

Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais

Statistical analysis of influential variables on microstructure and durability of concretes with mineral additions

Geraldo Cechella Isaia
Paulo Ricardo de Vargas Furquim
Antônio Luiz Guerra Gastaldini

Resumo

Este trabalho apresenta, por meio de análise estatística de 7.308 ensaios, a significância da influência do tipo e do teor de adições minerais, da relação água/aglomerante e da resistência à compressão axial de misturas binárias e ternárias de concretos com adições minerais sobre variáveis relacionadas com a microestrutura e a durabilidade. Por meio de regressões lineares simples e múltiplas e de análise de variância, conclui-se que os parâmetros que influenciaram as variáveis dependentes da microestrutura são porosidade, água combinada e hidróxido de cálcio remanescente; e da durabilidade são carbonatação, penetração de cloretos, absorção de água, entre outras, a partir das variáveis independentes que integraram os modelos gerais das regressões lineares múltiplas. O teor de adição mineral foi o que apresentou maior significância, seguido da relação água/aglomerantes, tipo de adição e, por último, resistência à compressão. Os resultados estatísticos comprovam o comportamento benéfico que as adições minerais apresentam sobre as propriedades dos concretos estudadas, conforme vastamente relatado na literatura.

Palavras-chave: Concreto. Microestrutura. Durabilidade. Adições minerais. Análise estatística.

Abstract

This study reports the statistical analysis of 7,308 tests performed to determine the effects of different types and contents of mineral additions, water/cement ratios, and axial compressive strength of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions on microstructure and durability parameters. Simple and multiple linear regression analyses and analysis of variance indicated that porosity, combined water, and remaining calcium hydroxide have influenced microstructure, whereas carbonation, chloride penetration, and water absorption affected durability. Mineral addition content had the most significant influence, followed by water/cement ratio, addition type, and compressive strength. The statistical results confirm the beneficial effects of mineral additions on concrete properties, which is consistent with a large number of studies reported on the literature.

Keywords: Experiment design. Fractional factorial design. Construction materials.

Geraldo Cechella Isaia
Departamento de Estruturas e
Construção Civil
Universidade Federal de
Santa Maria
Av. Roraima, 1000, Cidade
Universitária, Camobi
Santa Maria - RS - Brasil
CEP 97119-900
Tel.: (55) 2208-000
E-mail: gisaia@pq.cnpq.br

**Paulo Ricardo de
Vargas Furquim**
Departamento de Estruturas e
Construção Civil
Universidade Federal de
Santa Maria
E-mail: pvfurquim@bol.com.br

**Antônio Luiz Guerra
Gastaldini**
Departamento de Estruturas e
Construção Civil
Universidade Federal de
Santa Maria
E-mail: gastaldini@pq.cnpq.br

Recebido em 17/10/2008
Aceito em 05/03/2009

Introdução

As adições minerais trazem vantagens ao concreto estrutural pela melhoria da microestrutura e da durabilidade e, sobretudo, pelos benefícios de sustentabilidade relacionados ao consumo de subprodutos agrícola-industriais potencialmente poluentes. Quando parte do cimento é substituída por adições minerais, as reações de hidratação e/ou pozolânicas formam compostos hidratados mais homogêneos e induzem a diminuição de hidróxido de cálcio, originando pastas mais densas pelo refinamento dos poros, o que dificulta a percolação de fluidos agressivos.

Mehta e Monteiro (2008) apontam que a substituição parcial de cimento por adições minerais melhora a microestrutura do concreto porque as pequenas partículas segmentam os canais de percolação de água, reduzem a exsudação e segregação e promovem o aumento de locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação, tornando a pasta mais homogênea. Por efeito físico, os grãos menores propiciam empacotamento dos poros, diminuem o efeito parede na zona de transição e promovem o aumento da resistência.

Quando se substitui parte de cimento por adições minerais, cada tipo atua de modo distinto, de acordo com a finura, atividade química, física ou ainda quantidade na mistura, tendo em vista que esses fatores proporcionam diferentes interações com a pasta. Alterações do tipo ou teor da adição mineral e da relação água/aglomerante (a/ag) influem na microestrutura dessas pastas e resultam em comportamento mecânico e de durabilidade distintos.

Investigações realizadas pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON), da Universidade Federal de Santa Maria (ISAIA, 1995; MORAES, 2001; VENQUIARUTO, 2002; HOPPE FILHO, 2002; SILVEIRA, 2004; ISAIA; GASTALDINI, 2002, 2004, entre outras) apontam que o desempenho da microestrutura e da durabilidade de concretos com adições minerais, especialmente quanto às propriedades ligadas à corrosão da armadura, em geral, é tão mais elevado quanto maior é a quantidade de adição mineral no traço. Esse comportamento é mais pronunciado nas misturas ternárias, quando ocorrem efeitos híbridos e sinérgicos entre as reações de hidratação e pozolânicas, aliados aos efeitos físicos de obstrução e refinamento dos poros promovidos pelas partículas de menores dimensões.

Os resultados das pesquisas mencionadas indicam que, à medida que aumenta a quantidade de adição mineral nos traços de concreto, em igualdade de

resistência à compressão axial, a microestrutura das pastas cimentícias torna-se mais compacta, em função do refinamento dos poros e dos efeitos físicos, proporcionando, por consequência, melhorias do desempenho em quase todas as propriedades relacionadas com a durabilidade, com exceção, em alguns casos, da carbonatação, quando os teores de substituição de cimento são muito altos (em geral acima de 50%). Esses efeitos produzidos pelo aumento da quantidade de adição nas misturas de concreto foram constatados em pesquisas isoladas, não inter-relacionadas entre si, sendo desejável a realização de investigação complementar para observar se esse comportamento pode ser generalizado, quando os dados são analisados em conjunto por intermédio de análises estatísticas.

São escassos na literatura estudos estatísticos sobre a qualificação e a quantificação dos parâmetros que influem nas misturas de concreto com adições minerais, especialmente resistência mecânica, relação a/ag, microestrutura e durabilidade, quando relacionados ao tipo e ao teor de adição mineral empregados.

Pelo exposto, este trabalho apresenta, por meio de ferramentas estatísticas, a significância da influência do tipo e do teor de adições minerais, relação a/ag e resistência à compressão de concretos com adições minerais, sobre variáveis relacionadas com a microestrutura – porosidade, água combinada e absorção de água – e a durabilidade – carbonatação, penetração de cloretos e absorção de água, entre outras. Tem como escopo específico observar, por meio de regressões lineares simples e múltiplas, a hierarquização da significância das variáveis retromencionadas, analisadas individualmente ou em conjunto, sobre seus efeitos nas variáveis resposta estudadas, objetos dos projetos de pesquisa apresentados.

Modelos matemáticos

Os modelos para análise estatística empregam técnicas por comparação de grupos, por regressão linear ou não, simples ou múltipla. O uso dessas técnicas depende do tipo de análise que se deseja realizar com os dados e os resultados que se queira inferir a partir deles. Nanni e Ribeiro (1987) propõem modelo estatístico genérico que expressa análise fatorial de K-Fatores (equação 1).

$$X_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (1)$$

sendo:

X_{ijk1}: variável resposta;

μ: média geral;

A_i: influência do fator A, i=1...n;

B_j: influência do fator B, j=1...n;

C_k: influência do fator C, k=1... n;

AB_{ij}: influência da interação dos fatores A e B;

AC_{ik}: influência da interação dos fatores A e C;

BC_{jk}: influência da interação dos fatores B e C;

ABC_{ijk}: influência da interação de todos os fatores;

e

ε_{ijk1}: medida do erro experimental,

onde: ε_{ijk1} → N(0, σ).

Os projetos fatoriais são mais eficientes do que os experimentos simples porque permitem conclusões mais gerais, pela análise das interações das variáveis estudadas, e não apenas dos efeitos individuais delas. Segundo Levine, Berenson e Stephan (1998), quando algumas medidas de resultados dos grupos são contínuas e certos pressupostos são cumpridos, pode-se empregar a análise de variância (ANOVA) para comparar as médias aritméticas de distintos grupos. Em certo sentido, o termo “análise de variância” parece ser um nome mal aplicado, uma vez que o objetivo é analisar diferenças entre as médias aritméticas. A partir de análise de variação dos dados, entre ou dentro dos grupos, existe a possibilidade de tirar conclusões sobre possíveis diferenças nas médias aritméticas deles.

