total de materiais secos dependerá das características individuais dos materiais empregados e das características de sua mistura.

Essa colocação pressupõe a necessidade de ser desenvolvido um intenso trabalho no estudo do melhor proporcionamento entre os materiais escolhidos de forma a otimizar a mistura para possibilitar diminuir a demanda de água para uma determinada trabalabilidade.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ARGAMASSA

Quando um estudo de dosagem é desenvolvido, considerando o emprego de apenas um agregado graúdo, o primeiro parâmetro a ser quantificado é o teor de argamassa, representado pela letra grega  $\alpha$ .

Quando forem empregados dois ou mais agregados graúdos, antes da definição do teor de argamassa deverá ser estabelecido o melhor proporcionamento entre os diversos agregados. Caso seja considerada no estudo a mistura de areias, igualmente a definição do proporcionamento adequado deve anteceder o estudo do concreto propriamente dito.

Em alguns procedimentos é possível determinar simultaneamente o teor de argamassa e o melhor proporcionamento entre agregados graúdos.

Estando definido o teor de argamassa, fica, por consequência, estabelecida a percentagem de agregado graúdo na mistura.

A definição da melhor composição entre diferentes agregados sejam estes graúdos ou miúdos, independentemente do método adotado, deve ter como referência a obtenção da mistura de menor índice de vazios.

No caso da composição de agregados graúdos, a mistura de menor índice de vazios pressupõe a minimização da quantidade de argamassa o que pode ser entendido, para um mesmo traço, como a diminuição do teor de agregado miúdo. Havendo, por conseguinte, redução da superfície específica é possível esperar haver redução na demanda de água, desde que não ocorra o comprometimento da trabalhabilidade. Esse mesmo raciocínio pode ser feito com relação a agregados miúdos.

Como benefícios relacionados com a redução na quantidade absoluta de água necessária para uma determinada consistência, podem ser relacionados o aumento na estabilidade de volume e a redução no consumo de cimento.

Em regiões onde não haja disponibilidade de agregados miúdos naturais de boa qualidade a preços razoáveis, a redução no teor de argamassa passa a representar também um forte objetivo econômico.

Na bibliografia específica, Helene e Terzian (1992), Petrucci (1979), Recena (2007) e Tutikian e Dal Molin (2008), é possível reconhecer uma larga quantidade de procedimentos ou roteiros a serem seguidos tanto para a definição do teor de argamassa como para a obtenção do melhor proporcionamento entre diferentes agregados graúdos.

A experiência adquirida por um profissional em dosagens de concreto empregando materiais iguais ou no mínimo similares permite que, em situações análogas, o teor de argamassa possa ser estabelecido empiricamente de forma a ser obtida uma mistura perfeitamente trabalhável e adequada aos padrões culturais regionais.

A aplicação de um conhecimento empírico leva em consideração de forma subjetiva e até mesmo inconsciente as características dos materiais encontrados em uma determinada região, assim como a forma do grão e sua textura superficial. Esse conhecimento empírico se traduz pelo estabelecimento de uma cultura regional que determina a internalização de conceitos relacionados com as características que definem um bom concreto para as pessoas de uma comunidade ou uma região geográfica.

Muitas vezes essa cultura fica restrita aos muros de uma fábrica de pré-moldados, ou ao universo de uma concreteira, nesse último caso por serem levadas em conta as características dos equipamentos empregados na produção, no transporte e no lançamento do concreto, no caso de bombas.

O conhecimento empírico pode ser documentado através da atribuição de valores médios característicos aos parâmetros que devem ser quantificados num processo de dosagem. Esses valores médios adotados para o cálculo de traços são obtidos do tratamento dado a uma grande quantidade de valores determinados experimentalmente em procedimentos de dosagens experimentais desenvolvidos ao longo de vários anos em laboratórios de instituições de ensino e pesquisa. Como exemplo pode ser citado o **Método CIENTEC de Dosagem Empírica** desenvolvido por Recena (2007).

Isso posto, impõe-se como questionamento a necessidade de estudos mais acurados para a definição do teor de argamassa, visto que as aproximações empíricas podem bem satisfazer aos requisitos básicos de trabalhabilidade de um bom concreto, embora sempre com tendência ao superdimensionamento.

A análise dos diferentes procedimentos empregados para a definição do teor de argamassa, apresentados por Boggio (2000), permite concluir ser de uma maneira geral atribuída pouca importância à precisa definição desse parâmetro, visto tratarem-se, em sua maioria, de procedimentos baseados em avaliações subjetivas.

Mais uma vez o objetivo deve ser sempre a pesquisa de uma mistura que conduza ao menor consumo de água possível, ou seja, ao traço calculado com o menor teor de água sobre o total de materiais secos possível, de maneira a garantir a otimização do traço tanto em termos técnicos como em termos econômicos, considerando haver uma relação direta e biunívoca entre economia e redução no consumo de cimento por m<sup>3</sup>.

Se efetivamente a redução no consumo de cimento for obtida pelo decréscimo na demanda de água, por sua vez consequência da obtenção da mistura de melhor reologia,

paralelamente estará sendo otimizada a mistura com relação à retração, porosidade e permeabilidade com reflexos diretos sobre a durabilidade.

Assim, o objetivo do estudo contemplando pequenos detalhes e otimizações ultrapassa aquele vinculado apenas à economia, senão, ainda, o de melhorar o desempenho geral do concreto.

Considerando que praticamente todo o concreto produzido em centros urbanos tem origem em centrais gravimétricas, em sua grande maioria automatizadas, é possível esperar que, em função da homogeneidade esperada do concreto produzido, seja possível trabalhar dentro de limites mais estreitos.

Há que ser considerado que a redução de alguns quilogramas de cimento por m<sup>3</sup> de concreto produzido, ao final de um período de produção, pode representar uma redução de custo significativa e economicamente importante.

A subjetividade da definição empírica, tanto do teor de argamassa como no proporcionamento dos agregados, deve ser substituída pela objetividade de métodos experimentais que possam garantir maior precisão, viabilizando o estabelecimento de padrões para a obtenção de misturas otimizadas sob o aspecto reológico.

Desconsiderando aqueles métodos de sugestão empírica em que a mistura de agregados é apresentada de forma estática em tabelas ou outros de praticamente nenhuma aplicação no meio técnico, é possível admitir como usuais aquele método sugerido por Helene e Terzian (1992) e ratificado por Tutikian e Dal Molin (2008) desenvolvido a partir da obtenção de uma mistura de agregados que conduza à maior massa unitária possível e o método desenvolvido por Lobo Carneiro como apresentado por Petrucci (1978) e Bauer (1979) cujo objetivo é o mesmo, embora seja obtido pela otimização teórica da composição granulométrica da mistura na busca pela maior continuidade possível, a partir do conhecimento da distribuição granulométrica de cada um dos agregados envolvidos.

#### 4.2.1 Análise crítica dos métodos mais empregados na definição do teor ótimo de argamassa.

Como já citado, os vários procedimentos para determinação do teor de argamassa de um concreto, representam a diferença entre os diversos métodos de dosagem (BOGGIO, 2000).

Atualmente um procedimento de largo emprego é aquele sugerido por Helene e Terzian (1992) e identificado por método do **IPT/EPUSP, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**.

Na verdade esse procedimento citado como um método é apenas um roteiro que orienta a interpretação subjetiva com base na observação do aspecto de misturas concebidas a partir de um mesmo traço, preparadas com teores crescentes de argamassa.

O que caracteriza um método de ensaio é sua reprodutibilidade, ou seja, qualquer pessoa que o aplicar necessariamente deverá obter o mesmo resultado. As variações admitidas devem ser passíveis de interpretação estatística, fornecendo a possibilidade de serem rastreadas.

Quanto maior o grau de detalhamento nas rotinas e a precisão dos equipamentos, menor a variabilidade.

Se a obtenção de um resultado ficar condicionada a uma observação subjetiva, portanto, pessoal do operador, o procedimento não pode ser considerado um método, mas sim um roteiro.

O procedimento IPT/EPUSP tem como diferencial positivo o fato de estabelecer uma rotina de acréscimos de argamassa a uma mistura de maneira a não alterar o traço tomado como referência. Assim, vai sendo progressivamente aumentado o teor de argamassa de um concreto em que o traço é mantido, até que visualmente seja identificado o teor ideal para o conjunto de materiais escolhido para o estudo. Com a rotinização do procedimento acabam por serem criados padrões de observação a partir de referências visuais que, com a repetição, permitem a identificação de valores adequados para cada caso.

Não raramente o profissional responsável pelo estudo de dosagem, baseado no conhecimento do histórico da variabilidade dos materiais empregados, pode optar por sugerir um teor de argamassa mais elevado para garantir uma maior flexibilidade do concreto frente às variações inerentes aos materiais.

O objetivo de manter a observação de um mesmo traço com diferentes teores de argamassa durante a aplicação do procedimento IPT/EPUSP, pressupõe haver necessidade de serem adotados diferentes teores de argamassa em diferentes traços, caso contrário a definição do teor de argamassa poderia ser concebida a partir da adição apenas de areia a um concreto produzido independentemente do traço adotado como base.



Admitir que traços diferentes necessitem diferentes teores de argamassa encontra consubstanciamento nas afirmações postas a seguir:

- a) um traço muito rico com elevado teor de cimento apresentará uma coesão elevada, o que até certo ponto é negativo visto que para romper essa coesão e permitir dotar o concreto de uma maior fluidez é necessário o emprego de uma maior quantidade de água. A redução no teor de argamassa, nesse caso, permitiria diminuir a quantidade de material fino, o que poderia ser traduzido em diminuição na quantidade de água para uma mesma trabalhabilidade;
- b) em um traço pobre a reduzida quantidade de material fino, o cimento, determina uma mistura de baixa coesão e baixa retenção de água, o que compromete a adequada trabalhabilidade, fato que poderia ser atenuado com o aumento na quantidade da areia, ou seja, com a elevação do teor de argamassa.

Isso posto, impõe-se o retorno à questão da necessidade, conveniência ou importância de sofisticar os procedimentos desenvolvidos para a definição das proporções de mistura dos diversos agregados ou, mais especificamente, para a determinação do teor de argamassa de um concreto.

Assim, não estaria errado admitir como razoável o estabelecimento da curva de Abrams num processo de dosagem a partir de traços desdobrados com teores de argamassa crescentes a partir do traço mais forte. O trabalho seria então determinar para cada traço arbitrado, um teor ótimo de argamassa.

O cálculo dos traços seria feito, considerando também a relação definida por uma curva que modelasse a interação entre o teor de argamassa e a relação água/cimento, ou o traço em massa e o teor de argamassa, permitindo a adoção de um teor de argamassa específico para cada traço calculado.

Experiências com esta variação já foram realizadas na CIENTEC com sucesso e ainda hoje esse é um expediente empregado sempre que dosagens experimentais são desenvolvidas para o cálculo de traços de grande amplitude o que normalmente se verifica na matriz de traços adotados por concreteiras.

Se efetivamente for considerado esse grau de detalhe no desenvolvimento de um estudo de dosagem, a definição dos teores de argamassa a serem considerados não pode ser fruto de uma interpretação subjetiva, mas necessariamente de um estudo preciso balizado por critérios bem definidos.

Nesse momento deve ser considerada a possibilidade de utilização do procedimento experimental proposto por Petrucci (1979) para determinação do teor de argamassa quando

aplicado o método de dosagem de concreto apresentado como **Método ITERS, Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul**, igualmente apresentado por Boggio (2000).

Esse método elimina a interpretação subjetiva na medida em que avalia o comportamento reológico de concreto como resposta a um estímulo dinâmico representado pela queda da mesa de remoldagem conforme especificada NBR 7215 (ABNT, 2006) quantificado pelo número de quedas necessárias para remoldar um tronco de cone abatido de concreto em um cilindro. Mais reodinâmico será um concreto quanto mais sensível for ao estímulo introduzido.

O método de dosagem proposto por Petrucci (1979) vale-se do método conhecido como **Método de Remoldagem de Powers**, que pode ser considerado como um método de baixo grau de subjetividade. Para Petrucci (1979) a proporção ideal entre agregado graúdo e agregado miúdo é aquela que proporciona a menor relação entre água e materiais secos para o abatimento requerido, pois definirá o concreto mais econômico.

O procedimento proposto por Lobo Carneiro citado por Petrucci (1979), Bauer (1979) e Boggio (2000), baseia-se exclusivamente na composição granulométrica dos agregados utilizados para estimar a mistura de menor índice de vazios. Como é possível incluir o agregado miúdo no procedimento é possível determinar simultaneamente o teor de argamassa adequado ao agregado graúdo considerado ou a mistura, quando forem empregados mais de um.

Durante muitos anos o método da granulometria contínua, desenvolvido originalmente por Lobo Carneiro (1953), foi adotado como uma simplificação do método de dosagem proposto por Petrucci (1979) pela **CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul**, instituição esta que sucedeu aquela a partir de 1972.

Essa citada simplificação foi adotada pela CIENTEC em função de sua simplicidade de aplicação caracterizada pela exigência apenas do conhecimento da composição granulométrica dos agregados a serem misturados para o enquadramento da mistura em faixas consideradas como representantes de uma granulometria ótima, função da dimensão máxima característica do maior agregado da mistura.

O método proposto por **Lobo Carneiro** estabelece para cada dimensão máxima característica do agregado graúdo, três curvas granulométricas que representam misturas de granulometrias contínuas, uma considerada diante da perspectiva de emprego de

vibração para o adensamento, outra considerando o adensamento executado manualmente, e ainda uma curva média.

O melhor proporcionamento entre os agregados graúdos considerados e a estimativa do teor ótimo de argamassa para a composição do agregado graúdo podem ser obtidos a partir da aplicação de um método gráfico de fácil desenvolvimento como exemplificado por Petrucci (1979)

Quando esse método passou a ser empregado pela CIENTEC, para proporcionamento dos agregados, praticamente todo o concreto passava a ser adensado mecanicamente, ficando a fronteira da curva representante do limite inferior da zona ótima como uma referência a mistura de agregados para concretos a serem bombeados, técnica incipiente àquela época, os anos 1970.

Como o método foi desenvolvido na cidade do Rio de Janeiro, representante de uma região de predominância de rochas do tipo graníticas ou sua metamorfose, o gnaíse, que apresentam fratura cúbica, sua aplicação considerando agregados de naturezas distintas não dispensava a reprodução de concretos para a observação de seu aspecto, momento em que correções eram procedidas caso visualmente, ou diante de rotinas de observação subjetiva, fosse identificada qualquer anormalidade no aspecto da mistura.

Quando eram empregados agregados de natureza basáltica, de fratura lamelar, sempre correções se impunham.

Os relatórios emitidos pela instituição apresentavam em seu corpo o seguinte texto:

O teor ótimo de argamassa foi determinado através da observação de concretos preparados com os materiais entregues, usando-se percentagens variáveis de agregados e água, tendo-se tomado como ponto de partida o proporcionamento indicado pela curva de Lobo Carneiro para agregados de dimensão máxima "X" mm. Desta maneira, o teor ótimo de argamassa determinado para o concreto em questão, foi de "Y"%, sendo de "Z" e "W" as percentagens de brita A e brita B, respectivamente.

Como se depreende do texto a estimativa inicial para o teor de argamassa também era feita através do método de Lobo Carneiro (1953).

Diante da imprecisão advinda da observação visual e subjetiva dos concretos produzidos, a metodologia adotada pela CIENTEC podia ser considerada como de alto grau de empirismo.

Esse método relaciona a melhor trabalhabilidade a obtenção de uma curva granulométrica o mais contínua possível a partir da mistura dos agregados, como também apregoado por Helene e Terzian (1992).

As variações eventualmente verificadas no teor de argamassa estimado, determinantes de correções a partir da observação de concretos produzidos em laboratório, com este fim, poderiam ser creditadas ao fato de o método considerar apenas o tamanho dos grãos e não sua forma, razão pela qual sua aplicação sobre agregados lamelares conduzia a um teor de argamassa sempre inferior àquele que se poderia supor ótimo.

O teor de argamassa admitido como ótimo era obtido a partir das correções demandadas por sugestão visual, dependendo sempre, dessa maneira, sua otimização da experiência do profissional responsável por sua aplicação.

A grande vantagem desse método é o fato de ser possível em uma única operação analítica ou gráfica obter não somente o melhor proporcionamento entre os agregados graúdos, mas também o teor de argamassa adequado à mistura.

O método desenvolvido por Lobo Carneiro é facilmente aplicado com o auxílio de recursos de informática, existindo já programas que permitem a variação da percentagem de cada agregado em uma mistura virtual, sendo a otimização procedida a partir da avaliação de um coeficiente de correlação que informa sobre o afastamento da curva granulométrica da mistura proposta em relação à curva padrão de Lobo Carneiro para a dimensão máxima característica do maior agregado considerado no estudo.

Posteriormente a CIENTEC passou a adotar o método desenvolvido por Recena (2007) denominado **Método Alemão simplificado**. Esse método permite estimar o volume de vazios de um agregado e correlacionar essa informação com a necessidade de argamassa na mistura.

#### 4.2.2 Proposição de uma metodologia de caráter objetivo

O método, denominado **Alemão Simplificado**, apresentado por Recena (2007), na verdade trata-se da adaptação de um roteiro traduzido de uma orientação apresentada por **Grür** em *Der Beton, Herstellung und Gefüge*, Berlin 1926, por isso identificado como **Método Alemão**. A complementação **Simplificado** foi agregada em função de sua adaptação nada mais ser do que uma simplificação realizada com o intuito de torná-lo simples o suficiente para possibilitar sua aplicação mesmo em obra, sendo necessário apenas como equipamento uma balança e uma trena ou simplesmente uma régua.

O método baseia-se na quantificação do volume de vazios de um agregado graúdo obtido pela medição do volume de água necessário para cobrir o agregado previamente disposto em um balde plástico. Conhecido o volume ocupado pelo agregado é possível calcular a massa de concreto pelo emprego de um valor proposto para sua massa específica. Conhecida a massa de agregado graúdo empregada na determinação é possível calcular o teor de argamassa, em percentagem. Sobre o valor originalmente calculado é aplicado um coeficiente de correção de 1,20, ou seja será necessária uma massa de argamassa 20% maior do que a necessária para promover simplesmente o preenchimento dos vazios do agregado.

Embora o método como exposto em Recena (2007) vise à aplicação de uma forma simplificada de maneira exequível em obra, sua adoção como referência em laboratório tem permitido a obtenção de misturas adequadas.

A variação a ser obtida no valor do teor de argamassa estará condicionada à variação na massa específica adotada para conversão de volume de concreto em massa de concreto e no próprio fator de correção.

Como o roteiro foi desenvolvido prevendo sua aplicação simplificada, sempre o teor de argamassa estará sendo superestimado, conduzindo a misturas sempre trabalháveis, mas nem sempre otimizadas.

#### 4.2.3 Aperfeiçoamento do método “Alemão Simplificado”

Carecendo de precisão e confiabilidade, além da necessidade de garantir a reprodutibilidade em sua aplicação, o que permitiria que, independentemente do operador, o valor do teor de argamassa recomendado para um determinado agregado graúdo fosse igual ou ao menos muito próximo, o método sofreu aperfeiçoamentos.

Em substituição ao balde genérico sugerido originalmente, foi desenvolvido um equipamento, que consiste de um tubo de PVC com 200mm de diâmetro nominal, no qual é colocado fundo. Lateralmente é efetuado um corte de aproximadamente 10 mm de largura, para possibilitar a observação do agregado no interior do cilindro, e colada em sua borda uma régua. Uma torneira é posicionada na parte inferior do cilindro com a finalidade de permitir regular o nível de água no interior do equipamento. As figuras 16, 17 e 18 permitem visualizar o referido equipamento. Atualmente o tubo de PVC está sendo substituído por outro de acrílico que dispensa a realização do citado corte, sendo apenas colada uma régua diretamente sobre o tubo.

O nivelamento da superfície do agregado dentro do cilindro é feito com o auxílio de um êmbolo metálico e um nível de bolha, sendo o correto posicionamento do êmbolo garantido por meio de uma guia adaptada na tampa.



Figura 16: equipamento montado

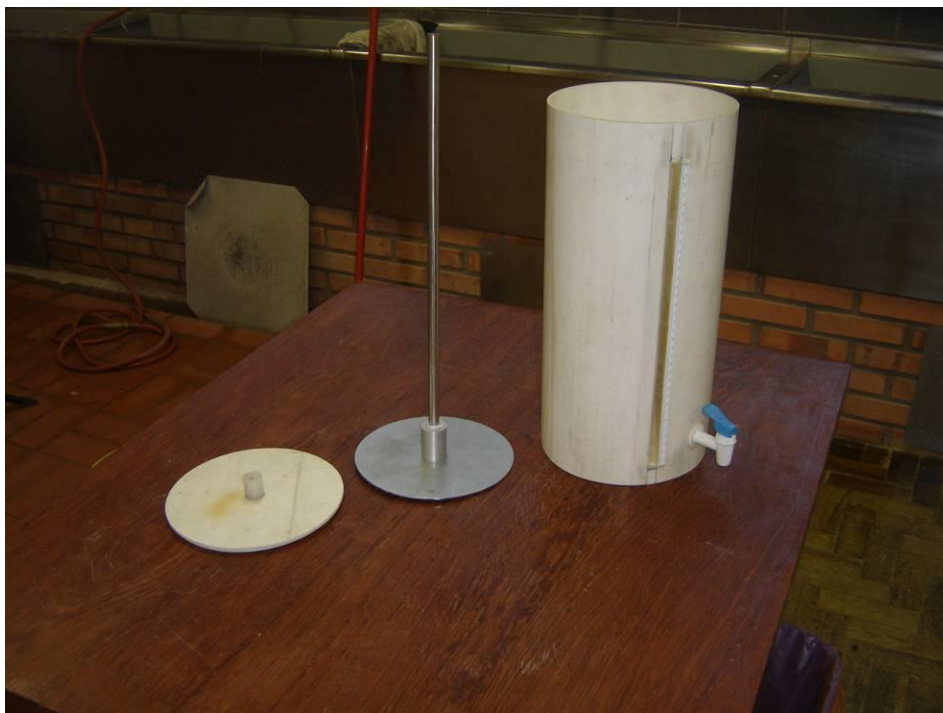


Figura 17: equipamento desmontado



Figura 18: êmbolo dentro do cilindro permitindo a leitura na régua

Uma massa definida do agregado gráudo em estudo é colocada dentro do recipiente de PVC. Em seguida os grãos do agregado são acomodados manualmente de maneira a que a superfície do agregado posicionada apresente-se uniforme. Em seguida é colocado o êmbolo e com pequenos movimentos que não caracterizem um processo de compactação é garantida a horizontalidade da placa metálica, verificada com o auxílio do nível de bolha.



Estando assim posicionado o êmbolo, é possível realizar a leitura da altura ocupada pelo agregado no recipiente, através da régua, tendo como referência a visualização da posição do êmbolo na janela vertical do recipiente. Feita a leitura, o êmbolo é removido e o conjunto é levado a uma balança. Anotada a massa do conjunto é colocada água no recipiente até a altura lida na régua, sendo usada a torneira para remover água, garantindo o atingimento da marca lida anteriormente. Por diferença de massa é possível avaliar o volume de vazios do agregado.

O procedimento descrito serve igualmente para determinar o melhor proporcionamento entre agregados graúdos. Parte-se de uma determinada massa de um agregado e vão sendo feitas substituições desse por outro agregado, e medido o volume de vazios por diferença de massa. Os diferentes volumes determinados são expressos graficamente em função da percentagem de substituição, permitindo que seja traçada uma curva que permitirá a estimativa da percentagem de substituição de um agregado pelo outro que conduza ao menor volume de vazios, sendo este proporcionamento tomado como a melhor mistura possível de ser obtida com os agregados considerados.

Se não houver disponibilidade de balança, o volume de vazios pode ser obtido a partir do emprego de uma proveta graduada e calibrada, sendo avaliada a diferença no volume de água originalmente vertido para dentro do recipiente e o volume de água drenado até que o nível da água dentro do recipiente corresponda à leitura feita na régua.

Conhecido, então, o suposto volume de argamassa, necessário para o preenchimento dos vazios do agregado, pode ser procedida sua conversão em massa a partir do conhecimento de um valor que represente a massa específica da argamassa constituída por cimento e areia.

Como já citado anteriormente, a massa específica do concreto pode variar com grande amplitude em função da grande variação existente entre as massas específicas dos agregados de diferentes naturezas mineralógicas.

Já a areia natural pode variar quanto à forma do grão ou ao grau de retrabalho conforme informa Recena (1994), mas em sendo composta eminentemente por grãos de quartzo, sua massa específica apresentará grande homogeneidade.

A variação esperada nos valores da massa específica da argamassa estará vinculada mais às variações na proporção entre cimento e areia, ou seja, no traço da argamassa, do que às variações da massa específica dos diferentes tipos de cimento.



#### 4.2.3.1 Estimativa da massa específica da argamassa em concretos

Essa estimativa foi feita a partir de um estudo desenvolvido no campo teórico e representa um valor médio, calculado a partir da consideração de valores extremos, como a seguir é apresentado. Os materiais considerados na simulação representam limites extremos dentre os valores pesquisados nos relatórios de dosagens experimentais realizadas pela CIENTEC, e que constituem registros históricos.

Os valores apresentados como limites para teor de argamassa, teor de água sobre o total de materiais secos e para os traços foram obtidos do banco de dados referente a dosagens experimentais realizadas na CIENTEC.

- a) massas específicas dos materiais considerados na estimativa, conforme tabela 28;

Tabela 28: massa específica dos materiais considerados no estudo

Material	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	
	Mínima	Máxima
Cimento	2,75	3,10
Areia	2,59	2,66
Brita	2,54	3,10

- b) traços (em massa) de concreto tomados como limites usuais dentro do campo dos concretos para fins estruturais;  
 -traço forte.....1:4,00,  
 -traço fraco.....1:7,00,
- c) teores de argamassa;  
 -mínimo.....48%,  
 -máximo.....55%,
- d) teores de água sobre o total de materiais secos;  
 -baixo.....8,50%,  
 -alto.....9,50%.

Embora o estudo objetivasse a estimativa de um valor médio para a massa específica da argamassa empregada na composição de concretos, são igualmente apresentados valores para brita, tendo em vista a necessidade de estimar os consumos de cimento máximo e mínimo para os traços de concreto definidos para o estudo.

A escolha desses traços foi baseada em limites operacionais de maneira a não permitir a consideração de concretos com consumos de cimento fora dos limites usuais. Concretos para uso em estruturas, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), devem apresentar uma resistência característica à compressão mínima de 20 MPa, o que definiu o traço fraco.

O limite superior, correspondente ao traço forte, foi estimado pela definição de um consumo de cimento que não caracterizasse o tangenciamento do campo dos concretos de alta resistência.

A composição otimizada dos materiais considerados permite estimar ser o consumo de cimento mínimo aquele obtido a partir do emprego do traço fraco, cimento, areia e brita de menor massa específica e o mais elevado teor de água sobre o total de materiais secos, nesse caso independentemente do teor de argamassa considerado, segundo a simulação feita. No outro extremo o valor limite superior pode ser verificado considerando, ao contrário, o traço forte, os valores de massa específica mais elevados e, nesse caso, o teor de argamassa de 48%.

Dessa maneira, foram obtidos os valores de consumo de cimento de 259 kg/m<sup>3</sup> e 473 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, representando os limites superior e inferior do intervalo considerado.

O valor médio da massa específica da argamassa foi obtido a partir dos valores calculados considerando todas as composições possíveis entre traços, cimentos, areias, teores de argamassa e percentagem de água sobre o total de materiais secos.

A título de exemplo é apresentado o cálculo da massa específica da argamassa correspondente ao traço 1:4,00, em tese produzido com cimento de massa específica 2,75 kg/dm<sup>3</sup>, areia com massa específica de 2,66 kg/dm<sup>3</sup>, teor de água sobre o total de materiais secos de 9,50% e teor de argamassa de 55%.

Assim é possível obter conforme as equações 21 e 22.

a) desdobramento do traço;

$$\frac{\alpha}{100} = \frac{(1+a)}{(1+m)}, \text{ então } \frac{55}{100} = \frac{(1+a)}{(1+m)}; 0,55 = \frac{(1+a)}{5,00} \text{ logo } a = 1,75 \quad (\text{equação 21})$$

$$H = 9,50\% ; a/c = \left( \frac{9,50}{100} \right) \cdot (1 + m), \text{ onde } a/c = 0,095 \cdot 5,00 \text{ logo } a/c = 0,475 \quad (\text{equação 22})$$

b) cálculo do volume absoluto de argamassa, apresentado na equação 23.

$$V = \left( \frac{1kg}{2,75 kg/dm^3} \right) + \left( \frac{1,75kg}{2,66 kg/dm^3} \right) + a/c = 1,496 dm^3 \quad (\text{equação 23})$$

c) cálculo da massa de argamassa correspondente ao traço unitário;

$$M_{arg} = 1,00kg + 1,75kg + 0,475kg = 3,225kg \quad (\text{equação 24})$$

d) cálculo da massa específica da argamassa.

$$M_{esp.da arg.} = \frac{M_{arg}}{V_{arg}} \text{ ou } \frac{3,225kg}{1,496 dm^3} = 2,155 kg/dm^3 \cong 2,16 \frac{kg}{dm^3} \quad (\text{equação 25})$$

Dessa maneira foi possível calcular a massa específica para a argamassa de um concreto a partir da consideração das 32 alternativas possíveis, tendo sido obtidos os seguintes parâmetros:

Massa específica média = 2,16 kg/dm<sup>3</sup>;  
 Desvio padrão .....= 0,05 kg/dm<sup>3</sup>;  
 Valor máximo.....= 2,26 kg/dm<sup>3</sup>;  
 Valor mínimo.....= 2,07 kg/dm<sup>3</sup>.

#### 4.2.3.2 Estimativa do fator de correção para o teor de argamassa

Para estimativa do fator de correção a ser aplicado sobre o teor de argamassa calculado a partir do volume de vazios do agregado graúdo foram considerados os teores de argamassa empregados em dosagens experimentais de concreto realizadas pela CIENTEC a partir do

ano de 2004. Destes, foram aproveitados aqueles definidos em procedimentos que envolveram apenas uma areia e um agregado graúdo. A consideração de misturas de agregados graúdos estabeleceria a consideração de uma nova variável, qual seja o método empregado para definição do proporcionamento entre os diferentes agregados graúdos.

O valor do fator de correção em cada situação foi calculado com base no teor de argamassa obtido para o volume de vazios do agregado graúdo (básico) e no teor de argamassa efetivamente empregado em cada dosagem (real). O fator de correção representa o quociente entre o valor real e o valor básico. O valor teórico representa o produto da multiplicação do valor básico pelo fator de correção que, por sua vez, é o valor obtido pelo cálculo da média dos fatores de correção individuais.

A admissão simples desse valor como referência considera as diversas interpretações subjetivas estabelecidas em cada dosagem, sem discriminar a utilização prevista para o concreto estudado, sendo levado em conta, dessa maneira, concretos para emprego convencional e para emprego por bombeamento.

Os valores considerados estão apresentados na tabela 29.

Tabela 29: fator de correção individuais do teor de argamassa

Natureza da rocha	Graduação da brita	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	Teor de argamassa (%)			Fator de correção
				Básico	Real	Teórico	
G	1	2,61	1,33	44	52	55	1,18
B	1	2,95	1,53	40	49	50	1,22
G	1	2,64	1,39	42	54	53	1,28
B	1	2,68	1,36	44	55	54	1,25
C	1	2,72	1,45	41	52	51	1,27
B	2	2,82	1,43	43	53	53	1,23
B	2	2,58	1,32	44	55	55	1,25
B	2	2,94	1,45	43	50	53	1,16
B	2	2,81	1,45	42	52	52	1,24
B	2	2,89	1,48	42	51	52	1,21
B	1	2,50	1,26	46	59	57	1,28
B	1	2,63	1,29	46	55	57	1,20
B	1	2,93	1,40	45	58	55	1,29
B	1	2,79	1,43	42	56	53	1,33
B	1	2,74	1,36	44	51	55	1,16
B	1	2,76	1,39	44	52	54	1,18
B	1	2,66	1,39	43	52	53	1,21
B	1	2,94	1,56	39	50	49	1,28
B	1	2,82	1,56	38	50	47	1,32
B	1	2,72	1,36	44	52	55	1,18
B	0	2,77	1,26	48	58	60	1,21
B	0	2,85	1,35	46	60	57	1,30
B	1	2,75	1,40	43	53	53	1,23
G	0	2,61	1,32	45	57	55	1,27

Obs.: 1) B = rocha de natureza basáltica;

G = rocha de natureza granítica,

C = rocha de natureza calcária,

2) graduação 1 em geral corresponde a um agregado de dimensão máxima 19 mm;

3) graduação 2 em geral corresponde a um agregado de dimensão máxima característica 25 mm ou 32 mm;

4) graduação 0 em geral corresponde a um agregado de dimensão máxima 9,5 mm.

O tratamento dado aos valores apresentados na tabela 29 conduziu aos seguintes parâmetros:

Valor médio = 1,24; desvio padrão = 0,05; valor máximo = 1,33; valor mínimo = 1,16.

O valor médio de 1,24, obtido como fator de correção, é superior ao valor originalmente adotado no **Método Alemão Simplificado** de 1,20 (RECENA, 2007)

A experiência obtida na CIENTEC pela aplicação do método informa ser mais apropriado o valor de 1,24, provavelmente em função de, à época em que o chamado **Método Alemão** foi concebido, o concreto não ser ainda bombeado.

