

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS,  
ELÁSTICAS E DE DEFORMAÇÃO EM CONCRETOS  
COM ALTOS TEORES DE ESCÓRIA E CINZA  
VOLANTE.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Sílvio Maurício Beck**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2009**

**EFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, ELÁSTICAS  
E DE DEFORMAÇÃO EM CONCRETOS COM ALTOS  
TEORES DE ESCÓRIA E CINZA VOLANTE.**

**por**

**Sílvio Maurício Beck**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Materiais de Construção Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

**Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Geraldo Cechella Isaia**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2009**

---

© 2009

Todos os direitos autorais reservados a Sílvio Maurício Beck. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser com autorização por escrito do autor.

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. CEP: 97105-900.

Fone: (55) 3220- 8837; Fax: (55) 3220 – 8030; e-mail: [pgcivil@ct.ufsm.br](mailto:pgcivil@ct.ufsm.br)

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a dissertação de Mestrado

**EFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, ELÁSTICAS E DE  
DEFORMAÇÃO EM CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE  
ESCÓRIA E CINZA VOLANTE.**

elaborada por  
**Sílvio Maurício Beck**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Geraldo Cechella Isaia, Dr.**  
(Presidente / Orientador)

**Antônio Luiz Guerra Gastaldini, Dr. (UFSM)**

**Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Dr. (UFRGS)**

Santa Maria, 12 de Março de 2009.

*Aos meus pais, por me proporcionarem  
o maior bem que alguém pode possuir:  
o conhecimento.*

## AGRADECIMENTOS

Agradecer, conforme Aurélio Buarque de Holanda em seu dicionário é o ato de “*mostrar-se grato por; demonstrar gratidão*”. Para mim, agradecer é algo além da definição proposta por Holanda; é também demonstrar reconhecimento às pessoas e amigos que nos apóiam e incentivam nos desafios que a vida nos apresenta.

Deste modo, presto minha gratidão e reconhecimento:

Ao meu orientador Prof.<sup>o</sup> Geraldo Cechella Isaia, pela oportunidade e confiança depositada em mim para a realização deste trabalho; pelos ensinamentos conferidos e a orientação ao longo deste período, assim como pela dedicação que dispensa aos seus orientandos;

Ao Prof.<sup>o</sup>. Antônio Luiz Guerra Gastaldini pela dedicação e ensinamentos prestados durante o curso de Pós-Graduação;

À Prof.<sup>a</sup>. Tatiana Cureau Cervo pelo apoio e ensinamentos durante a realização dos trabalhos experimentais;

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil;

À Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pela oportunidade concedida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro concedido para a realização desta pesquisa;

A Régis Moraes e demais colegas do Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto – GEPECON, pelo apoio e amizade nestes anos de curso.

A todos que fazem parte do corpo técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM pelo auxílio dispensado;

Aos amigos, bolsistas de iniciação científica, pela dedicação e empenho no desenvolvimento dos trabalhos experimentais – Rogério Quinhones, Filipe Diesel e Marcelo Oliveira;

Aos meus pais, Olimpio Beck Neto e Maria Goreti Beck; à minha esposa Gisiane Medeiros Moraes e minha filha Isabela;

E em especial a minha avó, Maria Lôndero Mousquer, pelo acolhimento, incentivo e companheirismo nestes anos de estudo, e que nesta reta final partiu desta vida, deixando-nos seu exemplo de luta e esperança.

A todos agradeço sinceramente. Muito obrigado!

*Sílvio Maurício Beck*

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **EFEITOS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, ELÁSTICAS E DE DEFORMAÇÃO EM CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE ESCÓRIA E CINZA VOLANTE.**

AUTOR: SÍLVIO MAURÍCIO BECK

ORIENTADOR: GERALDO CECHELLA ISAIA

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 12 de Março de 2009.

A utilização de subprodutos e resíduos industriais como pozolanas, é uma alternativa para atingir a sustentabilidade, economia e durabilidade em estruturas de concreto. Esta pesquisa possui o objetivo de analisar os efeitos nas propriedades mecânicas, elásticas e de deformação em concretos com elevados teores de escória granulada de alto-forno e cinza volante em substituição ao cimento Portland em massa. O uso de altos teores de adições minerais tem por fim o aumento da durabilidade e redução do consumo de cimento, tendo o uso de cal hidratada a finalidade de ativar estas adições, repor parte do hidróxido de cálcio consumido pelas reações pozolânicas, aumentando as resistências iniciais e finais das misturas. Desta forma, estudaram-se três misturas de concreto: uma sem adições minerais, somente com cimento Portland (CP V-ARI), tomada como referência, com relações  $a/c$  0.40, 0.60 e 0.83, e duas misturas com adições minerais em substituição ao cimento em igual massa, com 70% de escória e 20% de cinza volante, sendo uma delas com adição de 20% de cal hidratada em relação à massa de aglomerantes em adição ao cimento, ambas para relações  $a/mc$  0.30/0.33, 0.40 e 0.49, as quais foram renomeadas como R, EV e EVC. Foram realizados ensaios de resistência a compressão axial em corpos de prova (10x20 cm) nas idades de 07, 28, 91 e 300 dias, cujos resultados variaram entre 18.2 MPa e 81 MPa, ensaios de resistência a tração por compressão diametral e módulo de elasticidade aos 28, 91 e 300 dias, assim como ensaios de retração total em corpos de prova prismáticos (10x10x30 cm) aos 28, 91, 180 e 300 dias. Também se correlacionou os resultados das resistências mecânicas, elásticas e de deformação com algumas variáveis intervenientes e independentes apresentadas, assim como com algumas prescrições normativas existentes. Os resultados foram analisados para cada traço individualmente, em relação aos traços referências, em relação à evolução da resistência, eficiência do uso da cal hidratada e em igualdade de relação  $a/mc$  0.4. Na análise de igualdade de relação  $a/mc$  0.400, em relação ao concreto referência, na idade inicial, a resistência a compressão axial do concreto EV foi, em média, 72% da apresentada por este, sendo a resistência do EVC 55%, e na idade final, 65% e 50%, respectivamente. Em relação à resistência a tração por compressão diametral, aos 28 dias o concreto EV apresentava 76% da resistência da referência, e o concreto EVC 58%. Esta relação, aos 300 dias foi de 80% e 61% respectivamente. Para o módulo de elasticidade, aos 28 dias, o concreto EV apresentou 82% e o EVC 70% do resultado obtido pela mistura referência, mantendo-se esta proporção até a idade final (300 dias). Na análise da retração total, o concreto EV apresentou uma retração 10% inferior ao traço referência, enquanto o concreto EVC aos 300 dias apresentou uma retração 16% superior ao mesmo. A observação através da conjuntura dos resultados obtidos demonstra uma satisfatória relação entre os diferentes traços estudados, viabilizando o uso de elevados teores de adições minerais em substituição a grande parcela de cimento em massa.

*Palavras-chaves: Concreto, cinza-volante, escória, cal hidratada, resistência, módulo de elasticidade, retração.*

## ABSTRACT

Master's Thesis  
Program for graduate in Civil Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **EFFECTS ON MECHANICAL, ELASTIC AND DEFORMATION PROPERTIES ON CONCRETE WITH HIGH LEVELS OF SLAG AND FLY ASH.**

AUTHOR: SÍLVIO MAURÍCIO BECK  
MENTOR TEACHER: GERALDO CECHELLA ISAIA  
City and Date: Santa Maria, 12 March of 2009.

The use of byproducts and industrial waste as pozzolanic, is an alternative to achieve the sustainability, economy and durability in concrete structures. This survey has as its purpose to analyze the effect on mechanical, elastic and deformation properties on concrete with a high level of granulated slag from blast furnace and fly ash in place of Portland bulk cement. The use of high levels of mineral additions has the purpose of increasing the durability and reducing the consumption of cement, the use of hydrated lime aims to activating these additions, restore part of the calcium hydroxide consumed by the pozzolanic reactions, increasing the initial and final strength to the mixtures. This way, three mixtures of concrete have been studied: one of them without mineral additions, only using Portland cement (CP V-ARI), taken as a control, with relations  $a/c$  0.40, 0.60 and 0.83, and two mixtures with mineral additions in place of cement in equal mass, with 70% of slag and 20% of fly ash, being one of them with addition of 20% of hydrated lime on the mass of binders in addition to the cement, both to the relations  $a/mc$  0.30/0.33, 0.40 and 0.49, which have been renamed as R, EV and EVC. Tests were held to resistance to axial compression in bodies of evidence (10x20cm) the ages of 07 28, 91 and 300 days, whose results range from 18.2 MPa and 81 MPa, tests of resistance to traction by diametral compression and module of elasticity at 28, 91 and 300 days, as well as tests of total shrinkage on prismatic bodies of evidence (10x10x30 cm) at 28, 91, 180 and 300 days. The results of mechanical, elastic and strain resistance have been also correlated with some intervening and independent variables, as well as some existing regulatory requirements. The results have been analyzed to each trace individually, in relation to the control traces, in relation to the evolution of the resistance, effectiveness of the use of the hydrated lime and in equal relationship  $a/mc$  0.4. In the analysis of the equal relationship  $a/mc$  0.400, in the case of reference concrete, in the initial age, the resistance to the axial compression of the concrete EV was, in media, 72% of the one presented by it, being the resistance to the EVC 55%, and in the final age, 65% and 50% respectively. In the case of the traction by diametral compression, to 28 days the concrete EV presented 76% of the resistance of the reference, and the concrete EVC 58%. This relation to 300 days was 80% and 61% respectively. To the elasticity module, to 28 days, the concrete EV presented 82% and the EVC 70% of the result obtained by the reference mixture, maintaining this proportion until the final age (300 days). In the analysis of the total retraction, the concrete EV presented an inferior retraction 10% inferior to the reference trace, while the concrete EVC to 300 days presents a good retraction 16% superior to it. The observation through the conjuncture of the results found shows a satisfactory relation among the different traces studied, making feasible the use of high levels of mineral additions in substitution to the large portion of cement in bulk.