Vieira (2003) realizou análise estatística por regressão não linear múltipla, que possibilitou ajustar modelo matemático que representou a relação entre os fatores analisados e a resistência à compressão a 28 dias (f_c, em MPa), e verificar a significância da relação a/ag e do teor de adição de sílica ativa nos traços (sa em %). O modelo de regressão proposto é apresentado na equação 2, sendo b₀, b₁ e b₂ os parâmetros dos fatores considerados no modelo.

$$f_c = \text{Exp} \{b_0 + [b_1/(a / ag)] + (b_2 / sa)\} \quad (2)$$

Kulakowski (2002) obteve modelo estatístico dos dados observados para carbonatação em concreto realizado por meio de regressão não linear múltipla. O modelo proposto para análise está representado pela equação 3.

$$Ecc = \text{Exp} \{b_0 + [b_1*(a/ag)] + (b_2*ad) + (b_{12}*ac*ac)\} * t^{b_3} \quad (3)$$

onde:

Ecc = profundidade de carbonatação;

a/ag = relação água/aglomerante;

ad = teor de sílica ativa;

t = idade de ensaio; e

b₀, b₁, b₂, b₃ e b₁₂ = parâmetros dos fatores considerados no modelo.

O modelo de carbonatação apresentou significância p < 0,01, indicando que a relação entre as variáveis foi significativa em nível de confiança de 99%. O coeficiente de determinação r² = 0,95 indicou que o modelo explicou 95% da variabilidade dos valores observados para profundidade de carbonatação.

Análise estatística com uso de regressão não linear múltipla com resultados apresentados por análise de variância (ANOVA) foi realizada por Kulakowski, Pereira e Dal Molin (2009), para relacionar a profundidade de carbonatação com as relações a/ag, teor de sílica ativa e idade de ensaio. O modelo encontrado está na equação 4.

$$d_c = \exp[-16,99 + (8,75 \times a/ag) + (1,04 \times sa) + (1,41 \times a/ag \times sa)] \times t^{2,64} \quad (4)$$

onde:

d_c = profundidade de carbonatação (mm);

a/ag = relação água/aglomerante (com valores entre 0,30 e 0,80);

sa = teor de sílica ativa (com valores entre 0 e 0,20); e

t = idade de ensaio (126 dias).

Por esse modelo, somente a variável relação a/ag e idade de ensaio t foram estatisticamente significantes para o nível de confiança de 99%, porque o valor de ‘p’ foi inferior a 0,01.

Assim, os modelos estatísticos possibilitam estudar os resultados de ensaios por relações matemáticas entre as variáveis observadas e inferir-se sobre os fatores preponderantes que influem em determinado fenômeno. No estudo experimental a seguir os termos variável independente e variável resposta são utilizados como sinônimos.

Estudo experimental

Ensaio

Durante mais de uma década foram desenvolvidas pesquisas pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Concreto (GEPECON) da UFSM acerca da microestrutura e durabilidade do concreto contendo diversos tipos e teores de adições

minerais, especialmente com altos teores. Suas conclusões foram divulgadas por dissertações, teses, anais de eventos ou em periódicos, nas quais se destaca a influência que o tipo e o teor de adição trazem, de modo diferenciado, para a resistência mecânica, microestrutura e durabilidade, a partir das relações a/ag adotadas (GASTALDINI; ISAIA, 1998; ISAIA; GASTALDINI, 2004).

Em vista da disponibilidade de extenso acervo de dados, surgiu a idéia de relacioná-los estatisticamente por regressões lineares simples ou múltiplas e, também, pela análise de variância, com o intuito de observar os parâmetros mais significativos que influíram nas propriedades dos concretos, como tipo e quantidade de adição mineral, relação a/ag e resistência à compressão, sobre propriedades da microestrutura e durabilidade.

As pesquisas que integram este trabalho são as seguintes, listadas na Tabela 1:

- (a) Projeto 1POZ: estudo de misturas binárias e ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e filler calcário, para averiguar os efeitos físicos e pozolânicos sobre variáveis da microestrutura e durabilidade de concretos com altos teores de pozolanas;
- (b) Projeto 2CAL: estudo da adição de cal hidratada em misturas binárias e ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e escória de alto forno, para repor a reserva alcalina da solução dos poros e reduzir a velocidade de carbonatação;
- (c) Projeto 3ATI: estudo de misturas binárias e ternárias de cinza volante, escória de alto forno e cinza de casca de arroz com ativadores químicos à base de sulfato e silicato de sódio, para observar as influências sobre a durabilidade do concreto;
- (d) Projeto 4FIN: estudo da influência da finura da escória de alto forno sobre a penetração de cloretos de concretos, em teores médios e altos; e
- (e) Projeto 5CAR: estudo de misturas binárias e ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, em teores normais e elevados, sobre a carbonatação do concreto.

A Tabela 2 apresenta as variáveis estudadas nos ensaios de porosimetria de mercúrio do projeto 1POZ.

As cinco pesquisas utilizaram o mesmo tipo de aglomerante (CP-V ARI), conforme a NBR 5733, com procedência do mesmo fabricante. Apesar de

a realização dos projetos estar separada entre si em até 8 anos e, portanto, serem os cimentos oriundos de lotes distintos, não foram constatadas diferenças significativas nas características químicas, físicas e mecânicas das amostras analisadas. Empregou-se como agregado miúdo areia natural quartzosa proveniente de Arenal, Santa Maria, classificada como areia média, com MF entre 1,81 e 2,74. O agregado graúdo era de rocha diabásica britada de Itaára, lavada e classificada como brita 1, com MF entre 6,60 e 6,91. Utilizaram-se aditivos superplastificantes à base de naftaleno ou éter carboxilato para conferir ao concreto fresco abatimento de 75 mm \pm 15 mm.

Nos cinco projetos foram estudadas cinco misturas binárias com seis teores de AM, quatro ternárias com nove teores de AM, e três misturas com ativadores químicos com nove teores, totalizando 12 misturas e 24 teores de AM. Foram moldadas 15 misturas de referência e 157 misturas com AM para estudo de oito variáveis da microestrutura (1.848 resultados) e sete variáveis da durabilidade (5.460 resultados). Foram obtidos, no total, 7.308 resultados (valores médios), provenientes de mais de 22.000 dados individuais.

As variáveis independentes ou fatores de controle foram relação a/ag, idade de ensaio, tipo de adição mineral e teor da adição mineral. Cada variável independente foi testada em diversos níveis, conforme consta na Tabela 1. Os ensaios foram realizados em idades entre 7 e 182 dias, mas somente os resultados de 91 dias são apresentados neste trabalho. As variáveis dependentes ou respostas relacionadas à microestrutura foram teor de hidróxido de cálcio remanescente (NBR 5748), teor de água combinada, volume total de intrusão de mercúrio, área total dos poros, porosidade total, diâmetro crítico e diâmetro médio dos poros. As variáveis dependentes relacionadas à durabilidade foram coeficiente de carbonatação acelerada com 10% de CO₂, coeficiente de difusão de água, penetração de cloretos (ASTM, 1997), teor de cloretos totais (ASTM, 1997), absorção capilar de água (RILEM, 1999), permeabilidade ao oxigênio (RILEM, 1999) e relação iônica Cl⁻/OH⁻. Também se utilizou a resistência à compressão axial como variável dependente, por ser propriedade-referência em qualquer investigação em concreto.

Mais detalhes sobre dados, ensaios e características dos materiais empregados neste trabalho são encontrados em dissertação de mestrado de Furquim (2006).