#### 4.2.4 Outras aplicações para o equipamento desenvolvido

O equipamento desenvolvido também pode ser empregado para determinar a melhor mistura entre agregados graúdos a partir da medição do volume de cada composição, tendo como referência uma mesma massa, como será mais bem detalhado adiante quando da apresentação da parte experimental do presente trabalho.

É possível igualmente utilizar o equipamento para determinar tanto a massa específica de agregados graúdos como sua massa unitária, a partir de uma massa conhecida do agregado em estudo e da curva de calibração do equipamento, já que nesse caso o conhecimento do volume correspondente à leitura da régua auxiliar deve ser preciso.

A calibração do equipamento empregado na pesquisa foi feita em uma balança com precisão de um grama a partir da medição da massa de água colocada em etapas no equipamento, sendo, então, a leitura na régua auxiliar relacionada com a massa de água colocada no equipamento. A conversão de massa em volume de água foi feita a partir da consideração de ser 1,00 a densidade da água.

Assim, uma medida é feita durante o enchimento do equipamento e outra durante seu esvaziamento realizado com o auxílio da torneira.

Para o equipamento em questão, foram obtidos os dados apresentados na tabela 30 que segue:

Tabela 30: calibração do equipamento para determinação do teor de argamassa

Massa de água (g)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
Leitura na régua (cm)	3,5	7,0	10,6	14,0	17,5	20,1	24,4	27,7	31,2	34,6

A representação gráfica da relação estabelecida entre os parâmetros relacionados na tabela 30 pode ser visualizada na figura 19.

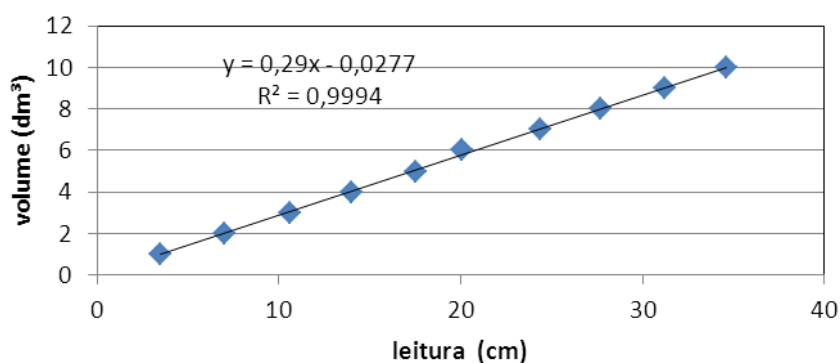


Figura 19: representação gráfica da calibração do equipamento para determinação do teor de argamassa

Nas determinações feitas no laboratório da CIENTEC, tem sido empregada uma massa de brita de 10000g. A colocação do êmbolo permite ler na régua uma altura que corresponde ao volume obtido pela equação apresentada na figura.19. A massa unitária será o quociente entre a massa de brita e o volume calculado.

Para a determinação da massa específica é necessário conhecer:

- a tara, que corresponde à massa do equipamento com água até uma determinada altura identificada na régua auxiliar;
- uma pré-determinada massa de brita;
- e a massa do conjunto representada pelo equipamento com a brita e água até a determinada altura indicada na régua auxiliar.

A diferença entre a tara mais a massa de brita e a massa do conjunto será o volume absoluto da massa de brita considerada, sendo, então, a massa específica o quociente entre a massa de brita considerada e essa diferença, ou seja o volume absoluto de brita.

É possível em uma mesma operação determinar para uma brita a massa unitária, a massa específica e o teor de argamassa a ser adotado no concreto.

Como em todo método de ensaio, a precisão do resultado estará condicionada ao cuidado do operador e à precisão dos equipamentos, mas os resultados que estão sendo obtidos em laboratório colocam a metodologia apresentada como uma alternativa a ser considerada.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido de maneira a apresentar passo a passo o roteiro seguido para comprovar o princípio no qual se baseia o método proposto, qual seja o de haver um traço dentro de uma família que permite a obtenção de um determinado abatimento pelo tronco de cone com o menor teor de água sobre o total de materiais secos, sendo esse traço tomado como referência para substituição de cimento por cinza, alterando o rendimento do aglomerante e mantendo o mesmo volume de pasta.

Como os traços admitidos como integrantes de uma família são obtidos a partir do tratamento de parâmetros de dosagem definidos no estudo de um concreto com mesmos materiais, mesmo proporcionamento entre os agregados e mesmo teor de argamassa, diferenças no abatimento pelo tronco de cone a partir do emprego de um mesmo teor de água sobre o total de materiais secos somente podem ser atribuídas aos diferentes volumes de pasta verificados nos diferentes traços.

Então, é possível afirmar que, para um mesmo teor de água sobre o total de materiais secos, haverá um traço dentro de uma família que apresentará o mais elevado abatimento pelo tronco de cone por apresentar mais mobilidade como resposta à ação da força da gravidade. Em outras palavras, é possível admitir haver um volume ótimo de pasta, definido por um traço, em que o abatimento pelo tronco de cone especificado poderá ser obtido com um menor teor de água sobre o total de materiais secos.

Sabidamente existe uma variação significativa no valor do teor de água sobre o total de materiais secos, em função dos diferentes comportamentos reológicos, entre os traços de uma família definida pelos traços empregados no estudo de dosagem. Considerando que essas diferenças estão relacionadas com o volume de pasta, a única maneira de atender a todas as resistências requeridas de um estudo de dosagem com traços otimizados seria empregando o mesmo volume de pasta em todos os traços.

Um mesmo traço somente poderia apresentar concretos com resistências diferentes se fosse possível alterar o rendimento do cimento, ou se fosse possível empregar cimentos com diferentes resistências à compressão.



Diante do exposto, o princípio básico do método proposto reside na definição do traço de melhor resposta reológica, sendo as diferentes resistências obtidas por alterações no rendimento do cimento, obtido pela alteração na percentagem de substituição de cimento por cinza.

O traço de melhor resposta reológica, definido com o emprego apenas cimento, passa a representar o teto de resistência possível de ser obtido. A partir dessa definição poderão ser obtidos tantos traços quantos necessários a partir da alteração do rendimento do cimento pela substituição parcial por cinza volante. As diferentes percentagens de substituição definirão aglomerantes com características diferentes, mas o traço será o mesmo ou aproximadamente o mesmo.

Um trabalho dessa natureza que se propõe a apresentar uma alternativa para os métodos tradicionais de dosagem de concreto somente terá valor se efetivamente representar uma evolução e não apenas mais uma alternativa, meramente mais um método de dosagem.

Por evolução é possível entender mais rapidez no desenvolvimento dos procedimentos de dosagem, mais rapidez no cálculo de traços ou aumento da concisão dos resultados, mas, sem qualquer dúvida, a mais significativa evolução terá sido alcançada se a metodologia desenvolvida conduzir a obtenção de traços que atendam a premissas de dosagem com menor consumo de cimento e ainda se for possível incorporar algum resíduo o que representará além de economia, preservação do meio ambiente e aumento da sustentabilidade na construção civil.

Para estabelecimento de um parâmetro de comparação foi desenvolvida uma dosagem clássica de acordo com o método usualmente empregado pela CIENTEC.

Os traços experimentais no desenvolvimento de uma dosagem são definidos de forma a garantir a obtenção de uma amplitude de resistência capaz de permitir a interpolação do traço que determinará o atingimento da resistência requerida. Quanto maior a amplitude das resistências obtidas com os traços experimentais, maior a quantidade de traços passíveis de serem calculados.

Os traços calculados a partir dessa dosagem de referência foram considerados padrão para a comparação do rendimento dos traços calculados pelo procedimento proposto, sendo o elemento de comparação o consumo de cimento.

A reprodução dos traços experimentais no desenvolvimento dessa dosagem convencional permitiu a identificação do traço de melhor comportamento reológico, sendo este tomado

como referência. Assim, a reprodução de diferentes traços de uma mesma família para identificação do volume ótimo de pasta faz parte integrante do procedimento proposto.

A continuidade do estudo contemplou a avaliação do efeito da adição de cinza volante aos traços empregados, de maneira que fosse mantida a mesma proporção entre cimento e agregados. As percentagens de adição variaram de maneira crescente, sendo maior no traço originalmente mais fraco, de menor consumo de cimento. Esse procedimento visou à exposição do ganho de resistência possível de ser obtido pela simples adição de uma cinza volante a um concreto, através da reação pozolânica.

A segunda etapa consistiu do desenvolvimento de estudos, de acordo com o método em proposição, a partir da substituição de cimento por cinza volante no traço de melhor reologia, realizada em massa, com e sem correção do volume.

A alternativa que considera correção de volume fideliza a atividade com o conceito proposto na medida em que mantém o volume de pasta, já que a massa específica da cinza é menor que a do cimento. Em contrapartida não corrigir o volume representa uma grande simplificação tanto na rotina de produção de concreto como na elaboração de sua dosagem.

A interpretação dos resultados obtidos com os dois procedimentos, com e sem correção de volume da cinza, visou estabelecer padrões de comparação com o intuito de avaliar a necessidade, em termos práticos, de proceder a essa correção, na tentativa de evidenciar que as simplificações que serão propostas ao final do trabalho não representam comprometimento à qualidade do concreto ou à sua economia.

Em sua concepção original o estudo previa o emprego de apenas uma cinza, escolhida por apresentar uma superfície específica média dentre as cinzas disponíveis nos Laboratórios de Materiais de Construção Civil da CIENTEC e da PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Após a observação dos resultados obtidos na primeira etapa com o emprego da cinza escolhida originalmente, para dotar o estudo de maior amplitude, foram incorporadas duas outras cinzas uma de mais elevada superfície específica e outra, de menor superfície específica.

Um estudo complementar foi desenvolvido com a cinza de mais elevada superfície específica, segundo a mesma metodologia, mas considerando substituições negativas, ou seja, adições, na tentativa de ampliar o universo de traços possíveis de serem calculados

incluindo aqueles destinados à obtenção de valores de resistência mais elevados que o obtido com o traço padrão, estudado apenas com cimento.

As cinzas disponíveis nos citados laboratórios foram empregadas em estudos de dosagem podendo ser consideradas, então, amostras que circularam no mercado.

## 5.1 MATERIAIS EMPREGADOS NO ESTUDO

Os materiais empregados no estudo foram submetidos a ensaios visando a caracterização física, mecânica e química, no cimento e nas cinzas, de maneira a possibilitar uma avaliação da sua qualidade e permitir a comparação dos resultados obtidos.

### 5.1.1 Cimento

O cimento empregado no estudo foi do tipo CP V, tendo a opção sido feita por esse tipo de cimento por não apresentar qualquer adição além de calcário moído. A suposição de que um cimento assim produzido possa apresentar maior homogeneidade em suas características permitirá a reprodução do estudo apresentado nesse trabalho com maior fidelidade, já que cimentos fabricados com adições ativas tem seu comportamento influenciado pelas características da adição e pela percentagem de substituição.

#### 5.1.1.1 Caracterização química

A decomposição do cimento em óxidos foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios-X, no Laboratório de Análises Inorgânicas do Departamento de Química da CIENTEC, sendo a determinação da perda ao fogo realizada segundo a NBR NM 18 (ABNT, 2004) e o resíduo insolúvel, segundo a NBR NM 22 (ABNT, 2004) pelo Laboratório de Combustíveis do mesmo Departamento de Química da CIENTEC, estando os resultados apresentados na tabela 31.

Tabela 31: caracterização química do cimento empregado no estudo

Determinação	Resultado (% em massa)
Óxido de cálcio (CaO)	61,92
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	17,83
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,36
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,80
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,60
Óxido de magnésio (MgO)	5,10
Óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	3,06
Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,26
Perda ao fogo (1000°C)	4,07
Resíduo insolúvel	1,50

#### 5.1.1.2 Caracterização física e mecânica

Os ensaios realizados visando caracterizar física e mecanicamente a amostra empregada no estudo foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da CIENTEC.

A massa específica foi determinada segundo a NBR NM 23 (ABNT, 1998), a superfície específica, segundo a NBR NM 76 (ABNT, 1998) e a resistência à compressão simples, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996).

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 32.

Tabela 32: parâmetros físico mecânicos do cimento empregado no estudo

Determinação	Resultado	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	22,0
	3 dias	33,3
	7 dias	34,9
	28 dias	38,9
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,08	
Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)	4490	

### 5.1.1.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura

O cimento foi observado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), conforme registro apresentado pela figura 23, com o intuito de permitir a visualização dos grão e permitir a comparação direta com os grãos das cinzas volantes empregadas no estudo.

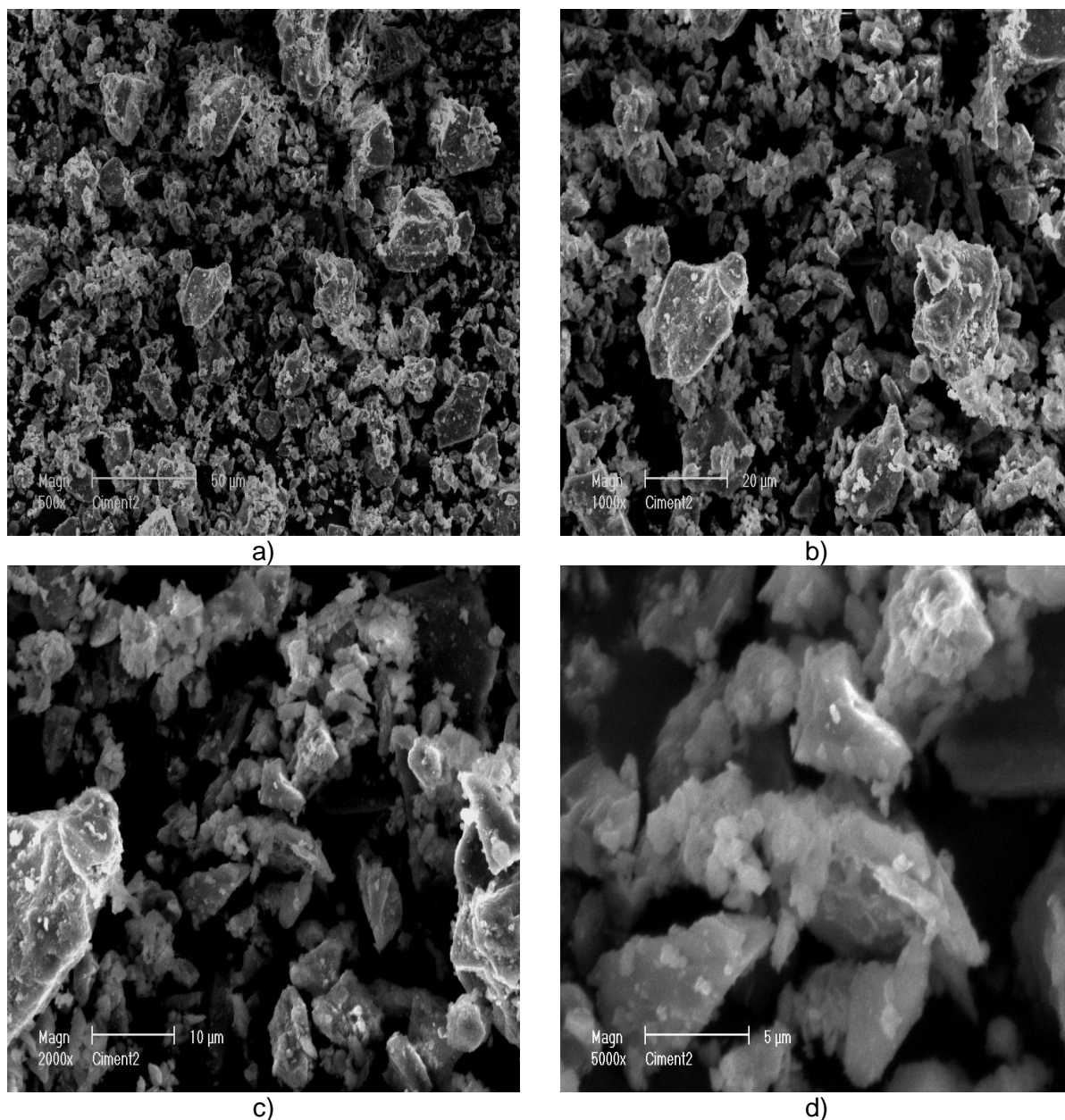


Figura 23: cimento empregado no estudo visto ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes

## 5.1.2 Agregados

Os agregados utilizados no presente trabalho foram obtidos no mercado da grande Porto Alegre, sendo largamente empregados na produção de concreto e reconhecidamente de boa qualidade.

A areia fina é procedente do município de Osório - RS, extraída em jazidas localizadas à beira de lagoas costeiras. A areia média é obtida por dragagem direta do leito do rio Jacuí, nos municípios de Charqueadas e São Jerônimo - RS.

Os agregados graúdos são originários de jazida localizada no Município de Gravataí - RS, identificados comercialmente como **Brita 0** e **Brita 1**. A rocha matriz é identificada pelo fornecedor como sendo Diabásio. Ambas as britas sofrem processo de beneficiamento em equipamento modificador de forma com o intuito de reduzir a lamelaridade dos grãos.

Além do processo de modificação da forma do grão, nas britas, os agregados não sofreram qualquer outro beneficiamento.

### 5.1.2.1 Caracterização física

#### 5.1.2.1.1 Massa específica e massa unitária

A massa específica foi determinada pelo método do picnômetro e a massa unitária de acordo com o recomendado pela NBR NM 52 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 33:

Tabela 33: massa específica e massa unitária

Agregado	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )
Areia fina	2,64	1,43
Areia média	2,62	1,53
Brita 0	3,08	1,65
Brita 1	3,08	1,66

#### 5.1.2.1.2 Material fino que passa através da peneira 75 $\mu$ m, por lavagem.

A determinação do material fino passante através da peneira 75  $\mu$ m, por lavagem foi realizada segundo a NBR NM 46 (ABNT, 2003) tendo sido obtidos os resultados a seguir apresentados na tabela 34.

Tabela 34: material fino passante na peneira de 75  $\mu\text{m}$ , pôr lavagem

Agregado	Resultado (%)
Areia fina	1,10
Areia média	1,60
Brita 0	0,86
Brita 1	1,00

#### 5.1.2.1.3 Composição granulométrica

A determinação da composição granulométrica foi realizada de acordo com o recomendado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), tendo sido obtidos os resultados apresentados nas tabelas 35 e 36.

Tabela 35: distribuição granulométrica das areias

Peneiras abertura	Massa retida (kg)		% em massa			
			Retida		Acumulada	
	Areia fina	Areia média	Areia fina	Areia média	Areia fina	Areia média
4,75 mm		0,006		1		1
2,36 mm	0,001	0,044	0	4	0	5
1,18 mm	0,002	0,077	0	8	0	13
600 $\mu\text{m}$	0,010	0,183	1	18	1	31
300 $\mu\text{m}$	0,071	0,539	7	54	8	85
150 $\mu\text{m}$	0,792	0,129	79	13	87	98
fundo	0,123	0,022	13	2	100-	100-
total	0,999	1,000	100	100	96	233
Módulo de finura					0,96	2,33
Dimensão máxima característica					600 $\mu\text{m}$	2,36 mm



Tabela 36: distribuição granulométrica das britas

Peneiras abertura	Massa retida (kg)		% em massa			
			Retida		Acumulada	
	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1
19 mm	-	0,292	-	3	-	3
12,5 mm	-	6,975	-	70	-	73-
9,5 mm	0,014	1,982	0	20	0	93
6,3 mm	1,552	0,707	31	7	31-	100-
4,75 mm	1,731	0,005	35	0	66	100
2,36 mm	1,613		32	0	98	100
1,18 mm	0,050		0	0	99	100
600 µm			0	0	99	100
300 µm			0	0	99	100
150 µm			0	0	99	100
fundo	0,040	0,040	1	2	100-	100-
total	5,000	10,001	100	100	560	696
Módulo de finura					5,60	6,96
Dimensão máxima característica					9,5 mm	19 mm

#### 5.1.2.1.4 Teor de impurezas orgânicas nas areias

A determinação foi realizada de acordo com a NBR NM 49 (ABNT, 2001), tendo sido percebida nas soluções obtidas com as amostras das duas areias uma coloração mais clara que a coloração da solução padrão.

#### 5.1.3 Cinza volante

É sabido existir diferentes características em cinzas volantes de diferentes origens ou de uma mesma fonte, nem tanto pela sua constituição química, mais pelas diferenças que podem existir na forma do grão e, principalmente, na superfície específica, estando essas diferenças relacionadas com as características do carvão e com o regime de queima.

O emprego de uma cinza volante de excelente desempenho poderia, ao produzir um concreto de mais elevado rendimento, sugerir ser este decorrente da técnica de dosagem, permitindo ser feita uma avaliação tendenciosa da eficácia do método proposto.

Inicialmente foi pensado desenvolver o trabalho a partir do emprego de uma cinza que pudesse caracterizar o material médio, não representando a melhor nem a pior alternativa.



No decorrer do trabalho foi levantada a questão sobre a possibilidade de o método proposto ter uma aplicação restrita condicionada pelas características da cinza empregada, o que determinou a consideração de outras duas amostras de cinza. Assim, ao fim e ao cabo foram empregadas três diferentes cinzas volantes, duas com superfícies específicas apresentando valores extremos, fixando assim a amplitude da variação esperada no desempenho do concreto, e outra cuja superfície específica pudesse caracterizar um valor médio. Como essa decisão foi tomada no decorrer do desenvolvimento da fase prática do trabalho, algumas experiências foram desenvolvidas com apenas um tipo de cinza, aquela originalmente escolhida.

A escolha das cinzas foi procedida dentre as amostras existentes no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Departamento de Materiais de Construção Civil (DEMACC) da CIENTEC e no Laboratório de Materiais de Construção Civil da pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), recebidas em diferentes oportunidades para a realização de dosagens experimentais de concreto, num total de sete amostras, mediante a comparação dos valores de superfície específica determinados pelo permeabilímetro de Blaine segundo a NBR NM 76 (ABNT, 1998).

Foi estabelecido esse parâmetro como elemento de comparação por ser a reação pozolânica uma reação de superfície, estando seu rendimento associado diretamente à superfície específica, o que pode ser evidenciado no desenvolvimento do trabalho.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 37, não havendo identificação das cinzas que pudesse associá-las à fonte produtora.

Tabela 37: massa específica e superfície específica das cinzas volantes empregadas no estudo

Amostra	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)
1	1,92	2500
2	2,30	4195
3	1,88	2750
4	1,88	2680
5	1,94	2825
6	2,11	3825
7	2,18	3140

A média dos valores da superfície específica das amostras consideradas foi de 3131 cm<sup>2</sup>/g, sendo o desvio relativo de cada valor individual em relação ao valor médio apresentado na tabela 38:

Tabela 38: desvio relativo máximo da superfície específica das amostras de cinza em relação ao valor médio amostral

Amostra	1	2	3	4	5	6	7
Desvio relativo (%)	20,2	34,0	12,7	14,4	9,8	22,2	0,29

Conforme a premissa inicial, foi escolhida para o desenvolvimento do estudo a cinza identificada pelo número 7 por apresentar o menor desvio relativo em relação ao valor médio, podendo ser tomada como a própria média.

Como já citado anteriormente, durante o decorrer do estudo duas outras cinzas foram utilizadas, sendo sua escolha, diante do objetivo de sua inclusão, determinada por apresentarem valores extremos de superfície específica dentro da amostra.

Esse procedimento foi adotado, tendo em vista tratar-se a cinza volante de um resíduo industrial com características condicionadas pela forma de obtenção, principalmente com relação à forma de queima, à eficiência do queimador e a temperatura.

Paralelamente à variação vinculada ao processo de queima devem ser consideradas as variações existentes no carvão empregado como combustível, não sendo possível considerar cinza volante um material homogêneo que sempre apresenta um mesmo desempenho.

A substituição de uma cinza por outra, obtida por processos diferenciados de queima com o emprego de carvões de diferentes origens, na produção de concreto deve ser precedida de um estudo prévio com vistas a determinação das características físico mecânicas.

Assim, segundo o critério estabelecido, o trabalho deveria ser desenvolvido com as cinzas identificadas por amostras 1, 2 e 7, no entanto, a observação visual e tátil da amostra 1 indicou uma textura muito grosseira, sendo esta amostra desconsiderada. Assim, a amostra 1 foi substituída pela amostra 4, sendo então as três amostras empregadas no estudo aquelas identificadas pelos números 2, 4 e 7, sendo a amostra 4 caracterizada por uma superfície específica imediatamente superior àquela verificada na amostra 1, desconsiderada.

A partir da definição das três amostras, estas passaram a ser identificadas pelo valor da superfície específica com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados, sendo então definidas as cinzas 4195, 2680 e 3140, respectivamente.

### 5.1.3.1 Caracterização das cinzas

#### 5.1.3.1.1 Índice de atividade pozolânica

As cinzas escolhidas foram submetidas a ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica com o cimento empregado no estudo, segundo o recomendado pela NBR 5752 (ABNT, 1992). Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 39.

Tabela 39: índice de atividade pozolânica

Material	Massa (g)			
	Mistura A	Mistura B	Mistura C	Mistura D
Cimento	312,0	202,8	202,8	202,8
Cinza 4195	-	82,62	-	-
Cinza 3140	-	-	78,31	-
Cinza 2680	-	-	-	67,53
areia	936,0	936,0	936,0	936,0
Água (g)	160	160	170	174
I (mm)	228	220	226	222
I AP (%)	100,0	90,2	71,8	58,5

- "I" representa o índice de consistência;
- I AP representa o índice de atividade pozolânica que expressa a porcentagem da resistência obtida na mistura produzida apenas com cimento verificada na argamassa produzida com a mistura de cimento e cinza.

Os resultados indicam que apenas a cinza volante identificada como 4195 apresenta um índice de atividade superior a 75%, valor mínimo de acordo com a NBR 12653:1992.

#### 5.1.3.1.2 Análise química

Em continuidade à caracterização das amostras de cinza empregadas no estudo, estas foram submetidas à análise química, estando a composição determinada apresentada a seguir na tabela 40.

Tabela 40: análise química quantitativa das cinzas

Determinação (% em massa)	Amostra de cinza		
	4195	3140	2680
Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	58,57	61,58	66,27
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	27,14	28,54	21,02
Óxido de cálcio (CaO)	1,58	1,14	2,96
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,02	3,43	5,63
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	3,0	1,37	1,90
Óxido de magnésio (MgO)	0,73	0,35	0,79
Óxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	<0,03	<0,03	<0,03
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,25	0,09	0,16
Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	1,22	1,07	0,70
Óxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	0,29	0,30	0,20
Perda ao fogo (1000°C)	2,17	2,10	0,34

#### 5.1.3.2.3 Composição granulométrica

A distribuição granulométrica das cinzas empregadas no estudo foi determinada pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. O tamanho das partículas pode ser visualizado na tabela 41.

Tabela 41: diâmetro das partículas das cinzas

Determinação	Amostra		
	4195	3140	2680
Diâmetro a 10%	2,22	4,13	6,485
Diâmetro a 50%	13,8	31,24	40,05
Diâmetro a 90%	41,49	113,72	170,67
Diâmetro médio	18,22	50,25	66,93

A observação dos resultados apresentados na tabela 41 permite associar a superfície específica com o diâmetro médio das partículas.

#### 5.1.3.1.4 Difração de raios X

Os difratogramas qualitativos das amostras empregadas no estudo foram obtidos de ensaios realizados no Laboratório de Análises Inorgânicas da CIENTEC, por meio de um difratômetro de raios-X, marca RIGAKU, sistema D/MAX – 2100, com goniômetro *Última+ theta-theta* e detector de cintilação de NaI(Tl).

As amostras foram submetidas à varredura angular de 3° a 80°, com as seguintes condições experimentais:

- a) tubo de raios-X com ânodo de cobre;
- b) radiação  $\text{CuK}\alpha$ ;
- c) tensão de 40kV;
- d) corrente aplicada de 20 mA;
- e) velocidade de varredura de 2°/min;
- f) intervalo de leitura (passo) de 0,020°.

As figuras 20, 21 e 22 apresentam os espectros das cinzas 4195, 2680 e 3140, respectivamente.

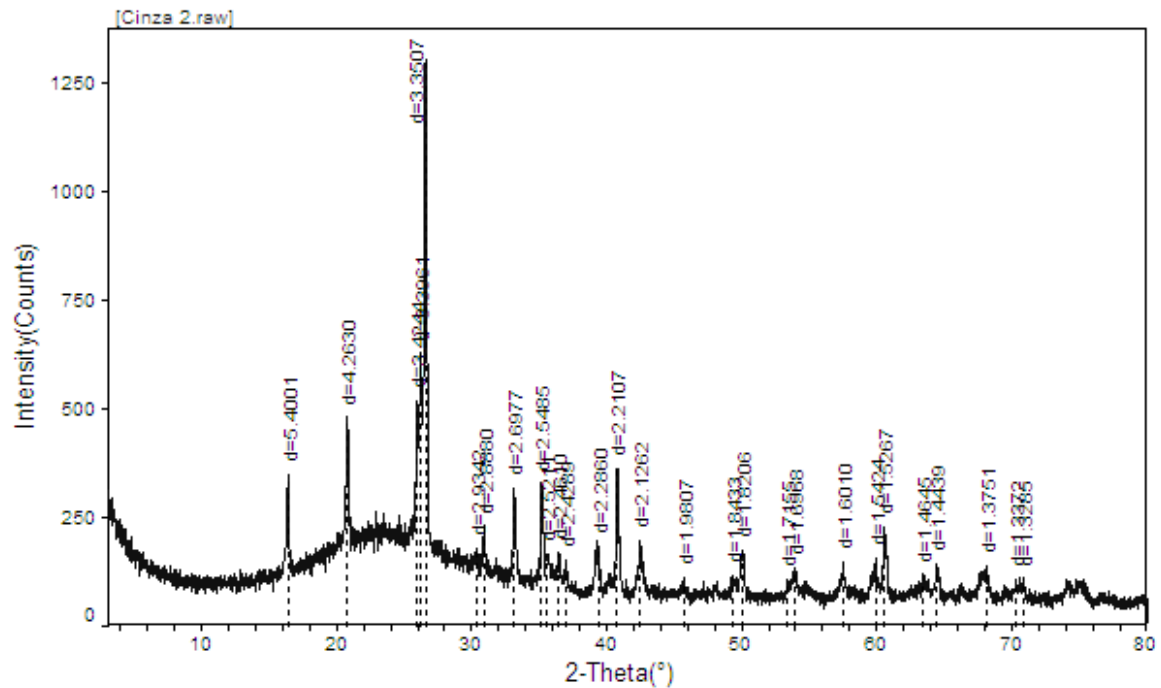


Figura 20: difratograma obtido da análise da cinza 4195.

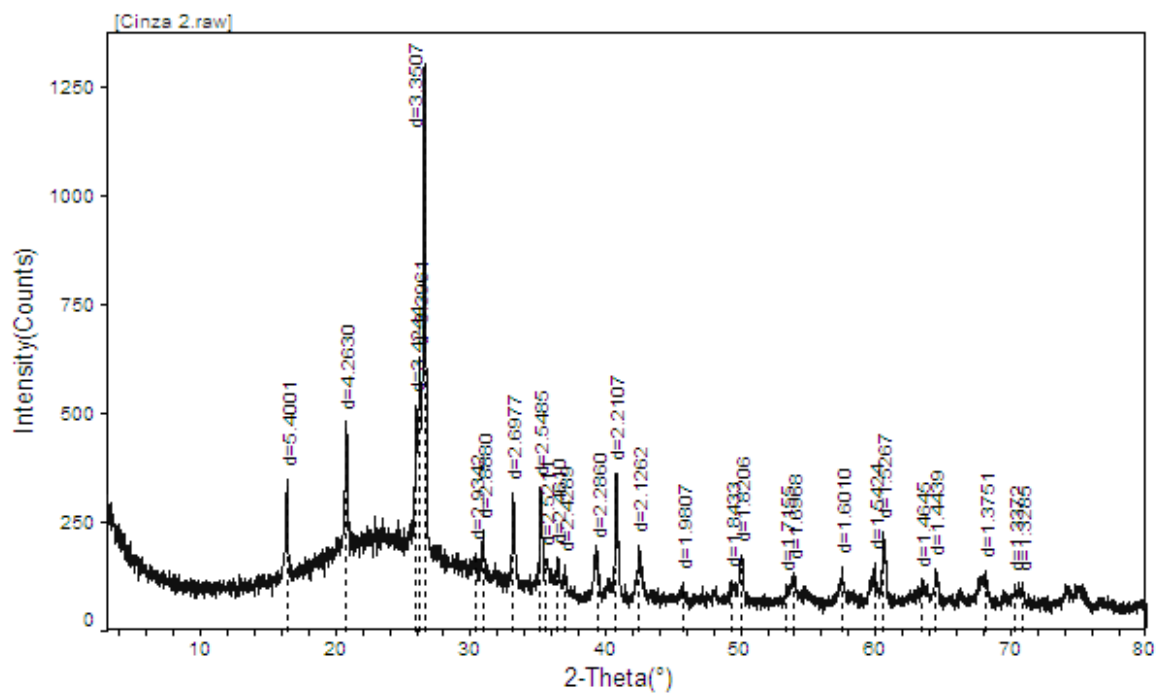


Figura 21: difratograma obtido da análise da cinza 2680.