*Keywords: Concrete, Flay Ash, Slag, Lime hydrated, strength, modulus of elasticity, total shrinkage.*



## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 3.1</b> – Composição química do cimento e adições minerais .....	60
<b>TABELA 3.2</b> – Dimensões características do cimento e adições minerais .....	61
<b>TABELA 3.3</b> – Características físicas do cimento e adições minerais .....	61
<b>TABELA 3.4</b> – Composição das amostras .....	61
<b>TABELA 3.5</b> – Resultados de ensaios BET .....	63
<b>TABELA 3.6</b> – Caracterização dos agregados .....	64
<b>TABELA 3.7</b> – Consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto .....	67
<b>TABELA 3.8</b> – Nomenclatura, relação a/mc e teores substituídos .....	67
<b>TABELA 4.1</b> – Índice de eficiência do uso de cal na RCA .....	80
<b>TABELA 4.2</b> – Índice de eficiência do uso de cal na RCD .....	86
<b>TABELA 4.3</b> – Correlação entre RCD calculado pelo ACI/NBR 6118 e resultados aos 28 dias .....	105
<b>TABELA 4.4</b> – Correlação entre RCD calculado pelo ACI/NBR 6118 e resultados aos 91 dias .....	106
<b>TABELA 4.5</b> – Correlação entre Eci calculado pelo CEB, ACI e NBR 6118 e resultados aos 28 dias.....	107
<b>TABELA 4.6</b> – Correlação entre Eci calculado pelo CEB, ACI e NBR 6118 e resultados aos 91 dias .....	108

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b> – Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto (Mehta & Monteiro, 1994, p. 63, <i>apud</i> Jacintho & Giongo, 2005) .....	38
<b>FIGURA 2.2</b> – Período de contribuição para a resistência mecânica de diferentes adições minerais (Mehta, 1983, p. 46, <i>apud</i> Isaia, 1995) .....	40
<b>FIGURA 3.1</b> – Atividade pozolânica do cimento CP V- ARI aos 14 dias .....	62
<b>FIGURA 3.2</b> – Atividade pozolânica da mistura 01 aos 14 dias .....	62
<b>FIGURA 3.3</b> – Atividade pozolânica da mistura 02 aos 14 dias .....	63
<b>FIGURA 3.4</b> – Distribuição granulométrica das amostras .....	64
<b>FIGURA 3.5</b> – Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	65
<b>FIGURA 3.6</b> – Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	65
<b>FIGURA 4.1</b> – RCA das misturas de referência dos 07 aos 300 dias .....	71
<b>FIGURA 4.2</b> – RCA das misturas com adições minerais dos 07 aos 300 dias .....	72
<b>FIGURA 4.3</b> – RCA das misturas com adições minerais e cal dos 07 aos 300 dias .....	73
<b>FIGURA 4.4</b> – RCA das misturas aos 07 dias .....	74
<b>FIGURA 4.5</b> – RCA das misturas aos 28 dias .....	74
<b>FIGURA 4.6</b> – RCA das misturas aos 91 dias .....	75
<b>FIGURA 4.7</b> – RCA das misturas aos 300 dias .....	76
<b>FIGURA 4.8</b> – Evolução da RCA das misturas dos 07 aos 28 dias .....	77
<b>FIGURA 4.9</b> – RCD da mistura referência dos 28 aos 300 dias .....	81
<b>FIGURA 4.10</b> – RCD das misturas com adições minerais dos 28 aos 300 dias .....	81
<b>FIGURA 4.11</b> – RCD das misturas com adições minerais e cal dos 28 aos 300 dias .....	82
<b>FIGURA 4.12</b> – RCD das misturas aos 28 dias .....	83

<b>FIGURA 4.13</b> – RCD das misturas aos 91 dias .....	83
<b>FIGURA 4.14</b> – RCD das misturas aos 300 dias .....	84
<b>FIGURA 4.15</b> – Evolução da RCD das misturas dos 28 aos 300 dias .....	85
<b>FIGURA 4.16</b> – Eci das misturas referência dos 28 aos 300 dias .....	87
<b>FIGURA 4.17</b> – Eci das misturas com adições minerais dos 28 aos 300 dias .....	88
<b>FIGURA 4.18</b> – Eci das misturas com adições minerais e cal dos 28 aos 300 dias .....	88
<b>FIGURA 4.19</b> – Eci das misturas aos 28 dias .....	89
<b>FIGURA 4.20</b> – Eci das misturas aos 91 dias .....	90
<b>FIGURA 4.21</b> – Eci das misturas aos 300 dias .....	90
<b>FIGURA 4.22</b> – Evolução do Eci das misturas dos 28 aos 300 dias .....	91
<b>FIGURA 4.23</b> – Retração das misturas de referência dos 28 aos 300 dias ....	93
<b>FIGURA 4.24</b> – Retração das misturas com adições minerais dos 28 aos 300 dias .....	94
<b>FIGURA 4.25</b> – Retração das misturas com adições minerais e cal dos 28 aos 300 dias .....	94
<b>FIGURA 4.26</b> – Retração das misturas aos 28 dias .....	95
<b>FIGURA 4.27</b> – Retração das misturas aos 91 dias .....	96
<b>FIGURA 4.28</b> – Retração das misturas aos 180 dias .....	97
<b>FIGURA 4.29</b> – Retração das misturas aos 300 dias .....	97
<b>FIGURA 4.30</b> – Evolução da retração das misturas dos 28 aos 300 dias .....	98
<b>FIGURA 4.31</b> – Resistência a compressão axial em igualdade de relação a/mc 0.400 .....	100
<b>FIGURA 4.32</b> – Resistência a compressão diametral em igualdade de relação a/mc 0.400 .....	101
<b>FIGURA 4.33</b> – Módulo de elasticidade em igualdade de relação a/mc 0.400 .....	102
<b>FIGURA 4.34</b> – Retração em igualdade de relação a/mc 0.400 e coeficientes de determinação .....	103
<b>FIGURA 4.35</b> – Retração em igualdade de relação a/mc 0.400 e igualdade de resistência .....	104
<b>FIGURA 4.36</b> – Correlação entre RCA e RCD para todas as idades das misturas estudadas .....	108

<b>FIGURA 4.37</b> – Correlação entre RCA e RCD para as misturas estudadas .....	109
<b>FIGURA 4.38</b> – Correlação entre RCA e módulo de elasticidade para todas as idades das misturas estudadas e fator $r^2$ .....	110
<b>FIGURA 4.39</b> – Correlação entre RCA e módulo de elasticidade para todas as idades das misturas estudadas .....	111
<b>FIGURA 4.40</b> – Correlação entre retração total e resistência a compressão axial para as misturas estudadas .....	112
<b>FIGURA 4.41</b> – Correlação entre retração e resistência a compressão em igualdade de resistência .....	113

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland  
**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
**ACI** – American Concrete Institute  
**ASTM** – American Society for Testings Materials  
**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – óxido de alumínio  
**a/ag** – relação água / aglomerante, em massa  
**a/c** – relação água / cimento, em massa  
**a/mc** – relação água / material cimentício, em massa  
**CAD** – concreto de alto desempenho  
**CaO** – óxido de cálcio  
**Ca(OH)<sub>2</sub> = CH** – hidróxido de cálcio  
**Ca<sup>2+</sup>** – íon cálcio  
**cal/mol.gr** – caloria por molécula grama  
**CCA** – cinza de casca de arroz  
**CEB** – Comité Eurointernacional du Betón  
**CH<sub>4</sub>** – metano  
**CO<sub>2</sub>** – dióxido de carbono  
**CO<sub>2eq</sub>** – dióxido de carbono equivalente  
**CP** – cimento Portland  
**CP V- ARI** – cimento Portland de alta resistência inicial  
**C-S-H** – silicato de cálcio hidratado  
**CV** – cinza volante  
**dm** – decímetro  
**E** – escória  
**EAF** – escória de alto- forno  
**EV** – mistura escória + cinza volante

**EVC** – mistura escória + cinza volante e cal adicionada  
**Eci** – módulo de elasticidade, em GPa  
**fck** – resistência à compressão  
**g** – grama  
**GEPECON** – Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto  
**GPa** – giga - pascal  
**H<sub>2</sub>O** – molécula de água  
**k** – quilo  
**k/m<sup>3</sup>** - quilo por metro cúbico  
**k/dm<sup>3</sup>** - quilo por decímetro cúbico  
**LMCC** – Laboratório de Materiais de Construção Civil  
**MgO** – óxido de magnésio  
**Mg(OH)<sub>2</sub>** – hidróxido de magnésio  
**min** – minuto  
**MPa** – mega – pascal  
**m<sup>2</sup>** - metro quadrado  
**m<sup>2</sup>/kg** – metro quadrado por quilo  
**m<sup>2</sup>/g** – metro quadrado por grama  
**mm** – milímetro  
**N<sub>2</sub>O** – óxido nitroso  
**OH<sup>-</sup>** - íon hidroxila  
**pH** – potencial hidrogeniônico  
**R** – referência  
**r<sup>2</sup>** – coeficiente de determinação  
**RCA** – resistência à compressão axial  
**RCD** – resistência à tração por compressão diametral  
**UFSM** – Universidade Federal de Santa Maria  
**Ø** – diâmetro  
**µm** – micrômetro  
**°C** – graus Celsius  
**%** – percentagem  
**#** – peneira  
**SiO<sub>2</sub>** – dióxido de silício  
**SO<sub>3</sub>** – trióxido de enxofre  
**SNIC** – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A</b> – Resultados dos ensaios de resistência a compressão axial .....	128
<b>ANEXO B</b> – Resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral .....	129
<b>ANEXO C</b> – Resultados dos ensaios de retração total .....	130
<b>ANEXO D</b> – Retração total: leituras diretas .....	131
<b>ANEXO E</b> – Comparativo entre os resultados dos ensaios de RCD com os resultados calculados pela NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 28 dias .....	132
<b>ANEXO F</b> – Comparativo entre os resultados dos ensaios de RCD com os resultados calculados pela NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 91 dias .....	133
<b>ANEXO G</b> – Comparativo entre os resultados dos ensaios de RCD com os resultados calculados pela NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 300 dias ....	134
<b>ANEXO H</b> – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade .....	135
<b>ANEXO I</b> – Comparativo entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade com os resultados calculados pelo CEB 90, NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 28 dias .....	136
<b>ANEXO J</b> – Comparativo entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade com os resultados calculados pelo CEB 90, NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 91 dias .....	137
<b>ANEXO K</b> – Comparativo entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade com os resultados calculados pelo CEB 90, NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 300 dias .....	138
<b>ANEXO L</b> – Resultados de resistência a compressão axial e equação de Abrams .....	139
<b>ANEXO M</b> – Evolução da resistência a compressão e equações de progressão .....	140