	Projeto 1POZ	Projeto 2CAL	Projeto 3ATI	Projeto 4FIN	Projeto 5CAR
Relação a/ag	0,35; 0,50; 0,65	0,35; 0,45; 0,55	0,35; 0,50; 0,65	0,35; 0,50; 0,65	0,35; 0,45; 0,55
Tipos e teores (%) de adições minerais (AM)	<i>Cinza volante:</i> 12,5, 25, 50 <i>Cinza c. arroz:</i> 12,5, 25, 50 <i>Filler calcário:</i> 12,5, 25, 50 <i>CV+CCA:</i> 12,5+12,5, 25+25	<i>Cinza volante:</i> 50, 50+15 cal <i>Cinza c. arroz:</i> 50, 50+18 cal <i>Escória A. F.:</i> 70, 70+15cal <i>CV+CCA:</i> 50+20, +18cal <i>E + CCA:</i> 20+70, +18cal	<i>Cinza volante:</i> 20, 20+ATI <i>Cinza c. arroz:</i> 20, 20+ATI <i>Escória A. F.:</i> 70, 70+ATI <i>E+CCA:</i> 50+20, 50+20+ATI	<i>Escória A. F.:</i> 35, 70 <i>Finuras E:</i> 300 m ² /g 500 m ² /g 700 m ² /g	<i>Cinza volante:</i> 25, 50 <i>Cinza c. arroz:</i> 25, 50 <i>Sílica ativa:</i> 10, 20 <i>CV+SA</i> 15+10, 30+20 <i>CV+CCA</i> 10+15, 20+30
Tipos de AM	4	10	8	3	5
Teores AM	11	10	8	2	10
Traços refer.	3	3	3	3	3
Traços c/AM	33	30	36	18	30
Nº de traços	36	33	39	21	33
Ensaio microestrutura (valores-limites)	<i>Hidróx. cálcio:</i> 0,10-14,0% <i>Água combin.:</i> 6,6-14,5% <i>Porosimetria</i> (ver tabela 2)	<i>Hidróxido de cálcio remanescente:</i> 0,13-8,50%			<i>Hidróxido de cálcio remanescente:</i> 0,27-5,81%
Ensaio de durabilidade (valores-limites)	<i>Coef. Carb.¹:</i> 1,4-28,5 <i>Penetração Cl⁻</i> 84-687 C <i>Teor de Cl⁻:</i> 0,071-14,0% <i>C. Dif. Água²:</i> 0,5-5,2.10 ⁻⁹	<i>Coef. Carb.¹:</i> 0,1 a 18,3 <i>Penetração Cl⁻</i> 183-3.134 C <i>Absor. Água³:</i> 176-5.200 <i>Rel. Cl⁻/OH⁻:</i> 0,17-7,1 <i>C. Difus. O₂⁴:</i> 0,4-636.10 ⁻¹⁷	<i>Coef. Carbo.¹:</i> 0,1-24,2 <i>Penetração Cl⁻</i> 207-2.866 C	<i>Penetração Cl⁻</i> 455-2.727 C <i>Rel. Cl⁻/OH⁻:</i> 0,41-3,71	<i>Coef. Carbo.¹:</i> 0,1-18,3
Resistência à compressão - fc	12,7-80,0 MPa	20,0-80,2 MPa	31,3-91,0 MPa	20,9-3,8 MPa	35,9-99,6 MPa
Var. microestr. Resultados	3 1.188	1 330			1 330
Var. durabilid. Resultados	4 1.584	5 1.650	5 1.560	2 336	1 330
Tot. resultados	2.772	1.980	1.560	336	660
Total geral: 7.308 resultados					

¹ mm.semana^{-0,5}

² m.s⁻²

³ g/m²

⁴ m²

Tabela 1 - Sumário das características, ensaios e dados dos projetos do estudo estatístico

	Volume Total Hg ml/g x 10	Área total dos poros m²/g	Diâmetro médio nm	Porosidade total %	Diâmetro Crítico nm	d>50 nm %	10<d<50 nm %
Valores limites	0,68-5,29	11.220-92.482	9-141	12,6-69,3	32-185	3,9-93,1	6,9-87,7

Tabela 2 - Variáveis dos ensaios de porosimetria de mercúrio do projeto 1POZ

Estudo estatístico

As médias individuais das variáveis foram submetidas à análise de variância para identificar se os valores das variáveis respostas diferiam estatisticamente entre si. Compararam-se grupos através da variabilidade das médias entre os diferentes grupos com a variabilidade das observações dentro de cada grupo. A significância estatística da variabilidade das médias entre os grupos, isto é, o efeito de determinada variável independente, analisada dentro de um modelo de regressão, sobre uma variável resposta foi determinada mediante o teste da Distribuição de Fischer, que compara valores calculados e tabelados para dado nível de significância da função de distribuição da probabilidade F . Utilizou-se o nível de confiança de 95% para comparar os valores calculados, F_{cal} , juntamente com sua significância ' p ', que o programa computacional adotado informou. Se F_{cal} foi maior que F tabelado (F_{tab}), a hipótese de que o efeito do valor considerado não fosse significativo foi rejeitada.

A análise de variância ANOVA, assim como os cálculos das regressões foram realizados pelo programa Statistica StatSoft 6.0, utilizando-se nível de confiança de 95%, porque, na maioria dos experimentos com materiais para fins estruturais, utiliza-se esse valor como referência para aceitação do erro ou fração deficiente.

Para observar as influências das adições minerais nas propriedades do concreto, dividiram-se as análises dos projetos em duas etapas: na primeira, foram selecionadas as misturas somente com cimento Portland (concreto de referência), para evidenciar a análise de variância e regressão linear simples entre as variáveis dependentes, uma a uma de cada projeto. Na segunda, observaram-se somente as misturas com adições minerais, repetindo-se novamente todas as análises da primeira, analisando-se o conjunto de todas as variáveis, por regressão linear múltipla, gerando modelo matemático geral para todas as variáveis envolvidas no projeto em questão.

Em resumo, foram realizadas as seguintes análises estatísticas:

- (a) análise estatística de variância entre cada variável dependente relacionada com a microestrutura e a durabilidade, para cada ensaio (ocorrência) isoladamente, com as variáveis independentes básicas de cada grupo, em conjunto e individualmente: tipo e teor de adição, relação a/ag e fc;
- (b) idem para todos os ensaios (ocorrências) de cada variável resposta, de todos os projetos em conjunto;
- (c) regressão linear simples entre cada variável dependente da microestrutura e durabilidade com as variáveis independentes básicas de cada grupo, individualmente; e
- (d) regressão linear múltipla entre cada variável dependente da microestrutura e durabilidade, com as variáveis independentes básicas de cada grupo, em conjunto.

Os resultados das análises de regressão foram classificados em quatro grupos, de acordo com o coeficiente de determinação do modelo (r^2): muito forte ($r^2 \geq 0,90$), forte ($0,70 \leq r^2 < 0,90$), média ($0,40 \leq r^2 < 0,70$) e fraca ($r^2 < 0,40$) (CHRISTMANN, 1978). Os resultados das análises de variâncias foram classificados em três grupos, de acordo com o nível de significância ' p ' encontrado: forte ($p \leq 0,05$), média ($0,05 < p \leq 0,10$) e fraca ($p > 0,10$).

A seguir exemplifica-se o cálculo da variável teor de hidróxido de cálcio do Projeto 2CAL. A Tabela 3 apresenta a análise de variância do modelo obtido, e na Tabela 4 encontram-se os parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas.

A análise de variância do modelo resultou em um coeficiente de determinação (r^2) de 0,88, indicando que o modelo ajustou 88% dos valores observados para o teor de hidróxido de cálcio remanescente, e o valor ' p ' do modelo menor que 0,01 indica que as variáveis representadas no modelo relacionam-se com o nível de confiança de 99%.

Deve-se ressaltar que, em face da sistemática adotada para o cálculo dos modelos de regressão adotados, os coeficientes de determinação englobam não somente a variabilidade apresentada entre os resultados dos ensaios de cada projeto como também entre todos os projetos, o que pode ter induzido o aumento das dispersões calculadas

pelos modelos, uma vez que os experimentos foram realizados em épocas distintas e com materiais similares de lotes diferentes. Portanto, as dispersões assim determinadas representam a condição mais desfavorável para efeito de análise e discussão estatística em termos de variabilidade dos resultados.

Os resultados da Tabela 4 indicam que as variáveis independentes tipo e teor de adição mineral, relação água/aglomerante e resistência à compressão são estatisticamente significativas ao nível de confiança de 99%, porque apresentam valor $p < 0,01$. O modelo de comportamento previsto pela análise de regressão linear múltipla, para os dados observados do teor de hidróxido de cálcio no concreto, é apresentado na equação 4.

$$CH = -4234,64 + 38,27*Tipo - 7,03*Teor + 327,87*a/ag + 2,12*fc \quad (4)$$

Desde que os dados analisados foram de valores médios, e não individuais (repetições), encontrou-se eventual distorção entre o nível de significância (p) e o coeficiente de determinação (r^2), por ocasião das análises de variância e aplicação dos modelos de regressão linear simples e múltipla. Esse fato foi constatado nas seguintes situações:

(a) significância fraca ($p > 0,10$) e coeficiente de determinação forte e muito forte ($r^2 \geq 0,70$): quando isso ocorreu não houve evidências estatísticas de que as médias dos dados fossem diferentes. O alto valor do coeficiente de determinação significou que a variação total dos dados pode ser explicada pelo modelo de regressão; e

(b) significância forte ($p \leq 0,05$) e coeficiente de determinação fraco ($r < 0,50$): nesse caso não houve

diferenças estatisticamente significativas entre as médias, mas o baixo valor do coeficiente de determinação encontrado significou que a variação total dos dados não pode ser explicada por esse modelo de regressão, pois os pontos estavam dispersos.

A influência individual de cada variável independente na variável dependente estudada foi obtida por regressão linear simples, primeiro com o concreto de referência e, após, com as AM. Para verificar a importância do tipo e, posteriormente, do teor de AM sobre a variável dependente em estudo, foi usada análise de regressão linear múltipla com três variáveis independentes: tipo ou teor, conforme um ou outro, relação a/ag e fc.