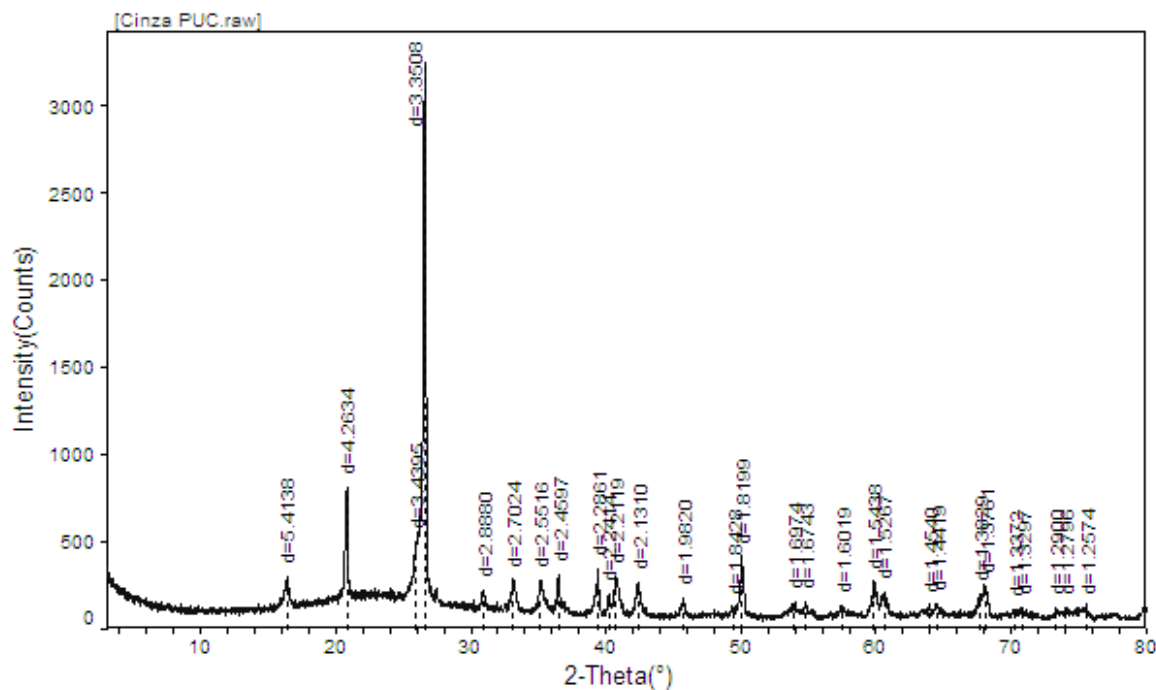


Figura 22: difratograma obtido da análise da cinza 3140.

### 5.1.3.1.5 Análise por microscopia eletrônica de varredura

Como complementação do estudo, as cinzas consideradas foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), por elétrons secundários, assim como o cimento.

As imagens apresentadas nas figuras de 24 a 26 permitem visualizar as diferentes formas dos grãos que constituem os materiais estudados.

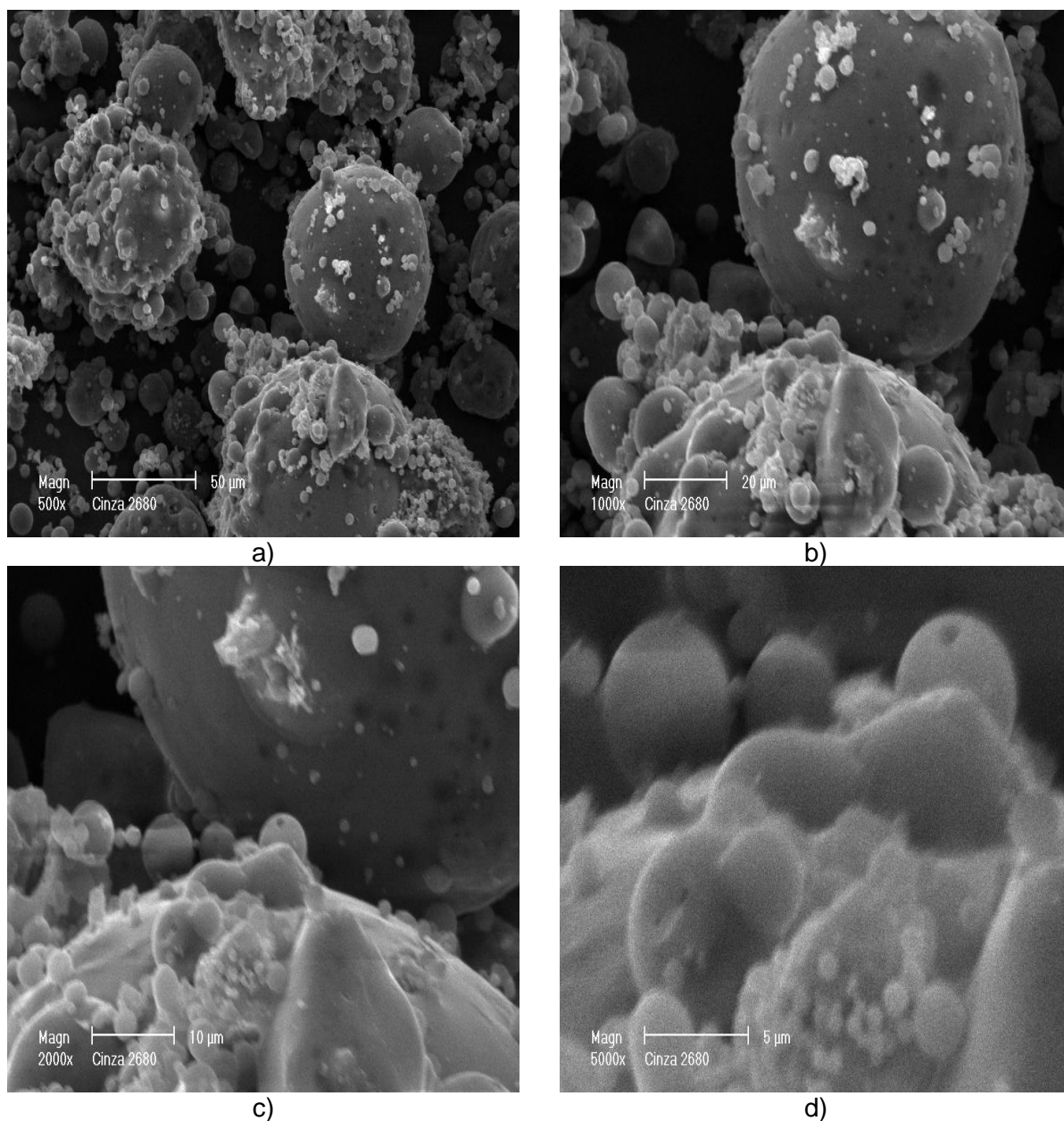


Figura 24: cinza 2680 vista ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes



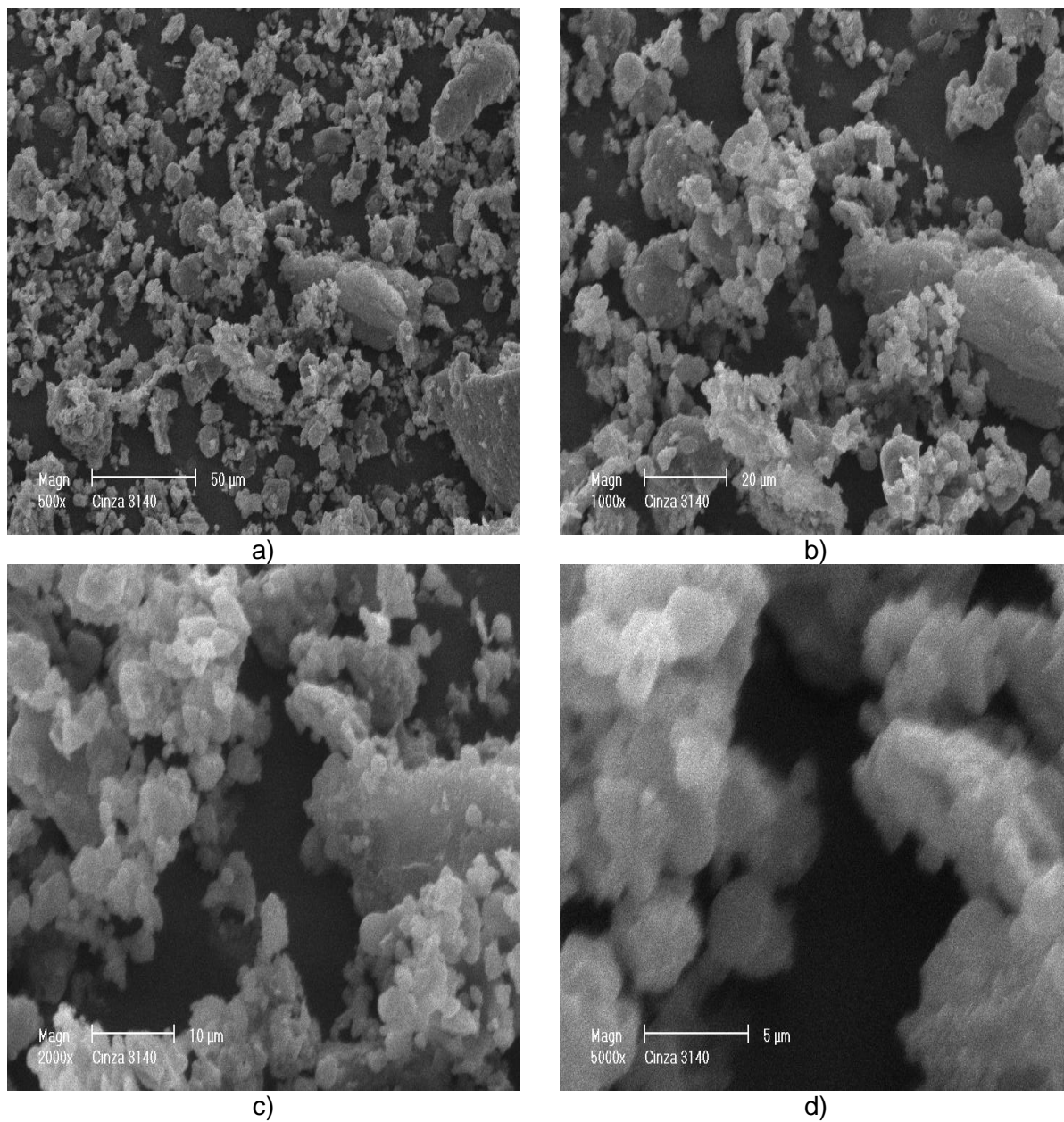


Figura 25: cinza 3140 vista ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes



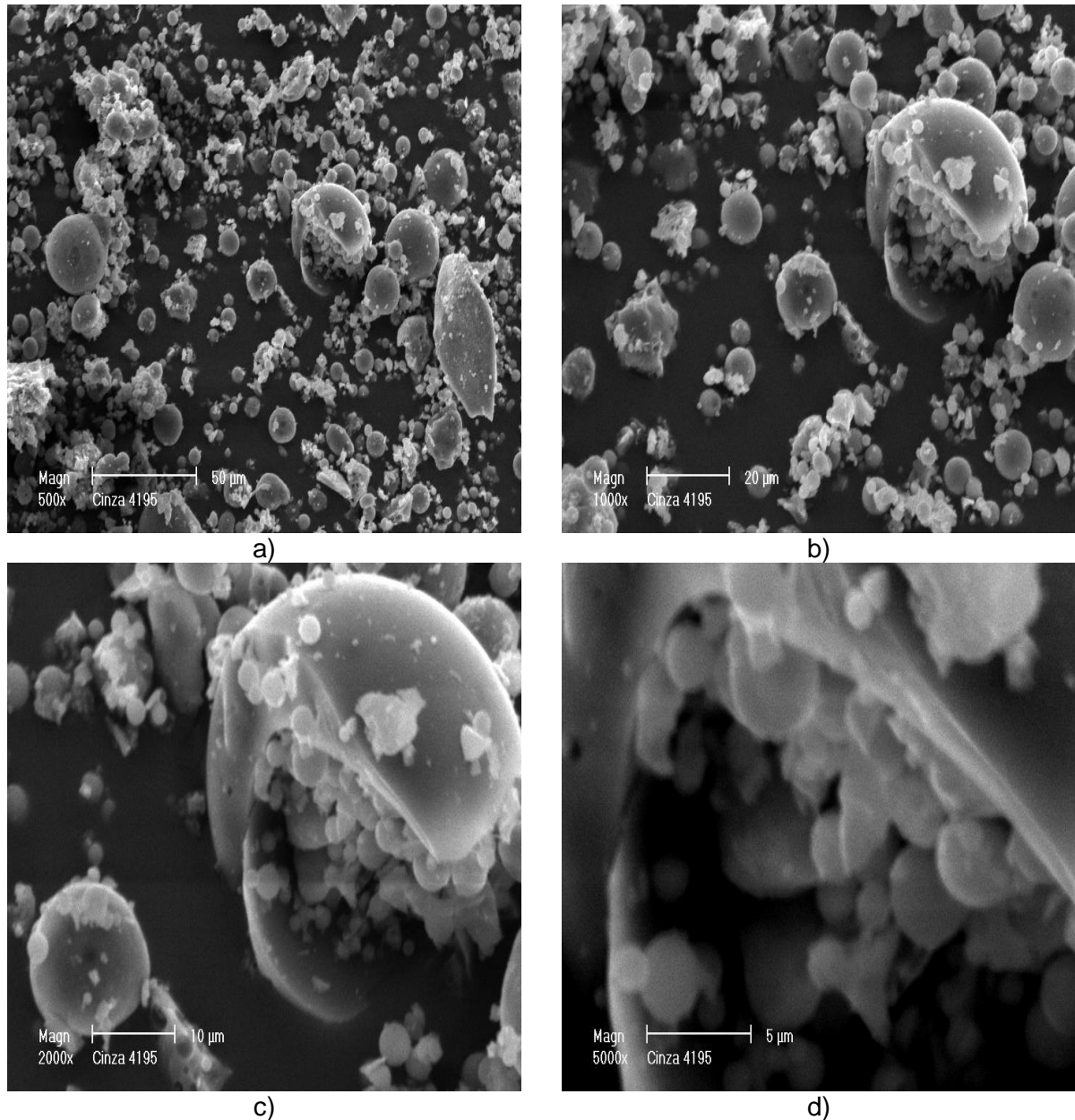


Figura 26: cinza 4195 vista ao MEV com aumentos de a) 500 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes

A observação das imagens apresentadas pelas figuras 23, 24, 25 e 26 consubstanciam a conclusão construída a partir da observação e análise dos resultados dos ensaios realizados sobre as três cinzas consideradas no estudo. Fica evidente a relação existente entre o melhor desempenho, como pozolana, com a mais elevada finura traduzida pelo menor diâmetro médio das partículas e pela mais elevada superfície específica, já que as análises químicas sugerem uma extrema similaridade entre as três cinzas consideradas no estudo.

A cinza identificada como 4195 apresenta uma morfologia granular compatível com a exemplificação proposta pela bibliografia (MEHTA e MONTEIRO, 2008; ROHDE, 2006; SILVA, 2010).

## 5.2. ESTUDO PRELIMINAR

### 5.2.1 Proporcionamento dos agregados.

Como já apresentado, foram escolhidos quatro agregados para o desenvolvimento dos concretos a serem estudados, duas areias, uma caracteristicamente fina e uma comercializada como média e duas britas de graduações comerciais **0** e **1**.

Num primeiro momento, para o estudo da influência do teor de argamassa na trabalhabilidade e na resistência mecânica, foi considerada a mistura que define um concreto na sua expressão mais simples com o emprego de apenas uma areia, uma brita, o cimento e a água. Posteriormente foram estudados concretos com a incorporação dos outros agregados para permitir a identificação das alterações decorrentes da mudança da distribuição granulométrica das misturas nas características de trabalhabilidade e resistência à compressão.

O teor de argamassa das misturas foi definido pela aplicação do método proposto no item 4.2.2.

O melhor proporcionamento entre as areias (média e fina) foi admitido como aquele que conduziu à obtenção do maior fator de adensamento, sendo este obtido pelo quociente entre a massa específica aparente da mistura das areias em diversas percentagens, definida por um volume pré-estabelecido, e a massa específica aparente da areia média, correspondentes a um volume de referência.

Assim, quantidades crescentes de areia média foram sendo substituídas por areia fina e a cada mistura o recipiente padrão era preenchido, sendo registrada a massa da areia composta. O valor considerado na estimativa do melhor proporcionamento representou a média de pelo menos três determinações.

Já a mistura ótima entre a brita **0** e a brita **1** foi obtida a partir da medição do índice de vazios de misturas em que a brita **1** foi sendo substituída por quantidades crescentes de brita **0**. O volume de vazios foi medido a partir da quantidade de água necessária para seu preenchimento, sendo a referência a medida indicada na régua graduada do equipamento descrito no item 3.2.2.

O pressuposto nessa metodologia é de que o melhor empacotamento entre os agregados conduz à mistura de menor volume de vazios e, conseqüentemente, à menor demanda de pasta.

Essa condição de contorno permite esperar serem obtidos concretos com menor consumo de cimento conforme relatam Catoia, Conceição Libório (2009). Esse conceito igualmente encontra esteio na proposta traduzida pelas curvas de **Lobo Carneiro** apresentadas por Petrucci (1979), que privilegiam a granulometria contínua das misturas. Igualmente Helene e Terzian (1992) referem estar sendo privilegiada a trabalhabilidade sempre que for aumentada a continuidade da distribuição granulométrica de um concreto.

### 5.2.1.1 Areias

Para a determinação da melhor proporção de mistura entre areia média e areia fina foram preparadas misturas em diferentes proporções para a determinação do fator de adensamento, sendo este parâmetro definido pelo quociente entre a massa de areia composta e a massa de areia média, tomada como referência.

Desta maneira foram obtidos os fatores de adensamento apresentados na tabela 42 e expressos graficamente na figura 27.

Tabela 42: fator de adensamento das misturas de areia

% de areia fina	0	10	20	30	50	70	80	90	100
Fator de adensamento	1,000	1,005	1,010	1,008	0,990	0,997	0,995	0,937	0,920

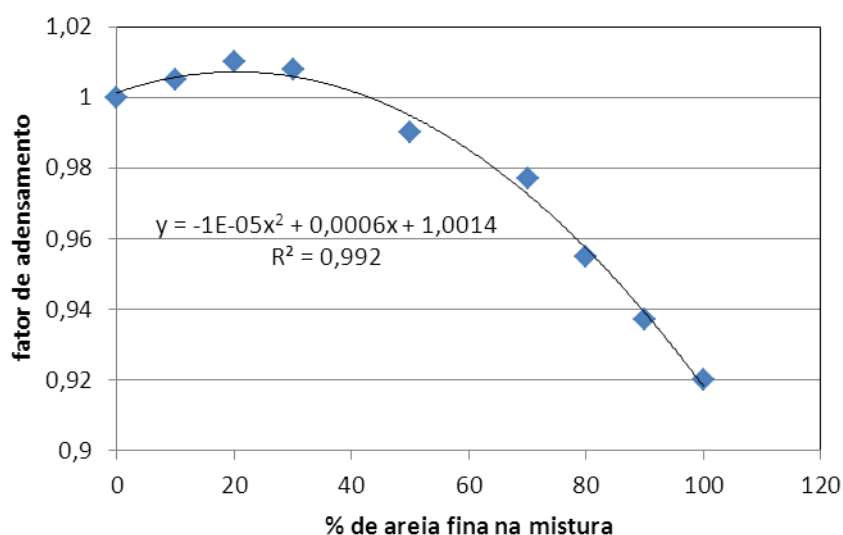


Figura 27: curva que relaciona o fator de adensamento da mistura de areia média e areia fina

É possível observar que o mais elevado fator de adensamento foi obtido a partir da substituição de 20% de areia média por areia fina.

Assim, o proporcionamento representado pelos percentuais de 20% e 80%, de, respectivamente, areia fina e areia média, foi tomado como ótimo e reproduzido na continuidade dos trabalhos.

### 5.2.1.2 Britas

O melhor proporcionamento entre as britas foi considerado aquele que permitiu minimizar o volume de vazios do agregado composto, sendo empregado o dispositivo descrito em 3.2.4, em determinações feitas sobre misturas obtidas com diferentes proporções entre brita 0 e brita 1, definidas por uma massa fixa, 5000 g.

A tabela 43 apresenta o índice de vazios quantificado para cada mistura.

Tabela 43: volume de vazios de misturas de brita em relação à proporção de brita e brita 1 na mistura

Composição	% em massa											
	B0	B1	B0	B1	B0	B1	B0	B1	B0	B1	B0	B1
	0	100	20	80	40	60	60	40	80	20	100	0
Volume de vazios (cm <sup>3</sup> )	1503		1272		1144		1070		1221		1355	

O tratamento gráfico dos valores conduziu à representação apresentada na figura 28.

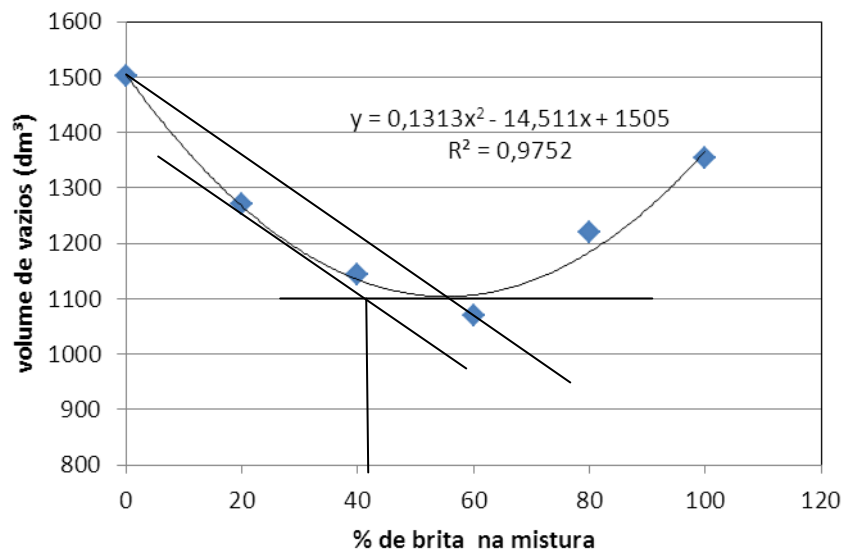


Figura 28: método gráfico para determinar a proporção entre as britas

Matematicamente o volume de vazios mínimo pode ser calculado igualando a zero a derivada primeira da equação representativa da curva. Assim, tem-se nas equações 26, 27 e 28.

$$y' = 2 \times 0,1313x - 14,511 \quad (\text{equação 26})$$

então:

$$0,2626x - 14,511 = 0 \quad (\text{equação 27})$$

e

$$x = 55,26\% \quad (\text{equação 28})$$

Considerando existir um patamar de igualdade que engloba o ponto de inflexão da curva a proporção de mistura adotada deve ser aquela cujo volume de vazios define o ponto de início desse patamar que representa a mistura com a menor percentagem de brita **0**. Assim é possível admitir que a partir do ponto inicial desse patamar, o volume de vazios não se altera substancialmente sugerindo que o aumento do teor de brita **0** não representa nenhum benefício, pelo contrário, sugerindo sim que o aumento da superfície específica da mistura pela incorporação de mais material fino possa aumentar a demanda de água.

A definição do ponto de início do patamar de equilíbrio foi estabelecida pela aplicação da técnica descrita pela NBR 6467 (ABNT, 2006) Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo, que conduziu a uma proporção de brita **0** na mistura de 42%.

### 5.3 CÁLCULO DO TEOR DE ARGAMASSA

Para evidenciar a importância do estabelecimento de uma granulometria contínua para o esqueleto granular no comportamento reológico de um concreto o trabalho foi desenvolvido de maneira a possibilitar a comparação entre as diversas alternativas, um concreto

produzido apenas com brita 1 e areia média, sendo posteriormente incorporada a brita 0 e a areia fina.

Da tabela 43 é possível identificar um volume de vazios ( $V_{\text{vaz.}}$ ) de  $1503 \text{ cm}^3$ , para uma massa de 5000 g de brita 1.

Com esse valor é possível calcular a massa teórica de argamassa ( $M_{\text{arg}}$ ) necessária para seu preenchimento a partir do produto do volume de vazios pela massa específica teórica de argamassa ( $M_{\text{esp. arg}}$ ), conforme equações 29 e 30.

$$M_{\text{arg}} = V_{\text{vazios}} \times M_{\text{esp. da arg.}} \quad (\text{equação 29})$$

então:

$$M_{\text{arg}} = 1503 \text{ cm}^3 \times 2,16 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 3246,48 \text{ g}^3 \quad (\text{equação 30})$$

Considerando, ainda, que a massa de concreto é a soma da massa de argamassa e da massa de brita, o cálculo do teor de argamassa pode ser assim apresentado, já com a correção prevista, equação 31.

$$\alpha = \frac{3246,48 \text{ g}}{3246,48 + 5000 \text{ g}} \times 1,24 = 48,81 \% \cong 49 \% \quad (\text{equação 31})$$

Considerando o emprego da mistura de britas, o volume de vazios correspondente à mistura de brita 0 e brita 1 na proporção de 42% e 58%, respectivamente, pode ser obtido a partir da equação da curva que modela a variação do volume de vazios em função da percentagem de substituição de brita 1 por brita 0. Assim é possível obter a equação 32.

$$V_{\text{vazios}} = (0,1313 \times 42^2) - (4,511 \times 42) - 1505 = 1127,15 \text{ cm}^3 \quad (\text{equação 32})$$

A esse volume de vazios pode ser associada a seguinte massa de argamassa determinada pela equação 33.

$$M_{\text{arg}} = 1127,15 \text{ cm}^3 \times 2,16 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 2434,64 \text{ g} \quad (\text{equação 33})$$

Da mesma forma como calculado anteriormente, o teor de argamassa é calculado pela equação 34.

$$\alpha = \frac{2434,64 \text{ g}}{2434,64 \text{ g} + 5000 \text{ g}} \times 1,24 = 40,61 \% \cong 41 \% \quad (\text{equação 34})$$

A partir dos procedimentos descritos para a definição do melhor proporcionamento entre os agregados escolhidos para o estudo e para o cálculo dos teores de argamassa a serem empregados em concretos produzidos apenas com brita **1** e com a mistura das britas **0** e **1** é possível definir:

- a) sempre que necessário, a mistura de areia média e areia fina será feita na proporção em massa de 20% e 80%, respectivamente;
- b) da mesma forma, a mistura das britas **0** e **1** será procedida igualmente em massa na proporção de 42% e 58%, respectivamente;
- c) o concreto a ser produzido apenas com brita **1** deverá ter os traços desdobrados a partir de um teor de argamassa em massa de 49%;
- d) o concreto a ser produzido com a mistura das duas britas na proporção indicada deverá ter os traços desdobrados considerando um teor de argamassa de 41%, em massa.

### 5.3.1 Otimização do teor de argamassa e identificação do traço de maior trabalhabilidade

O estudo visando salientar a importância do teor de argamassa no desempenho de um concreto foi baseado em um concreto produzido apenas com a areia média e brita **1**, e realizado por comparação direta do comportamento de diferentes traços desdobrados com diferentes teores de argamassa com relação à trabalhabilidade e resistência à compressão.

A trabalhabilidade foi avaliada pelo ensaio de abatimento pelo tronco de cone e pelo ensaio de remoldagem baseado no método de Powers simplificado (PETRUCCI, 1979).

O melhor teor de argamassa para uma dada conjugação de agregados deverá permitir a obtenção de uma determinada trabalhabilidade a partir do menor consumo possível de água, representado pelo teor de água sobre o total de materiais secos. A condição apresentada deverá conduzir a misturas que possam estar situadas dentro da faixa dos concretos trabalháveis, devendo esse conceito subentender não haver qualquer comprometimento da resistência mecânica do concreto endurecido, quer por dificuldade de adensamento, quer pela ocorrência de segregação.

Aceita a afirmativa posta no parágrafo anterior, tornam-se indissociáveis os conceitos de trabalhabilidade e desempenho reológico. Para um determinado volume de pasta, ou seja, para um determinado traço e uma determinada percentagem de água sobre o total de materiais secos, deve corresponder um teor de argamassa que conduza a uma mistura de melhor trabalhabilidade com o menor teor de água sobre o total de materiais secos.

Como definição para a expressão **melhor teor de argamassa** ou **teor ótimo de argamassa** é possível considerar ser:

“aquele que permitir a obtenção da mistura que demandar a menor quantidade de água possível para uma dada trabalhabilidade, sem comprometimento da resistência mecânica”.

O princípio apresentado condiciona, como objetivo último, a obtenção de um traço que atenda aos citados requisitos pré-determinados com o menor consumo de cimento possível.

No desenvolvimento do presente trabalho, a validação do princípio proposto foi baseada em um questionamento eminentemente experimental e comparativo.

Como referência, foi considerado o teor de argamassa já determinado para os materiais empregados no estudo, considerando o emprego de apenas areia média e brita **1**, calculado



em 49%, em massa, a partir do qual foram obtidos outros por alterações em 2 pontos percentuais em relação ao valor original, tendo sido adotados os teores de argamassa de 47%, 51% e 53%.

Como a comparação final deveria ser procedida pela análise do consumo de cimento em traços de mesma resistência, mas calculados para cada um dos teores de argamassa, o estudo foi conduzido de maneira a permitir o cálculo da curva de Abrams para cada situação.

Considerando que a trabalhabilidade é o elemento fundamental na análise, e considerando a dificuldade de sua quantificação a partir dos procedimentos convencionais empregados para sua estimativa, foi feita a opção por fixar o teor de água sobre o total de materiais secos e não a medida da consistência, como de praxe em estudos de dosagem, em função da grande variabilidade intrínseca aos métodos utilizados para sua quantificação em especial o abatimento pelo tronco de cone.

O teor de água sobre o total de materiais secos empregado foi definido de maneira que, em princípio, os abatimentos pelo tronco de cone esperados estivessem compreendidos entre 50 mm e 80 mm.

Esse padrão de abatimento conduz a troncos de cone abatidos em que não ocorrem alterações significativas tanto no nivelamento como na rugosidade da superfície de medição. Esta situação minimiza a necessidade de procedimentos de cunho subjetivo assim como a tomada de várias medidas ao longo da superfície superior do tronco de cone abatido para o cálculo de um valor médio ou a de serem feitas estimativas visuais para estabelecimento de planos médios sobre a superfície superior do tronco de cone abatido, o que fatalmente introduziria um componente de interpretação pessoal particular a cada operador.

Paralelamente os concretos tiveram sua reologia avaliada pelo método de remoldagem proposto, no entendimento de ser este menos suscetível à influência do operador, podendo, então, servir de elemento de comparação e aferição dos valores obtidos no ensaio de abatimento pelo tronco de cone.

O ensaio de corpos de prova, além de permitir o conhecimento da resistência à compressão simples, informa paralelamente sobre a homogeneidade dos resultados e consequentemente sobre sua confiabilidade, a partir da observação da variação existente entre os resultados individuais.

## 5.4 COMPROVAÇÃO PRÁTICA ATRAVÉS DA REPRODUÇÃO DE CONCRETOS PREPARADOS COM AS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE MISTURA DE AGREGADOS

### 5.4.1 Definição dos traços

Os traços foram definidos aleatoriamente tomando-se como referência os traços clássicos adotados pela CIENTEC para a execução de dosagens experimentais, rotineiramente. Foram assim considerados no estudo traços em massa de 1:3,50, 1:5,00, 1:6,50 e 1:8,00, desdobrados com os teores de argamassa estabelecidos. Todos os concretos foram produzidos a partir de uma massa total de 20 kg e com os agregados secos ao ar, permitindo que, em qualquer situação, fosse empregada uma mesma quantidade de água medida em gramas e correspondente a um teor de água sobre o total de materiais secos de 7,695%. A adoção de um mesmo teor de água sobre o total de materiais secos conduziu à mesma relação água/cimento para cada traço considerado.

### 5.4.2 Materiais empregados

Dos agregados definidos para o estudo, descritos e caracterizados anteriormente, foram empregados a brita **1** e a areia média. Posteriormente para confirmação de hipóteses foram também produzidos concretos com a incorporação da brita **0** e da areia fina.

Considerando tratar-se de um estudo eminentemente comparativo foi feita a opção por preservar o cimento destinado à produção de concreto durante o desenvolvimento do estudo experimental propriamente dito, ou seja, a validação do método de dosagem em proposição nesse trabalho.

Assim foi empregado o cimento disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil da PUC no momento do desenvolvimento dessa etapa.

Foram consumidos dois sacos que, por terem sido adquiridos conjuntamente, foram admitidos como representantes de uma mesma partida, constituindo uma amostra homogênea.

O emprego de apenas um agregado graúdo e um miúdo teve o objetivo de minimizar o número de variáveis, tendo-se, com o mesmo intuito, dispensado o uso de qualquer tipo de aditivo.

### 5.4.3 Procedimento adotado

Os concretos foram dosados em massa e processados em misturador forçado de contracorrente e eixo vertical próprio para serviços de laboratório, conforme pode ser visualizado na figura 29, sendo a água adicionada de forma lenta e contínua durante a mistura. Após o término da colocação da água o material permanecia em mistura por um minuto. Encerrado o processo de mistura, imediatamente era realizado o ensaio para a determinação do abatimento pelo tronco de cone sempre minimizando o manuseio do material com a finalidade de evitar perdas de água por evaporação.



Figura 29: equipamento empregado na mistura dos concretos.

Medido o abatimento, o material utilizado na determinação era recolocado na betoneira e, após breve mistura, descarregado e conduzido até o local onde então era realizado o ensaio de remoldagem baseado na proposta de **Powers**, distante alguns metros do equipamento de mistura, mas ainda no mesmo recinto do laboratório.