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	06
<b>ABSTRACT</b> .....	07
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	08
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	09
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	12
<b>LISTA DE ANEXOS</b> .....	14
<b>1. IMPORTÂNCIA, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS</b> .....	19
1.1. Introdução e Justificativa .....	19
1.2. Objetivos .....	23
1.3. Estrutura .....	24
<b>2. RESISTÊNCIA MECÂNICA E DEFORMAÇÕES DO CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS E CAL HIDRATADA</b> .....	26
<b>2.1. Adições minerais e cal hidratada</b> .....	26
2.1.1. Cinza volante .....	28
2.1.2. Escória granulada de alto-forno .....	32
2.1.3. Cal hidratada .....	33
<b>2.2. Concreto com altos teores de adições minerais</b> .....	36
2.2.1. Enfoque nas resistências mecânicas .....	37
2.2.1.1. Resistência à compressão axial – RCA .....	39
2.2.1.2. Resistência à tração por compressão diametral – RCD .....	44
2.2.2. Enfoque nas deformações e propriedades elásticas .....	46
2.2.2.1. Módulo de elasticidade .....	46
2.2.2.2. Retração total .....	50
2.2.3. Influência da cal hidratada .....	55



<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	58
<b>3.1. Introdução</b> .....	58
<b>3.2. Variáveis envolvidas</b> .....	58
<b>3.3. Caracterização dos materiais</b> .....	60
3.3.1. Cimento e adições minerais .....	60
3.3.2. Agregados .....	64
3.3.3. Aditivo superplastificante .....	65
<b>3.4. Proporcionamento e dosagem dos concretos</b> .....	66
3.4.1. Moldagem e cura dos corpos de prova .....	68
<b>3.5. Experimentos</b> .....	69
3.5.1. Resistência à compressão axial – RCA .....	69
3.5.2. Resistência à tração por compressão diametral – RCD .....	69
3.5.3. Módulo de elasticidade .....	69
3.5.4. Retração total .....	70
<b>4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	71
<b>4.1. Resistência a compressão axial – RCA</b> .....	71
4.1.1. Evolução da resistência .....	76
4.1.2. Eficiência do uso de cal hidratada .....	79
<b>4.2. Resistência a tração por compressão diametral – RCD</b> .....	80
4.2.1. Evolução da resistência a tração por compressão diametral .....	84
4.2.2. Eficiência do uso da cal hidratada .....	86
<b>4.3. Módulo de elasticidade</b> .....	87
4.3.1. Evolução do módulo de elasticidade .....	91
<b>4.4. Retração total</b> .....	92
4.4.1. Evolução da retração total .....	98
<b>4.5. Análise das misturas em igualdade de relação a/mc 0.400</b> .....	99
4.5.1. Resistência à compressão axial – RCA .....	100
4.5.2. Resistência à tração por compressão diametral – RCD .....	101
4.5.3. Módulo de elasticidade .....	102
4.5.4. Retração total .....	103
<b>4.6. Correlação entre RCD x ACI x NBR 6118</b> .....	105
<b>4.7. Correlação entre módulo de elasticidade x CEB x ACI x NBR 6118</b> ...	106

<b>4.8. Correlação entre os resultados das resistências mecânicas, elásticas e de deformações com variáveis intervenientes e independentes</b> .....	108
4.8.1. Correlação entre as resistências a compressão axial e resistência à tração por compressão diametral .....	108
4.8.2. Correlação entre resistência a compressão axial e módulo de elasticidade .....	109
4.8.3. Correlação entre a retração total e resistência a compressão axial .....	111
<b>5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	114
<b>5.1. Variação das principais propriedades mecânicas do concreto - resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral – módulo de elasticidade e retração total, com o uso de teores muito altos de adições minerais</b> .....	114
5.1.1. Resistência a compressão axial – RCA .....	114
5.1.2. Resistência a tração por compressão diametral – RCD .....	115
5.1.3. Módulo de elasticidade .....	116
5.1.4. Retração total .....	116
<b>5.2. Variações constatadas nas misturas com altos teores de pozolanas, em termos das propriedades estudadas, em relação ao concreto referência somente com cimento Portland</b> .....	117
5.2.1. Resistência a compressão axial – RCA .....	117
5.2.2. Resistência a tração por compressão diametral – RCD .....	118
5.2.3. Módulo de elasticidade .....	118
5.2.4. Retração total .....	119
5.2.5. Análise em igualdade de relação a/mc 04.40 .....	119
<b>5.3. Conclusão</b> .....	120
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	122
<b>ANEXO A</b> .....	128
<b>ANEXO B</b> .....	129
<b>ANEXO C</b> .....	130
<b>ANEXO D</b> .....	131
<b>ANEXO E</b> .....	132
<b>ANEXO F</b> .....	133

<b>ANEXO G</b> .....	134
<b>ANEXO H</b> .....	135
<b>ANEXO I</b> .....	136
<b>ANEXO J</b> .....	137
<b>ANEXO K</b> .....	138
<b>ANEXO L</b> .....	139
<b>ANEXO M</b> .....	140

## CAPITULO 01

**1. IMPORTÂNCIA, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.****1.1. Introdução e Justificativa**

Nos dias atuais, o aquecimento global e o uso irracional de recursos naturais são assuntos preocupantes para diversos setores da sociedade, os quais procuram soluções para minimizar estes efeitos. De acordo com Levy (2005), grande parte dos impactos ambientais é decorrente de um modelo de desenvolvimento que considerava o planeta Terra e todos os seus ecossistemas como uma fonte inesgotável de matérias-primas, assim como receptáculo adequado para todos os dejetos produzidos por seus habitantes; porém o preço deste ato agora é cobrado, pois os impactos ambientais decorrentes desta crescente industrialização podem ser sentidos através do efeito estufa, com o conseqüente aquecimento do planeta, o aumento do buraco na camada de ozônio, a poluição de rios e mares, bem como do ambiente em geral. A partir da falência deste conceito, no qual os recursos ambientais seriam inesgotáveis, estes passaram a ser objetos de interesse e de gestão.

Neste sentido, é oportuno elucidar qual a relação entre o desenvolvimento sustentável e a indústria da construção civil, ou mais especificamente, na produção de concreto, foco deste trabalho.

Segundo Levy (2005), a produção de cimento, e conseqüentemente a de concreto é um dos índices utilizados para avaliar o grau de desenvolvimento de um país. Do mesmo modo, este índice pode ser utilizado para avaliar a degradação causada pela indústria da construção civil ao meio ambiente. A solução para este paradoxo, como apontado por Levy, é a produção de concretos mais sustentáveis.

Entende-se por concretos sustentáveis aqueles que necessitam de menores consumos de recursos naturais para a produção de cimento, assim como menor utilização de clínquer na produção de concreto, conseguido através do uso de cimentos com adições minerais, ou mesmo substituição com o uso direto destas adições ao concreto, e menor consumo de energia.

De acordo com o CEMBUREAU, *apud* AÏTCIN (2000), mais de 1 bilhão de toneladas de cimento foram produzidas a cada ano entre 1990 e 1995, podendo-se

estimar a produção de aproximadamente 4.4 bilhões de metros cúbicos de concretos por ano neste período, isto é, mais de 2 toneladas de concreto por pessoa por ano. Conforme Aïtcin (2000), apenas a água doce foi mais largamente utilizada durante o mesmo período de tempo.

Levy (2005) relata que 1.7 bilhões de toneladas de cimento Portland são produzidos no mundo, em torno de 250 kg por habitante, sendo a produção de cimento responsável por cerca de 6% a 7% das emissões totais de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), número este que passa para além dos 10% em países como a China, que vem se desenvolvendo rapidamente, e que produz uma de cada três toneladas do cimento mundial. Já para o ano de 2006, o CEMBUREAU apresenta uma produção mundial de 2.54 bilhões de toneladas, ou seja, em apenas um ano, aproximadamente 2.55 vezes o produzido no mesmo período na década passada. Estes dados são confirmados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), que aponta uma produção mundial idêntica a registrada pelo CEMBUREAU. Em relação à produção brasileira, o SNIC relata para o ano de 2008 uma produção de cerca de 43 milhões de toneladas.

Cabe salientar que, para cada tonelada de cimento Portland produzido é liberada igual massa de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ). De acordo com Isaia (2004) *apud* LEVY (2005), a concentração de gases na atmosfera como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , expressos na forma de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , teve um previsão de aumento de aproximadamente 5.5% no período 1995/2005, elevando a temperatura do planeta em  $1.4^\circ\text{C}$ . Porém, previsões atuais apontam para um incremento de 20% na emissão dos gases  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ , cuja conseqüência direta seria o agravamento do efeito estufa.

Aïtci (2000), analisando as estatísticas de CEMBUREAU, observou que o consumo de cimento encontra-se mais estagnado nos países industrializados, ocorrendo até decréscimos em suas produções, mas crescente nos países em desenvolvimento. Nota-se que a produção mundial de cimento cresceu 22% em 1994, tendo como ano referência 1990. Para países considerados “em desenvolvimento” como China e Índia, estas percentagens correspondem a 95% e 30% respectivamente, e para alguns países conhecidos como “Tigres Asiáticos”, como Tailândia, Taiwan e Coréia do Sul, esta variação chega a 65%, 21% e 55%. Este grande consumo se deve ao fato de o concreto continuar sendo um material de construção de baixo custo, incorporando cerca de 85% de materiais locais (como areia, agregados e água), além de sua produção e uso não requerer tecnologia altamente sofisticada.

Desta forma, a comunidade técnica e científica, ligada à construção civil vem a algum tempo desenvolvendo pesquisas e estudos de diversos materiais que através de seu uso, possam diminuir o impacto e a poluição ambiental causada por este setor, sendo o estudo de materiais alternativos na fabricação de concreto, como adições minerais, um deles.

A substituição de parte do cimento Portland por uma ou mais adições minerais, segundo Levy (2005), na maioria subprodutos industriais tipo rejeitos, tem apresentado vantagens técnicas, econômicas e principalmente ambientais, tanto na redução da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, quanto no consumo de energia.

As utilizações destas adições minerais visam reduzir significativamente a poluição ambiental por emissão de CO<sub>2</sub>, pois a produção de clínquer seria diminuída ou estabilizada, assim como o consumo de energia, sendo este muito elevado na sua produção. Por outro lado, o uso de adições minerais, subprodutos industriais como a escória granulada de alto-forno e a cinza volante, rejeitos poluidores, diminuiriam o consumo de cimento por m<sup>3</sup>, além de dar destino e utilização a estes materiais geralmente descartados no meio ambiente.

Estas adições, como descritas anteriormente, são subprodutos industriais resultantes de outros processos produtivos, como a escória granulada de alto-forno, cuja origem está na produção de ferro-gusa, ou a cinza volante, resultante da queima de carvão pulverizado em usinas termoelétricas, estando continuamente disponíveis, porém de nenhum interesse às suas produtoras e que em grande parte, são descartadas no meio ambiente.