Como exemplo, a Tabela 5 apresenta os resultados estatísticos obtidos para a variável CH do projeto 2CAL. As linhas superiores correspondem ao estudo de regressão das variáveis individualmente, contendo os valores dos coeficientes de determinação (r^2) para as regressões lineares simples e o nível de significância (p) para as regressões lineares múltiplas. As linhas inferiores da tabela contêm os parâmetros da análise de variância: em itálico/negrito/grifado estão os valores de 'p' considerados significantes ($p \leq 0,05$); em negrito/sublinhado, os valores de r^2 classificados como fortes ou muito fortes. Os parâmetros da coluna do modelo geral são os mesmos que aparecem nas Tabelas 3 e 4.

A sistemática de apresentação do exemplo acima foi estendida a todas as variáveis dos projetos e será empregada para análise para as demais variáveis na discussão a seguir.

Efeito	SQ	GL	MQ	F_{crit}	Significância 'p'	Resultado
Modelo	67.513,17	4	16.878,29	48,16	0,0001	Significativo
Erro (resíduo)	8.761,30	25	350,45			
Total	76.274,47					

$$r = 0,94 \text{ e } r^2 = 0,88$$

SQ = soma dos quadrados; GL = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; r^2 = coeficiente de determinação do modelo ($1 - SQ_{erro}/SQ_{total}$); r = coef. correlação modelo

Tabela 3 - ANOVA para o modelo de regressão linear múltipla do teor de CH remanescente do Projeto 2CAL

Variável independente	Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste t	Significância 'p'
Constante	b0	-4.234,64	345,90	-12,24	0,0000
Tipo	b1	38,27	3,26	11,73	0,0000
Teor	b2	-7,03	0,67	-10,46	0,0000
a/ag	b3	327,87	82,33	3,98	0,0005
fc	b4	2,12	0,46	4,56	0,0001

Tabela 4 - Parâmetros calculados para as variáveis independentes analisadas para o teor de CH

	Modelo geral (rlm)		Individual adições min.				Indiv. ref.		Tipo (rlm)				Teor (rlm)			
	Tipo (rls)	Teor (rls)	a/ag	fc	a/ag	fc	CV	E	CV CA	CV E	50 %	70 %	90 %			
Var.	Tipo	0,00	0,99													
	Teor	0,00		0,08												
Ind.	a/ag	0,00			0,97		0,09		0,20	0,21	0,01	0,08	0,01	0,01		0,58
	Fc	0,00				0,10		0,30	0,58	0,33	0,01	0,14	0,01	0,00		0,69
A	r	0,94	0,00	0,32	0,01	0,30	0,99	0,89	0,79	0,70	0,97	0,88	0,96	0,96		0,88
N	r ²	0,88	0,00	0,10	0,00	0,09	0,98	0,80	0,63	0,49	0,95	0,77	0,92	0,93		0,77
O	F _{cal}	48,2	0,00	3,27	0,00	2,83	44,9	3,99	2,54	1,45	27,3	4,95	32,3	35,2		2,22
V	p	0,00	0,99	0,08	0,97	0,10	0,09	0,30	0,23	0,36	0,01	0,11	0,00	0,00		0,33
A	F _{tab}	2,8	4,2	4,2	4,2	4,2	161	161	9,55	9,55	9,55	9,55	4,07	4,07		19,2

(rls): regressão linear simples (rlm): regressão linear múltipla

(X,XX): valores de $r^2 \geq 0,70$; X,XX: valores de $p \leq 0,05$

Tabela 5 - Resultados do modelo geral e regressões lineares simples de CH no projeto 2CAL

Análise e discussão dos resultados

A seguir são discutidos os resultados da análise estatística dos dados tendo em vista o comportamento que as adições minerais apresentaram diante das propriedades estudadas e de suas prováveis causas. A análise global dos resultados identificou aqueles que mais interferiram nos modelos das variáveis dependentes da microestrutura e durabilidade, em relação ao número total de análises observadas. Nas Tabelas 6 a 11, a seguir, encontram-se os totais e os percentuais somente das análises que foram mais significativas ($p < 0,05$ e $r^2 > 0,70$) em relação a seu número total de ocorrências em cada estudo em particular. Aparecem grifados em negrito/italico os valores de F_{cal} mais elevados para cada uma das variáveis independentes, com a finalidade de salientar as variáveis que foram mais influentes. Os percentuais calculados ao final das tabelas não podem ser considerados em termos absolutos, porque as análises das variáveis independentes mais significantes foram realizadas em conjunto com os F_{cal} mais altos.

No presente trabalho conceitua-se como *ocorrência* o número (ou conjunto) de ensaios realizados para dada variável dependente ou resposta, correspondente a um ou mais projetos (experimentos) de pesquisa, conforme discriminado na Tabela 1.

Análise das variáveis dependentes relacionadas com a microestrutura

Os modelos gerais e as variáveis independentes que influenciaram as variáveis dependentes teor de água combinada (AC) e teor de hidróxido de cálcio (CH) remanescente estão na Tabela 6 e 7, onde

estão listadas as ocorrências dos projetos de pesquisa 1, 2 e 5, que atingiram níveis de significância forte ($p \leq 0,05$) e r^2 muito fortes ou fortes, $r^2 \geq 0,70$ (primeiro dígito das células). O segundo dígito representa o total de ocorrências para a variável considerada. As ocorrências que apresentaram o valor F_{cal} mais elevado de todos estão grifadas em negrito/italico. Para o teor de AC (Tabela 6), a variável independente mais importante foi a relação a/ag, seguida de fc. Observa-se que AC depende da hidratação do cimento, e não das reações pozolânicas, razão pela qual tanto o tipo quanto o teor de AM não foram significativos no modelo geral.

O modelo geral da variável dependente CH apresentou p forte e r^2 de muito forte a forte. As variáveis independentes que apresentaram maior significância para CH foram teor, tipo, fc e relação a/ag, nessa ordem. Dessa forma, pode-se afirmar que a variável CH foi a única variável dependente à qual todas variáveis independentes apresentaram efeito fortemente significativo no comportamento modelado para CH, confirmando estatisticamente ser um parâmetro de grande relevância, que influencia a microestrutura das pastas com adições minerais, uma vez que as reações pozolânicas dela dependem, como fartamente demonstra a literatura.

Os modelos individuais das variáveis dependentes mostraram significância para o tipo, teor e a/ag; para o concreto de referência, somente a resistência teve discreta significância. Nenhuma regressão apresentou r^2 forte para as regressões lineares simples (rls) nas misturas com AM, enquanto, para o concreto de referência, todas apresentaram r^2 muito forte ou forte. Assim, as adições minerais, quando estudadas isoladamente, conforme apresenta a Tabela 7, pelas modificações que introduzem na distribuição dos poros das

pastas, aumentaram as dispersões dos resultados quando comparadas às pastas de referência.

A Tabela 7 mostra os modelos gerais para o tipo e teor de adição mineral (rlm), mostrando que as misturas binárias CCA e CV e ternárias CCA-CV foram as mais significantes, porque apresentaram valores de F_{cal} mais elevados. O filler calcário, apesar de apresentar efeito significativo nessas duas propriedades (tipo e teor de AM), apresentou valores de F_{cal} menores. De todas as misturas, as ternárias CCA-CV foram as mais significantes, porque apresentaram maiores valores de F_{cal} e, assim, apresentaram maior aderência com os parâmetros da microestrutura (100% das ocorrências), porque apresentam ação sinérgica.

O teor de 25% foi mais significativo para AC, enquanto 50% e 70% foram para o CH. O menor número de ocorrências para AC mostra novamente que essa variável depende menos da AM, que forma C-S-H secundário, e mais do teor de cimento (hidratação e C-S-H primário). Houve maior interação estatística para teores baixos, até 25%, do que altos, quando predominaram os silicatos de menor relação C/S.

A predominância dos teores de 50% e 70% para CH evidencia que, estatisticamente, foram detectados F_{cal} mais altos à medida que se aumentou o teor de AM, com exceção para 90%. À medida que aumentou o teor de AM, a microestrutura se tornou mais homogênea e com poros menores, devido ao refinamento e ação física, o que se refletiu em menor quantidade de falhas, logo, em menor dispersão de resultados. Essas evidências reiteram a grande significância que o hidróxido de cálcio remanescente apresentou ante as demais variáveis dependentes.