O equipamento empregado para determinação do índice de remoldagem consiste de um recipiente cilíndrico dentro do qual é realizado o ensaio de abatimento pelo tronco de cone. Esse recipiente contendo o cone abatido de concreto é posicionado sobre a mesa de consistência descrita na NBR 7215 (ABNT, 1996) e fixado por dois **sargentos**. Em duas guias existentes no recipiente cilíndrico, diametralmente opostas, são encaixadas duas hastes que suportam um êmbolo marcado em uma posição que corresponde à definição dentro do recipiente cilíndrico de um volume igual ao volume de concreto contido pelo cone

de Abrams. Ao ser atingida essa marca, o tronco de cone de concreto estará remoldado na forma de um cilindro. O índice de remoldagem será o número de quedas na mesa de consistência necessário para que o tronco de cone original esteja transformado em um cilindro.

Nas imagens apresentadas nas figuras 30 e 31 é possível visualizar o equipamento empregado no ensaio de remoldagem.



Figura 30: equipamento empregado no ensaio de remoldagem simplificado



Figura 31: conjunto montado sobre a mesa de consistência

O valor do abatimento pelo tronco de cone, obtido do ensaio realizado já no interior do recipiente próprio para o ensaio de remoldagem, permitiu a aferição do valor inicial, tendo em vista que em nenhum concreto o valor medido pela segunda vez apresentou variação maior do que 10 mm, como pretendido pela norma NBR 7212 (ABNT, 1984).

A análise conjunta dos resultados obtidos no ensaio de abatimento pelo tronco de cone e no ensaio de remoldagem permite, por coerência, associar de forma direta o abatimento pelo tronco de cone com a própria trabalhabilidade das misturas.

Encerrado o ensaio de remoldagem, o material era conduzido até o local apropriado para a moldagem de corpos-de-prova onde, após homogeneização manual, eram moldados dois exemplares, um para ensaio à compressão aos 7 dias de idade e outro, aos 28.

#### 5.4.4 Resultados

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 44:

Tabela 44: Resultados do estudo relacionando teor de argamassa e trabalhabilidade

Traço	Parâmetro avaliado	Teor de argamassa – $\alpha$ (%)											
		47			49			51			53		
		Individual	Ex.		Individual	Ex.		Individual	Ex.		Individual	Ex.	
1:3,50	$f_{c7}$ (MPa)	43,0	43,8	<b>43,8</b>	43,4	43,2	<b>43,4</b>	44,0	45,2	<b>45,2</b>	43,9	44,8	<b>44,8</b>
	$f_{c28}$ (MPa)	55,1	55,0	<b>55,1</b>	55,2	56,2	<b>56,2</b>	59,7	57,6	<b>59,7</b>	57,0	57,4	<b>57,4</b>
	s (cm)	<b>65</b>			<b>55</b>			<b>55</b>			<b>50</b>		
	IR	<b>34</b>			<b>30</b>			<b>32</b>			<b>42</b>		
	a/c	<b>0,346</b>											
1:5,00	$f_{c7}$ (MPa)	28,4	29,2	<b>29,2</b>	30,0	29,4	<b>30,0</b>	28,8	28,5	<b>28,8</b>	30,9	30,7	<b>30,9</b>
	$f_{c28}$ (MPa)	42,0	42,1	<b>42,1</b>	43,5	(*)	<b>43,5</b>	43,7	45,5	<b>45,5</b>	44,6	43,4	<b>44,6</b>
	s (cm)	<b>95</b>			<b>95</b>			<b>80</b>			<b>60</b>		
	IR	<b>21</b>			<b>18</b>			<b>19</b>			<b>24</b>		
	a/c	<b>0,462</b>											
1:6,50	$f_{c7}$ (MPa)	19,2	19,0	<b>19,2</b>	18,6	19,5	<b>19,5</b>	19,1	19,2	<b>19,2</b>	18,2	18,9	<b>18,9</b>
	$f_{c28}$ (MPa)	29,7	31,4	<b>31,4</b>	29,6	31,6	<b>31,6</b>	30,2	29,8	<b>30,2</b>	30,5	29,4	<b>30,5</b>
	s (cm)	<b>80</b>			<b>65</b>			<b>50</b>			<b>35</b>		
	IR	<b>22</b>			<b>20</b>			<b>26</b>			<b>30</b>		
	a/c	<b>0,577</b>											
1:8,00	$f_{c7}$ (MPa)	10,2	10,2	<b>10,2</b>	10,9	10,5	<b>10,9</b>	10,6	10,2	<b>10,6</b>	9,89	10,0	<b>10,0</b>
	$f_{c28}$ (MPa)	19,7	19,2	<b>19,7</b>	20,4	20,3	<b>20,4</b>	19,8	20,3	<b>20,3</b>	20,4	19,9	<b>20,4</b>
	s (cm)	<b>45</b>			<b>35</b>			<b>25</b>			<b>15</b>		
	IR	<b>27</b>			<b>26</b>			<b>42</b>			<b>42</b>		
	a/c	<b>0,693</b>											

(\*) corpo-de-prova danificado para ensaio.

Observações:  $f_{c7}$ : resistência à compressão aos 7 dias de idade;

$f_{c28}$ : resistência à compressão aos 28 dias de idade;

s: abatimento pelo tronco de cone expresso em “mm”;

IR: índice de remoldagem;

a/c: relação água/cimento.

A comparação dos resultados obtidos indica não serem iguais as trabalhabilidades dos concretos produzidos com os diferentes traços e mesmo teor de argamassa, permitindo sua relação tanto com o teor de argamassa como com o volume de pasta.

Considerando concretos produzidos com diferentes teores de argamassa e com o mesmo traço, pode ser percebida uma menor amplitude de variação entre os três mais baixos teores de argamassa. Maior diferença é observada no concreto de mais elevado teor de argamassa.

O entendimento dessa afirmação deve ser ventilado pela consideração de ter sido usado um mesmo teor de água sobre o total de materiais secos para todos os concretos. A obtenção de valores diferentes e que, em alguns casos, extrapolam a variação admitida para o nível de abatimento de  $\pm 10$  mm, conforme orienta a NBR 7212 (ABNT, 1984), permite afirmar que, a despeito de ter sido empregado o mesmo teor de água sobre o total de materiais secos, o abatimento pelo tronco de cone não foi o mesmo. Essa constatação reafirma a opinião expressa anteriormente de ser a lei de Lyse de pequena abrangência, porquanto a comparação dos valores dispostos em coluna, correspondentes a traços diferentes de um mesmo concreto (mesmo teor de argamassa), permite admitir haver mesmo abatimento pelo tronco de cone entre traços contíguos, apenas entre os traços 1:5,00 e 1:6,50 no concreto concebido com 47% de argamassa, e entre os traços 1:3,50 e 1:5,00 no concreto estudado com 53% de argamassa, representando apenas dois eventos dentro de um universo de 12 possibilidades.

A análise mais detalhada dos resultados obtidos no ensaio de abatimento pelo tronco de cone permite dizer que o desenvolvimento da trabalhabilidade, avaliada indiretamente pela medição do abatimento pelo tronco de cone, não observa um mesmo comportamento tanto entre os diferentes traços e um mesmo teor de argamassa como para os diferentes teores de argamassa empregados na produção de um mesmo traço. Objetivamente, os valores medidos para o abatimento pelo tronco de cone, como dispostos na tabela 43, diferem tanto na direção vertical como na horizontal.

É possível observar que o teor de argamassa de 53% determinou nos concretos a redução da trabalhabilidade no sentido do traço mais forte, de maior consumo de cimento, para o mais fraco, de menor consumo de cimento. Ainda considerando o desenvolvimento na direção vertical, nos demais traços, para cada teor de argamassa, o abatimento pelo tronco de cone parte de um valor mais baixo, experimenta um pico e torna a reduzir.

Esse comportamento reforça a assertiva de haver relação direta entre trabalhabilidade, teor de argamassa e volume de pasta, além de sugerir haver um comportamento reológico diferenciado entre os diferentes concretos estudados.

Com relação ao ensaio de resistência à compressão, a análise direta dos valores obtidos permite apresentar na tabela 45 valores percentuais que representam a maior variação entre os valores obtidos em cada traço com os diferentes teores de argamassa e os valores da variação máxima relativa em relação à média, identificados como desvio relativo máximo.

Tabela 45: elementos de variação das resistências à compressão obtidas no estudo para identificação do melhor teor de argamassa

Traço	Varição absoluta máxima (%)	Desvio relativo máximo (%)
1:3,50	8,3	4,6
1:5,00	8,1	4,2
1:6,50	4,6	2,3
1:8,00	3,6	2,5

A reprodução única de traços de diferentes concretos não fornece elementos para que seja aplicado um conceito estatístico na comparação dos resultados obtidos. No entanto é possível fazer uma analogia ao especificado pela NBR 7215 (ABNT, 1996) que admite válido o ensaio em uma determinada idade se o desvio relativo máximo em relação à média não ultrapassar 6%.

A aplicação desse critério sobre os quatro valores de resistência à compressão, obtidos para cada traço, com cada um dos quatro teores de argamassa empregados, sugere ser possível considerar de mesma ordem de grandezas as resistências medidas, podendo representar a própria resistência do concreto em cada traço, não havendo influência direta do teor de argamassa sobre esse parâmetro.

Essa consideração encontra respaldo na Lei de Abrams uma vez que todos os traços foram produzidos a mesma relação água/cimento, não tendo sido ultrapassados os limites que definem um concreto como trabalhável, caso contrário alguma repercussão seria observada na resistência à compressão, por deficiência de adensamento ou existência de segregação.

Os valores obtidos no ensaio de remoldagem indicam um comportamento similar do comportamento reológico nos quatro traços.

Para facilitar a observação, as tabelas 46 e 47, a seguir apresentadas, registram um resumo desses resultados.



Tabela 46: valores de índice de remoldagem e teores de argamassa

Traço	Índice de remoldagem			
	Teor de argamassa (%)			
	47	49	51	53
1:3,50	34	30	32	42
1:5,00	21	18	19	24
1:6,50	22	20	26	30
1:8,00	27	26	42	42

Tabela 47: valores de abatimento pelo tronco de cone e teores de argamassa

Traço	Abatimento pelo tronco de cone (mm)			
	Teor de argamassa (%)			
	47	49	51	53
1:3,50	65	55	55	50
1:5,00	95	95	80	60
1:6,50	80	65	50	35
1:8,00	45	35	25	15

A observação dos valores apresentados nos quadros indica ser a melhor trabalhabilidade verificada no traço 1:5,00, independentemente do teor de argamassa, por apresentar o menor índice de remoldagem simultaneamente ao maior abatimento pelo tronco de cone, sugerindo haver relação da trabalhabilidade verificada com o volume de pasta.

Nas tabelas 46 e 47, anteriormente apresentadas, é possível observar que o mais elevado abatimento pelo tronco de cone ocorre nos traços desdobrados com 47% de argamassa e o mais baixo índice de remoldagem, nos traços desdobrados com o teor de argamassa de 49% o que permite afirmar que concretos diferentes que apresentem o mesmo abatimento pelo tronco de cone nem sempre apresentarão o mesmo comportamento reológico e, conseqüentemente, a mesma trabalhabilidade.

O fato pode ser explicado a partir da interpretação física dos dois ensaios. O abatimento pelo tronco de cone indica a plasticidade do concreto estimada pela deformação do tronco de cone sob a ação da gravidade, podendo ser esta relacionada com a trabalhabilidade uma vez garantida a coesão da mistura. Já o ensaio de remoldagem sugere a maior ou menor energia necessária para movimentar a mistura fresca, fornecendo, portanto, informações sobre o comportamento reológico da mistura.



A análise dos valores obtidos no ensaio de abatimento pelo tronco de cone permite observar haver no sentido horizontal, que contempla a variação no teor de argamassa, um comportamento análogo em todos os traços traduzido pelo decréscimo do valor do abatimento no sentido do mais elevado teor de argamassa, como que evidenciando a relação direta entre a diminuição do valor do abatimento pelo tronco de cone com o aumento da superfície específica da mistura.

Os valores obtidos no ensaio de remoldagem apresentam um comportamento diferente expondo um aumento na trabalhabilidade para o teor de 49% de argamassa, permitindo relacionar o índice de remoldagem com a diminuição do atrito interno da mistura.

No sentido vertical, é possível observar haver um aumento na trabalhabilidade a partir do traço mais forte, de maior volume de pasta, passando por um valor máximo e decaindo no sentido dos traços de menor volume de pasta. Esse comportamento indica haver um volume de pasta que determina a melhor reologia da mistura, fato que pode ser generalizado pela observação a seguir apresentada:

“Para uma mesma quantidade de água: o maior volume de aglomerante, a partir de um dado valor, determina o aumento da coesão e diminuição da trabalhabilidade: o menor volume de aglomerante, a partir de um dado valor, determina o aumento do atrito interno igualmente com redução da trabalhabilidade”.

É importante para o desenvolvimento do presente trabalho, em etapas posteriores, considerar haver para cada conjunto de materiais um volume de pasta ótimo que determina, para uma quantidade de água definida, a maior trabalhabilidade possível.

Os traços mais ricos em cimento apresentam tanto a plasticidade como a reologia prejudicadas pela elevada demanda de água requerida pela mais elevada superfície específica.

Traços mais fracos, pela redução no volume de pasta, apresentam maior atrito interno o que dificulta a mobilidade relativa entre os grãos do agregado.

Em ambos os casos, para uma determinada quantidade de água, o efeito é a redução na trabalhabilidade.

Buscando comparar agora em termos econômicos a eficiência dos concretos concebidos com os diferentes teores de argamassa, foi feito um exercício teórico que consistiu da estimativa de consumo de água para cada traço, considerando uma trabalhabilidade avaliada indiretamente pelo abatimento pelo tronco de cone. Essa estimativa permitiu o

cálculo de traços para resistências padrão a partir de curvas de Abrams calculadas para os concretos obtidos com cada um dos teores de argamassa.

O cálculo do teor de água sobre o total de materiais secos foi procedido a partir da equação atribuída a Popovics como informa Boggio (2000) e igualmente apresentada por Helene e Terzian (1992) e Recena (2007), conforme equação 35.

$$H_f = H_i \left( \frac{s_f}{s_i} \right)^{0,1} \quad (\text{equação 35})$$

Onde:

$H_f$  = teor de água sobre o total de materiais secos, necessário para a obtenção de um determinado abatimento pelo tronco de cone;

$H_i$  = teor de água sobre o total de materiais secos determinante de um abatimento pelo tronco de cone inicial;

$s_i$  = valor do abatimento pelo tronco de cone inicial;

$s_f$  = valor do abatimento pelo tronco de cone final ou desejado.

A aplicação da equação 25 sobre o valor experimental único para todos os concretos permitiu o cálculo dos valores apresentados na tabela 48 que segue, tomando por base o abatimento pelo tronco de cone de 95 mm.

Tabela 48: estimativa de H para um mesmo abatimento pelo tronco de cone

Traço	a/c	Porcentagem de água sobre o total de materiais secos			
		Teor de argamassa (%)			
		47	49	51	53
1:3,50	0,346	7,99	8,13	8,13	8,20
1:5,00	0,462	7,70	7,70	7,83	8,06
1:6,50	0,577	7,83	7,99	8,20	8,50
1:8,00	0,693	8,29	8,50	8,79	9,25

Os valores obtidos podem ser expressos graficamente para cada teor de argamassa, como a seguir se apresenta nas figuras 32 a 35, estando nas abscissas representada a relação água/cimento e nas ordenadas, o teor de água sobre o total de materiais secos.

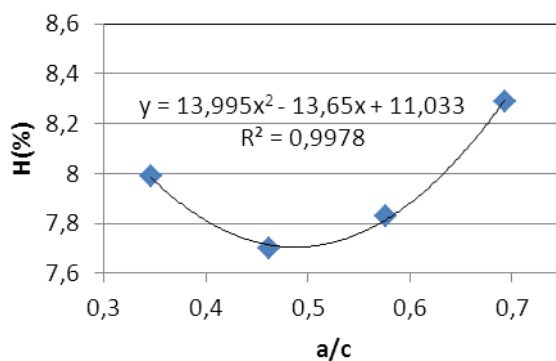


Figura 32: interação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 47% de argamassa, calculado em massa

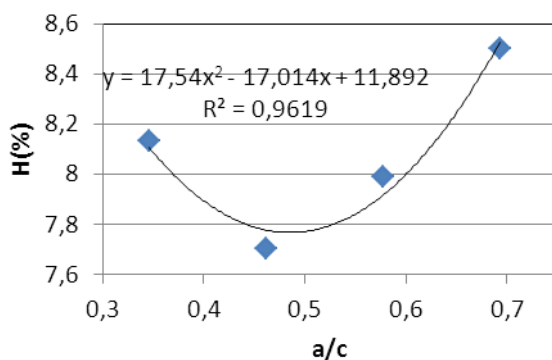


Figura 33: interação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 49% de argamassa, calculado em massa

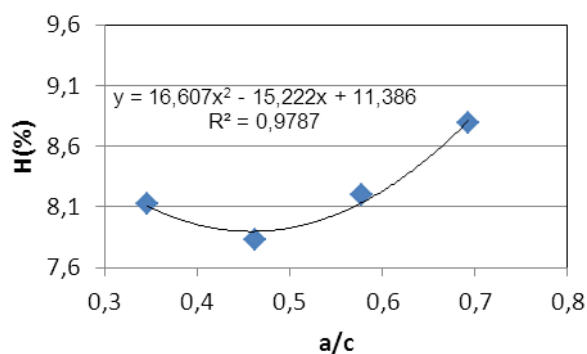


Figura 34: interação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 51% de argamassa, calculado em massa

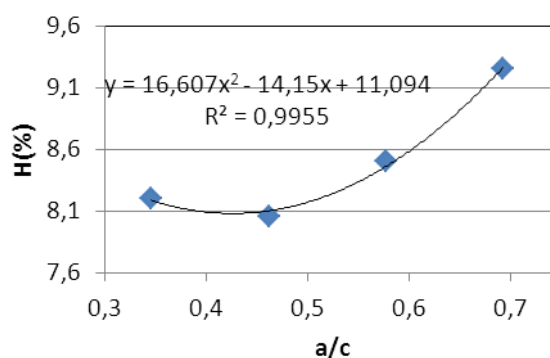


Figura 35: interação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos para o concreto desenvolvido com 53% de argamassa, calculado em massa

A observação dos gráficos permite identificar a forte correlação entre o comportamento físico da demanda de água representada pelo teor de água sobre o total de materiais secos e a relação água/cimento, indicando a menor demanda de água para o traço 1:5,00, reproduzido com a relação água/cimento de 0,462.

É possível observar pela concavidade da curva ser menor a diferença na demanda de água em traços de menor teor de argamassa.

A definição do melhor concreto pode ser feita através da comparação dos consumos de cimento calculados para cada teor de argamassa, em que indiretamente estará sendo comparada a maior trabalhabilidade representada pelo menor consumo de água para um mesmo abatimento pelo tronco de cone.

A relação da trabalhabilidade com o abatimento pelo tronco de cone não pode deixar de ser estabelecida em função de ser este parâmetro empregado universalmente para sua avaliação, apesar de todas as imprecisões intrínsecas ao método.

O índice de remoldagem, embora possa ser mais efetivo na avaliação do comportamento reológico do concreto, é muito pouco usado, de maneira que não existe uma referência estabelecida nem tampouco sensibilidade para julgar comparativamente o comportamento de concretos que apresentem valores próximos.

No estudo em desenvolvimento, considerando não haver diferenças entre as resistências à compressão em função do teor de argamassa, as variações a serem observadas no consumo de cimento de traços calculados para mesmas resistências obtidas dos diferentes concretos, caracterizados pela variação estabelecida no teor de argamassa, deverão ser

atribuídas exclusivamente ao teor de água sobre o total de materiais secos necessário para a obtenção de um determinado abatimento pelo tronco de cone.

Como as resistências são iguais, assim como iguais são as relações água/cimento para cada traço, as resistências estabelecidas para comparação são obtidas com a mesma relação água/cimento, mas com diferentes percentagens de água sobre o total de materiais secos.

Assim é possível obter os resultados apresentados na tabela 49, obtidos com base no cálculo das relações água/cimento a partir das equações que modelam a lei de Abrams, empregando o teor de água sobre o total de materiais secos calculado a partir da curva de segundo grau empregada na moldagem matemática do comportamento da variação desse parâmetro em função da relação água/cimento, conforme as figuras 32, 33, 34 e 35 apresentadas anteriormente:

Tabela 49: consumo de cimento de traços calculados com diferentes teores de argamassa e com o teor de água sobre o total de materiais secos corrigida para um mesmo abatimento pelo tronco de cone

fc 28	a/c	Teor de argamassa (%)							
		47		49		51		53	
		H (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )
20	0,71	8,40	276	8,65	282	8,95	289	9,43	301
25	0,64	8,03	295	8,19	299	8,45	306	8,85	317
30	0,57	7,80	324	7,89	326	8,11	333	8,43	343
35	0,52	7,72	353	7,79	355	7,96	360	8,23	369
40	0,48	7,71	382	7,77	384	7,91	389	8,13	397
45	0,44	7,74	419	7,80	421	7,90	424	8,08	431

A observação dos resultados identifica a direta relação que pode ser estabelecida entre o teor de argamassa e a quantidade de água necessária para um mesmo abatimento pelo tronco de cone e, conseqüentemente, com o consumo de cimento, permitindo conceber a seguinte assertiva, dentro do universo dos concretos trabalháveis:

“Para um mesmo conjunto de materiais, a hipótese de que a redução do teor de argamassa possa conduzir a um menor consumo de água e, conseqüentemente, a um mais baixo consumo de cimento e a uma menor probabilidade de instalação de processos de fissuração por conta da retração, deve ser sempre considerada”.

Com o intuito de verificar as alterações que ocorreriam em decorrência de mudanças na continuidade da distribuição granulométrica dos concretos, foi acrescentado, numa primeira etapa, à mistura original correspondente ao traço de melhor reologia (1:5,00 com 49% de argamassa), a Brita 0, respeitando a proporção entre brita 0 e brita 1 de 42% e 58%, respectivamente, como já estabelecido.

Em uma segunda etapa o mesmo traço foi reproduzido com o teor de argamassa calculado para um agregado obtido pela composição das britas **0** e **1**, de 41%.

Na terceira etapa, parte da areia média foi substituída pela areia fina segundo o proporcionamento de 80% e 20%, como definido previamente.

Nas três situações foi mantido o mesmo teor de água sobre o total de materiais secos (H), determinando a mesma relação água/cimento, permitindo, dessa maneira, a comparação direta dos resultados já que foram empregados ainda os mesmos materiais da mesma amostra com a qual foi desenvolvido todo o estudo.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 50.

Tabela 50: influência da distribuição granulométrica na trabalhabilidade

Traço	Parâmetro avaliado	$\alpha=49\%$ areia média e b1		$\alpha=49\%$ areia média b0 e b1		$\alpha=41\%$ areia média b0 e b1		$\alpha=41\%$ areias média e fina, b0 e b1					
		Individual	Ex.	Individual	Ex.	Individual	Ex.	Individual	Ex.				
1:5,00	$f_{c7}$ (MPa)	30,0	29,4	30,0	29,8	30,0	30,0	27,0	27,7	27,7	27,5	28,4	28,4
	$f_{c28}$ (MPa)	43,5	37,9	43,5	46,4	44,2	46,4	43,5	44,1	44,1	42,9	42,6	42,9
	s (cm)	95		70		105		140					
	IR	18		21		21		19					
	a/c	0,462		0,462		0,462		0,462					

Considerando o mesmo critério já adotado, descrito na NBR 7215 (ABNT, 1996), é possível calcular para os valores de resistência à compressão um desvio relativo máximo de 5,0% e uma amplitude de variação, calculada entre os valores extremos e expressa sobre o limite inferior de 8,2%.

Embora o critério adotado para aceitação do ensaio a partir da consideração de serem os valores obtidos de mesma ordem de grandeza, é possível perceber que a resistência

verificada no concreto com 49% de argamassa e britas **0 e 1** é mais elevada que as demais, apresentando estas valores muito próximos.

Diante dessa constatação, por prudência, o ensaio foi reproduzido em igualdade de condições.

Os resultados obtidos com os concretos produzidos no mesmo momento estão apresentados na tabela 51:

Tabela 51: influência da distribuição granulométrica na trabalhabilidade, repetição

Traço	Parâmetro avaliado	$\alpha=49\%$ areia média e b1			$\alpha=49\%$ areia média b0 e b1			$\alpha=41\%$ areia média b0 e b1			$\alpha=41\%$ areias média e fina, b0 e b1		
		Individual	Ex.	Ex.	Individual	Ex.	Ex.	Individual	Ex.	Ex.	Individual	Ex.	Ex.
1:5,00	$f_{c7}$ (MPa)	27,5	28,0	28,0	29,6	29,4	29,6	28,2	28,4	28,4	30,5	30,0	30,5
	$f_{c28}$ (MPa)	43,0	43,8	43,8	45,5	43,6	45,5	44,0	43,9	44,0	45,5	47,4	47,4
	s (cm)	75			50			110			125		
	IR	22			28			23			17		
	a/c	0,462			0,462			0,462			0,462		

Pode ser observado que o comportamento dos concretos, avaliado comparativamente com relação à trabalhabilidade, por sua vez estimada indiretamente pelo abatimento pelo tronco de cone, permaneceu inalterado.

As diferenças nos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão, em comparação com os resultados obtidos no primeiro ensaio, em termos absolutos, não podem ser dissociadas do fato de ter sido empregada uma amostra de cimento diferente daquela originalmente utilizada.

As variações observadas permitem calcular um desvio relativo máximo, em analogia à NBR 7215 (ABNT, 1996), não superior a 6%, de maneira que é possível considerar os valores obtidos como sendo de mesma ordem de grandeza.

Os concretos desenvolvidos com 41% de argamassa sugerem uma trabalhabilidade maior, se for considerado como elemento de comparação o abatimento pelo tronco de cone. Quando é empregada areia fina, é possível afirmar ser evidente e significativo o aumento na trabalhabilidade em comparação com os demais concretos considerados, não somente pelo

aumento havido no abatimento pelo tronco de cone, mas principalmente pela redução sensível no índice de remoldagem.

As observações feitas com relação à trabalhabilidade e ao fato de não ter havido comprometimento da resistência mecânica confirmam a assertiva posta anteriormente, vinculando a redução do teor de argamassa à direta redução na quantidade de água demandada para um determinado nível de trabalhabilidade.

Por outro lado, para um mesmo teor de argamassa, o aumento na continuidade da composição granulométrica da mistura favorece a trabalhabilidade.

Na tentativa de relacionar ainda o abatimento pelo tronco de cone com a composição granulométrica da mistura, foi desenvolvido um trabalho no sentido de comparar a distribuição granulométrica de cada concreto com um padrão, sendo esse tomado pela curva de “Lobo Carneiro”, desenvolvida para misturas com dimensão máxima característica 19 mm (BAUER, 1979; BOGGIO, 2000; PETRUCCI, 1979).

Os resultados obtidos estão relacionados na tabela 52 que segue:



Tabela 52: relação entre trabalhabilidade e módulo de finura de diferentes concretos

$\alpha$ (%)	Traço	Agregado (% na mistura)				Índices de trabalhabilidade		Índice de aderência	Módulo de finura
		Brita 1	Brita 0	Areia média	Areia fina	A (mm)	IR		
47	1:3,50	53,00	-	24,78	-	65	34	39,6	4,27
	1:5,00			30,33	-	95	21	38,2	4,40
	1:6,50			33,67	-	80	22	38,0	4,47
	1:8,00			35,89	-	45	27	38,2	4,53
49	1:3,50	51,00	-	26,78	-	55	30	38,0	4,17
	1:5,00			32,33	-	95	18	36,5	4,30
	1:6,50			35,67	-	65	20	36,2	4,38
	1:8,00			37,89	-	35	26	36,4	4,43
51	1:3,50	49,00	-	28,78	-	55	32	37,1	4,08
	1:5,00			34,33	-	80	19	35,3	4,21
	1:6,50			37,67	-	50	26	34,9	4,29
	1:8,00			39,89	-	25	42	35,0	4,34
53	1:3,50	47,00	-	30,78	-	50	42	36,7	3,99
	1:5,00			36,33	-	60	24	34,7	4,12
	1:6,50			39,67	-	35	30	34,3	4,20
	1:8,00			41,89	-	15	42	34,3	4,25
49	1:5,00	29,51	21,42	32,33	-	70	21	19,8	4,01
41	1:5,00	34,22	24,78	24,33	-	105	21	14,4	4,34
41	1:5,00	34,22	24,78	19,46	4,87	140	19	15,8	4,27

Por índice de aderência deve ser entendido o valor obtido pela raiz quadrada do somatório das diferenças ao quadrado entre os valores retidos acumulados em cada peneira da curva experimental e da curva padrão de “Lobo Carneiro”, devendo ser entendido que o menor índice de aderência acusa a obtenção de uma curva granulométrica mais aproximada da curva padrão.

#### 5.4.4.1 Análise dos resultados

A análise da tabela simplesmente a partir dos parâmetros de comparação apresentados não permite uma interpretação lúcida na medida em que o comportamento reológico do concreto, a própria demanda de água e, conseqüentemente, o valor do abatimento pelo tronco de cone, sofrem grande influência da coesão determinada pela quantidade de cimento em cada traço. Ou seja, no momento em que é considerado o cimento na

composição granulométrica da mistura e, portanto, admitida sua passagem em 100% pela peneira de 150  $\mu\text{m}$ , a influência relativa do proporcionamento entre os agregados fica menos evidenciada.

Por outro lado, a curva de **Lobo Carneiro** definida para agregados de dimensão máxima característica de 19 mm, apresenta um determinado conteúdo de material passante na peneira de 150 $\mu\text{m}$  de abertura de malha. Esse material fino, em termos práticos, pode ser considerado aglomerante, o que permite admitir que o estabelecimento da curva II, tomada como referência para o presente estudo, considerou a quantidade de aglomerante correspondente a um traço em massa de 1,00:4,88 que define a percentagem de cimento de 17%.

Traços em massa diferentes desse padrão já partem de uma diferença estrutural qual seja a diferente quantidade de material passante na peneira de 150  $\mu\text{m}$  de abertura de malha. Nessas condições a comparação mais fiel pode ser entendida como aquela produzida a partir do tratamento dado às composições feitas a partir do traço 1,00 : 5,00, empregado no estudo.

No entanto, é possível colher elementos que corroboram afirmações anteriormente feitas nesse trabalho. O elevado consumo de cimento, por elevar a superfície específica da mistura, aumenta a demanda de água e prejudica a trabalhabilidade para uma mesma quantidade de água. Em contrapartida, traços de menor consumo de cimento que determinam um volume de pasta inferior a um mínimo de referência, por falta da “lubrificação” exercida pela pasta, apresentam comportamento reológico de menor expressão, provavelmente em decorrência do aumento do atrito interno da mistura gerado pelo mais intenso e efetivo contato propiciado entre os diversos grãos dos agregados que a compõem.

Em todos os concretos onde foi empregada apenas a brita 1 e a areia, na medida em que diminui o volume de pasta, ou seja, na medida em que o traço se torna mais fraco, com menor consumo de cimento, o módulo de finura se eleva gradualmente. A citada elevação é de pequena magnitude, mas em termos teóricos é possível admitir haver diminuição na superfície específica da mistura, o que determinaria, em tese, menor demanda de água, mas, no entanto, ao contrário do que seria razoável imaginar, a trabalhabilidade diminui.

Paralelamente parece não haver relação direta do índice de aderência da curva granulométrica de cada mistura com o padrão de “Lobo Carneiro”, e a trabalhabilidade, para

a amplitude de variação observada, visto esta ser menor em concretos de distribuição granulométrica mais aproximada do padrão.

As misturas que envolveram o emprego de brita 0 e areia fina apresentaram um índice de aderência menor, indicando a maior proximidade de sua distribuição granulométrica com a da curva padrão.

No concreto produzido com 49% de argamassa a substituição de parte da brita 1 por brita 0 determinou um aumento na superfície específica, fato observado pela redução no módulo de finura e que determinou a redução da trabalhabilidade, expressa pela redução no abatimento pelo tronco de cone e pelo aumento no índice de remoldagem.

Já nos concretos produzidos com 41% de argamassa, o módulo de finura se eleva, o abatimento pelo tronco de cone igualmente se eleva, sugerindo a diminuição na demanda de água, mas o índice de remoldagem não se altera proporcionalmente.

Na comparação direta do comportamento das misturas obtidas com 41% de argamassa é possível identificar um comportamento não esperado já que no traço em que foi empregada apenas areia média, a despeito de apresentar melhor correlação com a curva de **Lobo Carneiro**, além de mais elevado módulo de finura, a trabalhabilidade ficou aquém daquela obtida com a mistura em que foi empregada a mescla de areias.

Em verdade há uma incorreção conceitual na comparação realizada, já que são concretos diferentes pela incorporação de um novo material, a areia fina. O que efetivamente pode ser afirmado é que o concreto composto com areia fina apresentou um comportamento reológico mais favorável, sugerindo tratar-se de uma mistura de melhor trabalhabilidade.

A comparação dos traços em que são empregadas as duas britas, mas com teores de argamassa de 49% e 41%, evidencia estar a melhor trabalhabilidade relacionada diretamente com a melhor correlação com a curva padrão e com o aumento do módulo de finura.

Como os dois concretos foram produzidos com os mesmos materiais, as diferenças observadas podem ser diretamente relacionadas com a variação no teor de argamassa.