De acordo com Dal Molin (2005), a produção de ferro-gusa no Brasil em 2004 foi de aproximadamente 35.000.000 toneladas, estimando-se uma produção média de escória granulada de alto-forno de 11.375.000 toneladas, sendo a produção mundial de escória calculada em 120 milhões de toneladas.

Em relação a cinza volante, Rocha (2003) citado por Brizola (2007), estima a produção brasileira em 3 milhões de toneladas por ano de cinzas, sendo 65% a 85% destas, são cinzas volantes. Já Rohde (2006), afirma ser o estado do Rio Grande do Sul, detentor de 89% das reservas de carvão mineral brasileiro, sendo a produção de cinza volante produzida nas usinas termoelétricas deste estado no ano de 2006, em torno de 2 milhões de toneladas.

A incorporação de adições minerais na produção de cimentos ou concretos pode reduzir ainda o consumo de energia, não só porque esses produtos frequen-

temente incorporam grandes quantidades de energia, como também podem reduzir as distâncias de transporte de matérias-primas. No caso das escórias e pozolanas, é o baixo nível de energia que permite a produção de cimentos sem a calcinação da matéria-prima, permitindo uma redução do consumo energético de até 80% (JOHN, 1995 *apud* DAL MOLIN, 2005).

O uso destas adições mostra-se uma solução vantajosa também devido ao fato de melhorarem certas características do concreto, como permeabilidade, diminuição da porosidade capilar, aumento da resistência a sulfatos, redução do calor de hidratação, entre outras. Mehta (1997) chama a atenção para o fato de a cinza volante e a escória, devido a sua grande pozolânicidade e propriedades cimentícias, poderem ser utilizadas em grandes quantidades. Em ensaios com substituições de 60% a 70% de cinza volante ou escória em concretos, Mehta obteve resultados com altas resistências e durabilidade a idades precoces.

Nota-se nesta conclusão de Mehta um outro fator importante, e de grande relevância na concepção de concreto nos dias atuais a ser analisado: a durabilidade.

Para Isaia (1993), a durabilidade adquire especial importância quando enfocada sob o aspecto estrutural, que em caso de perda de desempenho, seja em relação à segurança como em relação à vida útil, torna-se uma propriedade crítica. Do mesmo modo, é de opinião que a maioria dos problemas patológicos nas estruturas poderiam ser evitada através de conhecimentos mais abrangentes em relação ao comportamento dos materiais, assim como dos detalhes executivos, tanto por engenheiros como por projetistas, pois “quando se trabalha com materiais reais, entre os quais o concreto e seus componentes, existem várias fontes de variabilidade e, segundo o método científico, cada um necessita estudo específico, principalmente quando se deseja utilizá-lo com adequada durabilidade”. Credita ao desenvolvimento da tecnologia do concreto, ao investimento em estudos para melhoria da microestrutura e a utilização de aditivos superfluidificantes e pozolanas o grande aumento obtido nos últimos anos na resistência característica dos projetos de grandes obras.

Isaia (1993) citando Caquot (1952) afirma que somente a melhoria das propriedades dos materiais permite vislumbrar transformações radicais para as construções, em relação as que poderiam resultar do refinamento dos métodos de cálculo.

Atualmente, a durabilidade está sendo tão importante como a definição da resistência do concreto, havendo até uma inversão de prioridade, na qual o critério durabilidade se sobrepõe ao critério da resistência mecânica, pois quando focamos

somente na resistência, deixamos de lado propriedades consideradas “menores”, mas de suma importância no incremento da durabilidade. É certo que a elevação da resistência traz consigo uma melhora da durabilidade das estruturas de concreto, e isto é conseguido através do uso de aditivos superplastificantes e de adições minerais, seja estas últimas acrescidas ou em substituição parcial ao cimento. A incorporação destas adições minerais resulta na produção de materiais cimentícios que, devido à modificação da estrutura interna da pasta de cimento hidratada apresentam melhores características técnicas.

Estudo realizado por Isaia e Gastaldini (2004) com concretos com baixo consumo de cimento e elevados teores de adições minerais, correspondente a 20% de cinza volante e 70% de escória em substituição ao cimento, para resistências de 40 MPa e 50 MPa, resultou em média, na redução de 55% no consumo de energia, 5% no custo do metro cúbico do concreto, e um acréscimo de 40% no índice de durabilidade, dados estes comparados a um concreto referência sem adições minerais.

Do mesmo modo, afirmam que o uso de adições minerais em substituição ao cimento, em teores de 90%, em 3.5% da produção mundial de concreto, permitiria manter a produção de clínquer nos patamares de produção atual.

Mehta (1989) afirma ser a tendência atual o emprego de elevados teores de pozolanas em concretos estruturais, trazendo menores consumos de cimento, melhoria da trabalhabilidade e aumento da durabilidade como consequência.

Graças a pesquisas e ao uso diversificado em obras dos mais variados tipos de materiais, superfluidificantes e adições minerais, é que foi possível a modificação do enfoque da resistência mecânica para o de desempenho global (ISAIA, 1993).

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo básico avaliar a influência de adições minerais como a cinza volante e escória granulada de alto forno, quando utilizadas em substituição de parte do cimento, sobre algumas propriedades do concreto ligadas à resistência mecânica, elásticas e de deformação, através de ensaios de resistência a compressão axial, resistência a tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração total, bem como comparar os resultados obtidos entre as misturas de referência e aquelas com alto teor de adições minerais, com e sem a incorpo-



ração de cal hidratada, introduzida com o objetivo de ativar estas adições, visando aumentar as resistências iniciais e finais.

Como exposto, podemos formular a questão principal que gerou esta pesquisa: *“Como variam as principais propriedades mecânicas, elásticas e de deformação do concreto quando são empregados teores muito elevados de adições minerais?”*. Especificamente, podemos desdobrar esta questão em outras decorrentes, sendo as quais:

- ✓ *como variam as principais propriedades mecânicas do concreto - resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e retração total, com o uso de teores muito altos de adições minerais?*
- ✓ *em relação ao concreto de referência somente com cimento Portland, quais são as variações que se constatam nas misturas com altos teores de pozolanas, em termos das propriedades estudadas?*
- ✓ *como se comporta a taxa de evolução das propriedades estudadas?*

### **1.3. Estrutura**

Esta dissertação encontra-se estruturada em 4 capítulos, além desta introdução.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução e justificativa sobre pontos relevantes para esta pesquisa experimental como a composição, usos e benefícios de adições minerais, seu emprego como adição ou substituição do cimento na produção de concretos, sua ação e contribuição para a sustentabilidade da indústria da construção civil.

O Capítulo 2 versa sobre a utilização de adições minerais e cal hidratada na produção de concretos, assim como aborda o enfoque do uso de altos teores destas nas resistências mecânicas, através da resistência a compressão axial e a tração por compressão diametral, assim como para as deformações e propriedades elásticas, pela análise de módulo de elasticidade e retração total. Também aborda-se a influência da cal hidratada com enfoque nestas propriedades.

O Capítulo 3 relata o procedimento experimental propriamente dito, as variáveis envolvidas, a caracterização do material utilizado, o proporcionamento e dosagem das misturas de concretos, assim como os detalhes metodológicos dos experimentos em si.

No capítulo 4, faz-se a análise e discussão dos resultados, individualmente, como também correlacionando os mesmos entre si, com algumas variáveis independentes e intervenientes, com resultados teórico obtidos por códigos e normas nacionais e internacionais, como também em comparação com resultados referentes aos assuntos aqui abordados obtidos por vários pesquisadores, através da revisão bibliográfica presente nos capítulos 1 e 2.

As considerações finais e conclusões sobre a influência de altos teores de adições minerais e cal hidratada sobre as resistências mecânicas, elásticas e deformações das misturas, assim como o seu co-relacionamento são fundamentados no Capítulo 5.

Esclarece-se aqui, que este estudo é a terceira fase de um projeto de pesquisa mais extenso desenvolvido pelo Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto (GEPECON) da Universidade Federal de Santa Maria, abrangendo diversos temas como o estudo da camada de cobrimento de concreto com altos teores de cinza volante em misturas binárias (fase I), microestrutura e durabilidade com misturas binárias e ternárias de cinza volante e escória de alto-forno (fase II), tendo esta terceira fase o objetivo de, repetindo as misturas da fase II, analisar as propriedades mecânicas, elásticas e de deformação não contempladas nas fases anteriores.

## CAPITULO 02

**2. RESISTÊNCIA MECÂNICA E DEFORMAÇÕES DO CONCRETO COM ADIÇÕES MINERAIS E CAL HIDRATADA****2.1. Adições minerais e cal hidratada**

A utilização de pozolanas em concretos tem sido realizada há mais de 60 anos, inicialmente representada pelo uso da cinza volante em obras de barragens, com o propósito de diminuir o calor de hidratação e o custo. A partir da década de 70, intensificou-se o uso da microssílica em estruturas de concreto, com o objetivo de aumentar a sua resistência e melhorar a trabalhabilidade. Se o uso dessas pozolanas teve como motivo principal, nos seus primórdios, a diminuição dos custos ou o aumento da resistência, observou-se ao longo do tempo, através de pesquisas de laboratório, que a sua adição incrementa significativamente a durabilidade das estruturas de concreto com elas executadas (ISAIA, 1995).

De acordo com Isaia (1995), agregar adições minerais na produção de concreto proporciona vantagens econômicas e ambientais relevantes, pois substitui-se um material de elevado custo, como o cimento Portland, por materiais de baixo custo, constituídos por subprodutos industriais, na grande maioria resíduos descartáveis, como escória de alto forno, cinza volante, cinza de casca de arroz, entre outras. Seu emprego nos concretos reduz o consumo de energia necessário para a produção de cimento, como a utilização de recursos naturais pela extração de argila e calcário.

Para Mehta (1989), a tendência atual é o emprego cada vez maior de elevados teores de pozolanas em concretos estruturais, trazendo como consequência menores consumos de cimento, melhoria da trabalhabilidade, menor calor de hidratação e aumento da durabilidade.

Segundo Levy (2005) a incorporação de adições minerais ao concreto, como adição ou substituição de parte do cimento, se reduz significativamente a emissão de CO<sub>2</sub>, assim como o consumo de energia utilizado na produção de cimento. Deste modo, com a redução da produção de clínquer, utiliza-se uma quantidade menor de calcário, minimizando a emissão de gás carbônico liberado para a atmosfera. Ou

seja, além de reduzir o impacto ambiental produzido por outras indústrias, se reduz o consumo de matérias-primas extraídas da natureza, preservando recursos naturais.