As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados obtidos para as variáveis da porosimetria, que foram obtidos do projeto IPOZ, o único que forneceu dados para a análise estatística, razão pela qual consta apenas uma ocorrência para cada variável. Houve significância forte ($p < 0,05$) apenas para os modelos gerais das variáveis dependentes: volume

total de intrusão de mercúrio (VTI), porosidade total (PT) e diâmetro dos poros ($d > 50\text{nm}$ e $50 > d > 10\text{nm}$). As variáveis VTI e PT não apresentaram significância para as variáveis independentes, individualmente; entretanto, quando consideradas em conjunto, o modelo apresentou significância ($r^2 = 0,70$ e $p = 0,00$ para VTI e $r^2 = 0,60$ e $p = 0,00$ para PT). Deve-se considerar que VTI e PT são duas variáveis interdependentes, o que pode explicar esse comportamento similar. Para o diâmetro dos poros ($d > 50\text{nm}$ e $50 > d > 10\text{nm}$), a variável independente mais significativa, através do F_{cal} , foi o teor de adição mineral.

As dimensões dos poros entre 10 nm e 50 nm e acima de 50 nm também foram as variáveis dependentes que apresentaram significância, porque estão relacionadas com a PT e VTI, visto que, de todos os poros detectados pelo ensaio, somente ficaram de fora os de menor dimensão, isto é, entre 3 nm (menor dimensão detectada pelo porosímetro) e 10 nm, que, para os concretos usuais, são os de menor quantidade.

Entre as variáveis independentes que formam o modelo geral, apenas o teor de adição e a resistência à compressão, em duas ocorrências, e a relação a/ag , em uma, apresentaram significância. O teor, novamente, está em evidência como a variável independente mais significativa, porque, à medida que aumentou o conteúdo de adição na pasta, esta apresentou estrutura de poros mais fechada, aumentando as correlações estatísticas entre as variáveis supracitadas. As variáveis independentes f_c , relação a/ag e tipo de adição foram as que mais influenciaram nas variáveis da porosimetria, que dependeram mais da relação a/ag e de f_c nas misturas com AM, desde que essas variáveis, no concreto de referência, tiveram a mesma influência, pois apresentaram maior quantidade de modelos significativos. Os modelos de regressão lineares simples para as variáveis do ensaio de porosimetria apresentaram r^2 muito forte somente nas misturas de referência.

		Nº de modelos gerais	Variáveis independentes em conjunto (rlm)				Variáveis independentes individualmente				Concreto de referência	
			Tipo	Teor	a/ag	fc	Tipo (rls)	Teor (rls)	a/ag	fc	a/ag	fc
AC	p r ²	1/1			<u>1/1</u>	1/1	1/1		1/1		1/1	1/1
CH	P r ²	5/5 5/5	3/5	<u>5/5</u>	2/5	3/5	1/5	2/5			5/5 5/5	5/5 2/5
Total de ocorrências	p	6/6	3/6	5/6	3/6	4/6	2/6	2/6	1/6			1/6
	%	100	50	83	50	67	33	33	17			17
	r ²	5/6									6/6	6/6
	%	83									100	100

(XX: ocorrências com F_{cal} mais altos de todos; 1º dígito = nº de ocorrências da variável considerada e 2º dígito = nº total de ocorrências de todas as variáveis consideradas no estudo)

Tabela 6 - Número de ocorrências das variáveis dependentes AC e CH remanescente para todos os projetos

		Tipo de adição mineral (rlm)						Teor de adição mineral (rlm)					
		CCA	CV	SA	F	CV E	CCA CV	CV SA	12,5 %	25 %	50 %	70 %	90 %
AC	p r ²	<u>1/1</u> 1/1	1/1 1/1		1/1 1/1		<u>1/1</u> 1/1			<u>1/1</u> 1/1	1/1		
CH	p r ²	1/2 2/2	<u>2/3</u> 2/3	1/1	1/1 1/1	1/1	<u>3/3</u> 3/3	1/1	1/1	2/2 -	<u>5/5</u> 5/5	<u>3/3</u> 3/3	1/1
Total de ocorrências	p	2/3	3/4		2/2		4/4		1/2	3/3	6/6	3/3	
	%	67	75		100		100		50	100	100	100	
	r ²	3/3	3/4	1/1	2/2	1/1	4/4	1/1	1/2	1/3	5/6	3/3	1/1
	%	100	75	100	100	100	100	100	50	33	83	100	100

(XX: ocorrências com F_{cal} mais altos de todos; 1º dígito = nº de ocorrências da variável considerada e 2º dígito = nº total de ocorrências de todas as variáveis consideradas no estudo)

Tabela 7 - Número de ocorrências das variáveis dependentes AC e CH - Estudo do tipo e teor de adição

		Nº de Modelos gerais	Variáveis independentes em conjunto (rlm)				Variáveis independentes individualmente				Concreto referência		
			Tipo	Teor	a/ag	fc	Tipo (rls)	Teor (rls)	a/ag	fc	a/ag	fc	
Volume total Hg - VTI	p r ²	<u>1</u>						1	1		1	1	
Área total dos poros -ATP	p r ²							1	1		1	1	
Dimensão média poros- DMP	p r ²					1				1			
Porosidade total - PT	p r ²	<u>1</u>						1	1		1	1	
Diâmetro crítico - DC	p r ²									1	1	1	
d > 50 nm	p r ²	<u>1</u>		<u>1</u>	1	1	1			1		1	
50 > d > 10 nm	p r ²	<u>1</u>		<u>1</u>		1	1					1	
Total de ocorrências	p	4		2	1	2	3			3	6	3	2
	r ²											6	6

(X: ocorrência mais significativa ($p < 0,05$); X: ocorrência significativa ($p < 0,05$), com valor de 'p' maior do que X)

Tabela 8 - Número de ocorrências das variáveis dependentes da porosimetria (projeto 1POZ)

		Tipo de adição mineral (rlm)				Teor de adição mineral (rlm)		
		CCA	CV	F	CCA CV	12,5 %	25 %	50 %
Volume total Hg	p	1	1		<u>1</u>	1	<u>1</u>	1
	r ²	1	1		1	1	1	1
Área total dos poros	p		1		1			
	r ²		1		1			
Dimensão média poros	p			<u>1</u>			<u>1</u>	
	r ²			1				
Porosidade total	p	1			<u>1</u>		<u>1</u>	1
	r ²	1			1	1	1	1
Diâmetro crítico	p		1	1		1	1	
	r ²		1	1	1	1	1	
d > 50 nm	p		1	<u>1</u>			<u>1</u>	1
	r ²		1	1			1	1
50 > d > 10 nm	p		1	1			<u>1</u>	
	r ²		1	1	1			
d < 10 nm	p			<u>1</u>				
	r ²	1		1	1			
Total de ocorrências	p	2	4	5	2	2	6	3
	r²	3	5	5	6	3	4	3

(X): ocorrência mais significativa (p<0,05); X: ocorrência significativa (p<0,05), com valor de p maior do que X)

Tabela 9 - Número de ocorrências das variáveis dependentes da porosimetria - Estudo do tipo e teor de adição

A Tabela 9 mostra a influência das AM no concreto, do tipo e teor de adição, observando-se a que mais influenciou nas respostas das análises das variáveis dependentes da porosimetria foi o *filler* em cinco ocorrências; a CV, em 4. O teor de adição que mais se sobressaiu foi 25% em seis análises, seguido de 50% em três. O *filler* calcário se destacou das demais adições por não apresentar praticamente nenhuma interação química com os compostos hidratados da pasta, atuando somente por ação física, introduzindo menos dispersão.

A partir dos F_{cal} , observa-se que a mistura ternária CCA-CV e o teor de 25% foram o tipo e teor, respectivamente, que mais influenciaram no volume total de intrusão e da porosidade total. Esses dados estão coerentes com os de CH analisados anteriormente, pois, à medida que este é consumido nas reações pozolânicas, a estrutura dos poros se torna mais fina (refinamento dos grãos), principalmente nas misturas ternárias.

Contudo, na análise dos resultados da porosimetria não foi observado o mesmo comportamento quanto ao teor de adição, os quais, nesse caso, foram mais significativos para os teores intermediários, 25%, quando comparado com os resultados obtidos para as variáveis da durabilidade. Nesse caso, esse resultado alinhou-se mais com o da AC do que com o CH, analisados anteriormente. Entretanto, deve-se ressaltar que os resultados estão baseados em um único projeto, não existindo base de dados mais consistentes para confirmar essas afirmativas.

Análise das variáveis dependentes relacionadas à durabilidade

A Tabela 10 mostra os resultados das variáveis de durabilidade, onde se observa que no modelo geral de regressão linear múltipla (significância em 92% das ocorrências) o coeficiente de carbonatação e a absorção de água tiveram como variáveis independentes influentes mais significativas as quatro estudadas, isto é, tipo e teor de adição, relação a/ag e fc.