Esse fato permite considerar não ser possível comparar quanto à trabalhabilidade, segundo esses parâmetros, traços diferentes de um mesmo concreto ou traços iguais de concretos diferentes, mas:

“para um conjunto definido de materiais, a obtenção da melhor trabalhabilidade não pode ser dissociada de misturas de maior correlação com a curva padrão de Lobo Carneiro, nem da menor demanda de água definida pela menor superfície específica retratada pelo mais elevado módulo de finura possível de ser obtido com sua mistura.”

Nitidamente os traços que apresentam menor índice de aderência, indicativo de uma distribuição granulométrica de maior continuidade apresentam melhor comportamento reológico.

Confirmando a proposta apresentada por Helene e Terzian (1992), aumento de trabalhabilidade não pode ser dissociado da maior continuidade na distribuição granulométrica.

Assim, ficam estabelecidos os objetivos a serem atingidos no desenvolvimento de um método de dosagem baseado antes na trabalhabilidade.

Em termos práticos, o que se depreende das conclusões apresentadas, é que definidos os materiais a serem empregados em um estudo de dosagem de concreto, deverá ser despendido um tempo maior na definição da melhor mistura de agregados.

A melhor mistura de agregados deverá ser entendida como aquela que determinar a maior continuidade na distribuição granulométrica, incluindo o cimento, e o mais elevado módulo de finura possível. Pelo que foi possível observar, o atingimento desse objetivo determinará o emprego do menor teor de argamassa, desde que não haja comprometimento da coesão. Em outras palavras, o dito pode ser admitido como crível dentro da faixa dos concretos trabalháveis, sendo respeitadas as imposições subjetivas relativas à operacionalidade dos procedimentos de concretagem, principalmente em se tratando de concretos bombeáveis cuja mobilidade sob pressão deverá levar em conta inclusive as condições de operação do equipamento.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A QUANTIDADE DE ÁGUA ADICIONADA ÀS MISTURAS

Reforçando as observações que certamente puderam ser depreendidas da leitura do trabalho até esse estágio, a tese basilar defendida pressupõe a existência de um traço em que é verificado um volume de pasta ótimo cuja reprodução permite a obtenção de um concreto em que um índice de consistência estabelecido como referência é obtido com

menos água do que qualquer outro traço reproduzido com os mesmos materiais, mesmo teor de argamassa e mesmo proporcionamento entre os agregados.

Uma questão que pode ser posta como fundamental para a confiabilidade dos resultados do estudo, em função da variabilidade associada aos métodos disponíveis para quantificação da trabalhabilidade, trata de como filtrar as variações inerentes ao procedimento adotado com relação à quantidade de água empregada.

Qualquer concreto sempre estará vinculado a um parâmetro que indique de forma indireta sua trabalhabilidade. Esse parâmetro na maioria maciça das oportunidades é representado pelo índice de consistência medido pelo abatimento pelo tronco de cone, cuja determinação não só sugere a trabalhabilidade do material, como também sua homogeneidade com relação à especificação de fornecimento.

Durante a reprodução dos diferentes traços no desenvolvimento de um procedimento de dosagem, a água é adicionada de maneira gradual até que o aspecto da mistura obtida sugira ter sido alcançado o valor desejado para o abatimento pelo tronco de cone. Nesse momento a adição de água é interrompida e o ensaio é realizado. Dependendo da experiência do tecnologista o objetivo pode ser atingido já na primeira tentativa. Tanto melhor.

Atingida a trabalhabilidade esperada são moldados os corpos de prova para a verificação da resistência mecânica. A quantidade de água adicionada é medida, sendo calculado o teor de água sobre o total de materiais secos e a relação água/cimento para cada situação.

Assim, ficam estabelecidas as referências que permitem identificar para uma dada resistência mecânica os parâmetros necessários para o cálculo do traço, a relação água/cimento, o teor de água sobre o total de materiais secos e o teor de argamassa, sendo previamente estabelecido o melhor proporcionamento entre os agregados.

Não há como prescindir dessa metodologia de quantificação de água que emprega como referência o abatimento pelo tronco de cone e se baseia na observação visual do concreto, já que cada mistura de materiais apresentará um comportamento reológico diferenciado.

Como a amplitude de variação admitida no valor do abatimento pelo tronco de cone é bastante ampla, dentro dos limites estabelecidos por norma, concretos com diferentes abatimentos pelo tronco de cone são considerados como de mesma trabalhabilidade, muitas vezes não o sendo.

A colocação de água em mais de uma etapa pode favorecer à evaporação durante o processo de mistura, mormente em sendo utilizados misturadores de eixo vertical de contra corrente de cubas abertas, cuja elevada eficiência está relacionada com a mais intensa agitação do concreto.

Quanto maior o número de tentativas para o acerto da quantidade de água para o abatimento requerido, maior a evaporação, o que pode explicar, em algumas situações, a grande dispersão dos resultados, o que pode ser percebido pela distância entre os pontos experimentais e a curva de ajustamento, a curva de Abrams.

Como o abatimento pelo tronco de cone fornece resultados dentro de uma faixa de variação que pode ser considerada ampla, na primeira etapa do trabalho experimental foi feita uma tentativa de emprego de um método dinâmico desenvolvido com fins eminentemente acadêmicos no Laboratório de Materiais de Construção Civil da PUCRS, com base no **Método de Remoldagem de Powers**, como já referido anteriormente, na tentativa de aumentar a precisão associada aos resultados indicativos de um padrão de trabalhabilidade.

Esse método mostrou eficácia na avaliação do comportamento reológico de diferentes concretos, tendo sido útil na fase de estabelecimento do melhor proporcionamento entre os agregados e na definição do teor de argamassa mais adequado. É possível dizer ter sido esse método fundamental na opção pelo emprego de areia fina na composição do agregado miúdo, conforme os registros feitos anteriormente.

Nos concretos desenvolvidos com cinza, em todos os traços foi empregada uma mesma quantidade de água, para que todas as misturas pudessem ser procedidas da mesma maneira e praticamente no mesmo tempo, minimizando a probabilidade de a secagem do concreto alterar de forma significativa o índice de consistência, em função da demora na colocação dos acréscimos de água ou do tempo necessário para a realização dos ensaios visando medir o abatimento pelo tronco de cone em etapas intermediárias.

Na continuidade do estudo, em função da dificuldade e do tempo demandado para a execução do ensaio de **Remoldagem de Powers** simplificado, e considerando que o teor de água sobre o total de materiais secos foi fixado, o método foi abandonado.

Em alguns casos, excepcionalmente e contrariando a premissa inicial, foi necessário usar uma quantidade adicional de água e, em outros, ao contrário, a adição de água foi interrompida para não conduzir a um abatimento pelo tronco de cone excessivamente elevado. A manutenção da quantidade original de água nessas circunstâncias fatalmente

diminuiria a precisão da correção teórica a ser feita sobre o valor do teor de água sobre o total de materiais secos determinante de um mesmo abatimento pelo tronco de cone.

Considerando tratar-se de um estudo eminentemente comparativo a guarda de um mesmo critério representado pela aplicação de um mesmo princípio teórico de correção sobre valores de pequena variação absoluta permite admitir ser consistente a comparação feita.

A unificação do abatimento pelo tronco de cone foi realizada pela correção do teor de água sobre o total de materiais secos procedida através da equação 36 já apresentada:

$$H_f = H_i \times \left( \frac{sf}{si} \right)^x \quad (\text{equação 36})$$

O valor de  $x$  foi calculado nas primeiras reproduções dos traços a partir da interrupção da mistura com um nível intermediário de adição de água de maneira a serem determinados dois valores de  $H$  e dois valores de abatimento pelo tronco de cone  $s$ . O expoente  $x$  foi calculado pela mesma equação 35 com a nova apresentação dada pela equação 37.

$$x = \frac{\log\left(\frac{H_f}{H_i}\right)}{\log\left(\frac{sf}{si}\right)} \quad (\text{equação 37})$$

Esse procedimento foi adotado nas primeiras reproduções até ter sido possível calcular um valor médio. Embora tenha sido registrada grande variação, esse valor obtido experimentalmente pode ser considerado como 0,1, confirmando a proposição apresentada por Helene e Terzian (1992).

A partir dessa conclusão foi abandonada a metodologia empregada na determinação do coeficiente  $x$  em cada concreto, sendo adotado o valor de 0,1 em todas as regressões feitas durante o desenvolvimento do trabalho.

Os valores experimentais que permitiram essa simplificação e o tratamento a eles dado estão apresentados a seguir juntamente com a apresentação dos resultados obtidos na primeira etapa, como definida anteriormente.

Todos os traços foram reproduzidos a partir da mesma massa de materiais secos com a finalidade de, a partir da rotinização do procedimento de pesagem, minimizar a probabilidade de ocorrerem erros de medição da massa dos materiais em cada reprodução, além de permitir com mais facilidade o estabelecimento de uma referência visual que pudesse informar sobre o índice de consistência do concreto.

Como foi adotada para todos os concretos reproduzidos a massa de 20 kg de materiais secos por betonada, toda vez que no presente texto for feita alusão a uma quantidade de água, essa estará sendo referenciada a essa massa total de materiais secos, estabelecida como padrão.

O comportamento relativo dos concretos estudados foi avaliado a partir da comparação direta do consumo de cimento verificado em traços calculados para concretos de classes C15, C20, C25, C30 e C35, considerando um desvio padrão de dosagem de 4,0 MPa.

Assim, foram empregadas no cálculo dos traços para atendimento às classes de resistência tomadas como referência as resistências de dosagem apresentadas na tabela 53:

Tabela 53: resistência de dosagem

fck (MPa)	15	20	25	30	35
fc <sub>28</sub> (MPa)	21,6	26,6	31,6	36,6	41,6

Os valores de resistência média de dosagem foram obtidos conforme a NBR 12655:2006, pela equação 38:

$$f_{cm_{28}} = f_{ck} + (1,65 \times s) \quad (\text{equação 38})$$

## 5.6 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PROPOSTO

A apresentação do método proposto é feita a partir do estabelecimento de um paradigma representado por um concreto preparado sem o uso de cinza volante, tomado como referência, de forma a permitir a comparação de traços calculados pelas duas propostas através do consumo de cimento.



### 5.6.1 Concreto de referência

Por concreto de referência deve ser entendido o concreto produzido apenas com cimento desenvolvido com base em um procedimento clássico de dosagem, constituindo o referencial de comparação entre os traços calculados a partir dos concretos concebidos com o emprego de cinza volante em substituição ao cimento.

Para a construção da curva de Abrams, foram considerados quatro traços em massa, 1:3,00; 1:4,50, 1:6,00 e 1:7,50, desdobrados segundo o teor de argamassa de 41% e o proporcionamento entre os agregados definidos anteriormente, sendo de 20% e 80%, respectivamente, as percentagens de areia fina e areia média, na composição do agregado miúdo e de 42% e 58%, respectivamente, as percentagens das britas **0** e **1** na composição do agregado graúdo.

Após o ensaio à compressão realizado aos 7 dias de idade foi possível observar o elevado nível de resistência obtido, o que inviabilizou o cálculo por interpolação de traços determinantes de concretos de mais baixas resistências.

Diante desse fato, foi acrescido posteriormente à família original o traço 1:9,00, sendo a curva de Abrams construída a partir de cinco traços. Mesmo tendo sido tomada essa medida, em alguns casos, o cálculo dos traços referentes a resistências menores somente foi possível a partir de uma extrapolação, aceita nesse caso por se tratar de um estudo teórico desenvolvido com a finalidade de validar um método de dosagem.

Nessa etapa, além do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, foi realizado igualmente o ensaio de **Powers simplificado**, e a adição de água feita em duas etapas para viabilizar o cálculo do expoente da fórmula empregada para redução do abatimento obtido ao valor estabelecido como referência para desenvolvimento de todo o trabalho.

A relação entre o abatimento pelo tronco de cone e a quantidade de água empregada para sua obtenção possibilitou estabelecer, para o concreto em estudo, o traço de melhor desempenho reológico, admitido este como o traço no qual pode ser considerado haver o volume ótimo de pasta determinante da trabalhabilidade requerida com o menor consumo de água.

O traço de melhor reologia foi determinado a partir do tratamento dos resultados obtidos com os quatro primeiros traços, embora a inclusão do quinto traço, desenvolvido posteriormente, não tenha alterado significativamente o valor original, fato que pode ser observado como elemento validador da metodologia proposta.

Como ainda não era conhecido o expoente da fórmula adotada para cálculo do valor do teor de água sobre o total de materiais secos em função da variação do abatimento pelo tronco de cone, a água foi sendo adicionada em etapas.

A tabela 54 apresenta as características do concreto de referência.

Tabela 54: características do concreto de referência

Material	% Substituição				
	0	0	0	0	0
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	-	-	-	-
Areia fina	0,128	0,251	0,374	0,497	0,620
Areia média	0,512	1,004	1,496	1,988	2,480
Brita 0	0,991	1,363	1,735	2,106	2,478
Brita 1	1,369	1,882	2,395	2,909	3,422
Traço final cim.: agr.	1:3,00	1:4,50	1:6,00	1:7,50	1:9,00
Traço final agl.: agr.	1:3,00	1:4,50	1:6,00	1:7,50	1:9,00
H <sub>1</sub> (%)	8,57	7,36	7,07	6,90	7,28
s <sub>1</sub> (mm)	55	70	75	65	75
H <sub>2</sub> (%)	9,08	8,03	7,52	7,56	7,86
s <sub>2</sub>	125	130	125	120	130
Coefficiente	0,07	0,14	0,12	0,15	0,14
Hf (%)	9,05	7,94	7,48	7,56	7,77
sf (mm)	120	120	120	120	120
a/c	0,36	0,44	0,53	0,64	0,79
a/agl	0,36	0,44	0,53	0,64	0,79
% de adição	0	0	0	0	0
% substituição	0	0	0	0	0
C (kg/m <sup>3</sup> )	589	435	344	282	238
f <sub>c7</sub> (MPa)	53,6	45,6	38,6	27,5	18,4
f <sub>c28</sub> (MPa)	65,1	52,9	46,7	35,4	24,3

As equações 39 e 40 modelam as curvas de Abrams para 7 e 28 dias de idade, calculadas pelo método dos mínimos quadrados segundo uma função logarítmica (PETRUCCI, 1979).

$$\log f_{c_7} = 2,1396 - \left(\frac{a}{c}\right)^{1,0940} \quad (\text{equação 39})$$

$$\log f_{c_{28}} = 2,1686 - \left(\frac{a}{c}\right)^{0,9789} \quad (\text{equação 40})$$

A figura 36 apresenta as curvas de Abrams de 7 e 28 dias de idade. Os resultados obtidos aos 7 dias de idade serviram durante o desenvolvimento do trabalho para antecipar qualquer distúrbio ou servirem de referência para alguma correção, assim como a decisão por incluir mais um traço no grupo estabelecido originalmente.

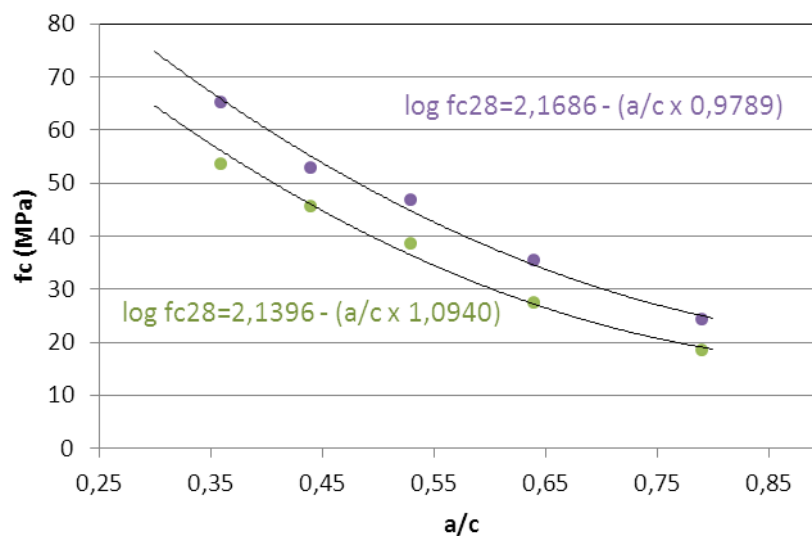


Figura 36: curvas de Abrams

Para o cálculo dos traços de referência a relação água/cimento foi obtida analiticamente pelo emprego da equação que define a curva de Abrams na idade de 28 dias.

O teor de água sobre o total de materiais secos foi calculado, para cada relação água/cimento, a partir da equação da curva representativa da relação entre esse parâmetro e a relação água/cimento, como a seguir se apresenta na figura 37:

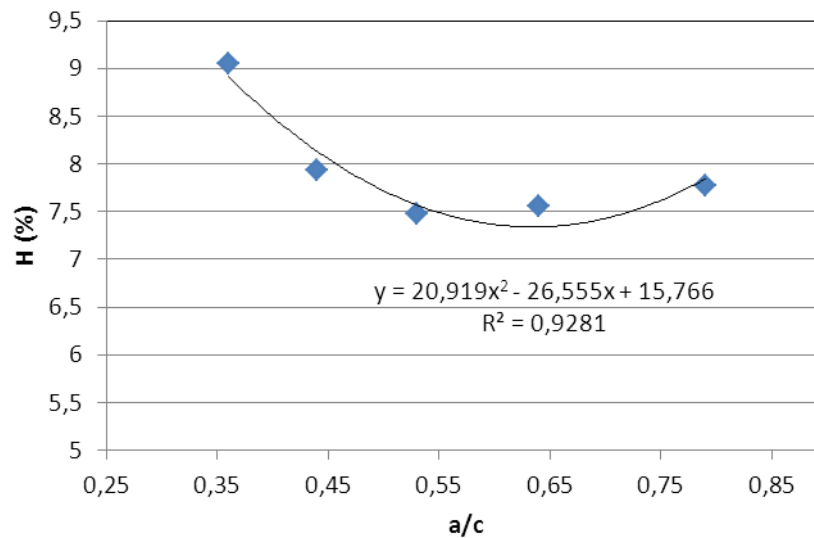


Figura 37: interação entre relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos

#### 5.6.1.1 Procedimento empregado no cálculo dos traços,

É apresentado como exemplo o cálculo do traço referente ao concreto da classe C15, considerando um desvio padrão de dosagem de 4,0 MPa, desdobrado a partir do conhecimento do teor de argamassa adotado no estudo, da relação água/cimento obtida analiticamente com o auxílio da equação da curva de Abrams, equação 40, e do teor de água sobre o total de materiais secos, obtido da curva que relaciona esse parâmetro com a relação água/cimento, como apresentado na figura 37.

O cálculo apresentado é um exemplo, já que o roteiro seguido foi aplicado para todos os traços.

##### 5.6.1.1.1 Determinação da relação água/cimento:

A relação água/cimento é obtida diretamente da equação 40, tendo como dado de entrada a resistência de dosagem aos 28 dias de idade como apresentado na equação 41.

$$\log 21,6 = 2,1686 - \left(\frac{a}{c} \times 0,9789\right) \quad (\text{equação 41})$$

$$\frac{a}{c} = 0,85$$

#### 5.6.1.1.2 Determinação do teor de água sobre o total de materiais secos

O teor de água sobre o total de materiais secos é obtido diretamente do gráfico apresentado pela figura 37, tendo como dado de entrada a relação água/cimento, como apresentado na equação 42.

$$H = 20,919 \times (a/c)^2 - 26,555 \times a/c + 15,766 \quad (\text{equação 42})$$

$$H = 8,62$$

#### 5.6.1.1.3 Cálculo do traço em massa

Com os parâmetros determinados nos itens 5.6.1.1.1 e 5.6.1.1.2, relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos, é possível calcular o traço em massa da forma apresentada na equação 43.

$$1 + m = \frac{100 \times a/c}{H} \quad (\text{equação 43})$$

$$1 + m = \frac{85}{8,62} = 9,86$$

#### 5.6.1.1.4 Desdobramento do traço

O cálculo da percentagem de cimento na mistura pode ser visualizado através da observação da equação 44.

$$\% Ci = \frac{100}{1 + m} \quad (\text{equação 44})$$

$$\% Ci = 10,14$$

A percentagem de agregado miúdo é determinada pela diferença entre o teor de argamassa e a percentagem de cimento conforme indicado na equação 45.

$$\% \text{ areia} = \alpha - \% Ci \quad (\text{equação 45})$$

$$\% \text{ areia} = 41 - 10,14 = 31,16$$

O consumo teórico de cimento é obtido através da equação 46.

$$C = \frac{1000}{\frac{1,00}{\gamma_{ci}} + \frac{a}{\gamma_{areia}} + \frac{p}{\gamma_{brita}} + \frac{a}{c}} = \quad (\text{equação 46})$$

$$C = \frac{1000}{\frac{1,00}{3,08} + \frac{0,61}{2,64} + \frac{2,43}{2,62} + \frac{2,44}{3,08} + \frac{3,37}{3,08} + 0,85} = 237 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Com esses valores assim calculados é possível preencher a tabela 55.

Tabela 55: traço calculado para concreto classe C15

Material	Traço		Quantidade de material (kg/m <sup>3</sup> )
	(%)	massa	
Cimento	10,14	1,00	237
Areia fina	6,17	0,61	145
Areia média	24,69	2,43	576
Brita 0	24,78	2,44	578
Brita 1	34,22	3,37	799
Água	8,62	0,85	201

A tabela 56 relaciona os parâmetros empregados no desdobramento dos demais traços, tomados como referência, sendo assim estabelecido um padrão de consumo de cimento para os concretos referentes às classes de resistência consideradas.

Tabela 56: parâmetros de dosagem e consumo de cimento para os traços de referência

$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	a/c	H (%)	C (kg/m <sup>3</sup> )
15	21,6	0,85	8,32	231
20	26,6	0,76	7,65	240
25	31,6	0,68	7,35	260
30	36,6	0,62	7,31	285
35	41,6	0,56	7,43	320

#### 5.6.1.1.5 Verificação da relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

Com os consumos de cimento obtidos para cada uma das resistências características à compressão foi possível traçar o gráfico apresentado na figura 38 que explicita a relação existente entre os dois parâmetros.

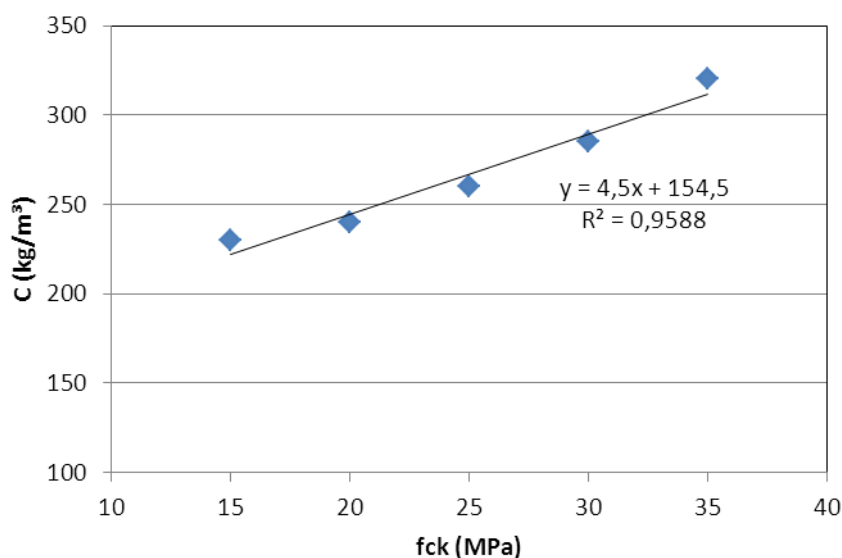


Figura 38: relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

#### 5.6.2 Definição do traço de melhor comportamento reológico

A definição do traço considerado como o de melhor comportamento reológico foi conduzida a partir da representação gráfica da relação entre o traço em massa (m) e a percentagem de água sobre o total de materiais secos observada nos traços reproduzidos para a construção da curva de Abrams do concreto de referência.

Como o traço 1:9 foi introduzido posteriormente a definição do traço de melhor reologia foi feita a partir da consideração dos traços 1:3,00; 1:4,50; 1:6,00 e 1:7,50.

A construção gráfica que permitiu a identificação do chamado traço de melhor reologia seguiu o procedimento definido pela NBR 6467 (ABNT, 2006), sendo este definido por um ponto correspondente ao valor de  $m$  a partir do qual a variação na percentagem de água sobre o total de materiais secos pode ser considerada constante em um intervalo amplo, abrangendo o ponto de inflexão da curva representativa da citada relação apresentada na figura 39.

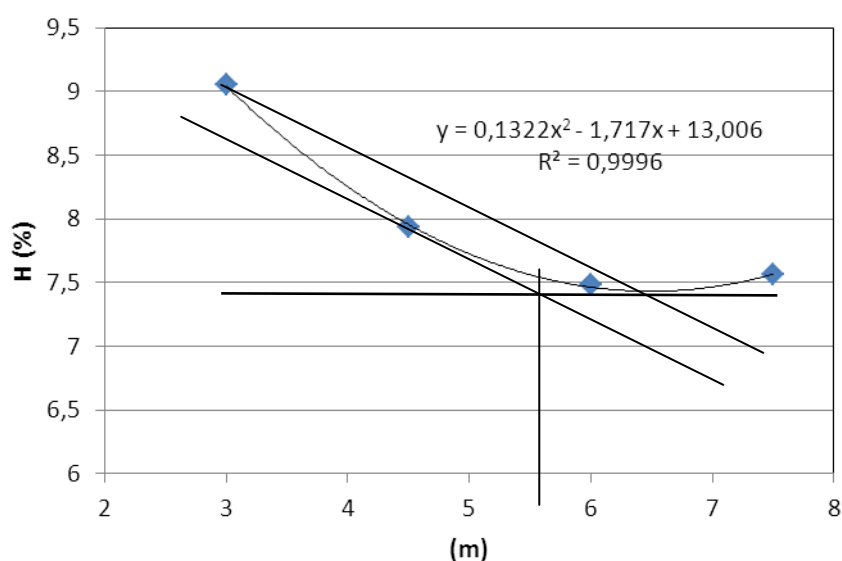


Figura 39: método gráfico para identificação do traço de melhor reologia

A aplicação do mesmo critério ao gráfico elaborado com os cinco traços permitiu observar haver pouca variação no valor que define o início do intervalo em que o valor do teor de água sobre o total de materiais secos assume um comportamento constante num intervalo de variação do traço.

Esse valor calculado, a partir da curva construída com quatro traços, foi de 5,65, o que corresponde a um traço em massa de 1:5,65, adotado, então, como referência para a continuidade do estudo.

### 5.6.3 Adição de cinza volante ao concreto de referência

A adição direta de cinza volante aos traços empregados na elaboração do concreto de referência teve por objetivo expor de forma comparativa o ganho de resistência mecânica decorrente dessa operação.



Aos traços considerados no desenvolvimento do concreto de referência foi adicionada cinza volante em percentuais crescentes de maneira que a maior adição ocorresse no traço de menor consumo de cimento, 1:9,00.

Para que a cinza volante adicionada a cada um dos traços, não perdesse o caráter de adição, na expressão dos traços finais, após a adição, foi considerada como integrante do agregado de maneira a permitir a avaliação da influência da adição sobre a resistência à compressão e sobre a demanda de água para uma mesma trabalhabilidade. Essa influência foi avaliada por comparação direta desses parâmetros definidos como elementos de comparação com aqueles observados no concreto de referência.

Para o desenvolvimento dessa etapa foi empregada a cinza identificada como 3140, até então escolhida para ser a única a ser empregada no estudo, o qual agregou posteriormente outras duas cinzas, conforme já citado.

Os resultados obtidos podem ser visualizados na tabela 57.

Tabela 57: resumo dos resultados do concreto produzido com adição de cinza volante

Material	% adição				
	14,3	25,0	42,9	66,7	110,5
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	0,143	0,250	0,429	0,667	1,105
Areia fina	0,099	0,201	0,288	0,364	0,399
Areia média	0,398	0,804	1,153	1,455	1,596
Brita 0	0,991	1,363	1,735	2,106	2,478
Brita 1	1,369	1,882	2,385	2,909	3,422
Traço final cim. : cinza+agr.	1:3,00	1:4,50	1:6,00	1:7,50	1:9,00
Traço final agl. : agr.	1:2,50	1:3,40	1:3,89	1:4,10	1:3,75
H <sub>1</sub> (%)	10,2	9,76	9,56	9,80	10,7
s <sub>1</sub> (mm)	80	105	90	90	100
H <sub>2</sub> (%)	10,7	9,99	9,90	10,0	11,0
s <sub>2</sub>	120	135	140	125	140
Coefficiente	0,12	0,09	0,08	0,06	0,08
Hf (%)	10,7	9,88	9,78	9,96	10,9
sf (mm)	120	120	120	120	120
a/c	0,43	0,55	0,69	0,85	1,10
a/agl	0,37	0,44	0,48	0,51	0,52
% de adição	14,3	25,0	42,9	66,7	110,5
% substituição	0	0	0	0	0
C (kg/m <sup>3</sup> )	564	412	322	263	248
f <sub>c7</sub> (MPa)	51,3	39,0	30,1	22,8	16,4
f <sub>c28</sub> (MPa)	63,7	48,9	44,0	35,7	28,1

As equações 47 e 48 modelam matematicamente as curvas de Abrams construídas com os resultados obtidos aos 7 e 28 dias de idade.

$$\log f_{c_7} = 2,0011 - \left( \frac{a}{c} \times 0,7327 \right) \quad (\text{equação 47})$$

$$\log f_{c_{28}} = 1,9958 - \left( \frac{a}{c} \times 0,5084 \right) \quad (\text{equação 48})$$

Para o cálculo dos traços de comparação, além da relação água/cimento, obtida analiticamente da equação que modela a curva de Abrams de 28 dias de idade, equação 48 foi empregado o teor de água sobre o total de materiais secos e a percentagem de cinza volante a ser adicionada obtidos analiticamente das equações que modelam matematicamente as relações entre relação água/cimento e percentagem de água sobre o total de materiais secos e relação água/cimento e percentagem de adição, conforme pode ser visualizado nas figuras 40 a 42.

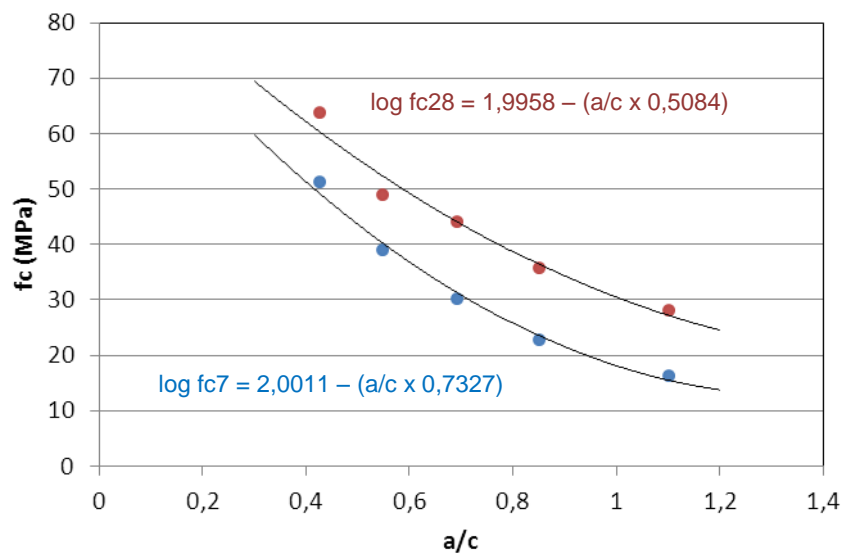


Figura 40: curvas de Abrams para o concreto com adição

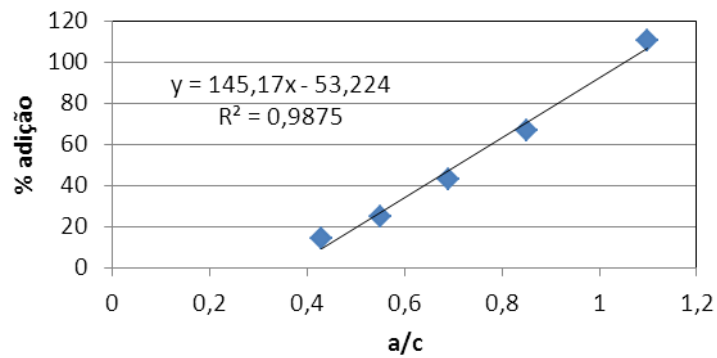


Figura 41: interação entre a relação água/cimento e % de adição

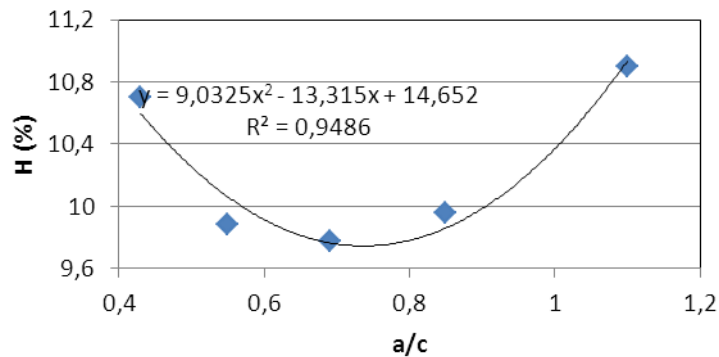


Figura 42: interação entre relação água/cimento e H

### 5.6.3.1 Procedimento empregado no cálculo dos traços.

#### 5.6.3.1.1 Cálculo da relação água/cimento

A relação água/cimento foi obtida diretamente da equação 48, sendo dado de entrada a resistência média de dosagem obtida para um concreto de classe C 15, conforme pode ser visualizado na equação 49.

$$\log 21,6 = 1,9958 - \left(\frac{a}{c} \times 0,5084\right) \quad (\text{equação 49})$$

$$\frac{a}{c} = 1,30$$

### 5.6.3.1.2 Cálculo do teor de água sobre o total de materiais secos

O teor de água sobre o total de materiais secos foi obtido da equação que modela a relação entre a relação água/cimento e o teor de água sobre o total de materiais secos conforme apresentado na equação 50.

$$H = 9,0325 \times \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 13,315 \times \frac{a}{c} + 14,652 \quad (\text{equação 50})$$

$$H = 12,6$$

### 5.6.3.1.3 Cálculo do traço em massa

Com os parâmetros determinados nos itens 4.6.3.1.1 e 4.6.3.1.2, relação água/cimento e teor de água sobre o total de materiais secos, é possível calcular o traço em massa da forma apresentada na equação 51.

$$1 + m = \frac{100 \times \frac{a}{c}}{H} \quad (\text{equação 51})$$

$$1 + m = \frac{130}{12,6} = 10,32$$

A percentagem de adição de cinza volante foi obtida da equação que modela a relação estabelecida entre relação água/cimento e percentagem de adição conforme pode ser visualizado na equação 52.

$$\% \text{adição} = 145,17 \times \frac{a}{c} - 53,224 \quad (\text{equação 52})$$

$$\% \text{adição} = 135$$

A percentagem de cimento na mistura é obtida conforme a aplicação da equação 53.

$$\%Ci = \frac{100}{1+m} \quad (\text{equação 53})$$

$$\%Ci = 9,69$$

A percentagem de agregado miúdo na mistura é obtida pela diferença entre o teor de argamassa e a percentagem de cimento conforme indicado na equação 54.

$$\%areia = \alpha - \%Ci \quad (\text{equação 54})$$

$$\%areia = 41 - 9,69 = 31,31$$

Com esses valores assim calculados é possível preencher a tabela 58.