Neville (1992) *apud* ISAIA (1995) diz que, em concretos de elevado desempenho, as baixas relações a/c resultam em parcelas de cimentos não hidratados que passam a atuar como fíller, apenas preenchendo espaços vazios na pasta de cimento, e argumenta que, no futuro, deve ser empregada uma proporção cada vez maior de materiais cimentantes, como cinza volante, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, microssílica, bem como suas combinações, que são mais baratas e produzem um concreto com melhor desempenho.

No que diz respeito aos aspectos técnicos, Neville (1997) afirma que a utilização destas pozolanas resultam em refinamento dos poros, maior densificação e resistência tanto da pasta como da interface pasta-agregado (zona de transição).

Baalbaki *et al.* (1993), citado por Isaia (1995), estudou diversas misturas de microssílica, cinza volante e escória de alto forno, evidenciando que o uso dessas pozolanas propiciam a obtenção de altas resistências, assim como economia resultante da redução de consumo de cimento e a redução do aditivo superfluidificante, necessário para obter misturas trabalháveis.

Conforme Dal Molin (2005), a incorporação de adições minerais resulta em materiais cimentícios com melhores características técnicas, visto que modificam a estrutura interna das pastas de cimento hidratada, reduzem a porosidade capilar do concreto, o calor de hidratação, e conseqüentemente, as fissuras de origem térmica.

As adições minerais, de acordo com Dal Molin (2005), classificam-se de acordo com a ação físico-química em:

- material pozolânico: definido pela NBR 12653 (ABNT,1992) como um material silicoso ou silico-aluminoso que possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentantes: sílica ativa (ou microssílica), cinza volante e cinza de casca de arroz são exemplos.

- material cimentante: não precisa do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H, porém sua auto-hidratação é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação para fins estruturais. Quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, a presença do hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação, como é o caso da escória de alto-forno.

- filler: adição mineral finamente dividida, que não possui nenhuma atividade química. Sua ação é apenas de ordem física, através do empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação das partículas de cimento

Os efeitos químicos das adições minerais está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado adicional, que é o principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas (DAL MOLIN, 2005).

As adições minerais, através das reações pozolânicas, reduzem a porosidade e a permeabilidade da pasta de acordo com sua reatividade como hidróxido de cálcio (GASTALDINI, 1996).

Conforme Dal Molin (2005), entre os efeitos físicos podemos destacar o efeito microfíler, ou seja, o aumento da densidade da mistura devido ao preenchimento dos vazios pelas partículas das adições minerais; o refinamento dos poros e dos produtos de hidratação do cimento decorrente da ação das pequenas partículas das adições que agem como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; a alteração da microestrutura da zona de transição, diminuindo a espessura da zona de transição pela redução da exudação, preenchendo os vazios deixados pelas partículas de cimento próximo ao agregado, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre retida sobre o agregado (efeito parede).

Visto os diversos e diferentes efeitos relacionados à incorporação de adições minerais ao concreto, muitos destes ligados a sua natureza, composição, propriedades e atividade, torna-se importante relacioná-los e discuti-los individualmente.

### 2.1.1. Cinza volante

As cinzas volantes são partículas sólidas, finas e esféricas resultantes da queima do carvão mineral, material este, conforme Gomes (2002), originário de resíduos vegetais que ao longo de milhões de anos sofreram transformações até se tornarem uma rocha estratificada, composta com alto teor de carbono, entre 55% a 95%. Compõe-se basicamente por compostos de sílica e alumina, oriundas dos argilo-minerais (caulinita, montmorilonita, illita), dos óxidos (quartzos) e dos silicatos (cloritas) (STUMPP, 2003). No Brasil, as maiores reservas de carvão mineral encon-

tram-se na região sul, especificamente no estado do Rio Grande do Sul, o qual possui 89% das reservas nacionais. Este carvão tem como finalidade o uso para geração de energia, através de sua queima em usinas termoelétricas.

Segundo Dal Molin (2005), da queima (combustão) deste carvão resultam dois tipos de cinzas: as cinzas pesadas, de textura mais grosseira, que caem no fundo da fornalha em tanques de resfriamento e são removidas hidraulicamente ou por fluxos de água; e as cinzas volantes, de textura mais fina, arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas e recolhidas por precipitadores eletrostáticos ou mecanicamente.

A natureza do carvão, o modo de pulverização do carvão para queima, o processo de retirada e o grau de classificação das partículas pelo sistema de exaustão, influenciam na variação das propriedades das cinzas volantes, como: o teor de vidro, de carvão, o tamanho e distribuição das partículas, presença de óxido de magnésio e outros minerais

A cinza volante utilizada no Brasil é a de baixo teor de cálcio (< 5%) de acordo com Abreu (2004) *apud* VAGHETTI (2005), podendo ser classificada como pozolana comum, classe C, pela NBR 12653 (ABNT, 1993).

Tanto a NBR 12653 (ABNT, 1993) como a ASTM-C618 (1980) classificam a cinza volante conforme o teor de cálcio presente. Cinzas volantes de baixo teor de cálcio (< 10%) são classificadas como tipo C pela NBR 12653, e tipo F pela ASTM-C618. Já as cinzas com alto teor de cálcio são nomeadas como classe E pela NBR 12653, e como classe C pela ASTM-C618.

Conforme pesquisas de Vaghetti (2005), as cinzas volantes brasileiras possuem composição química muito semelhante, e teor de cálcio (CaO) menor que 5%, ou seja, são de baixo teor cálcico. Apresentam teor de sílica entre 60% e 65%, teor de alumina entre 20% e 30% e um teor de óxido de ferro entre 2% e 6%.

As sílicas amorfas constituem entre 60% e 90% do volume das cinzas volantes (MEHTA, 1989).

As cinzas volantes possuem partículas tipicamente esféricas, apresentando-se em pequenas quantidades como esferas ocas, chamadas cenosferas, e quando preenchidas por outras esferas menores, são conhecidas como plenosferas. Possuem diâmetros entre 1  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ , sendo que a maioria das partículas apresenta diâmetro menor que 45  $\mu\text{m}$ . (DAL MOLIN, 2005)

A superfície específica das cinzas volantes varia entre 300 m<sup>2</sup>/kg e 700 m<sup>2</sup>/kg, muito semelhante ao cimento Portland, que possui superfície específica variando entre 350 m<sup>2</sup>/kg a 600 m<sup>2</sup>/kg. Sua massa específica encontra-se em um intervalo de variação de 1900 kg/m<sup>3</sup> e 2400 kg/m<sup>3</sup>. A substituição em massa de cimento por cinza volante resulta em um volume maior de material aglomerante, pois o cimento Portland possui massa específica de 3150 kg/m<sup>3</sup>, ou seja, o volume de cinza volante é aproximadamente 30% maior, quando substitui o cimento em igual massa.

As cinzas volantes apresentam efeitos químicos e físicos que melhoram as propriedades do concreto. O efeito químico apresentado pela cinza volante está na capacidade de reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub> - que se forma durante a hidratação do cimento Portland – formando uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado, C-S-H, produto responsável pela resistência nas pastas de cimento hidratadas. Entre os efeitos físicos podemos destacar a alteração da microestrutura da zona de transição, o refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento, redução do ar aprisionado, redução dos poros capilares, e o efeito microfíler, ou seja, o preenchimento dos vazios pelas partículas de cinza, ocasionando no aumento da densidade da mistura.

De acordo com Fan & Zhang, apud GOMES (2003), as cinzas volantes apresentam baixa reatividade. A razão disto está na camada superficial de suas partículas, que se apresenta densa e quimicamente estável, sendo necessário o rompimento desta camada para deflagrar os constituintes internos de maior reatividade.

Para Neville (1997) os produtos de reações das cinzas volantes são muito semelhantes ao C-S-H resultante da hidratação do cimento Portland. Estas reações podem ocorrer até uma semana ou mais depois da mistura, como é o caso de alguns tipos de cinza. Este atraso nas reações das cinzas volantes traz um efeito benéfico em relação ao modelo de desprendimento de calor de hidratação. Por isso, as reações da cinza volante no concreto exigem muito tempo e uma cura úmida prolongada. Em temperaturas elevadas (entre 20°C e 80°C) estas reações são aceleradas, porém há um retrocesso na resistência. Porém, Papadakis (1999) apud GOMES (2003), que investigou a atividade da cinza volante de baixo teor de cálcio e, por meio de medidas de calor de hidratação, notou que o início da atividade da cinza se dá entre 2 e 3 semanas após a mistura, podendo seu processo se estender até os 6 meses de idade. Ressalta-se também, que as reações da cinza volante são influenciadas pelas propriedades do cimento Portland ao qual são adicionadas.

De acordo com Neville (1997), uso de cinza volante apresenta inúmeras influências no concreto fresco. Podemos destacar que o uso destas resulta em concretos coesivos, com menor tendência à exsudação; a redução de água em uma mistura devido à adição de cinza volante é de 5% a 15% em relação a uma mistura com cimento Portland sem adição, para uma mesma trabalhabilidade e mesmo teor de material cimentício, sendo esta redução de água devido à forma esférica das partículas, pois uma quantidade suficiente de partículas envolve a partícula de cimento, tornando-a defloculada; além de um efeito retardador de pega (aproximadamente de 60 minutos), provavelmente devido à liberação de  $SO_3$  presente na superfície das partículas, que retarda o início da pega, e não o intervalo entre o início e o final da mesma.

De acordo com Isaia (1992), no concreto endurecido, as reações pozolânicas fixam o hidróxido de cálcio, aumentam a resistência a longo prazo, pelo refinamento dos poros da pasta, diminuindo a permeabilidade, e aumentando a durabilidade. Há um crescimento mais lento da resistência, assim como uma maior sensibilidade ao teor de umidade nas idades iniciais, necessitando de uma cura mais prolongada.

Para Mehta, *apud* ISAIA (1995), as reações pozolânicas entre a cinza volante e a pasta de cimento ocorrem da seguinte maneira: após a mistura com a água forma-se uma película impermeável ao redor da partícula, não ocorrendo nenhuma reação até que haja disponibilidade de hidróxidos alcalinos ou de cálcio e íons sulfatos em concentração suficiente na solução da fase de contato. Assim, íons hidróxidos ativam a hidratação dos aluminossilicatos vítreos, e por fim, prosseguem as reações pozolânicas, consumindo hidróxido de cálcio e formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), enquanto houver disponibilidade de cal.