Para a penetração de Cl⁻ e teor total de Cl⁻ retidos, as variáveis independentes mais significativas foram teor e tipo de adição e a fc, não sendo significativa a relação a/ag. Juntamente com essas, a carbonatação acelerada também apresentou uma significância em todos os experimentos realizados (8/8), e a variável teor foi, igualmente, a que apresentou maior número de ocorrências significativas (7/8). A relação Cl⁻/OH⁻ teve como variáveis independentes significativas o tipo e teor de adição e a relação a/ag, não sendo significativa a fc. A difusão à água teve como variável independente significativa somente a relação a/ag, e a difusão de oxigênio, o teor de adição mineral. O modelo geral de regressão linear múltipla se mostrou significativo em 92% das ocorrências, sendo a principal variável independente com mais influência o teor de AM, em 62% dessas (⁵/₇ dos maiores F_{cal}); a segunda mais importante foi o tipo de adição, em 43% das ocorrências (¹/₇ dos

maiores F_{cal}); e, por último, a relação a/ag em 24% das ocorrências ($1/7$ dos maiores F_{cal}). Apesar de ser significativo em 24% das ocorrências, apresentou F_{cal} menores que o das demais variáveis independentes.

À primeira vista, não parece lógico que a resistência à compressão e a relação a/ag não estivessem entre as variáveis independentes que mais afetaram a durabilidade (somente 24% das ocorrências), visto que não apresentaram nenhum F_{cal} que sobrepujasse os demais. Isso se deve ao fato de que, para uma mesma resistência, podem ocorrer variações amplas para dada propriedade pela modificação das interações compatibilidade *versus* distribuição dos poros que as AM conferem ao concreto. Para uma mesma resistência, quando se utilizam diferentes tipos e teores de adições minerais, as relações a/ag podem variar bastante, porque cada adição e teor conferem microestruturas peculiares com distintas distribuições de poros. Assim, é coerente que a resistência à compressão apresente maior dispersão de resultados, para uma dada variável, em relação à relação a/ag e ao tipo e teor de AM. Essa é uma das razões pelas quais as análises e discussões de resultados de ensaios com distintos tipos e teores de adições minerais sejam realizadas em igualdade de resistência à compressão axial.

As regressões lineares simples revelaram que a variável independente individual mais significativa foi a relação a/ag, em 73% das ocorrências, seguida da resistência à compressão, com 65%. O teor de AM, com 32%, e o tipo, com 22%, foram as variáveis independentes menos influentes. Os valores de r^2 foram fortes e muito fortes em 13% das ocorrências para a/ag e 11% para fc. Não foram encontradas correlações fortes para o tipo e teor de AM. Para os concretos de referência foram encontradas significâncias fortes somente para a relação a/ag em 24% das análises e nenhuma para fc. Os valores de r^2 foram fortes e muito fortes em 100% para a relação a/ag e em 92% para a resistência à compressão, evidenciando as eventuais distorções encontradas no desenrolar dos experimentos, conforme comentado no item 3.2.

A Tabela 11 apresenta os modelos específicos das regressões lineares múltiplas sob o ponto de vista particular do tipo e do teor de AM (neste caso não são variáveis), tendo como variáveis independentes o teor de adição, relação a/ag e fc, para o primeiro estudo, e as variáveis independentes tipo de adição, relação a/ag e fc, para o segundo. As misturas binárias e ternárias apresentaram altas significâncias; entre as binárias, o *filler* calcário e a CV foram significantes em 100% e 58% das ocorrências respectivamente e apresentaram

maiores valores de F_{cal} em duas variáveis, seguida da escória e cinza de casca de arroz com 73% e 63% das ocorrências respectivamente, em relação ao total das análises, com F_{cal} mais elevados em uma variável cada.

Entre as misturas ternárias, as mais significativas foram CV-E, com F_{cal} mais altos em três variáveis, E-CCA e CCA-CV, com F_{cal} em duas. As misturas ternárias que apresentaram maior significância dependeram da variável observada e, logo, do mecanismo atuante sobre ela. O valor de F_{cal} revelou tendência de apresentar valores mais altos para as misturas ternárias do que as binárias, mostrando que o efeito sinérgico de duas AM torna os resultados estatisticamente mais significantes, conforme descrito anteriormente.

Os valores de r^2 dos modelos lineares múltiplos foram fortes ou muito fortes, acima de três quartos das ocorrências; para quase todas as misturas binárias e ternárias, representaram entre 50% e 100% das ocorrências. Esse fato mostrou que, ao se realizar análise mais restrita, com três variáveis independentes, em relação ao modelo geral, as regressões lineares demonstraram menores dispersões, o que tornou os modelos mais representativos. Na Tabela 11, com as regressões lineares múltiplas sobre o tipo de AM (com as variáveis teor, a/ag e fc), os valores de r^2 foram fortes ou muito fortes entre 73% e 100%, para as misturas binárias, e de 80% a 100%, para as ternárias. Na Tabela 9, para o modelo geral por regressão linear múltipla, para as três variáveis independentes, os valores de r^2 apareceram em 54% das ocorrências e em nenhuma variável independente individualmente, valor sensivelmente inferior aos da Tabela 11. Depreende-se desses resultados que, ao se considerarem as quatro variáveis independentes avaliadas isoladamente, não houve correspondência entre 'p' e r^2 nos modelos gerais, entretanto, quando consideradas somente as três variáveis separadamente, houve melhor correspondência entre 'p' e r^2 . Deduz-se, então, que os teores de AM introduziram maior dispersão nos resultados do que o tipo de AM, para esse enfoque das variáveis da durabilidade.

A Tabela 11 apresenta ainda os resultados dos modelos das regressões lineares múltiplas do teor de AM, com as variáveis independentes: tipo de adição, relação a/ag e fc. Foi significativa a maioria das análises realizadas, entre 72% e 100% das ocorrências, desde 12,5% até 90% de substituição de cimento. Também r^2 apresentou-se forte e muito forte, acima de três quartos de todas as análises realizadas e, para grande parte delas, em 100%, reproduzindo o que foi observado para os níveis de significâncias.

		Nº Mode los gerais	Variáveis independentes em conjunto (rlm)				Variáveis independentes individualmente				Concreto de referência	
			Tipo	Teor	a/ag	fc	Tipo (rls)	Teor (rls)	a/ag	fc	a/ag	fc
1.Coeff. de Carbonat.	p	8/8	3/8	7/8	4/8	2/8		4/8	8/8	8/8	8/8	8/8
	r ²	7/8							2/8	3/8	8/8	8/8
2.Coeff. dif. de água	p	1/1			1/1				1/1	1/1	1/1	1/1
	r ²	1/1							1/1	1/1	1/1	1/1
3.Absorção de água	p	5/6	2/6	3/6	2/6	2/6			6/6	6/6	3/6	6/6
	r ²	2/6							2/6		6/6	6/6
4.Coeff. dif. de oxigênio	p	3/3		1/3			3/3	3/3			1/3	
	r ²	1/3									3/3	
5.Penetração de cloretos	p	8/8	6/8	7/8		4/8	2/8	4/8	3/8	1/8	6/8	3/8
	r ²	6/8									8/8	8/8
6.Teor total de cloretos	p	4/4	2/4	3/4		1/4	1/4	1/4	3/4	3/4	4/4	4/4
	r ²	2/4									4/4	4/4
7.Relação Cl ⁻ /OH ⁻	p	5/7	3/7	2/7	2/7		2/7		6/7	4/7	7/7	7/7
	r ²	1/7									7/7	7/7
Total de ocorrências	p	34/37	16/37	23/37	9/37	9/37	8/37	12/37	27/37	24/37	9/37	
	%	92	43	62	24	24	22	32	73	65	24	
	r²	20/37							5/37	4/37	37/37	34/37
	%	54							13	11	100	92

(**XX**: ocorrências com F_{cal} mais altos de todos; 1º dígito = nº de ocorrências da variável considerada e 2º dígito = nº total de ocorrências de todas variáveis consideradas no estudo)