Tabela 58: traço calculado para um concreto C15

Material	Traço		Quantidade de material (kg/m <sup>3</sup> )
	(%)	massa	
Cimento	9,69	1,00	203
Cinza 3140	13,13	1,36	276
Areia fina	3,64	0,38	77
Areia média	14,54	1,50	304
Brita 0	24,78	2,55	518
Brita 1	34,22	3,53	717
Água	12,6	1,30	264

A tabela 59, a seguir apresentada, relaciona os parâmetros empregados no desdobramento dos diversos demais traços estabelecidos como padrão e os consumos de cimento e cinza em cada caso.

Tabela 59: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência

$f_{ck}$ (MPa)	a/c	H (%)	Adição (%)	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo teórico de cinza (kg/m <sup>3</sup> )
15	1,30	12,6	135	203	273
20	1,12	11,1	109	215	234
25	0,98	10,3	89	232	207
30	0,85	9,9	70	261	183
35	0,74	9,7	54	296	160

#### 5.6.3.1.4 Verificação da relação entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

Com os consumos de cimento obtidos para cada uma das resistências características à compressão foi possível traçar o gráfico apresentado na figura 43 que explicita a relação existente entre os dois parâmetros.

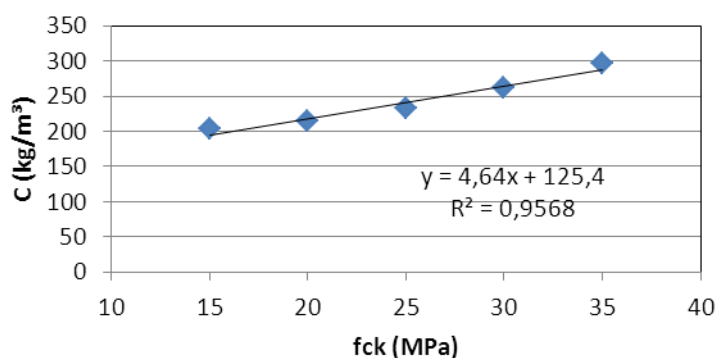


Figura 43 : relação entre o consumo de cimento e a resistência característica à compressão

#### 5.6.4 Cálculo do expoente da fórmula usada para corrigir o valor de H.

Até essa etapa foi adotado o procedimento de adicionar a água em duas etapas, sendo obtidos para cada concreto dois teores de água sobre o total de materiais secos o que permitiu o cálculo do expoente  $x$ .

Com os valores determinados foi possível estimar um valor médio para ser empregado na continuidade do trabalho. Assim foi calculada, a partir dos valores experimentais

determinados nessa primeira etapa, a média dos valores obtidos com o concreto produzido apenas com cimento e com a adição direta de cinza.

Os valores obtidos estão relacionados na tabela 60.

Tabela 60: valores medidos do expoente x

Concreto	Expoente x					
	1:3,00	1:4,50	1:6,00	1:7,50	1:9,00	Média
Cimento	0,07	0,14	0,12	0,15	0,14	0,12
Cimento e cinza	0,12	0,09	0,08	0,06	0,08	0,09
<b>Média final</b>						0,10

É possível observar haver diferença entre o valor médio obtido com os traços reproduzidos apenas com cimento e o valor médio oriundo do tratamento dos dados obtidos dos traços reproduzidos com adição de cinza volante.

Como o desenvolvimento do trabalho em sequência a essa primeira etapa, é baseado não em adições de cinza, mas sim em substituições de cimento por cinza, foi atribuído ao expoente da fórmula empregada o valor de 0,1 representando a média aritmética de todas as determinações.

Embora haja variações nesse parâmetro, o fato de todos os concretos reproduzidos em continuidade ao estudo terem como referência um mesmo traço e mesmas percentagens de substituição de cimento por cinza e considerando ainda tratar-se de um estudo eminentemente comparativo, as variações esperadas não invalidam a comparação produzida.

A simplificação feita representa um único critério aplicado indistintamente sobre concretos produzidos com um mesmo traço e mesmas percentagens de substituição de cimento por cinza.

## 5.7 APLICAÇÃO DO PRINCÍPIO EM ESTUDO

A segunda etapa do desenvolvimento do método proposto consistiu da aplicação prática do conceito que sugere a associação da melhor reologia a um determinado volume de pasta considerado ótimo e, portanto, provedor da melhor trabalhabilidade.



O traço definido como de referência foi reproduzido a partir da substituição de cimento por cinza na tentativa de manter o volume de pasta o mais próximo possível daquele definido como ótimo, admitindo, dessa maneira, estar sendo mantida a melhor trabalhabilidade.

Foram estabelecidas aleatoriamente percentagens de substituição de 10%, 22,5%, 35% e 47,5% que, juntamente com o traço reproduzido apenas com cimento, ou seja, com 0 % de substituição, constituíram um universo de cinco eventos.

Como as características físicas da cinza volante diferem das do cimento, a substituição de cimento por cinza introduziu alterações na reologia da mistura que exigiram ajustes na quantidade de água requerida para um mesmo abatimento pelo tronco de cone.

A ideia original seria a de ser adicionada à mistura seca, independente da percentagem de substituição, a mesma quantidade de água, correspondente a um abatimento pelo tronco de cone de aproximadamente  $110 \pm 20$  mm, para, posteriormente, calcular em cada situação a percentagem de água sobre o total de materiais secos necessária para o atingimento de um mesmo abatimento pelo tronco de cone de referência, arbitrado em 120 mm, teórico portanto, para a comparação a ser estabelecida.

O cálculo da percentagem de água sobre o total de materiais secos, correspondente ao abatimento tomado como referência, foi procedido com o auxílio da equação 36, sendo adotado o expoente 0,1.

Em algumas situações foi possível perceber durante a incorporação de água à mistura que o valor do abatimento pelo tronco de cone poderia ser excessivamente elevado, em outras, mesmo sendo empregada a quantidade de água prevista, o aspecto do concreto sugeria um abatimento pelo tronco de cone em muito menor do que o valor de referência. No primeiro caso a adição de água foi interrompida, no segundo, o comportamento observado exigiu sua suplementação, para que a correção teórica não implicasse em valores muito elevados, mais sensíveis a distorções.

Como a substituição de cimento por cinza determina variações na reologia da mistura e, conseqüentemente, na demanda de água para um mesmo valor de abatimento pelo tronco de cone, foram adotados dois critérios de substituição. Assim, para cada uma das cinzas empregadas no estudo foram produzidos concretos com e sem a correção do volume de cinza em função de sua massa específica.

A opção por não realizar a correção objetivou introduzir uma simplificação no cálculo do traço, até mesmo porque o volume de pasta acabou por ser alterado na medida em que a demanda de água tenha sido variável.

Em função disso são sempre apresentadas duas alternativas para o procedimento de dosagem, uma onde foi realizada a correção da massa de cinza em função de sua massa específica e outra em que a substituição de cimento foi feita pela mesma massa de cinza.

Como na etapa anterior, nesta, em que é estudado o comportamento de concretos produzidos a partir da substituição de cimento por cinza, foi empregada para a produção dos concretos uma massa de material seco igual a 20 kg. Todos os concretos foram produzidos a partir do traço 1:5,65, considerado de melhor reologia e tomado como referência. O teor de argamassa e o proporcionamento entre os agregados foi mantido constante.

A tabela 61 apresentada na sequência indica a massa de materiais empregada em todas as reproduções. Tanto as substituições como as adições foram realizadas sobre a massa de cimento indicada na tabela, não tendo havido qualquer alteração nas massas dos demais materiais, a cada betonada.

Tabela 61: quantidade de materiais empregados na produção de concreto no laboratório

Material	Cimento	Areia fina	Areia média	Brita 0	Brita 1
Massa (kg)	3,008	1,038	4,154	4,956	6,844

A massa de cinza empregada foi calculada a partir do produto do volume de cimento removido pela massa específica da cinza a ser empregada na substituição.

O conceito expresso pode ser visualizado como a seguir se apresenta na equação 55:

$$M_{cin.} = \left( \frac{M_{cim.}}{m_{esp.cim.}} \right) \times m_{esp.cin.} \quad (\text{equação 55})$$

Onde:

$M_{cin.}$  = massa de cinza a ser adicionada á mistura;

$M_{cim.}$  = massa de cimento a ser substituída;

$m_{esp. cim}$  = massa específica do cimento;

$m_{esp. cin}$  = massa específica da cinza.

Como já apresentado anteriormente, o princípio do método proposto toma como referência o traço de mais elevada trabalhabilidade o qual é reproduzido com alteração do rendimento do aglomerante obtido pela substituição progressiva de cimento por cinza, o que condiciona a resistência. Assim o mesmo traço é adotado para a obtenção de qualquer resistência inferior àquela obtida apenas com o emprego de cimento.

Dessa maneira a resistência do concreto será obtida a partir de um mesmo traço estando a resistência condicionada pelo rendimento do aglomerante que é alterado pela variação na proporção entre cimento e cinza.

O cálculo dos traços é feito a partir da identificação da percentagem de substituição necessária para a obtenção de uma determinada resistência à compressão, sendo este o principal parâmetro de entrada. Esta percentagem de substituição é igualmente empregada para definir o teor de água sobre o total de materiais secos, caso tenha sido necessário alterar a quantidade de água para a obtenção do abatimento pelo tronco de cone de referência.

A partir do traço de referência é procedida a substituição de cimento por cinza, com ou sem correção do volume de cinza em função da massa específica e, em seguida, a correção do volume de concreto resultante.

Após essa sequência é possível proceder a uma verificação adicional através da verificação da relação água/cimento obtida ao final em comparação com a relação água/cimento relacionada diretamente com a resistência à compressão. Se houver uma diferença que possa sugerir a possibilidade de alterações na resistência do concreto nova correção pode ser efetuada sendo alterada a proporção entre cimento e cinza.

### 5.7.1 Dosagem realizada com o emprego da cinza 3140

#### 5.7.1.1 Substituição com correção (cinza 3140)

A apresentação imediata da tabela 62 permite observar o desempenho verificado.

Tabela 62 : resumo das características do concreto produzido com a cinza 3140, com correção do volume

Material	% substituição				
	0	10	22,5	35	47,5
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	0,079	0,205	0,381	0,640
Areia fina	0,345	0,383	0,445	0,531	0,657
Areia média	1,381	1,534	1,782	2,124	2,630
Brita 0	1,648	1,831	2,126	2,535	3,183
Brita 1	2,275	2,528	2,936	3,500	4,334
Traço final cim. : agr.	1:5,65	1:6,36	1:7,49	1:9,07	1:11,44
Traço final agl. : agr.	1:5,65	1:5,82	1:6,05	1:6,29	1:6,59
H <sub>1</sub> (%)	7,36	7,39	7,43	7,47	7,51
s <sub>1</sub> (mm)	115	100	50	50	40
H <sub>2</sub> (%)	7,36	7,52	8,00	8,15	8,20
s <sub>2</sub>	115	115	115	130	120
Coefficiente	0,10*	0,12	0,09	0,09	0,08
Hf (%)	7,39	7,56	8,03	8,09	8,20
sf (mm)	120	120	120	120	120
a/c	0,49	0,55	0,68	0,82	1,02
a/agl	0,49	0,51	0,56	0,59	0,62
% de adição	0	0	0	0	0
% substituição	0	10	22,5	35	47,5
C (kg/m <sup>3</sup> )	364	327	278	233	188
fc <sub>7</sub> (MPa)	39,5	33,4	27,9	21,9	16,0
fc <sub>28</sub> (MPa)	46,1	41,6	37,6	32,1	26,2

Para o estabelecimento dos parâmetros de entrada são empregados os gráficos a seguir apresentados nas figuras 44 a 46:

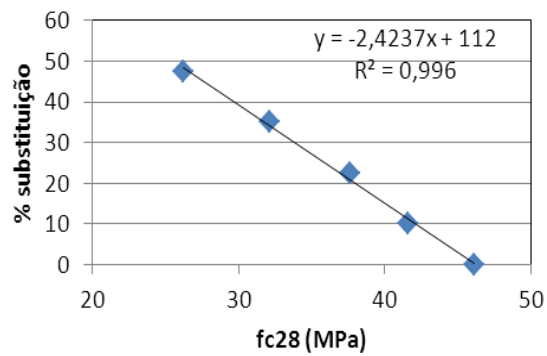


Figura 44: relação entre % de substituição e resistência à compressão

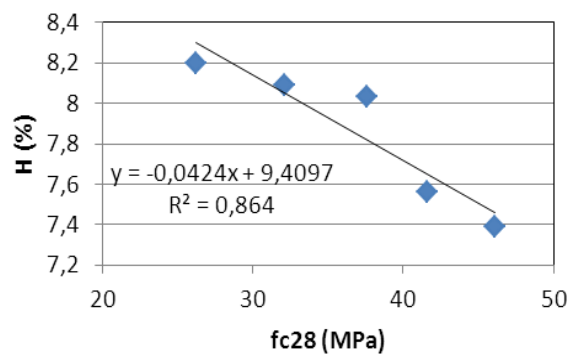


Figura 45: relação entre resistência à compressão e H

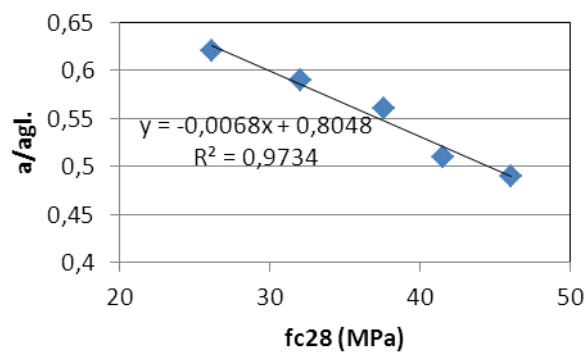


Figura 46 : relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante

### 5.7.1.1.1 Roteiro de cálculo do traço referente ao concreto da classe C15.

A determinação da percentagem de substituição é feita através da equação que modela a relação existente entre este parâmetro e a resistência à compressão conforme pode ser visualizado na equação 56.

$$\% subst. = (-2,4237 \times f_{c_{28}}) + 112 = \quad \text{(equação 56)}$$

$$\% subst. = 60\%$$

O teor de água sobre o total de materiais secos foi determinado conforme a equação que modela a relação existente entre este parâmetro e a resistência à compressão, equação 57.

$$H = (-0,0424 \times f_{c_{28}}) + 9,4097 \quad \text{(equação 57)}$$

$$H = 8,49\%$$

O traço é obtido a partir dos quantitativos de materiais necessários para a obtenção de 1m<sup>3</sup> de concreto sem substituição conforme a tabela 63.

Tabela 63: traço calculado para um concreto C 15

Material	Traço			
	Original	Substituição sem correção	Substituição com correção	Final
cimento	364	146	146	143
Cinza 3140	0	218	155	151
Areia fina	126	126	126	123
Areia média	503	503	503	493
Brita 0	600	600	600	588
Brita 1	828	828	828	811
Água	178	206	200	196
a/c	0,49	1,41	1,37	1,37
a/agl	0,49	0,56	0,67	0,67
Volume (dm <sup>3</sup> )	999	1056	1021	1000

Por original é identificado o traço de referência, de mais elevada trabalhabilidade. Na coluna identificada por **substituição sem correção** simplesmente 60% do cimento é substituído em massa por cinza. Na coluna identificada por **substituição com correção** o volume de cinza é corrigido de maneira a ser mantido o volume de pasta. A coluna identificada por “final” apresenta a correção feita na quantidade de material de maneira a ser obtido o volume de 1m<sup>3</sup> de concreto fresco.

A partir da figura 46 é possível relacionar a resistência pretendida com a relação água/aglomerante obtida no trabalho experimental. O cálculo desse valor permite confrontar o valor calculado para o traço obtido estabelecendo um parâmetro de controle.

No presente caso é possível calcular (equação 58):

$$a / agl = (-0,0068 \times f_{c_{28}}) + 0,8048 \quad (\text{equação 58})$$

$$a / agl. = 0,66$$

Caso a diferença observada entre os valores das relações água/aglomerante obtidas experimentalmente e fruto do cálculo desenvolvido na obtenção do traço indicar a possibilidade de haver distorções na resistência é possível proceder a mais um ajuste de maneira a garantir que a relação água/aglomerante não exceda ao valor de referência obtido experimentalmente. Nesse caso, seriam alteradas apenas as massas de cimento e cinza que, no presente caso, passariam respectivamente a 144kg/m<sup>3</sup> e 152kg/m<sup>3</sup>.

Em termos práticos essa correção não significa uma alteração importante de maneira que na prática é possível produzir o concreto conforme a primeira aproximação. Ajustes que se fizerem necessários, indicados pelo controle da produção, deverão ser feitos posteriormente.

A tabela 64 relaciona os parâmetros empregados no desdobramento dos diversos traços padrão e os consumos de cimento e cinza volante em cada caso, sempre adotando a metodologia proposta empregada para o cálculo do traço para verificação de um concreto classe C 15, conforme apresentado.

Tabela 64: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços calculados

fck (MPa)	a/agl	H (%)	%subst.	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo teórico de cinza (kg/m <sup>3</sup> )
15	0,67	8,49	60	143	151
20	0,63	8,29	48	186	122
25	0,59	8,07	35	234	89
30	0,56	7,86	23	278	59
35	0,52	7,65	11	322	28

#### 5.7.1.1.2 Verificação da relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

A figura 47 apresenta a relação entre o consumo de cimento e a resistência característica à compressão cuja representação gráfica relaciona os valores de consumo teórico de cimento e resistência característica à compressão apresentados na tabela 62.

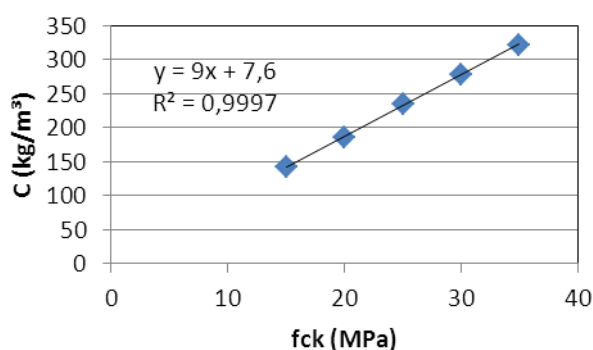


Figura 47: relação entre  $f_{ck}$  e consumo de cimento



## 5.7.1.2 Substituição sem correção (cinza 3140)

A tabela 65 relaciona os resultados obtidos.

Tabela 65: resumo das características do concreto produzido com a cinza 3140, sem correção do volume

Material	% substituição				
	0	10	22,5	35	47,5
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	0,111	0,290	0,538	0,905
Areia fina	0,345	0,383	0,445	0,531	0,657
Areia média	1,381	1,534	1,782	2,124	2,630
Brita 0	1,648	1,831	2,126	2,535	3,183
Brita 1	2,275	2,528	2,936	3,500	4,334
Traço final cim. : agr.	1:5,65	1:6,39	1:7,58	1:9,23	1:11,71
Traço final agl. : agr.	1:5,65	1:5,65	1:5,65	1:5,65	1:5,65
H <sub>1</sub> (%)	7,36	7,36	8,36	8,36	8,98
s <sub>1</sub> (mm)	115	65	140	65	80
H <sub>2</sub> (%)	7,36	7,89	8,36	8,98	9,48
s <sub>2</sub>	115	120	140	140	155
Coefficiente	0,10	0,11	0,10	0,09	0,08
Hf (%)	7,39	7,89	8,23	8,85	9,29
sf (mm)	120	120	120	120	120
a/c	0,49	0,58	0,72	0,92	1,20
a/agl	0,49	0,52	0,56	0,60	0,63
% de adição	0	0	0	0	0
% substituição	0	10	22,5	35	47,5
C (kg/m <sup>3</sup> )	364	322	273	224	178
f <sub>c7</sub> (MPa)	39,5	33,3	25,9	19,6	12,6
f <sub>c28</sub> (MPa)	46,1	41,2	36,9	29,6	21,6

O cálculo do traço de referência é feito da mesma maneira sem, no entanto, ser procedida a correção no volume da cinza, a partir das relações a seguir apresentadas nas figuras 48 a 50.

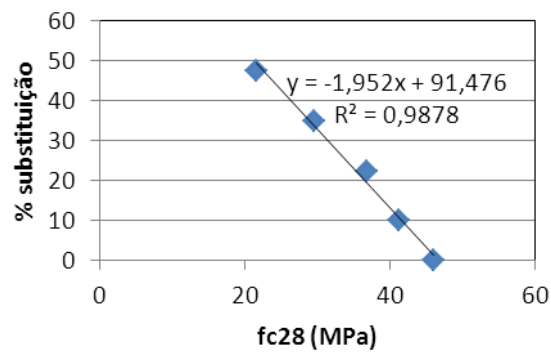


Figura 48: relação entre resistência à compressão e % de substituição

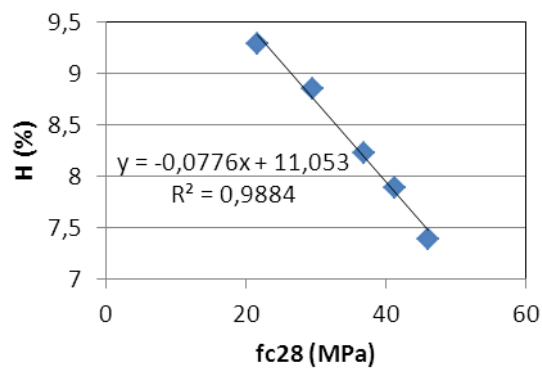


Figura 49: relação entre resistência à compressão e  $H$

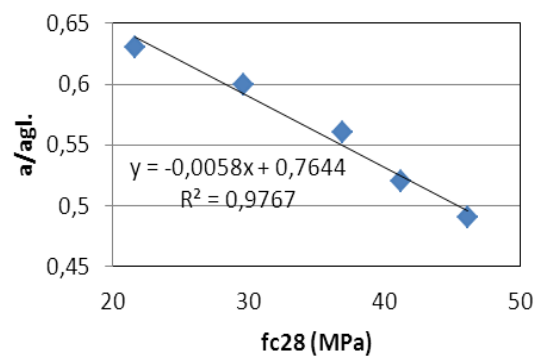


Figura 50: relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante

### 5.7.1.2.1 Roteiro de cálculo do traço referente ao concreto da classe C15.

A percentagem de substituição de cimento por cinza é definida a partir da relação existente entre resistência à compressão e percentagem de substituição representada pelo gráfico da figura 45 e modelada matematicamente pela equação 59.

$$\begin{aligned} \% subst. &= (-1,952 \times f_{c_{28}}) + 91,476 = && \text{(equação 59)} \\ \% subst. &= 49\% \end{aligned}$$

O teor de água sobre o total de materiais secos empregado no cálculo do traço é obtido da relação estabelecida entre este parâmetro e a resistência à compressão modelada matematicamente pela equação 60.

$$\begin{aligned} H &= (-0,0776 \times f_{c_{28}}) + 11,053 && \text{(equação 60)} \\ H &= 9,38\% \end{aligned}$$

Com os parâmetros de entrada são obtidos os valores relacionados na segunda coluna da tabela 66, sem a correção do volume de cinza. Na terceira coluna são apresentados os quantitativos para a obtenção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.

Tabela 66: traço calculado para concreto C15

Material	Traço		
	Original	Substituição sem correção	Final
cimento	364	186	173
Cinza 3140	0	178	166
Areia fina	126	126	118
Areia média	503	503	469
Brita 0	600	600	560
Brita 1	828	828	773
Água	178	227	212
a/c	0,49	1,22	1,22
a/agl	0,49	0,62	0,62
Volume (dm <sup>3</sup> )	999	1072	1000

A partir da tabela 66, é possível relacionar a resistência pretendida com a relação água/aglomerante obtida no trabalho experimental. O cálculo desse valor permite confrontar o valor calculado para o traço obtido estabelecendo um parâmetro de controle.

No presente caso é possível calcular pela equação 60 a relação água/aglomerante.

$$a / agl = (-0,0058 \times f_{c_{28}}) + 0,7644 \quad (\text{equação 60})$$

$$a / agl = 0,64$$

Nesse caso a relação água/cimento obtida no traço calculado é inferior ao valor relacionada diretamente com a resistência à compressão pretendida.

A tabela 67, a seguir apresentada, relaciona os parâmetros empregados no desdobramento dos diversos traços padrão e os consumos de cimento e cinza em cada caso.

Tabela 67: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência

$f_{ck}$ (MPa)	a/agl	H (%)	% subst.	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo teórico de cinza (kg/m <sup>3</sup> )
15	0,62	9,38	49	173	166
20	0,60	8,99	40	206	138
25	0,57	8,60	30	244	105
30	0,54	8,21	20	283	71
35	0,52	7,82	10	323	36

#### 5.7.1.2.2 Verificação da relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

A figura 51 apresenta graficamente a relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão dos traços padrão conforme apresentado na tabela 64.

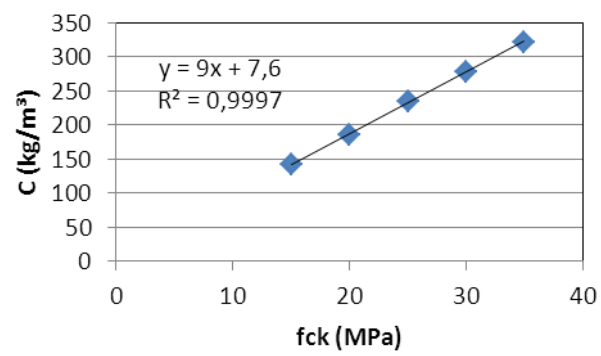


Figura 51: relação entre consumo de cimento e  $f_{ck}$

## 5.7.2 DOSAGEM REALIZADA COM O EMPREGO DA CINZA 2680

### 5.7.2.1 Substituição com correção (cinza 2680)

A tabela 68 apresentada a seguir relaciona os resultados obtidos.

Tabela 68: resumo dos resultados obtidos com o concreto com adição de cinza volante 2680 com correção de volume

Material	% substituição				
	0	10	22,5	35	47,5
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	0,069	0,180	0,333	0,528
Areia fina	0,345	0,383	0,445	0,531	0,657
Areia média	1,381	1,534	1,782	2,124	2,630
Brita 0	1,648	1,831	2,126	2,535	3,183
Brita 1	2,275	2,528	2,936	3,500	4,334
Traço final cim. : agr.	1:5,65	1:6,35	1:7,45	1:9,02	1:11,33
Traço final agl. : agr.	1:5,65	1:5,87	1:6,18	1:6,52	1:7,07
H <sub>1</sub> (%)	7,50	7,54	7,60	7,65	7,73
s <sub>1</sub> (mm)	130	135	140	115	130
Coefficiente	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*
H <sub>f</sub> (%)	7,44	7,45	7,48	7,68	7,67
sf (mm)	120	120	120	120	120
a/c	0,50	0,55	0,64	0,77	0,95
a/agl	0,50	0,52	0,55	0,58	0,62
% de adição	0	0	0	0	0
% substituição	0	10	22,5	35	47,5
C (kg/m <sup>3</sup> )	363	326	281	236	191
f <sub>c7</sub> (MPa)	36,3	32,5	27,7	21,6	14,7
f <sub>c28</sub> (MPa)	42,5	39,6	35,2	28,8	20,9

Para o estabelecimento dos parâmetros de entrada são empregados os gráficos a seguir apresentados nas figuras 52 a 54.

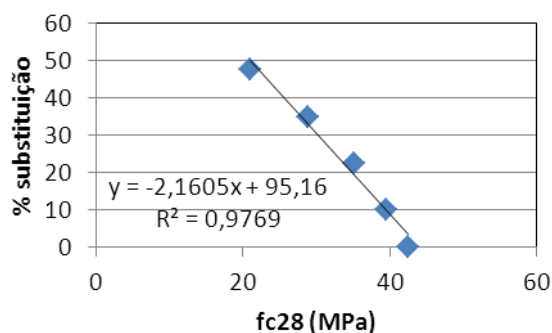


Figura 52: relação entre resistência à compressão e % de substituição

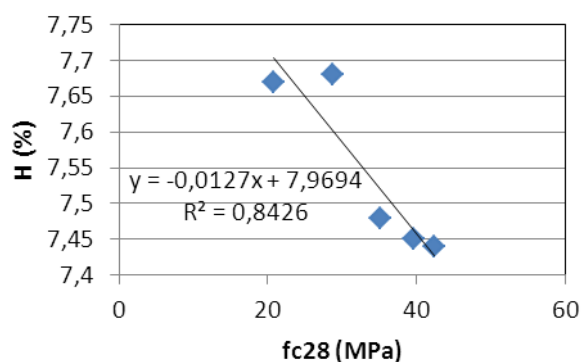


Figura 53: relação entre resistência à compressão e H

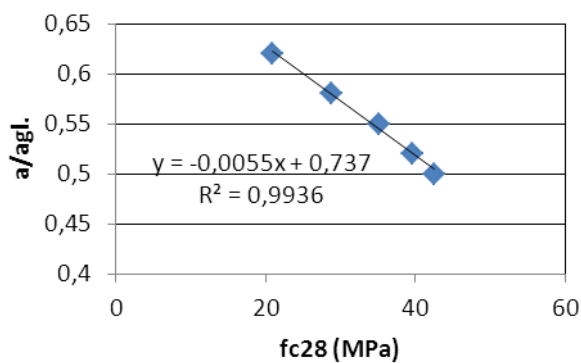


Figura 54: relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante

#### 5.7.2.1.1 Roteiro de cálculo do traço correspondente ao concreto classe C 15.

A porcentagem de substituição é obtida com o auxílio da equação que modela matematicamente o gráfico apresentado na figura 52, representada pela equação 61.

$$\% subst. = (-2,1605 \times fc_{28}) + 95,16 = \quad (\text{equação 61})$$

$$\% subst. = 48\%$$

O teor de água sobre o total de materiais secos é obtido da equação que modela matematicamente a relação exposta pela figura 53 na forma da equação 62.

$$H = (-0,0127 \times fc_{28}) + 7,9694 \quad (\text{equação 62})$$

$$H = 7,70\%$$

Com os parâmetros de referência são obtidos os valores relacionados na segunda coluna da tabela 70, sem a correção do volume de cinza. Na terceira coluna são apresentados os quantitativos para a obtenção de 1m<sup>3</sup> de concreto.

Tabela 69: traço calculado para um concreto C15

Material	Traço		
	Original	Substituição sem correção	Substituição com correção
Cimento	363	189	189
Cinza 2680	0	174	106
Areia fina	125	125	125
Areia média	501	501	501
Brita 0	598	598	598
Brita 1	826	826	826
Água	182	186	181
a/c	0,50	0,98	0,96
a/agl	0,50	0,51	0,61
Volume (dm <sup>3</sup> )	1000	1036	999

A partir da figura 54 é possível relacionar a resistência pretendida com a relação água/aglomerante obtida no trabalho experimental. O cálculo desse valor, com o auxílio da equação 63, permite confrontar o valor calculado para o traço obtido estabelecendo um parâmetro de controle.



$$\frac{a}{agl.} = (-0,0055 \times f_{c_{28}}) + 0,737 \quad (\text{equação 63})$$

$$\frac{a}{agl.} = 0,62$$

A relação água/cimento calculada pelo procedimento proposto coincide com o valor obtido diretamente da função que define a relação entre a resistência à compressão a relação água/aglomerante.

A tabela 70 relaciona os parâmetros empregados no desdobramento dos diversos traços padrão e os consumos de cimento e cinza em cada caso.