Como apresentado por Neville (1997), entre os benefícios do uso de cinzas volantes nas misturas de concreto podemos citar a redução da reação álcali-sílica, a resistência à abrasão não sofre prejuízos, a redução à penetração de cloretos em concretos maturados, a resistência a sulfatos através da alumina e da cal contidas na cinza volante e, por fim, maior permeabilidade inicial e baixa permeabilidade final. Em relação à permeabilidade, esta é uma conseqüência da reação lenta da cinza no concreto, que inicialmente apresenta uma permeabilidade elevada em relação a outras misturas com igual relação água/ cimento sem adições, e com o transcorrer do tempo, passa a ter uma permeabilidade bem baixa.



### 2.1.2. Escória granulada de alto forno

Escória granulada de alto forno são resíduos não metálicos provenientes da produção do ferro gusa, e se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, junto com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque, constituindo-se numa massa insolúvel e de menor densidade sobrenadante no ferro gusa. Quando resfriada bruscamente, resulta em um material amorfo, potencialmente reativo, que passa a chamar-se escória de alto forno, e que moída, é utilizada na fabricação de cimentos substituindo parte do clínquer, ou como adição em concretos (DAL MOLIM, 2005). A escolha da finura da escória e seu teor em relação ao material cimentício total dependem da finalidade de seu uso no concreto.

As composições químicas, que determinam as características físico-químicas das escórias, dependem das matérias primas utilizadas e do tipo de ferro gusa fabricado, sendo a variabilidade da composição muito pequena, sendo basicamente composta por óxidos de cálcio (CaO) entre 30% e 50%, óxidos de silício (SiO<sub>2</sub>) entre 30% e 42%, óxidos de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) entre 5% e 19% e óxido de magnésio (MgO) entre 1% e 21%.

De acordo com Neville (1997), como a mistura de cimento Portland com escória de alto forno contém mais sílica que o cimento puro, o resultado de hidratação é uma quantidade maior de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando desta pasta de cimento uma microestrutura muito mais densa.

Para Iller (1979), *apud* JOHN (1995), o mecanismo fundamental de hidratação da escória é o mesmo do cimento Portland, mas diferentemente deste, não se hidrata em contato com a água, ou o faz muito lentamente. Essa baixa velocidade de hidratação é devido a esta baixa solubilidade em água, dificultando a dissolução da sílica devido a uma camada de sílico-aluminato hidratado que se forma na superfície das partículas da escória.

A hidratação da escória de alto forno é lenta, o que resulta em uma reação continuada por longo tempo, observando-se o aumento da resistência a longo prazo. A inclusão de escória de alto forno reduz o pico de temperatura do concreto resultante da hidratação do cimento da mistura.

Uma maior finura resulta numa melhor evolução da resistência, mas somente em idades avançadas, pois deve ocorrer antes a ativação da escória, e uma finura maior do cimento Portland acelera esta ativação.

A proporção de escória e cimento também influencia a evolução da resistência do concreto. Para uma resistência maior a médio prazo, a proporção recomendada entre cimento e escória é de 50% / 50%, sendo porém a resistência inicial menor do que a de um concreto usando-se somente cimento. Pesquisas apontam boas evoluções de resistência com teores entre 50% e 75% de escória, para um total de material cimentício entre 300 Kg/m<sup>3</sup> a 420 Kg/m<sup>3</sup>. Uma cura úmida prolongada é importante devido à hidratação inicial ser lenta, e resultar num sistema de poros capilares que permite a perda de água em condições de secagem.

A incorporação de escória de alto forno não altera significativamente as relações entre a resistência a compressão e a resistência a tração na flexão, assim como a relação entre a resistência a compressão e o módulo de elasticidade. A retração inicial apresenta um aumento significativo, mas a retração final não é alterada (NEVILLE,1997).

Entre os benefícios que a incorporação de escória a misturas de concreto trazem está a melhoria da trabalhabilidade do concreto fresco, tornando a mistura mais trabalhável, porém coesa, devido à dispersão das partículas cimentícias e das características da superfície das partículas da escória, que são lisas e absorvem pouca água durante o processo de mistura. Porém a trabalhabilidade do concreto com escória de alto forno é mais sensível a variação de água. Quando com uma finura elevada, a escória reduz a exsudação do concreto, retarda a pega a temperatura normal entre 30 a 60 minutos, apresenta um lento desprendimento de calor com baixo pico de temperatura. A microestrutura da pasta de cimento hidratada é densa, melhorando a resistência a longo prazo e a durabilidade.

Em relação à durabilidade, concretos com adição de escória de alto forno apresentam menores risco a reações álcali-sílica, a resistência a penetração de íons cloretos é melhorada, a permeabilidade reduzida em até 100 (cem) vezes, melhor resistência a sulfatos, e um melhor preenchimento dos espaços dos poros com silicato de cálcio hidratado, C-S-H, tornando a pasta de cimento hidratado mais densa.

### 2.1.3. Cal hidratada

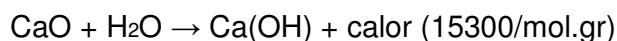
Como visto no item 2.1, e relatado em pesquisas realizadas por Stumpp *et al.* (2002), a substituição do cimento por adições minerais resulta em vários benefícios,

como o incremento de durabilidade, a diminuição do consumo de aglomerantes, a redução do custo econômico, assim como um menor consumo de energia. Porém, em contrapartida, ocorrem efeitos indesejáveis, como redução da reserva alcalina e aumento da carbonatação. A adição de cal hidratada em concretos com altos teores de adições minerais apresenta uma significativa influência na reserva alcalina, assim como na velocidade de propagação da carbonatação.

A cal é obtida da calcinação de rochas de calcário e dolomitas, a qual resulta na formação de cal e de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Sua qualidade química depende das características e das impurezas contidas nas rochas calcárias utilizadas em sua produção.

Classificam-se as cales em três tipos: a cálcica, quando apresenta elevado teor de óxido de cálcio; dolomita, quando este teor elevado é referente à quantidade de óxido de magnésio; e a magnésiana, quando os teores de óxido de magnésio estão em níveis intermediários entre a cal cálcica e a dolomítica. A cal calcinada é conhecida como cal virgem, e deve sofrer reação de hidratação para ser utilizada na construção civil, a chamada cal hidratada (DALLA LANA, 2005).

A cal possui uma composição variável de acordo com a cal virgem que a originou. Apresenta partículas de hidróxido de cálcio puro, e cristaliza-se com forma hexagonal, em placas lamelares ou prismas. A reação de hidratação para as cales cálcicas é expressa pela equação:



De acordo com Brizola (2007), citando GUIMARÃES (1997), para a hidratação da cal virgem com alto teor de cálcio são necessários, estequiometricamente, 32,1% de água, e parte desta água adicionada se incorpora às moléculas de hidratos – 24,3% no Ca(OH)<sub>2</sub>, 30,9% no Mg(OH)<sub>2</sub>, 15,8% no Ca(OH)<sub>2</sub>MgO e 27,2% no Ca(OH)<sub>2</sub>Mg(OH)<sub>2</sub> – e outra parte constitui a umidade e hidratos de outros elementos químicos ou minerais.

Segundo Guimarães (1997), a massa específica para a cal com alto teor cálcico está entre 2,3 kg/dm<sup>3</sup> e 2,4 kg/dm<sup>3</sup>, e em estado de pasta aumenta seu volume - em média 2,2 vezes o volume de cal seca - devido à capacidade de absorver e reter volume de água, além da estequiometricamente combinada. Este aumento de volu-

me combinado com a cristalização provoca um maior entrelaçamento das partículas, reduzindo a permeabilidade da pasta de cal.

Conforme Guimarães (1997), *apud* STUMPP (2003), a cal possui propriedade de retenção de água, ou seja, capacidade de conter e reter a água resistente à sucção, constituindo isto numa medida indireta da plasticidade, relacionando-se com a trabalhabilidade.

Durante o endurecimento, as partículas finas de hidróxidos se cristalizam, aumentando em número e tamanho, a medida que a água evapora. Estes cristais se entrelaçam formando uma malha resistente. O hidróxido de cálcio se transforma em carbonato anidro, com maior volume, provocando expansões, compactação e maior rigidez das interfaces dos componentes cristalinos (GUIMARÃES, 1997).

Segundo pesquisas realizadas por Stumpp (2003), as pozolanas – materiais silicosos ou silico-aluminosos e mineralogicamente amorfos – quando utilizados em composição com o cimento, tem uma característica comum, a sílica vítrea reativa, que na presença de água, combina com a cal produzindo silicato de cálcio hidratado, semelhante ao formado pela hidratação do cimento. A cal gerada pelas reações de hidratação do cimento produz uma zona de transição pasta-agregado deficiente, visto as partículas cristalinas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  terem tamanho significativamente maior que as partículas cristalinas de C-S-H. O consumo desta cal pelas adições minerais melhora a zona de transição, pois a cal de estrutura cristalina maior, ao reagir com a sílica amorfa, gera um C-S-H secundário, densificando a zona de transição.

De acordo com Dron (1984), *apud* JOHN (1995), a cal hidratada constitui-se num ativador natural da escória, eleva o pH para valores próximos de 12.5, evitando a formação de gel pouco permeável sobre as partículas anidras. Como a concentração de  $\text{Ca}^2$  na solução está mais próxima da saturação com relação aos produtos hidratados, a precipitação inicia-se mais rapidamente.

Para Dron (1982) e Lou *at al.* (1986), *apud* JOHN (1995), a aceleração da ativação pode-se dar por ativação química, mecânica ou térmica. A ativação química ocorre pela combinação de dois fatores: a elevação da velocidade de dissolução através da elevação do pH e antecipação do início da precipitação dos compostos hidratados devido ao aumento da concentração de íons na solução no início do processo de dissolução, ou pela alteração da solubilidade dos compostos da escória.

O emprego da cal hidratada como ativador das adições minerais tem por objetivo aumentar as resistências iniciais e finais das misturas. Este aumento de resis-

tência é devido ao hidróxido de cálcio que aumenta o pH da solução dos poros, e a formação de  $\text{OH}^-$ , atacando a fase vítrea e despolimerizando a rede de silicatos dissolvidos na solução, formando com íons  $\text{Ca}^{2+}$ , silicatos de cálcio hidratados em maiores proporção do que as misturas sem a presença da cal (JUESHI *et al.*, 2001).