Tabela 10 - Número de ocorrências das variáveis dependentes da durabilidade

		Tipo da adição mineral (rlm)							Teor da adição mineral (rlm)					
		1.CCA	2.CV	3.F	4.E	5.CV E	6.E CA	7.CCA CV	12,5 %	20 %	25 %	50 %	70 %	90 %
1.Coeff Carb.	p	3/5	2/4	1/1	2/3	1/1	1/2	2/3	1/1	3/3	2/2	5/5	6/6	
	r ²	5/5	4/4	1/1	2/3	1/1	2/2	3/3	1/1	3/3	2/2	5/5	6/6	1/1
2.Dif. Água	p	1/1	1/1	1/1				1/1	1/1		1/1	1/1		
	r ²	1/1	1/1	1/1				1/1	1/1		1/1	1/1		
3.Abs. água	p	2/3	1/2		2/2	1/1	1/2	1/1		3/3		2/3	5/6	1/1
	r ²	2/3	2/2		2/2	1/1	1/2	1/1		3/3		3/3	6/6	1/1
4.Dif. O ₂	p					1/1							1/3	1/1
	r ²					1/1		1/2				2/3	2/3	1/1
5.Pen. Cl ⁻	p	3/4	3/3	1/1	3/3	1/1	1/2	2/2	1/1	3/3	1/1	3/4	7/7	1/1
	r ²	3/4	3/3	1/1	3/3	1/1	2/2	2/2	1/1	3/3	1/1	4/4	7/7	1/1
6.Teor Cl ⁻	p	2/3		1/1			1/2			2/3	1/1	1/1	2/3	
	r ²	2/3	1/2	1/1			2/2	1/1	1/1	1/3	1/1	1/1	1/3	
7.Cl ⁻ OH ⁻	p	1/3			1/3		1/2			2/3		3/3	2/7	
	r ²	1/3			1/3		1/2	1/1		2/3		3/3	5/7	1/1
Total de Ocor.	P	12/19	7/12	4/4	8/11	4/4	5/10	6/10	3/4	13/15	5/5	15/20	23/32	3/5
	%	63	58	100	73	100	50	60	75	87	100	75	72	60
	r²	14/19	11/12	4/4	8/11	4/4	8/10	10/10	4/4	12/15	5/5	19/20	27/32	5/5
	%	74	92	100	73	100	80	100	100	80	100	95	84	100

(**XX**: ocorrências com F_{cal} mais altos de todos; 1º dígito = nº de ocorrências da variável considerada e 2º dígito = nº total de ocorrências de todas variáveis consideradas no estudo)

Tabela 11 - Número de ocorrências das variáveis dependentes da durabilidade - Estudo do tipo e teor de adição

Os valores de F_{cal} em negrito revelam aumento da significância dos modelos quando se aumentou o teor de AM na mistura. Há certa evidência de que os teores acima de 50% são mais significantes do que os de menor teor de adição. As variáveis com 70% de adição apresentaram significância em 72% das análises, assim como os maiores valores para F_{cal} em relação às demais misturas (4). Esse comportamento reforça o conceito de que as

variáveis da durabilidade são melhoradas quando se aumenta o teor de AM, especialmente em misturas ternárias, conforme constatado por Isaia e Gastaldini (2002)

Resumo das variáveis independentes mais significativas

A síntese das variáveis independentes mais significativas para as variáveis dependentes da microestrutura e durabilidade estão reunidas nas Tabelas 12, 13 e 14, nas quais se utilizou a letra 'X' para demonstrar a influência da variável independente de maior significância para cada variável dependente, sendo o 'X' em negrito a de significância mais alta para os modelos analisados (maior F_{cal} obtido das Tabelas 6 a 11).

As Tabelas 6 a 9 mostraram que os modelos gerais por regressão linear múltipla, considerando somente as ocorrências de cada projeto individualmente, foram fortemente significativos, $p < 0,05$, em 100% das análises da microestrutura, e 92% das da durabilidade. Esses resultados evidenciaram que os modelos gerais foram significativos para relacionar as variáveis dependentes com as quatro variáveis independentes: tipo e teor de AM, relação a/ag e fc. Entretanto, essas tabelas mostram que 83% (Tabela 6) das análises da microestrutura e 54% (Tabela 10) da durabilidade apresentaram valores de r^2 fortes e muito fortes para o modelo geral, demonstrando que existe dicotomia entre o grau de significância (p) e os coeficientes de determinação (r^2) conforme abordado no item 3.2, devido à falta de repetições dos dados individuais.

A Tabela 12 apresenta os modelos gerais totais, ou seja, considerando-se as ocorrências de todos os projetos conjuntamente, observando-se que, nesse caso, os modelos de cada variável dependente foram significativos ($p < 0,05$) para todas as variáveis resposta da microestrutura e durabilidade. Esse comportamento revela que os modelos calculados por ANOVA apresentaram significância em 100% das variáveis estudadas, mostrando que, quando o teor e tipo de adição mineral, juntamente com a relação a/ag e resistência à compressão são agrupadas na mesma análise de dada variável resposta, mostram interdependência entre si, de modo que o resultado de suas interações foi representado por modelo significante.

Por outro lado, a Tabela 12 revela que, quando se analisam as quatro variáveis independentes individualmente, as que mais influíram nos modelos das variáveis dependentes da microestrutura e durabilidade foram o teor de AM em todas as variáveis, exceção da AC e da difusão de água (a/ag: variável predominante) e relação CI/OH (tipo: variável predominante). Em outras palavras, à medida que aumentou a quantidade (teor) de AM na pasta, as dispersões diminuíram e influíram significativamente nas propriedades da microestrutura e da durabilidade. Em segundo lugar ficaram o tipo da adição e a relação a/ag, revelando

que são duas variáveis independentes relacionadas com o desempenho das variáveis microestruturais e da durabilidade. Observou-se que fc influenciou apenas duas variáveis da microestrutura e nenhuma da durabilidade, ratificando o comentário da Tabela 10 sobre porosidade *versus* distribuição dos poros.

Os resultados obtidos para as variáveis da microestrutura devem ser encarados com certa reserva, porque, com exceção de CH, todas as demais correspondem a uma única ocorrência. Deve ser levado em conta, também, que o ensaio de porosimetria apresenta, intrinsecamente, bastante variabilidade, o que pode ter influenciado a análise das variáveis independentes, quando analisadas isoladamente. Esse mesmo argumento pode ser estendido para as variáveis resposta penetração de oxigênio e relação CI/OH , que apresentaram os menores valores de r^2 (e também os menores F_{cal}) para as variáveis da durabilidade.

A Tabela 13 resume os modelos tipos e teores de AM mais significativos, retirados das Tabelas 7 e 10. A CCA e a CV foram as adições que mais se destacaram, em 67% e 75% (Tabela 8) das ocorrências da microestrutura e de 63% e 58% (Tabela 11) da durabilidade. Nas misturas ternárias destacaram-se a CCA-CV em 100% das ocorrências da microestrutura, a CV-E, também com 100% das variáveis dependentes da durabilidade, e a E-CCA, em 50%. Houve aumento de F_{cal} nas misturas ternárias em relação às binárias, sugerindo que aquelas, por serem complementares e sinérgicas, propiciaram menor dispersão do que as binárias. Os valores de r^2 evidenciaram forte correlação entre os tipos de AM com as variáveis analisadas, similarmente aos valores de 'p' encontrados (ver Tabelas 8 e 12).

A Tabela 13 apresenta ainda o resumo do modelo teor de AM mais significativo, retirado das Tabelas 7, 9 e 11. Para a microestrutura, o teor de 25% foi o mais significativo, e igual ou maior que 70% para a durabilidade, mostrando que, para a primeira, as dispersões dos resultados foram menores com teores mais baixos de AM e, para as variáveis ligadas à segunda, prevaleceram os teores mais elevados. Os valores de F_{cal} cresceram quando aumentou o teor na mistura para as variáveis dependentes da durabilidade, mostrando que as dispersões diminuíram devido à maior homogeneidade e à textura mais fina das pastas com o aumento do teor de material cimentício. Esse comportamento é corroborado pelo aumento de desempenho das variáveis relacionadas com a durabilidade, que geralmente apresentam melhoria devido à obstrução dos poros, resultando no aumento da compactação, o que dificulta a ação dos mecanismos de transporte através dos poros da pasta cimentícia.