Tabela 70: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência

$f_{ck}$ (MPa)	a/agl	H (%)	% subst.	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo teórico de cinza (kg/m <sup>3</sup> )
15	0,61	7,70	48	189	106
20	0,58	7,63	38	225	84
25	0,55	7,57	27	265	60
30	0,53	7,50	16	305	35
35	0,50	7,44	5	345	11

#### 5.8.2.1.2 Verificação da relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

A figura 55 apresenta graficamente a relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão, estabelecida a partir dos dados relacionados na tabela 68.

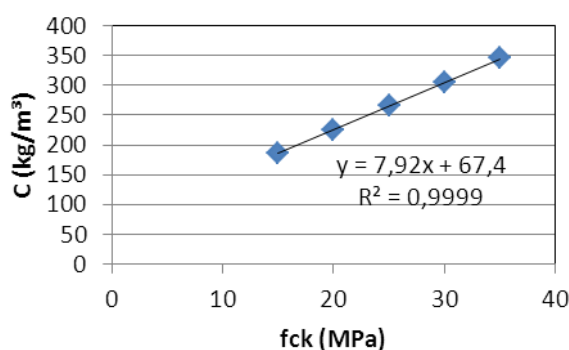


Figura 55: relação entre consumo de cimento e  $f_{ck}$

### 5.7.2.2 Substituição sem correção (cinza 2680)

Durante o desenvolvimento desse concreto a adição de mesma quantidade de água nos três primeiros traços, como indicado na tabela 71, determinou um abatimento pelo tronco de cone de  $120 \pm 20$  mm. A perspectiva de que fossem trabalhados todos os traços com a mesma quantidade de água estimulou a que fosse mantida essa quantidade de água nos dois últimos traços, no entanto nos traços em que a substituição correspondia a um percentual maior ocorreu uma queda abrupta do abatimento pelo tronco de cone. Essa atitude determinou a definição de uma situação não esperada, qual seja a de que todos os traços foram produzidos com a mesma relação água/aglomerante, mas para a obtenção do abatimento de referência a correção do teor de água sobre o total de materiais secos conduziu a valores maiores nos traços que apresentaram menor abatimento inicial. Essa situação obrigou a que fosse introduzida uma correção no cálculo dos traços para que fosse mantida a mesma relação água/aglomerante com a qual foram produzidos os concretos amostrados. As curvas apresentadas nas figuras 53 e 54 expressam as relações citadas:

Na tabela 71 são apresentados os resultados obtidos com o concreto com adição de cinza volante 2680 sem correção de volume.

Tabela 71: resumo dos resultados obtidos com o concreto com adição de cinza volante 2680 sem correção de volume

Material	% substituição				
	0	10	22,5	35	47,5
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	0,111	0,290	0,538	0,905
Areia fina	0,345	0,383	0,445	0,531	0,657
Areia média	1,381	1,534	1,782	2,124	2,630
Brita 0	1,648	1,831	2,126	2,535	3,183
Brita 1	2,275	2,528	2,936	3,500	4,334
Traço final cim. : agr.	1:5,65	1:6,39	1:7,58	1:9,23	1:11,71
Traço final agl. : agr.	1:5,65	1:5,65	1:5,65	1:5,65	1:5,65
H <sub>1</sub> (%)	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
s <sub>1</sub> (mm)	130	135	110	70	45
Coefficiente	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*
H <sub>f</sub> (%)	7,44	7,41	7,56	7,92	8,27
sf (mm)	120	120	120	120	120
a/c	0,50	0,55	0,64	0,77	0,95
a/agl	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
% de adição	0	0	0	0	0
% substituição	0	10	22,5	35	47,5
C (kg/m <sup>3</sup> )	363	325	276	230	184
fc <sub>7</sub> (MPa)	36,3	33,6	27,6	21,1	16,6
fc <sub>28</sub> (MPa)	42,5	39,9	37,2	28,7	25,5

Para o estabelecimento dos parâmetros de entrada são empregados os gráficos a seguir apresentados nas figuras 56 e 57.

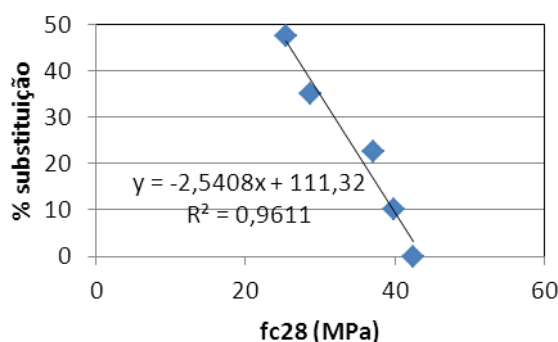


Figura 56: relação entre resistência à compressão e % de substituição

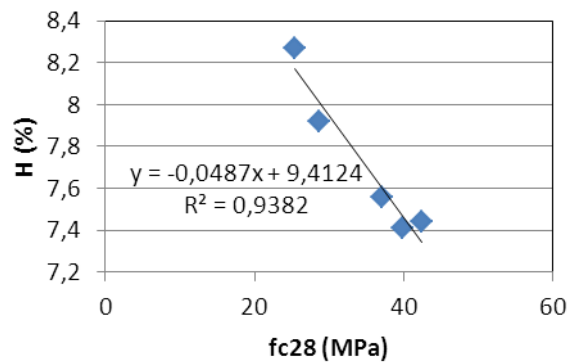


Figura 57: relação entre resistência à compressão e H

#### 5.7.2.2.1 Roteiro de cálculo do traço correspondente ao concreto classe C 15

A porcentagem de substituição foi obtida a partir da relação expressa pelo gráfico apresentado na figura 56, conforme detalhado pela equação 64.

$$\begin{aligned} \%subst. &= (-2,5408 \times fc_{28}) + 111,32 = && \text{(equação 64)} \\ \%subst. &= 56\% \end{aligned}$$

O teor de água sobre o total de materiais secos foi obtido da relação expressa pelo gráfico da figura 57, conforme detalhado pela equação 65.

$$\begin{aligned} H &= (-0,0487 \times fc_{28}) + 9,4124 && \text{(equação 65)} \\ H &= 8,36\% \end{aligned}$$

A partir do traço de referência são obtidos os valores relacionados na segunda coluna da tabela 72, sem a correção do volume de cinza. Na terceira coluna são apresentados os quantitativos para a obtenção de 1m<sup>3</sup> de concreto.

Tabela 72: traço calculado para um concreto C15

Material	Traço				
	Original	Sem correção	Com correção do volume final	Com correção da relação a/agl.	Com correção do volume final
cimento	363	160	150	167	164
Cinza 2680	0	203	191	213	209
Areia fina	125	125	118	118	116
Areia média	501	501	472	472	464
Brita 0	598	598	563	563	554
Brita 1	826	826	778	778	765
Água	182	202	190	190	187
a/c	0,50	1,26	1,26	1,14	1,14
a/agl	0,50	0,56	0,56	0,50	0,51
Volume (dm <sup>3</sup> )	1000	1062	1000	1017	1000

A última coluna relaciona os valores obtidos de maneira a que seja verificada a relação água/aglomerante de referência. A quantidade de água apresentada não representa o teor de água sobre o total de materiais secos empregado originalmente no cálculo do traço, o que exigiria uma nova correção, no entanto, o valor menor da percentagem de água sobre o total de materiais secos considerado determinará um abatimento pelo tronco de cone dentro da variação prevista.

A tabela 73 apresentada relaciona os parâmetros empregados no desdobramento dos diversos traços padrão e o consumo de cimento em cada caso.

Tabela 73: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência

$f_{ck}$ (MPa)	a/agl	H (%)	%subst.	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo teórico de cinza (kg/m <sup>3</sup> )
15	0,51	8,36	56	164	209
20	0,51	8,12	44	207	163
25	0,50	7,87	31	253	113
30	0,50	7,63	18	297	65
35	0,50	7,39	6	336	21

### 5.7.2.2.2 Verificação da relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

A figura 58 apresenta a verificação da relação existente entre o consumo de cimento e a resistência característica à compressão.

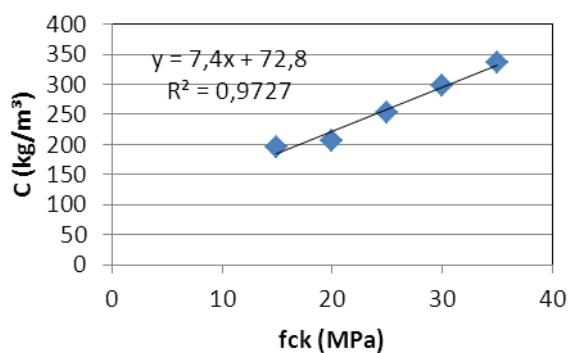


Figura 58: relação entre consumo de cimento e  $f_{ck}$

### 5.7.3 DOSAGEM REALIZADA COM O EMPREGO DA CINZA 4195

Considerando o mais elevado nível de resistência obtido no concreto produzido com o emprego da cinza 4195, foi adotado, posteriormente mais um nível de substituição para aumentar o espectro de resistências a fim de permitir a interpolação de traços com mais baixas resistência características à compressão.

### 5.7.3.1 Substituição com correção (cinza 4195)

As características do concreto produzido com a cinza 4195 com correção do volume são resumidas na tabela 74.

Tabela 74: resumo das características do concreto produzido com a cinza 4195 com correção do volume

Material	% substituição					
	0	10	22,5	35	47,5	70
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	0,083	0,217	0,402	0,676	1,742
Areia fina	0,345	0,383	0,445	0,531	0,657	1,150
Areia média	1,381	1,534	1,782	2,124	2,630	4,602
Brita 0	1,648	1,831	2,126	2,535	3,183	5,492
Brita 1	2,275	2,528	2,936	3,500	4,334	7,584
Traço final cim. : agr.	1:5,65	1:6,34	1:7,51	1:9,09	1:11,48	1:20,57
Traço final agl. : agr.	1:5,65	1:5,80	1:5,99	1:6,19	1:6,45	1:6,86
H <sub>1</sub> (%)	7,50	7,53	7,56	7,60	7,64	7,43
s <sub>1</sub> (mm)	105	115	120	125	140	140
Coeficiente	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*	0,10
H <sub>f</sub> (%)	7,60	7,56	7,56	7,57	7,52	7,32
sf (mm)	120	120	120	120	120	120
a/c	0,50	0,55	0,64	0,77	0,95	1,603
a/agl	0,50	0,51	0,53	0,55	0,57	0,584
% de adição	0	0	0	0	0	0
% substituição	0	10	22,5	35	47,5	70
C (kg/m <sup>3</sup> )	363	327	281	236	190	110
f <sub>c7</sub> (MPa)	35,8	32,8	29,7	24,3	18,1	6,92
f <sub>c28</sub> (MPa)	44,9	41,2	39,1	34,8	28,4	14,5

Para o estabelecimento dos parâmetros de entrada são empregados os gráficos a seguir apresentados nas figuras 59 a 61:

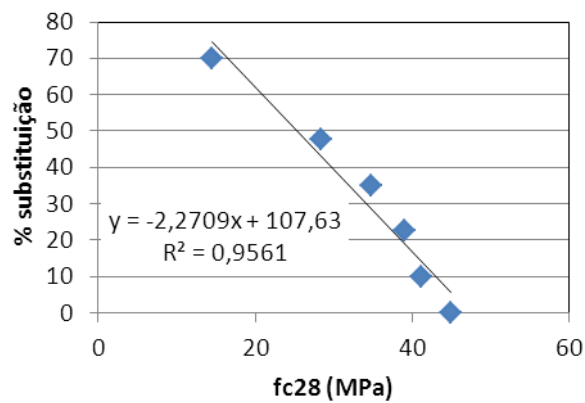


Figura 59: relação entre resistência à compressão e % de substituição

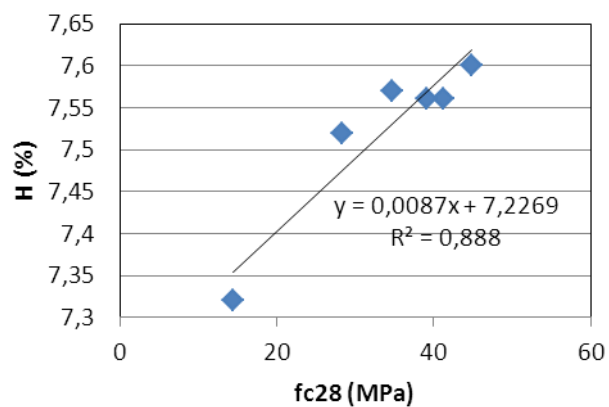


Figura 60: relação entre resistência à compressão e H

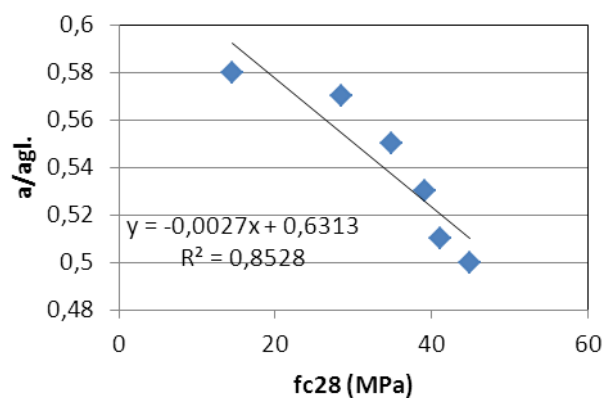


Figura 61 : relação entre resistência à compressão e relação água/aglomerante



### 5.7.3.1.1 Roteiro de cálculo do traço correspondente ao concreto classe C15

A percentagem de substituição foi obtida a partir da relação expressa pelo gráfico apresentado na figura 59, conforme detalhado pela equação 66.

$$\% subst. = (-2,2709 \times f_{c_{28}}) + 107,63 = \quad (\text{equação 66})$$

$$\% subst. = 59\%$$

O teor de água sobre o total de materiais secos foi obtido da relação expressa pelo gráfico da figura 60, conforme detalhado pela equação 67.

$$H = (0,0087 \times f_{c_{28}}) + 7,2269 \quad (\text{equação 67})$$

$$H = 7,04\%$$

Com os parâmetros de referência são obtidos os valores relacionados na segunda coluna da tabela 75, sem a correção do volume de cinza. Na terceira coluna são apresentados os quantitativos para a obtenção de 1m<sup>3</sup> de concreto.

Tabela 75: traço calculado para um concreto C15

Material	Traço			
	Original	Substituição sem correção	Substituição com correção	Final
Cimento	363	149	149	150
Cinza 4195	0	214	160	161
Areia fina	125	125	125	126
Areia média	501	501	501	505
Brita 0	598	598	598	602
Brita 1	826	826	826	832
Água	182	179	175	176
a/c	0,50	1,20	1,17	1,17
a/agl	0,50	0,49	0,57	0,57
Volume (dm <sup>3</sup> )	1000	1020	993	1000

Com base na relação definida na figura 61 é possível relacionar a resistência pretendida com a relação água/aglomerante obtida no trabalho experimental. O cálculo desse valor, conforme a equação 68, permite confrontar o valor calculado para o traço obtido estabelecendo um parâmetro de controle.

$$\frac{a}{agl.} = (-0,0027 \times f_{c_{28}}) + 0,6313 \quad (\text{equação 68})$$

$$\frac{a}{agl.} = 0,57$$

A relação água/cimento calculada pelo procedimento proposto é inferior ao valor obtido diretamente da função que define a relação entre a resistência à compressão a relação água/aglomerante. Essa constatação poderia suscitar a necessidade de realizar uma nova correção, no entanto é necessário considerar a variação existente na relação considerada e tratar-se de apenas um parâmetro de controle.

A tabela 76 apresenta a relação entre os parâmetros empregados no desdobramento dos diversos traços padrão e os consumos de cimento e cinza em cada caso.

Tabela 76: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência

$f_{ck}$ (MPa)	a/agl	H (%)	%subst.	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo teórico de cinza (kg/m <sup>3</sup> )	a/agl. real de controle
15	0,54	7,04	59	149	163	0,57
20	0,52	7,46	47	193	128	0,56
25	0,50	7,50	36	233	98	0,55
30	0,49	7,55	25	273	68	0,53
35	0,47	7,59	13	316	35	0,52

### 5.7.3.1.2 Verificação da relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

A figura 62 apresenta a verificação da relação existente entre o consumo de cimento e a resistência característica à compressão.

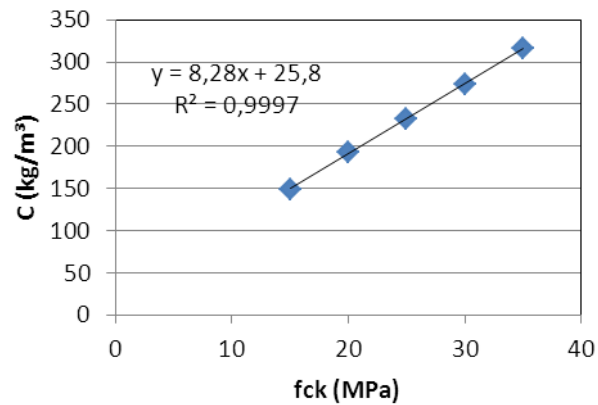


Figura 62: relação entre consumo de cimento e  $f_{ck}$

### 5.7.3.2 Substituição sem correção (cinza 4195)

As características do concreto produzido com cinza 4195 sem correção do volume são resumidas na tabela 77.

Tabela 77: resumo das características do concreto produzido com cinza 4195 sem correção do volume

Material	% substituição					
	0	10	22,5	35	47,5	70
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	0,111	0,290	0,538	0,905	2,333
Areia fina	0,345	0,383	0,445	0,531	0,657	1,150
Areia média	1,381	1,534	1,782	2,124	2,630	4,602
Brita 0	1,648	1,831	2,126	2,535	3,183	5,492
Brita 1	2,275	2,528	2,936	3,500	4,334	7,584
Traço final cim. : agr.	1:5,65	1:6,12	1:7,58	1:9,23	1:11,71	1:21,16
Traço final agl : agr.	1:5,65	1:5,65	1:5,65	1:5,65	1:5,65	1:5,65
H <sub>1</sub> (%)	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50	7,50
s <sub>1</sub> (mm)	105	90	90	85	75	95
Coefficiente	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*	0,10
H <sub>f</sub> (%)	7,60	7,72	7,72	7,76	7,86	7,68
sf (mm)	120	120	120	120	120	120
a/c	0,50	0,55	0,64	0,77	0,95	1,66
a/agl	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
% de adição	0	0	0	0	0	0
% substituição	0	10	22,5	35	47,5	70
C (kg/m <sup>3</sup> )	363	325	279	233	186	110
f <sub>c7</sub> (MPa)	35,8	31,2	26,6	23,5	19,6	9,48
f <sub>c28</sub> (MPa)	44,9	40,4	38,3	36,6	32,1	18,2

Neste caso o único parâmetro de entrada é a percentagem de substituição uma vez que todos os traços apresentaram praticamente a mesma demanda de água determinando uma mesma relação água/aglomerante para valores de percentagem de água sobre materiais secos aproximadamente iguais. O gráfico representado na figura 63 expõe essa relação entre resistência à compressão e percentagem de substituição.

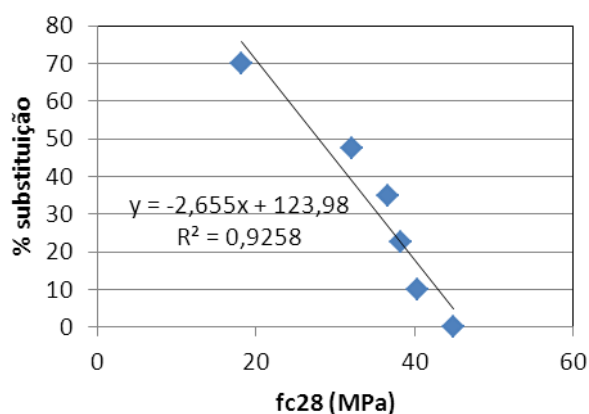


Figura 63: relação entre resistência à compressão e % de substituição

#### 5.7.3.2.1 Roteiro de cálculo do traço correspondente ao concreto classe C15

A percentagem de substituição foi obtida a partir da relação expressa pelo gráfico apresentado na figura 63, conforme detalhado pela equação 69.

$$\begin{aligned} \% subst. &= (-2,655 \times fc_{28}) + 123,98 = && \text{(equação 69)} \\ \% subst. &= 67\% \end{aligned}$$

Em função de ter sido observada uma variação muito pequena nos valores do teor de água sobre o total de materiais secos em todos os traços experimentais, o cálculo individualizado para cada percentagem de substituição não apresenta justificativa prática pela variação esperada no abatimento pelo tronco de cone. Dessa maneira, foi considerado para o cálculo de todos os traços o valor médio de 7,72%.

Com os parâmetros de referência, são obtidos os valores relacionados na segunda coluna da tabela 78, sem a correção do volume de cinza. Na terceira coluna são apresentados os quantitativos para a obtenção de 1m<sup>3</sup> de concreto.

Tabela 78: traço calculado para um concreto C15

Material	Traço			
	Original	Substituição sem correção	Correção do volume	Correção da relação a/agl.
cimento	363	120	116	119
Cinza 4195	0	243	236	243
Areia fina	125	125	121	121
Areia média	501	501	486	486
Brita 0	598	598	580	580
Brita 1	826	826	801	801
Água	182	186	181	181
a/c	0,50	1,56	1,56	1,51
a/agl	0,50	0,51	0,51	0,50
Volume (dm <sup>3</sup> )	1001	1031	1000	1004

O volume de concreto obtido na última coluna, embora inferior a 1000 dm<sup>3</sup>, não é corrigido, tendo em vista que o valor obtido é fortemente influenciado pelo critério de arredondamento adotado pelo programa empregado no cálculo. Ademais a diferença observada no volume final corresponde a um teor de ar aprisionado de 0,6%.

A tabela 79 relaciona os parâmetros empregados no desdobramento dos diversos traços padrão e os consumos de cimento e cinza em cada caso.

Tabela 79: parâmetros de dosagem e consumo de cimento e cinza para os traços de referência

f <sub>ck</sub> (MPa)	a/agl	H (%)	%subst.	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo teórico de cinza (kg/m <sup>3</sup> )
15	0,50	7,72	67	119	243
20			53	170	192
25			40	217	145
30			27	264	98
35			14	311	51

### 5.7.3.2.2 Verificação da relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão

A figura 64 apresenta a expressão gráfica da relação existente entre consumo de cimento e resistência característica à compressão a partir dos dados apresentados na tabela 76.

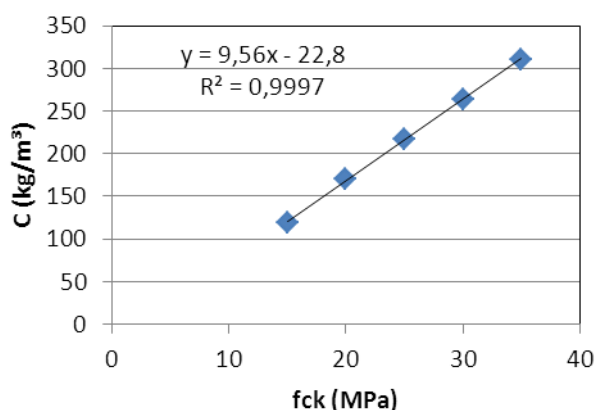


Figura 64: relação entre consumo de cimento e  $f_{ck}$

### 5.7.3.2.3 Simplificação de cálculo

Considerando a homogeneidade dos traços em função de todos serem obtidos com um mesmo teor de água sobre o total de materiais secos e mesma relação água/aglomerante, é possível proceder a uma simplificação no cálculo dos traços como a seguir se demonstra. Na tabela 80 são apresentados os quantitativos de materiais referentes a cada traço calculado.

Tabela 80: resumo dos traços calculados com a cinza 4195 sem correção do volume

Material (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{ck}$ (MPa)					Amplitude de variação (kg/m <sup>3</sup> )
	15	20	25	30	35	
Cimento	119	170	217	264	311	-
Cinza	243	192	145	98	51	-
Areia fina	121	122	123	123	124	3
Areia média	486	489	491	494	496	10
Brita 0	580	583	586	589	592	12
Brita 1	801	805	810	814	818	17
água	181	182	183	184	184	3
Volume (dm <sup>3</sup> )	1004	1003	1002	1002	1001	-

O procedimento proposto tem por objetivo simplificar as operações de dosagem e permitir com facilidade o cálculo de qualquer traço intermediário entre os limites estabelecidos.

Os quantitativos apresentados foram obtidos a partir do consumo teórico de cimento, ou seja, a partir da consideração de ser possível obter o adensamento pleno do concreto.

Como na prática o adensamento total não é verificado, o cálculo do consumo de cimento sempre é feito admitindo haver um certo volume ocupado pelo ar aprisionado principalmente durante o processo de mistura. Dessa maneira, é possível produzir concreto segundo qualquer um dos traços apresentados admitindo um certo teor de ar aprisionado. Feita essa consideração, é possível reproduzir os traços indicados com as quantidades de materiais referentes ao traço de menor consumo de cimento, o traço de classe C15. As diferenças no volume de concreto advindas da redução do volume de agregados nos traços de classes de resistências mais elevadas podem perfeitamente ser toleradas pela existência de um certo teor de ar aprisionado sempre presente e não considerado no cálculo do consumo de cimento em cada caso.

Assim, então, é possível imaginar todos os traços considerados serem produzidos com os quantitativos de agregados e água calculados para o traço de classe C15, correspondendo a diferença que ocorre no volume ao teor de ar aprisionado. Para melhor visualização é apresentada a tabela 81 que segue:

Tabela 81: resumo dos traços simplificados calculados com a cinza 4195 sem correção do volume

Material (kg/m <sup>3</sup> )	f <sub>ck</sub> (MPa)				
	15	20	25	30	35
Cimento	119	170	217	264	311
Cinza	243	192	145	98	51
Areia fina	121				
Areia média	486				
Brita 0	580				
Brita 1	801				
água	181				
Volume (dm <sup>3</sup> )	1004	999	993	988	983
a/agl.	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51
H(%)	7,75	7,74	7,74	7,73	7,72
Teor de ar aprisionado (%)	-0,4	0,1	0,7	1,2	1,7

Como os traços foram obtidos a partir da consideração de um teor de água sobre o total de materiais secos de 7,72%, a variação experimentada por esse parâmetro, a partir da simplificação feita, pode ser admitida como insignificante não tendo qualquer repercussão sobre o abatimento pelo tronco de cone.



A aplicação direta desse artifício de cálculo está na possibilidade de calcular qualquer traço por interpolação direta a partir do conceito expresso graficamente pela figura 63.

Exemplificando: na condições definidas pela dosagem e na suposição de haver a necessidade de produzir um concreto para a verificação de uma resistência característica à compressão de 22,5 MPa.

O traço é calculado a partir da definição da percentagem de substituição de cimento por cinza o que é obtido pela aplicação da equação 71 que modela matematicamente a relação entre percentagem de substituição e resistência à compressão apresentada graficamente na figura 63.

A título de verificação o procedimento poderia partir diretamente da relação exposta pela figura 64, permitindo ser calculado diretamente o consumo de cimento através da equação que modela matematicamente essa relação conforme apresentado pela equação 72.

$$\begin{aligned} f_{cm} &= f_{ck} + (1,65 \times 4,0) = && \text{(equação 70)} \\ f_{cm} &= 29,1 \text{MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ subst.} &= (-2,655 \times f_{c_{28}}) + 123,98 = && \text{(equação 71)} \\ \% \text{ subst.} &= (-2,655 \times 29,1) + 123,98 = \\ \% \text{ subst.} &= 47\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= (9,56 \times f_{ck}) - 22,8 && \text{(equação 72)} \\ C &= (9,56 \times 22,5) - 22,8 \\ C &= 192 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

De posse desses dados é possível calcular o traço admitindo que o consumo de cimento represente 53% do total de aglomerante. Como a quantidade de agregados e a percentagem de água sobre o total de materiais secos são constantes é possível obter o traço apresentado na tabela 82.

Tabela 82: traço calculado por interpolação a partir da % de substituição, com a cinza 4195, sem correção do volume

Material	Quantidade de material (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento	193
Cinza	171
Areia fina	121
Areia média	486
Brita 0	580
Brita 1	801
água	181
Volume (dm <sup>3</sup> )	997
a/agl.	0,50
H(%)	7,72
Teor de ar aprisionado (%)	0,3

### 5.7.3.3 Adição ao traço de referência (cinza 4195)

Em complementação ao estudo desenvolvido até então foi adicionada cinza ao traço de referência em percentagens crescentes. Essa decisão foi tomada tendo em vista que de todos os traços calculados em todas as alternativas estudadas para o concreto da classe C35, o menor consumo foi verificado na situação em que simplesmente foi adicionada a cinza 3140 aos traços reproduzidos apenas com cimento para a definição da curva de Abrams do processo convencional de dosagem, conforme apresentado no item 4.3.6.

Como já apresentado anteriormente há que ser considerado haver duas funções distintas da cinza quando empregada em um concreto, uma de natureza química, e outra de natureza física. A primeira é caracterizada pela ação pozolânica, interferindo diretamente sobre a resistência, e a outra tem um caráter eminentemente físico na medida em que, ao compor o aglomerante, garante a obtenção do volume ótimo de pasta da mistura o que permite ser obtida a trabalhabilidade esperada com o menor teor de água sobre o total de materiais secos, possível.

Assim, em traços de mais elevada resistência, cujo consumo de cimento se aproxima do valor verificado no traço de referência obtido sem cinza, a quantidade de cinza empregada em substituição ao cimento é pequena, não sendo otimizada a reação pozolânica por falta de reagente, vale dizer por falta de pozolana.

Nessas condições é possível admitir que a adição de cinza ao traço de referência determinará um ganho de resistência até o limite em que o aumento na demanda de água for mais importante no decréscimo da resistência do que o ganho de resistência determinada pela reação pozolânica.

A tabela 83 apresentada a seguir relaciona os parâmetros considerados e os resultados obtidos.

Tabela 83: resumo das características do concreto produzido com adição da cinza 4195

Material	% adição				
	0	25	50	75	100
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Cinza	-	0,250	0,500	0,750	1,000
Areia fina	0,345	0,345	0,345	0,345	0,345
Areia média	1,381	1,381	1,381	1,381	1,381
Brita 0	1,648	1,648	1,648	1,648	1,648
Brita 1	2,275	2,275	2,275	2,275	2,275
Traço final cim. : agr.	1:5,65	1:5,90	1:6,15	1:6,40	1:6,65
Traço final agl. : agr.	1:5,65	1:4,52	1:3,77	1:3,23	1:2,82
H <sub>1</sub> (%)	7,50	8,10	9,24	9,80	10,4
s <sub>1</sub> (mm)	105	95	140	120	95
Coefficiente	0,10	0,10*	0,10*	0,10*	0,10*
H <sub>f</sub> (%)	7,60	8,29	9,10	9,96	10,7
sf (mm)	120	120	120	120	120
a/c	0,50	0,56	0,66	0,72	0,80
a/agl	0,50	0,44	0,44	0,41	0,40
% de adição	0	25,0	50	75	100
% substituição	-	-	-	-	-
C (kg/m <sup>3</sup> )	363	342	319	302	286
fc <sub>7</sub> (MPa)	35,6	34,1	29,0	27,5	25,7
fc <sub>28</sub> (MPa)	44,9	46,4	42,7	44,0	41,9

Para melhor visualização é apresentado o gráfico representado na figura 65 composto a partir da resistência à compressão obtidas com os traços obtidos por substituição de

cimento por cinza, o que é interpretado como uma adição negativa, e pelos traços em que a cinza compõe a mistura como uma adição.

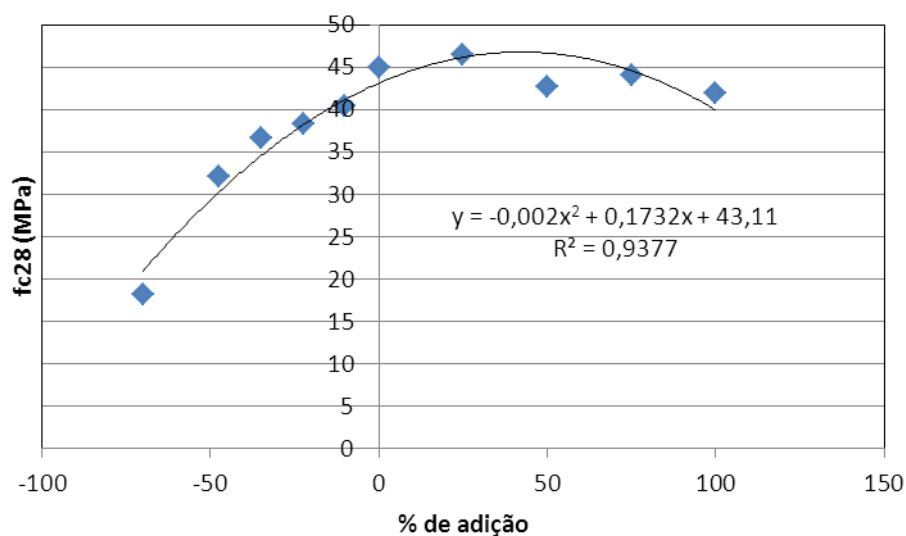


Figura 65: relação entre % de adição e resistência à compressão

Como pode ser observado, o melhor rendimento ocorre quando é adicionada cinza em uma porcentagem de 25%, embora ocorra um aumento na porcentagem de água sobre o total de materiais secos.