Segundo Cincotto *et al.*, apud BRIZOLA (2007), em ensaios de tempo de pega, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1991), na escória sem ativador o início de pega ocorreu após 57 horas da mistura e sem fim de pega observável até 84 horas. A adição de 0,1% de cal hidratada acelerou as reações, diminuindo o tempo de início de pega para 16 horas e o fim para 48 horas. Com 0,5% de cal adicionada, os tempos de início e fim de pega igualaram-se aos do cimento Portland, sendo a partir deste valor a diminuição mais acentuada, apresentando tendência à estabilização a partir de 5% de adição de cal.

Para Stumpp (2003), a cal hidratada composta basicamente de hidróxido de cálcio, apresenta diversas propriedades como retenção de água, aumento de volume com a sua cristalização provocando um maior entrelaçamento das partículas, diminuindo a permeabilidade das pastas de cal.

Sua adição em concretos com altos teores de adições minerais tem por finalidade suprir a reserva alcalina perdida pela substituição de cimento por cinza volante e escória de alto forno, e produzir uma pasta com menor porosidade.

## **2.2. Concreto com altos teores de adições minerais**

A utilização de adições minerais, de acordo com Dal Molin (2005), podem influenciar benéficamente muitas propriedades do concreto, tanto por efeitos físicos, químicos ou pela ação conjunta dos dois efeitos. A eficiência de uma adição mineral pode variar em função da quantidade utilizada e das condições de cura, bem como em função da sua composição química, mineralógica e granulométrica, sendo estas duas últimas as responsáveis pela ação diferenciada das adições no comportamento do concreto.

Almeida (2005) cita a utilização de sílica ativa, cinza volante, pozolanas naturais, cinza de casca de arroz e metacaulin em dosagens variando entre 8% e 12% de massa de cimento para obtenção de bons resultados. Neville (1997), cita a utili-

zação de cinza volante em teores variando entre 5% e 40%, sílica ativa em teores de 10%, e escórias entre 40% e 50%, considerando elevados os teores acima de 50%.

Já Isaia (1995), considera como elevado teor de pozolana aqueles que apresentam o dobro da taxa normal de substituição de cimento para cada uma das adições utilizadas. Em estudo realizado com misturas binárias e ternárias de cinza volante, microssílica e cinza de casca de arroz, considerou teores normais a substituição do cimento por 25% de cinza volante e 10% para as outras duas adições, e teores altos, quando esta substituição foi de 50% para a cinza volante e 20% para as demais.

Neste estudo consideramos a substituição parcial do cimento por adições minerais como de altos teores, por estas representarem 90% de substituição do cimento Portland em massa.

### 2.2.1. Enfoque nas resistências mecânicas

Aïtcin (2000) afirma ser um equívoco acreditar que as propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho sejam as mesmas de um concreto convencional mais resistente. Considera ser tão errado quanto julgar que as propriedades mecânicas do CAD possam ser deduzidas extrapolando as dos concretos usuais, assim como considera errado o fato de não considerar o relacionamento entre estas mesmas propriedades. Para Aïtcin, pode-se dizer que os concretos usuais se comportam como materiais homogêneos e isotrópicos tendo a pasta de cimento hidratado ou a interface pasta-agregado como o elo mais fraco, enquanto que os CAD comportam-se como materiais compostos não-isotrópicos, constituídos de pasta de cimento hidratado e agregados que podem possuir propriedades mecânicas distinta.

Para Dal Molin (2005), o aumento das resistências mecânicas é devido ao processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento, na medida em que aumenta a resistência da matriz na zona de transição. Mehta (1989), exemplifica o uso de sílica ativa em concretos cuja contribuição para a resistência se dá já nas idades iniciais (1 a 3 dias), sendo de maior significância até os 28 dias.

De acordo com Jacintho *et al.* (2005), a resistência mecânica do concreto é influenciada pela granulometria e resistência mecânica dos agregados, pelo tipo de cimento e pela sua quantidade em relação à água de amassamento, assim como

relação água/cimento, idade do concreto, forma e dimensões dos corpos-de-prova. Também o uso de adições minerais e aditivos afetam a resistência mecânica, que quando incorporados ao concreto, podem melhorar o desempenho de uma propriedade específica.

Podemos observar na figura 2.1, que a resistência do concreto é influenciada, entre outros fatores, pela resistência das fases componentes do concreto. Estas fases componentes subdividem-se em matriz, zona de transição e agregado. Nota-se que as duas primeiras são diretamente dependentes do fator a/c (ou fator a/mc) utilizado, das adições minerais incorporadas (por adição ou substituição ao cimento), e grau de hidratação (principalmente o tempo de cura) entre outras. Tanto a relação a/c (ou a/mc) quanto o grau de hidratação do cimento determinam a porosidade da pasta de cimento endurecida.

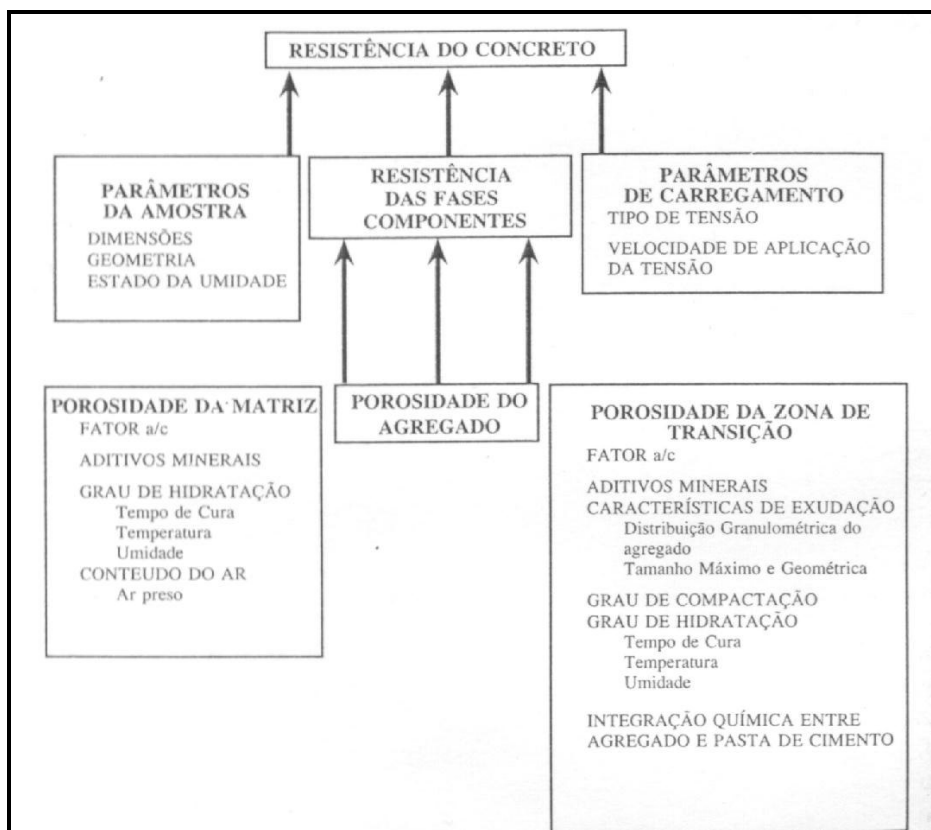


FIG 2.1- Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994, p.63)

A resistência final e a evolução da mesma com o tempo dependem da quantidade e características das adições minerais, do proporcionamento do concreto (tipo

e consumo de cimento, relação água/material cimentício, aditivo superplastificante) e condições de cura.

Conforme Helene (1993) citado por ISAIA (1995), a resistência depende essencialmente da porosidade capilar da pasta de cimento endurecido, ou seja da relação gel/espaco, assim, a relação a/c, a idade e condições de cura determinam o grau de hidratação que implementam a microestrutura dos concretos.

Desta maneira, a dosagem dos materiais constituintes e as condições de cura determinam a microestrutura da pasta, ou seja, a quantidade, forma e distribuição dos poros, responsáveis pelas características físico-mecânicas do concreto.

De acordo com Moraes *et al.* (2000), a resistência mecânica está intimamente relacionada à composição do concreto e aos seus cuidados na sua elaboração. Quanto a composição, o seu desempenho estará subordinado à qualidade da pasta, a qual define como será a estrutura dos poros, que por sua vez é função do tipo de cimento utilizado, da relação água/ aglomerante, do grau de hidratação e da presença ou não de adições minerais.

O comportamento da resistência mecânica está, portanto, relacionada à porosidade da pasta ou à da interface do agregado, para um determinado grau de hidratação, na idade considerada (ISAIA, 1995).

#### 2.2.1.1. Resistência à compressão axial – R.C.A.

Como já visto anteriormente, o uso de adições minerais agregam benefícios para o melhoramento das resistências mecânicas dos concretos. Exemplo disso é o uso de sílica ativa (ou microsíllica), que se traduzem em ganhos de resistência a compressão, devido ao efeito filer e pozolânico que reforçam a pasta e a interface pasta-agregado (zona de transição), conseqüente da reatividade conferida pelo elevado teor de sílica amorfa, e grande superfície específica.

Para concretos com escória granulada de alto-forno, Gastaldini (1996) observou em seus experimentos que a influência da escória na microestrutura da pasta de cimento resulta em um aumento no volume de poros de gel e diminuição no volume de poros capilares, ou seja, um refinamento dos poros, além da redução na porosidade total, o que resulta em menor permeabilidade e conseqüentemente maior du-



rabilidade do concreto, uma vez que restringe os movimentos da água, íons e gases para o seu interior.

Já em relação às cinzas volantes, Mehta (1983) *apud* ISAIA (1995), explica que a influência destas evidencia-se em dois momentos distintos quanto a velocidade das reações pozolânicas nas idades iniciais, não apresentando grande atividade antes dos 14 dias, e na resistência última, que depende do conteúdo de aglomerante, relação a/ag e grau de maturidade, resultando da combinação destas duas variáveis, em uma resistência mais elevada, pela redução da película de CH na interface pasta-agregado.

Observa-se também que a evolução da resistência à compressão é influenciada pelo efeito filer através das pequenas partículas de cinza volante, ocupando os vazios, densificando a pasta de cimento, visto que, de acordo com Isaia (1995), à medida que cresce a finura e o teor de cinza, a resistência à compressão também aumenta, principalmente a partir de 90 dias de idade, pois a finura e a composição químico-mineralógica agem em idades diferentes. Nas idades iniciais, a finura atua como ativadora da cinética da reação do clínquer, e em idades maiores, influencia na velocidade das reações pozolânicas.

A figura 2.2 apresenta os períodos de contribuição de algumas adições minerais à resistência mecânica dos concretos.