Variáveis dependentes		Modelos gerais (totais)				Variáveis independentes			
		nº	p	r ²	F _{cal}	Tipo	Teor	a/ag	fc
Microestrutura	Água combinada	1	0,007	0,82	7,43	-	-	X	X
	Hidróxido de Ca	5	0,000	0,90	36524	X	X	-	-
	Volume total Hg	1	0,000	0,70	15,30	Não significativa			
	Porosidade total	1	0,000	0,60	9,93	Não significativa			
	d>50 nm	1	0,000	0,64	12,40	-	X	X	-
	10>d>50 nm	1	0,002	0,45	5,63	-	X	-	X
	Geral					-	X	X	-
Durabilidade	Coef. de carbon.	8	0,007	0,82	42,37	-	X	X	-
	Difusão de água	1	0,000	0,87	48,26	-	-	X	-
	Absorção H ₂ O	6	0,027	0,68	12,60	X	X	-	-
	Penetr. de O ₂	3	0,020	0,61	6,45	-	X	-	-
	Penetr. de Cl ⁻	8	0,000	0,79	16,64	X	X	-	-
	Teor total de Cl ⁻	4	0,001	0,65	11,74	X	X	-	-
	Relação Cl ⁻ /OH ⁻	7	0,047	0,56	5,43	X	X	-	-
Geral					X	X	X	-	

(X = variáveis de maior significância (p<0,05); X = variável de significância mais alta (maior F_{cal}, n° = número total de ocorrências)
Tabela 12 - Resumo das variáveis independentes mais significativas do modelo geral para as variáveis dependentes da microestrutura e durabilidade

Variáveis dependentes		Tipo de adição mineral						Teor de adição mineral							
		Misturas binárias				Misturas ternárias									
		CCA	CV	F	E	CCA	CV	E	CCA	12,5 %	20 %	25 %	50 %	70 %	90 %
Micro-estrutura	AC	X		X		X					X				
	CH	X	X			X						X	X		
	VTI Hg	X	X			X					X	X			
	DMP			X							X				
	PT	X				X					X	X			
	DC		X	X					X		X	X			
	d>50 nm		X	X							X				
	10>d>50 nm		X	X							X				
Geral		X	X		X					X	X				
Durabilidade	KCO ₂	X	X			X				X				X	
	D.H ₂ O		X	X		X			X						
	A.H ₂ O	X	X				X			X				X	
	P. O ₂						X							X	X
	P. Cl ⁻	X	X				X							X	X
	T. Cl ⁻	X		X				X		X		X			
	Cl ⁻ /OH ⁻	X			X			X				X			
Geral	X	X			X	X			X				X		

(X = variáveis de maior significância (p<0,05); X = variável de significância mais alta (maior F_{cal})

Tabela 13 - Resumo dos modelos tipo de adição mineral mais significativos para as variáveis dependentes da microestrutura e durabilidade

Os resultados mostrados nas Tabelas 12 a 14 evidenciam que o teor de adição mineral, individualmente, foi a variável independente que apresentou significância em 10 (77%) das 13 variáveis resposta analisadas neste trabalho, seguidas da relação a/ag, tipo de adição e fc. Entretanto, quando as quatro variáveis independentes foram analisadas em conjunto, em todas as ocorrências dos projetos estudados, os modelos gerais se mostraram significantes na totalidade (14) das variáveis resposta. Quanto ao tipo de adição mineral, as misturas ternárias apresentaram tendência de maior significância do que as binárias. Os altos teores de adição mineral

(≥50%) foram os que apresentaram resultados mais significantes para as variáveis resposta da durabilidade, uma vez que não houve ensaios de microestrutura para teores maiores do que aquele mencionado.

Conclui-se, portanto, que o teor da adição mineral é a variável independente-chave, juntamente com a relação a/ag, para explicar as principais variações observadas nas propriedades da microestrutura e durabilidade apresentadas pelas variáveis resposta. Esse comportamento comprova estatisticamente o melhor desempenho das misturas de concreto com adições minerais, à medida que aumenta seu teor nos traços, ou, ainda, quando são empregadas duas

ou mais adições minerais em misturas ternárias, conforme já comprovado por inúmeros artigos e trabalhos publicados na literatura, especialmente na produção bibliográfica do GEPECON da UFSM, como as citadas no presente trabalho.

Conclusão

Por análises de regressões simples e múltiplas, este trabalho apresentou estudo sobre a significância da influência do tipo e do teor de AM, relação a/ag e resistência à compressão de concretos com substituição parcial de adições minerais, sobre variáveis relacionadas com a microestrutura e a durabilidade.

Entre os parâmetros que influenciaram as variáveis dependentes da microestrutura e da durabilidade do concreto, constatou-se que, para as variáveis independentes individuais dos modelos gerais, o teor de adição mineral foi o que apresentou maior significância, seguido da relação água/aglomerante, tipo de adição e, por último, resistência à compressão. Quando as quatro variáveis independentes foram analisadas conjuntamente em todas as ocorrências dos ensaios realizados, os modelos gerais mostraram significância $p < 0,05$ para todas as variáveis resposta dos cinco projetos analisados.

A relação a/ag, seguida da resistência à compressão, do teor e do tipo de adição foram as variáveis independentes que preponderaram nas análises por regressão linear simples.

Para o concreto de referência, sem adições minerais, houve significância fraca e coeficiente de determinação forte e muito forte para todas as variáveis estudadas. Esse fato ocorreu porque essas misturas não continham AM e os dados foram avaliados pelos valores médios, ao invés dos dados individuais coletados em laboratório.

Quanto ao tipo de adição mineral, conclui-se que as misturas binárias com CCA e CV e as ternárias com CCA-CV para a microestrutura e CV-E para a durabilidade foram as AM mais significantes, pois demonstraram possuir significância 'p' e coeficiente de determinação r^2 superiores às demais. O *filler* calcário, por atuar apenas por efeito físico, apresentou significância em todas as análises para as variáveis tipo e teor de AM.

O teor de adição que apresentou melhor resultado estatístico foi 25% para a microestrutura e 70% para a durabilidade. Houve forte significância 'p' e forte e muito forte valor de r^2 para teores elevados de substituição de cimento por AM. O F_{cal} aumentou nas misturas ternárias em relação às binárias, sugerindo que aquelas, por serem

complementares e sinérgicas, propiciaram menor dispersão dos resultados que as misturas binárias.

Algumas variáveis independentes, isoladamente, não foram significativas nos modelos, mas sua interação com os demais proporcionou resultados significativos pela sinergia existente entre elas. Dessa forma, os modelos gerais com as quatro variáveis independentes (tipo e teor de AM, a/ag e fc) demonstraram ser mais adequados para realizar o estudo estatístico por meio de regressão linear múltipla, com o propósito de avaliar variáveis dependentes da microestrutura e da durabilidade desses concretos.

Os comportamentos observados comprovaram estatisticamente o melhor desempenho das misturas de concreto com adições minerais, à medida que aumentou seu teor nos traços ou, ainda, quando foram empregadas duas ou mais adições minerais em misturas ternárias, conforme já constatado por vários trabalhos publicados na literatura.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.** ASTM C1152, W. Conshohocken, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride ion Penetration.** ASTM C1202, W. Conshohocken, 1997.
- CHRISTMANN, R. U. **Estatística aplicada.** São Paulo: Edgard Blücher, 1978. 454 p.
- FURQUIM, P. R. V. **Estudo Estatístico de Produção de Concretos com Adições Minerais.** Santa Maria, 2006. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C. Porosidade de Pastas compostas de Misturas Binárias e Ternárias de Adições Minerais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 1998. p. 35-43.

HOPPE FILHO, J. **Efeitos da Adição da Cal Hidratada sobre a Permeabilidade ao Oxigênio e Absorção Capilar de Concreto com Altos Teores de Adições Minerais**. Santa Maria, 2002. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

ISAIA, G. C. **Efeitos de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; GASTALADINI, A. L. G. Efeitos do Aumento do Nível da Resistência à Compressão sobre a Microestrutura e Durabilidade do Concreto Com pozolanas. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002. Brasília. **Anais...** Brasília: Universidade de Brasília, 2002.

ISAIA, G. C.; GASTALADINI, A. L. G. Microestrutura e Durabilidade de Concreto de Alto Desempenho com Altos Teores de Pozolanas: estudo comparativo com concreto convencional. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2003, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo, 2004.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Silica Ativa**. Porto Alegre, 2002. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. J.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-Induced Reinforcement Corrosion in Silica Fume Concrete. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 23, n. 3, p. 1189-1195, mar.2009.

LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística: teoria e aplicações usando Microsoft Excel em português**. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 782 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. P. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

MORAES, R. C. **Efeitos Físico e Pozolânico sobre a Resistência à Compressão e Microestrutura de Concreto com Adições Minerais**. Santa Maria, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e Avaliação de Experimentos**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 193 p. (Caderno de Engenharia, 17/87)

RILEM. Recommendations of TC116-PCD: tests for gas permeability of concrete. **Materials and Structures**, v. 32, n. 217, p. 163-179, 1999.

SILVEIRA, R. G. **Estudo da Resistência e da Microestrutura da Camada de Cobrimento de Protótipos de Concreto com Pozolanas**. Santa Maria, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

VENQUIARUTO, S. **A influência do Teor e da Finura de Adições Minerais na Carbonatação do Concreto**. Santa Maria, 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

VIEIRA, F. M. P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão de Armaduras em Concretos com Adição de Silica Ativa**. Porto Alegre, 2003. 223 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERGS e ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica e apoio financeiro de projetos de pesquisas que deram origem ao presente trabalho.