Esse aumento pode ser estimado a partir da figura 66 apresentada a seguir:

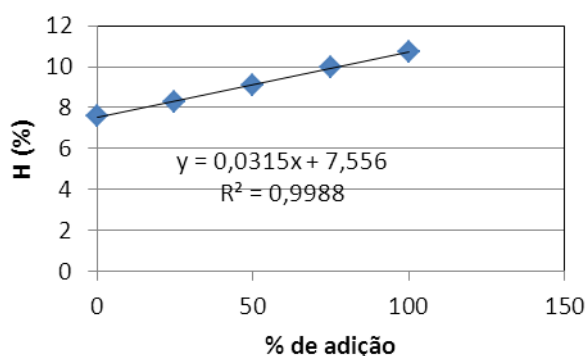


Figura 66: relação entre % de adição e H

Para cálculo de traços de mais elevado consumo de cimento é possível considerar ser mais econômico admitir a adição de cinza sobre o traço original, assim as porcentagens de adição são obtidas da equação que modela a relação existente entre a porcentagem de adição e a resistência à compressão apresenta na figura 65.

### 5.7.3.3.1 Roteiro de cálculo do traço referente ao concreto da classe C 40

Para o concreto da classe C40, considerando como até então em todo o estudo apresentado nesse trabalho um desvio padrão de dosagem de 4,0 MPa, tem-se como resistência média de dosagem o valor de 46,6 MPa. A percentagem de adição para esse concreto será, então, calculada a partir da equação 73 que modela a relação expressa pelo gráfico da figura 61.

$$46,6 = (-0,002 \times \%ad.^2) + (0,1732 \times \%ad.) + 43,11 \quad (\text{equação 73})$$

$$\%ad. = 32\%$$

Para uma percentagem de adição de 32% deverá ser empregada uma quantidade de água correspondente a uma percentagem de água sobre o total de materiais secos obtido da curva apresentada na figura 62 e modelada pela equação 74 a seguir apresentada:

$$H = 0,0315 \times \%ad. + 7,556 \quad (\text{equação 74})$$

$$H = 0,0315 \times 32 + 7,556$$

$$H = 8,56\%$$

Nesse caso, como ocorre uma grande alteração no teor de água sobre o total de materiais secos, é necessário tomar como parâmetro de entrada também a relação água/cimento como já procedido na situação similar apresentada no item 4.3.6. A relação água/cimento é determinada com o auxílio do gráfico representado na figura 67 e pela aplicação da equação 75 que modela matematicamente a relação entre a % de substituição e a relação água/cimento.

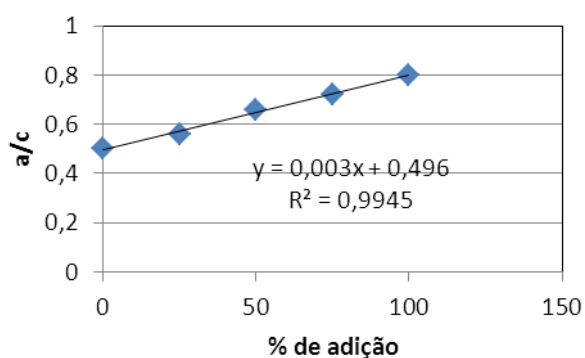


Figura 67: relação entre % de substituição e relação água/cimento

$$\frac{a}{c} = 0,003 \times \%ad + 0,496 \quad (\text{equação 75})$$

$$\frac{a}{c} = 0,003 \times 32 + 0,496$$

$$\frac{a}{c} = 0,592$$

A tabela 84 apresentada o traço calculado.

Tabela 84: traço calculado para concreto C 40 a partir da adição de cinza

Material	Quantidade de material (kg/m³)		
	Original	Com adição	Corrigido
Cimento	363	363	335
Cinza	-	116	107
Areia fina	125	125	115
Areia média	501	501	462
Brita 0	598	598	551
Brita 1	826	826	761
Água	183	216	199
Volume	1002	1085	1000
a/c	0,50	0,595	0,594
a/agl	0,50	0,45	0,450
H (%)	7,58	8,54	8,54

## 5.8 CÁLCULO DE TRAÇOS A PARTIR DA RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE CIMENTO E RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO

A relação existente entre a resistência característica à compressão e o consumo de cimento permite o cálculo de traços a partir da variação do consumo de cimento desde que conhecida a variação do teor de água sobre o total de materiais secos no intervalo considerado.

No caso em que o teor de água sobre o total de materiais secos é constante, o que representa uma situação ideal, traços podem ser obtidos apenas pela variação no consumo de cimento. Quando a massa de aglomerante é a mesma, então os traços serão obtidos para diferentes resistências apenas pela alteração na proporção entre cimento e cinza o que vale dizer apenas pela alteração do rendimento do aglomerante.

Tomando como exemplo o cálculo de um traço para uma resistência característica à compressão de 27,5 MPa, o consumo de cimento pode ser obtido pela aplicação direta da relação entre o consumo de cimento e a resistência característica à compressão representada pelo gráfico da figura 64 e modelada matematicamente pela equação 76.

$$C = (9,56 \times fck) - 22,8 \quad (\text{equação 76})$$

$$C = (9,56 \times 27,5) - 22,8$$

$$C = 240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Transpondo a tabela 84 e alterando o consumo de cimento, mas mantendo constante a massa de aglomerante seria obtido o traço almejado assim como apresentado na tabela 85.

Tabela 85: traços finais obtidos do estudo realizado com a cinza a cinza 4195 com correção do volume e traço adicional calculado pela relação entre a resistência característica à compressão e o consumo de cimento

Material (kg/m <sup>3</sup> )	fck (MPa)					
	15	20	25	27,5	30	35
Cimento	118	170	218	240	267	317
Cinza	241	192	145	123	99	52
Areia fina	121					
Areia média	486					
Brita 0	580					
Brita 1	801					
água	181					
Volume (dm <sup>3</sup> )	1003	999	994	991	990	985
a/agl.	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49
H(%)	7,75	7,74	7,74	7,73	7,73	7,72
Teor de ar aprisionado (%)	-0,3	0,1	0,6	0,9	1,0	1,5

## 5.9 OUTRAS APLICAÇÕES DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

### 5.9.1 Na dosagem de concretos autoadensáveis

Tem por objetivo esse capítulo apresentar uma alternativa prática de aplicação imediata na dosagem de concretos autoadensáveis.

Porém, antes de apresentar a metodologia proposta é necessário discorrer algo sobre o procedimento de dosagem desse tipo de concreto.

Como no procedimento de dosagem apresentado para concretos de emprego convencional, o primeiro trabalho trata da obtenção da composição dos agregados de maneira a ser obtido um proporcionamento que conduza a uma mistura com a maior continuidade possível.

A partir dessa definição é calculado um traço de referência de maneira que a relação água/cimento estimada como ponto de partida permita ser obtida uma resistência à compressão superior àquela média necessária para a verificação de um determinado fck de projeto. A fixação da relação água/cimento e do teor de água sobre o total de materiais secos determina um consumo teórico de cimento para o traço considerado.



Caso o profissional que esteja desenvolvendo o trabalho não tenha experiência para proceder a essa estimativa inicial de traço, necessariamente deverá haver um estudo em laboratório que possibilite determinar o valor para o teor de água sobre o total de materiais secos necessário para a obtenção de um abatimento pelo tronco de cone, definido inicialmente para o concreto, antes da colocação do aditivo superplastificante.

Como em concretos autoadensáveis deve ser privilegiada a coesão, a recomendação é de que o traço de referência apresente um consumo de cimento superior a 450 kg/m<sup>3</sup>.

A definição do teor de argamassa é feita experimentalmente sendo o teor inicial determinado pelo método proposto no item 4.3. Como o procedimento visa a obtenção de um teor de argamassa adequada a um concreto para utilização convencional com abatimento pelo tronco de cone inferior a 120 mm, é necessário proceder a uma correção nesse valor inicial a partir da observação de concretos preparados com teores de argamassa crescentes sendo mantido o mesmo traço inicial. Esse procedimento pode seguir o roteiro proposto por Helene e Terzian (1992), conhecido como método IPT/EPUSP.

A rotina de observação deve ter como referência a adição da maior quantidade de água possível à mistura sem que ocorra segregação da mistura.

Tem sido tomado como referência com sucesso em estudos realizados um abatimento pelo tronco de cone igual ao valor da altura do cone de Abrams menos duas vezes a dimensão máxima do agregado de maior graduação empregado na mistura. Assim se for empregada uma brita de dimensão máxima característica de 19 mm, o abatimento pelo tronco de cone a ser atingido sem segregação da mistura será tanto quanto possível de 260 mm.

A rotina a ser seguida determina que a água seja adicionada em etapas de maneira que a cada acréscimo seja observada a coesão da mistura a partir da realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone. Sendo constatada a segregação da mistura são adicionados cimento e agregado miúdo de maneira a ser mantido o traço original. Nova quantidade de água é adicionada e nova observação feita de maneira que ao final seja verificado o abatimento pelo tronco de cone limite sem a ocorrência de segregação.

A esse teor de argamassa determinado são acrescidos dois pontos percentuais de maneira a que se possa dispor de uma reserva no valor desse parâmetro capaz de absorver pequenas variações na distribuição granulométrica da mistura de agregados passíveis de ocorrência em função de variações em na granulometria de qualquer um de seus componentes.

A partir dessas definições o traço é reproduzido para identificação do teor de aditivo superplastificantes a ser adotado sendo então submetido à bateria de ensaio previstos na normalização vigente apresentados por Tutikian (2008).

Assim definida a mistura de referência, parcelas do cimento são substituídas por cinza volante em percentagens crescentes de maneira que seja possível tratar os dados segundo o procedimento de dosagem proposto.

Será possível, dessa maneira, calcular traços para qualquer resistência compreendida entre os limites estabelecidos pelo traço sem substituição e o traço em que ocorreu a maior percentagem de substituição.

A experiência tem informado ser possível produzir concretos autoadensáveis com resistências características à compressão tão baixas como 15 MPa ou tão elevadas como a obtida sem substituição de cimento por cinza rigorosamente com o mesmo aspecto visual e comportamento reológico praticamente iguais.

A dosagem de concretos autoadensáveis fica simplificada na medida em que o trabalho primordial é restringido apenas à identificação do traço cujo teor de argamassa e o volume de pasta determinem condições ideais de trabalhabilidade definidas como anteriormente citado.

Normalmente por questões de segurança um concreto autoadensável poderá ser dosado com um volume de pasta ligeiramente superior ao volume ótimo o que determinará apenas um maior consumo de cinza garantindo a manutenção das características reológicas requeridas mesmo diante de pequenas alterações nas características dos agregados.

### 5.9.2 Na dosagem de concretos para fabricação de peças pré-moldadas

O procedimento proposto encontra aplicação igualmente eficaz na dosagem de concretos a serem empregados na produção de peças pré-moldadas que utilizam concretos muito secos devido a necessidade de as peças apresentarem estabilidade após o período de adensamento feito com auxílio de moldes.

Nessas situações o atingimento da resistência requerida está muito mais ligado ao aumento da densidade da mistura do que à relação água/cimento, visto esta ser muito baixa. A possibilidade de redução no consumo de cimento determina uma mistura porosa e por isso de menor resistência.

A aplicação do método proposto parte do estudo de concretos com plasticidades mais elevadas, correspondendo a abatimentos pelo tronco de cone de aproximadamente 80 mm, considerando um teor de argamassa definido pelo procedimento apresentado no item 4.3. É claro que o concreto não poderá ser assim empregado, mas a melhor trabalhabilidade obtida com um abatimento pelo tronco de cone mais elevado também será a melhor para abatimentos pelo tronco de cone menores.

Concretos muito secos com abatimento pelo tronco de cone zero, não permitem observar variações em função do traço ou seja em função do volume de pasta de maneira que essa determinação necessariamente precisa ser feita considerando um nível de abatimento pelo tronco de cone mais elevado.

Uma vez definido o volume ótimo de pasta a resistência requerida passa a ser obtida a partir da alteração do rendimento da composição aglomerante pela substituição de cimento por cinza.

#### 5.9.3 Na dosagem de concretos para compactação com rolos

Da mesma forma, por se tratar de uma mistura muito seca e de baixo consumo de cimento, concretos a serem compactados por rolos podem apresentar elevação da resistência pelo aumento da compacidade da mistura.

Assim, uma vez definido o melhor proporcionamento entre os agregados, é possível determinar a melhor reologia a partir da reprodução de diferentes traços com consumos de cimento da ordem daqueles verificados em concretos convencionais para estruturas e abatimentos pelo tronco de cone mais elevados, da ordem de 80 mm.

Definido então o traço de melhor reologia a resistência requerida passa a ser obtida pela alteração no rendimento do aglomerante pela substituição de cimento por cinza.

#### 5.9.4 Na dosagem de concretos de baixa densidade com agregados leves

A estabilidade de um concreto de baixa densidade obtido pelo emprego de agregados leves no estado fresco pode ser caracterizada pela manutenção da homogeneidade durante as operações de concretagem, ou seja é necessário garantir a incorporação de todo o agregado usado pela argamassa ou, se não for utilizado agregado miúdo, pela própria pasta.

O volume de agregado leve passível de incorporação está diretamente vinculado às características da pasta, principalmente com relação á coesão. Tanto mais agregado poderá

ser incorporado a uma matriz quanto maior o volume de pasta empregado e quanto maior sua coesão.

Mais água mais fluidez menor densidade e menor coesão menor capacidade de aglutinar as partículas do agregado leve. O aumento da coesão de uma pasta somente poderá ser obtido a partir de um elevado volume de aglomerante, o cimento.

No processo de dosagem é necessário definir um volume de pasta e sua consistência suficientes para incorporar a quantidade de agregado determinante do concreto na densidade desejada.

A partir da definição do traço cimento poderá ser gradualmente substituído por cinza volante de maneira a manter o volume e as características da pasta permitindo ser atingida a resistência requerida por um custo menor.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concretos e argamassas apresentam variações em suas características que bem podem ser consideradas como inerentes a processo de produção, de maneira que uma única reprodução de um traço pode ser considerada uma fotografia, retratando um comportamento pontual.

A reprodução continuada de um mesmo traço representará uma sequência de fotografias que retratarão comportamentos similares, mas não idênticos. A análise dessas diversas reproduções permitirá avaliar as variações inerentes ao processo de obtenção do material, informando não somente sobre valores absolutos, mas também sobre a variabilidade associada.

Conclusões sobre fotografias poderão indicar tendências mas sempre haverá o risco de ser promovida uma generalização apressada. Filmes, ou seja, a conjunção de várias fotografias permitirão avaliar mais que uma tendência, um comportamento.

Sempre que possível concretos deverão ser avaliados por filmes e não por fotografias.

Nunca foi objetivo do presente trabalho, e muito menos pretensão do autor, estabelecer uma comparação direta entre os diferentes concretos estudados para estabelecer uma escala de valores para estabelecimento de uma melhor ou uma pior alternativa em termos de procedimentos de dosagem, se não apenas apresentar um procedimento alternativo de dosagem.

O fato de haver o envolvimento de um menor consumo de cimento na maioria dos traços calculados pelo procedimento proposto deve apenas indicar uma tendência que, na medida do possível, deverá ser confirmada.

A título de informação adicional é conveniente citar que experiências de mesma orientação vem sendo feitas na prática em escala industrial há pelo menos oito anos com excelentes resultados, confirmando ser possível reduzir o consumo de cimento de concretos produzidos a partir de traços dimensionados segundo a metodologia proposta em comparação com aqueles obtidos de procedimentos tradicionais de dosagem.

## 6.1 CONCLUSÕES

Para melhor avaliar o comportamento dos traços reproduzidos durante o desenvolvimento do programa experimental, principalmente com relação aos diferentes tipos de cinza volante empregados e aos critérios de incorporação ao concreto, é apresentada a tabela 86 que relaciona os consumos de cimento obtidos nas diferentes situações.

Tabela 86: resumo dos consumos de cimento obtidos das diferentes maneiras de cálculo de traços

Cinza empregada	Forma de emprego	Consumo teórico de cimento (kg/m <sup>3</sup> )				
		fck (MPa)				
		15	20	25	30	35
Concreto sem cinza (referência)		237	240	260	285	320
3140	Substituição com correção	143	186	234	278	322
	Substituição sem correção	173	206	244	283	323
	Adição direta	203	215	232	<b>261</b>	<b>296</b>
2680	Substituição com correção	189	225	265	305	345
	Substituição sem correção	164	209	253	297	336
4195	Substituição com correção	149	193	233	273	316
	Substituição sem correção	<b>119</b>	<b>170</b>	<b>217</b>	264	311

Os valores assinalados indicam as alternativas em que foi obtido o menor consumo de cimento, sendo possível observar a influência direta do emprego de uma cinza de mais elevada superfície específica nos traços de classes de resistência C15, C20 e C25. Para os concretos de classes de resistência C30 e C35, o menor consumo de cimento foi obtido para traços concebidos a partir da adição direta da cinza volante 3140. Esse expediente foi empregado exclusivamente com o intuito de comprovar a eficácia do emprego de cinza volante em concretos, não tendo sido reproduzido com as outras duas cinzas consideradas no estudo.

O resultado obtido está relacionado diretamente com a disponibilidade de uma maior quantidade de reagente para a consecução da reação pozolânica.

Assim, é possível sugerir haver dois comportamentos distintos para a cinza volante incorporada ao concreto. Um com prevalectimento da ação física, na medida em que permite a manutenção do volume de pasta identificado como determinante da mistura de melhor comportamento reológico, minimizando o teor de água sobre o total de materiais secos, favorecendo a redução do consumo de cimento em traços de mais baixa classe de resistência, e outro com mais intensa ênfase ao comportamento químico da cinza volante através da reação pozolânica diante da maior disponibilidade de hidróxido de cálcio em traços com maior consumo de cimento.

Independentemente de qualquer juízo de valor, a observação dos resultados obtidos na pesquisa permite concluir haver vantagens no uso de cinza volante em concreto quando houver ganho de resistência, o que impacta diretamente no custo final.

O objetivo principal proposto pela pesquisa foi atingido na medida em que é efetivamente apresentada uma metodologia original e inovadora para dosagem de concretos com o uso de cinza volante. A propriedade do procedimento proposto está diretamente ligada à obtenção de traços com consumos de cimento menores do que aqueles observados em traços calculados para as mesmas premissas básicas através de um método convencional.

É confirmada a proposição basilar do estudo de haver para um determinado conjunto de materiais um traço que demanda a menor quantidade de água para um abatimento pelo tronco de cone pré-estabelecido e de ser possível manter um mesmo traço para diferentes resistências à compressão, alterando o rendimento da mistura aglomerante pela substituição de cimento por cinza volante de maneira a manter aproximadamente o mesmo volume de pasta e, por conseguinte, aproximadamente a mesma reologia sem alterando substancial na demanda de água.

O trabalho de pesquisa permitiu identificar a existência de uma relação linear entre o consumo de cimento e a resistência à compressão, expressa pelo  $f_{ck}$ , desde que seja mantida a mesma trabalhabilidade avaliada indiretamente pelo abatimento pelo tronco de cone. Essa relação constitui-se em uma ferramenta importante para a correção de traços ou até mesmo para seu cálculo podendo ser considerada um princípio consistente com elevada reprodutibilidade podendo ser considerado uma lei.

A utilização de aproximadamente um mesmo volume de pasta em uma família de traços permite que concretos de baixo consumo de cimento e resistências à compressão menos

elevadas possam ser obtidos com relações água/aglomerante menores que aquelas definidas em traços de mesma resistência obtidos de métodos tradicionais de dosagem, permitindo inferir ser possível esperar um comportamento mais eficiente em termos de durabilidade. Embora careça de confirmação essa possibilidade abre a perspectiva de emprego de concretos de mais baixas resistências e menor consumo de cimento.

A consideração em projeto de resistências características à compressão de menor magnitude com o emprego de concretos produzidos com intenso uso de cinza volante poderá vir a se constituir em um poderoso vetor na redução da emissão de carbono.

Através da prática proposta é possível obter traços de concreto autoadensável de diferentes resistências com praticamente as mesmas características de trabalhabilidade, além de permitir a otimização de concretos de elevada consistência empregados na produção de componentes pré-moldados ou concretos destinados à compactação com rolos.

Embora a metodologia proposta possa ser adotada em dosagens de qualquer tipo de concreto devem ser salientadas as vantagens advindas de seu emprego em dosagens de concretos autoadensáveis em que é mantido o mesmo aspecto e fundamentalmente a mesma trabalhabilidade para qualquer proporção de mistura entre cimento e cinza, conseqüentemente para qualquer nível de resistência. Essa homogeneidade permite uma definição mais precisa de referências visuais auxiliares na definição de pequenos ajustes no abatimento pelo tronco de cone inicial e mesmo na proporção do aditivo superplastificante.

O estudo produziu resultados que permitem uma nova visão sobre os conceitos de trabalhabilidade no que se refere ao entendimento da vinculação desta com o volume de pasta do concreto, assim como uma nova visão sobre a vinculação da resistência à compressão com a porosidade da mistura.

Outra consideração a ser feita, mesmo que não relacionada diretamente com os objetivos propostos pela pesquisa, é a de que o desempenho de cinzas volantes, como pozolanas ou simplesmente como elementos modificadores de reologia, pode ser significativamente diferente. Deve ser revista a prática usual de empregar cinzas volantes de diferentes procedências, e mesmo obtidas sob diferentes regimes de queima, os quais são alterados em função das condições de demanda por energia elétrica, como um material homogêneo.

As vantagens que podem ser obtidas da aplicação do método proposto para incorporação de cinza volante ao concreto são mais pronunciadas em concretos dosados para o atingimento de resistências à compressão de menor magnitude.



O desenvolvimento de um equipamento, informalmente chamado de cilindro graduado, e o estabelecimento de parâmetros para sua utilização, para o cálculo do teor de argamassa, minimizando a influência do aspecto subjetivo normalmente considerado em procedimento usuais, pode ser considerado como mais uma contribuição da pesquisa realizada. A simplicidade do procedimento desenvolvido com o auxílio do citado equipamento para definição da melhor proporção de mistura de agregados graúdos é igualmente uma contribuição valiosa para procedimentos de dosagem de concreto.

Ainda com relação ao cilindro graduado, a possibilidade de em uma única operação calcular, além do teor de argamassa, a massa unitária e a massa específica de agregados graúdos, representa uma evolução principalmente em aplicações em laboratórios de campo.

## 6.2 SUGESTÃO PARA A CONTINUIDADE DO ESTUDO

Fundamentalmente a grande linha que pode ser seguida na evolução do aqui apresentado deve ter como objetivo o estudo mais aprofundado da relação existente entre o volume de pasta e a reologia da mistura, a partir da quantificação da variável reológica, inclusive com o desenvolvimento ou adaptação de equipamentos específicos para o tipo de estudo pretendido.

A interpretação do comportamento reológico de diferentes misturas realizada por comparação direta a partir da avaliação da consistência do concreto medida pelo abatimento pelo tronco de cone tem caráter restrito, sugerindo uma tendência, como demonstrado, mas, principalmente, um potencial a ser explorado.

O comportamento com relação à durabilidade de concretos dosados segundo o procedimento sugerido, que apresentem baixo consumo de cimento na pasta otimizada, deve ser estudado oportunamente.

O desenvolvimento do método proposto com a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes além da consideração de serem obtidas as resistências desejadas em idades mais elevadas deve ser igualmente um tema a ser desenvolvido na medida em que poderá determinar a obtenção de concretos com ainda menores consumos de cimento ou viabilizar a obtenção de uma resistência mais elevada no traço de referência permitindo o cálculo de um espectro mais amplo de traços.

Seria importante que estudos fossem desenvolvidos na adaptação do método proposto a outros materiais assim como a escória de alto forno, cinza de casca de arroz e, ainda, argila calcinada.

### 6.3 MENSAGEM FINAL DO AUTOR

Os desafios propostos à humanidade para perpetuar o habitat legado em condições dignas de habitabilidade devem instigar a busca constante pela sustentabilidade como conceito de vida e não apenas como argumento de venda ou ferramenta de **marketing**.

A renúncia ao lucro predatório, muitas vezes travestido por medidas simpáticas, mas sem eficácia, deve ser compensada pela satisfação da integração cada vez mais mimetizada entre os meios de produção e o meio ambiente.

De nada adianta, por absoluta ineficácia, incorporar um resíduo ao cimento se dessa atitude resultar um produto de menor rendimento que demandará uma quantidade maior na produção de uma mesma unidade de volume de concreto, representando nenhum benefício ao ambiente.

Por outro lado, é convicção desse pesquisador ser o concreto um material termodinamicamente instável, sendo obrigatória sua proteção a partir da ampliação do conceito de deterioração, impondo seu limite inferior ao comprometimento estético a partir da alteração de seu aspecto.

Em se tratando de concreto armado é entendimento do autor que o que deve ser durável não é o concreto, mas sim a peça ou a estrutura. O concreto responsável pela durabilidade é limitado à camada de cobrimento da armadura. Uma vez atacada a armadura de nada adianta ser durável o concreto do interior da peça.

Talvez fosse mais adequado projetar com a resistência necessária para a garantia da estabilidade estrutural, sendo a durabilidade garantida pela proteção superficial do concreto.

A sustentabilidade buscada dentro do tema concreto deve ser apoiada em uma estrutura trípede: o menor consumo de cimento, o uso de cimento que incorpore a maior quantidade possível de resíduos e o uso intenso de resíduos durante a produção do concreto.

## REFERÊNCIAS

ABRAMS, D. A. Design of Concrete Mixtures. **Bulletin 1**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, 1918.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). 116 R-90: Cement and concrete terminology. In: \_\_\_\_\_. **ACI manual of concrete practice** - part 1: materials and general properties of concrete. Detroit: ACI, 1946.

\_\_\_\_\_. 201.2R-92: Guide to durable concrete. In: \_\_\_\_\_. **ACI manual of concrete practice** - part 1: materials and general properties of concrete. Detroit: ACI, 1992.

\_\_\_\_\_. 211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete. In: \_\_\_\_\_. **ACI manual of concrete practice** - part 1: materials and general properties of concrete. Detroit: ACI, 1994.

ANDRADE, W. P. (Ed.) **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

ARAUJO, P. S. S; MARCIANO, Z. A. N. **Método de Lobo Carneiro**. São Paulo: EPUSP, 1988. Trabalho apresentado na disciplina: Estrutura Interna e Dosagem do Concreto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Práticas Correntes de Dosagem de Concreto nos Países Latino americanos. In: REUNIÃO DO GLA-RILEM, 1965, Santiago. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1965.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458**: grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial – especificação. Rio de Janeiro, 1991a.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico – especificação. Rio de Janeiro, 1991b.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais – classificação por grupos de resistência – classificação. Rio de Janeiro, 1992a.

\_\_\_\_\_. **NBR 12654**: controle tecnológico de materiais componentes do concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 1992b.

- \_\_\_\_\_. **NBR NM 33**: concreto – amostragem do concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998a.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento pelo tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998b.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 76**: cimento Portland – determinação da finura pelo método da permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998c.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 49**: agregado fino – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2003b.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: agregados – determinação do material fino que passa através da peneira de 75µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003d.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9935**: agregados – terminologia. Rio de Janeiro, 2005b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12655**: concreto – preparo, controle e recebimento – procedimento. Rio de Janeiro, 2006a.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12821**: concreto – preparação de concreto em laboratório – procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

BAUER; L. A. F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S, O cimento Portland no Brasil. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. atual. ampl. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 761-795, v. 1.

BICZÓK, I. **Corrosión y Protección del Hormigón**. Tradução Emilio J. D'ocon Asensi. 6. ed. Bilbao: UMRO, 1972.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/12575>>. Acesso em: 17 dez. 2010.

BURGOA, G. N. **Dosajes adecuados para el hormigón estructural**. Buenos Aires, INTI – Centro de Investigación de la Tecnología Aplicada a la Construcción. [s.d.].

ROHDE, G. M.; ZWONOK, O.; CHIES, O.; DA SILVA, N. L. W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil**: aspectos técnicos e ambientais. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. v. 1.

CALEJA, J. **Cimentos Pozolânicos**. In: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

CANNON, R. W. Proportioning fly ash concrete mixes for strength and economy. **ACI Journal Proceedings**, Detroit, v. 65, n. 11, p. 969-979, Nov. 1968.

COSTA, A. L. P. da, GEYER, A. B.; RECENA, F. A. P. – **Carbonatação: Avaliação da evolução como influência de distintas adições**. Disciplina Patologia das Edificações – UFRGS – NORIE – setembro de 1992.

CREMONINI, R. A.; LIMA, F. G. **Método de Inge Lyse – Constância de água /m<sup>3</sup> de concreto**. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade do Estado de São Paulo. Disciplina : Estrutura Interna e Dosagem de Concreto de Cimento Portland. São Paulo, junho de 1988.

DAFICO, D. A. **Contribuição ao estudo da dosagem do concreto de cimento Portland**. 1997. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DAVIS, R. E.; CARLSON, R. W.; KELLY, J. W. Properties of cements and concretes containing fly ash. **ACI Journal Proceedings**, Detroit, v. 33, n. 55, p. 577-612, May/Jun. 1937.

DE LUCCA, A. C. K. **Reação álcali-agregado**: efeito do uso de cinza volante. 2010. 94 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/26021>>. Acesso em: 17 dez. 2010.

DJANIKIAN, J. G. **Cimento Portland Pozolânico 320**. In: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

DUMET, T. B.; PINHEIRO L. M. A evolução do concreto: uma viagem no tempo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza. Anais... São Paulo: IBRACON, 2000, 1 CD.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa**. 3. ed. rev. atual. Curitiba: Positivo, 2004.

GOBETTI, A. F.; SCARRONE, A. Características da Cinza de Carvão da Termoelétrica de Charqueadas e sua Influência no Comportamento do Cimento Portland. **ITERS Boletim**, Porto Alegre, ITERS, n. 49, 1969.

GOPALAN, M. K. ; HAQUE M. N. **Mix design for optimal strength development of fly ash concrete**. Cement and Concrete Research 20 (2003) p 312-314.

\_\_\_\_\_. **Strenght development of fly ash concretes**. Materials and structures 19 (2010) p 33-37.

HELENE, P. R. L. Dosagem de concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 439-471,v. 1.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI: IPT, 1986.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

IBRACON – Anais do Colóquio: Permeabilidade do concreto à água, São Paulo, dezembro de 1971. (??)

ISAIA, G. C. **Seminário: Porosidade e permeabilidade do concreto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. NORIE, Porto Alegre, 1989. (??)

Khokhar, M.I.A.; Roziere, E.; Turcry, P.; Grondin, F. e Loulili, A. **Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength**. Cement & Concrete Composites 32 (2010) 377-385.

LANGE, C. M.; GEYER, R. T. – **Carbonatação e sua influência no cobrimento das armaduras**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – NORIE – Porto Alegre, agosto de 1991.

LOBO CARNEIRO, F. L. **Dosagem de concretos**. Rio de Janeiro: INT, 1953.

LYSE, I. Test on consistency and strength of concrete having constant water content. In: ANNUAL MEETING. 35. 1932, Atlantic City. **Proceedings...** Philadelphia: ASTM, 1932. v. 32, part II, p. 629-636.

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

MEHTA, P. K. **High-Performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development**. International Workshop on Sustainable Development and concrete technology. Bejjin,2004.

MONTEIRO, P. J. M. Controle da microestrutura para o desenvolvimento de concretos de alto desempenho. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, EPUSP, BT/PCC/86, 22 p., 1993.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador Giammusso. 2. ed. atual. São Paulo: Pini,1997.

PEDROSO, F. L. Os caminhos da pesquisa sobre concreto. **Concreto e Construções**. São Paulo, IBRACON, n. 52, p. 37-46. Out./Nov./Dez. 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. Revisão Vladimir Antonio Paulon. 6. ed. atual. rev. Porto Alegre: Globo, 1979.

PRICE,W. H. **Pozolanas**. In: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

PRISZKULNIK, S. **Pozolanas para aglomerantes de construção civil**. In: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

RECENA, F. A. P. **Curso de dosagem e patologia do concreto**. [ano] não publicado. (no texto, escrever: Recena (não publicado) ) ou

RECENA, F. A. P. **Estabelecimento de um padrão secundário para a areia normal do rio Tietê a partir da areia do rio Guaíba**. 1994. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RECENA, F. A. P. Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland. 2. ed. rev. ampl. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

ROHDE, G. M. **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil** – Porto Alegre: CIENTEC, 2006.

SOARES, A. K. **Cimento Portland Pozolânico**. In: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

SORIA SANTAMARIA, F. **Panorama de los cementos puzolânicos en el futuro** – in Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos – Organizada pela ABCP Associação brasileira de Cimento Portland – São Paulo, 1981.

SILVA, M. G. **Cimentos Portland com Adições Minerai**s – in Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

SU N.; MIAO B. **A new method for the mix design of médium strenght flowing concrete with low cemente contente** Cement & Concrete Composites, 25 (2003) 215-222.

TORRENT, R. J.; DI PACE G. D. – Control de calidad – riesgos del productor y del consumidor de hormigón en el esquema de aceptación del CIRSOC 201. Buenos Aires, INTI[s.d.].

TORRES, A. F. Dosagem de concretos. **Boletim do IPT**, São Paulo, IPT, n. 1. 3. ed. rev., 1936.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 2008.

VERDÚ, F. A. – Pozolanas. In: **Curso de aperfeiçoamento sobre materiais de construção**. URGs. Porto Alegre, p.124-131, 1963.

\_\_\_\_\_. – Cinzas volantes. In: **Curso de aperfeiçoamento sobre materiais de construção**. URGs. Porto Alegre, p.132-139, 1963.

\_\_\_\_\_. – Reologia dos materiais. In: **Curso de aperfeiçoamento sobre materiais de construção**. URGs. Porto Alegre, p.223-232, 1963.