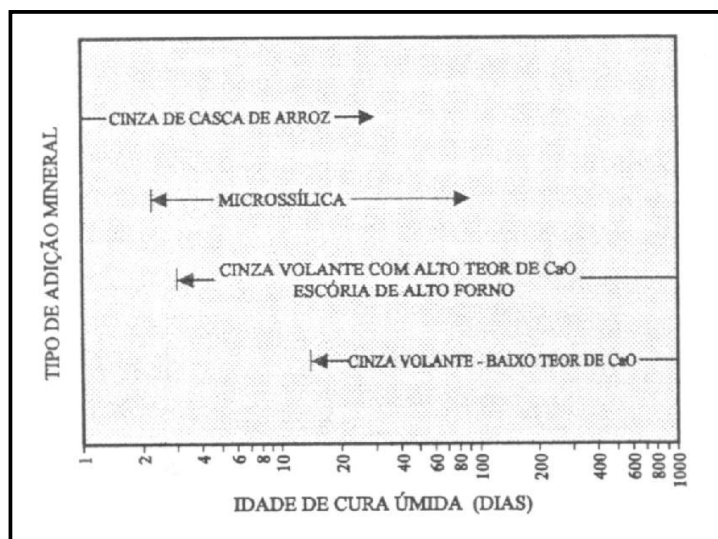


FIG 2.2 - Período de contribuição para a resistência mecânica de diferentes adições minerais (MEHTA, 1983, p.46)

Conforme Gopalan (1993), citado por ISAIA (1995), para teores de cinza volante entre 15% e 80% da massa de material cimentante, conclui-se que a contribuição da cinza volante para a resistência do concreto é representada pelo fator de nucleação e pozolanicidade da mesma, além das reações pozolânicas dependerem do teor de cinza adicionada ao concreto, sendo tão mais lentas quanto maior o teor adicionado.

A resistência a compressão do concreto com cinza volante é adversamente influenciada quando há falta de cura úmida, em especial, nas primeiras idades. Nestas, as reações pozolânicas estão quase ausentes e a pouca umidade disponível diminui a parcela de contribuição para a resistência, que potencialmente poderia ser fornecida pelas partículas de cinza (ISAIA, 1995).

Poom, Lam & Wong (2000), pesquisaram concretos com adição de 45% de cinza volante, e relação a/ m.c. igual a 0.24, obtendo resistência axial de 89.4 MPa aos 28 dias de idade.

Alves (2000) estudou misturas com substituição parcial de cimento por 50% de cinza volante (CV) e cinza de casca de arroz (CCA) e relações a/ m.c. iguais a 0.35, 0.50 e 0.65. Com relação a/ m.c. 0.35, obteve aos 91 dias, resistências de 69.5 MPa para a mistura com CCA, e 62.7 MPa para a mistura com CV. Com relação a/ m.c. igual a 0.50, as resistências resultantes foram de 52.7 MPa e 35.7 MPa, para a CCA e CV respectivamente. Já com relação a/ m.c. de 0.65, obteve para a mistura com CV resistência igual a 26.9 MPa.

Um estudo sobre a influência da substituição parcial do cimento por cinza volante, cinza de casca de arroz e fíler calcário, conjunto e separadamente, sobre a resistência mecânica foi realizado por Moraes *et al.* (2000). Utilizou relações a/m.c. 0.35, 0.50 e 0.65 para misturas binárias de cimento com cinza volante, cinza de casca de arroz e fíler calcário para teores de substituição de 12.5%, 25% e 50%, e misturas ternárias de cimento, cinza volante e cinza de casca de arroz para teores de substituição de (12.5+12.5)% e (25%+25%). O emprego do fíler calcário teve por objetivo comparar o desempenho de uma adição inerte com as misturas pozolânicas. Obteve resistências aos 28 dias, de 75.6 MPa para substituição de 25% de cinza de casca de arroz, e de 70.7 MPa para a substituição de 12.5% de cinza volante, para relação a/ m.c. 0.35. As 91 dias as resistências máximas foram 79.4 MPa e 80 MPa para substituição de 25% de cinza de casca de arroz e 12.5% de cinza volante respectivamente, para relação a/ m.c. 0.35. Concluiu que as misturas ternárias apre-

sentaram resistências superiores ao concreto referência aos 91 dias para a relação  $a/m.c.$  0.35, assim como para teores normais de substituição (12.5%), os concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz apresentaram índices médios de resistência acima do referência. Houve um decréscimo nas misturas binárias no índice de resistência com o aumento do teor de substituição, com exceção da mistura com 25% de cinza de casca de arroz. Nas misturas com cinza volante e cinza de casca de arroz houve um decréscimo mais acentuado quando o teor de substituição passou de 25% para 50%. Nos concretos com cinza volante, os índices médios de resistência não variaram significativamente com a evolução da idade de 28 para 91 dias.

Moraes *et al.* (2000) observou que quando da inserção de adições minerais na elaboração de concretos em substituição parcial do cimento Portland, verifica-se comportamentos diferentes para cada adição conforme suas características e atividades, tanto físicas como químicas, em relação as suas interações com a pasta de cimento, assim como a existência de uma forte correlação entre a resistência à compressão e a relação  $a/ag$  para as misturas. Porém ressalta que, quando aumentado o teor de substituição do cimento por adições, ocorre uma diminuição da resistência mecânica.

Isaia(1995) estudou os efeitos de adições de teores normais e elevados de cinza volante, cinza de casca de arroz e microssílica em substituição parcial do cimento, em misturas binárias e ternárias de cinza volante com cinza de casca de arroz e cinza volante com microssílica, de modo a verificar suas influências sobre a durabilidade do concreto de elevado desempenho. Foram estudadas substituições binárias de 25% e 50% de cinza volante, 10% e 20% de microssílica e 10%, 20% e 30% de cinza de casca de arroz, assim como misturas ternárias de cinza volante e microssílica na proporção de (15+10)% e (30+20)%, e de cinza volante e cinza de casca de arroz no teores de (15+10)%, (30+20)% e (20+30)%. As relações  $a/ag$  foram 0.30, 0.40 e 0.50.

Para as idades iniciais (07 dias) obteve resistências de 70.9 MPa para a mistura com 30% de cinza de casca de arroz, e 68.3 MPa para a mistura com 20% de microssílica, para relação  $a/ag$  0.30, e resistência de 50.5 MPa para misturas com 30% de cinza de casca de arroz e relação  $a/ag$  0.50. As maiores resistências observadas foram 85.5 MPa e 84.9 MPa aos 28 dias para as misturas com 30% de cinza de casca de arroz e 20 % de microssílica respectivamente. Em relação ao índice de resistência e o índice médio de resistência, verificou-se que para teores normais de

pozolana, os concretos com microsíllica e cinza de casca de arroz apresentaram resistências maiores que os de referência em todas as idades. Nas misturas ternárias houve decréscimo das resistências iniciais, e o uso de cinza volante isolada sobrepujou o referência a partir dos 91 dias. Para os teores elevados manteve-se as tendências, porém em níveis mais altos para as misturas com microsilica e cinza de casca de arroz. A adição da cinza volante baixou as resistências iniciais, e as misturas com 50% apresentaram resultados inferiores a mistura referência. Tanto para os teores normais como para os elevados, as resistências resultaram maiores nas idades iniciais e menores nas idades finais.

Brizola (2007) investigou concretos com 90% de substituição de cimento em massa por cinza volante (em teores de 20%) e escória de alto-forno (teor de 70%), assim como misturas com a mesma substituição em massa, porém com adição de 20% de cal hidratada em relação a massa de aglomerantes, para relações a/ag 0.3, 0.4 e 0.5. Os resultados foram comparados com os obtidos através de ensaios realizados com uma mistura de referência, sem adição mineral, com relações a/ag 0.4, 0.6 e 0.8. Observou-se que os concretos referência e as misturas com adição de cal hidratada apresentaram maior desenvolvimento de resistência até os 28 dias, enquanto que as misturas sem adição de cal obtiveram um ganho maior entre os 28 e 91 dias para as relações a/ag estudadas. Em relação a adição de cal hidratada, verificou uma melhora na resistência a partir dos 28 dias, sendo 40% maior nesta idade que nas misturas sem cal na média das 03 relações a/ag, e que esta contribuição estendeu-se até a idade de 300 dias. As maiores resistências apresentadas aos 91 dias foram de 49.7 MPa para a mistura sem cal e 53.4 MPa para a mistura com cal, ambas com relação a/ag 0.3.

Silveira (2004) estudou a resistência à compressão de concretos com adição de 50% de cinza volante em substituição ao cimento. Sua pesquisa constituiu-se em 03 misturas: uma referência somente com cimento Portland, para relações a/c 0.45, 0.60 e 0.80, e duas misturas com 50% de cinza volante, para relações a/mc iguais a 0.40, 0.55 e 0.75, sendo que a uma destas acrescentou-se 20% de cal hidratada em relação à massa de aglomerante. Os ensaios de RCA foram executados aos 28 e 91 dias.

Para a idade inicial (28 dias) e final (91 dias), as maiores resistências foram obtidas pela mistura referência com fator a/c 0.45 e pela mistura com 50% de cinza

volante e cal hidratada com a/mc 0.40, resultando 60.2 MPa e 41.2 MPa aos 28 dias, e 64.3 MPa e 56.2 MPa aos 91 dias, respectivamente.

Observou-se que as misturas de referência apresentaram pequenos acréscimos de resistência quando comparados com as misturas com cinza volante. Isto demonstra que misturas com cinzas volantes apresentam nas primeiras idades resistências mais baixas, conforme apresentado no item 1.1.1, devido à baixa reatividade, ou seja, até os 28 dias, a adição de cinza volante promove um retardamento do desenvolvimento da resistência à compressão.

Aos 91 dias, as misturas de referência apresentavam resistências maiores do que as obtidas pelos concretos com cinza volante. Nesta idade, a mistura referência, para todas as relações a/c, apresentou um incremento de resistência em relação às misturas com cinza volante na ordem de 40% para fator a/mc 0.40, de 32% para a/mc 0.55 e 47% para a relação a/mc 0.75. Porém a taxa de aumento de resistência a compressão destes, mostraram-se maiores que os de referência, principalmente para relações a/mc mais baixos, indicando que, em idades mais avançadas, os traços com a adição mineral podem diminuir a diferenças de resistência a compressão em relação ao referência. As misturas com cinza volante mostraram uma evolução acentuada entre 28 e 91 dias, na ordem de 24% para a relação a/mc 0.40, de 26% para a/mc 0.55 e 36% para o fator a/mc 0.75.

#### 2.2.1.2. Resistência à tração por compressão diametral – RCD

O uso de adições minerais causam redução na porosidade da matriz e da zona de transição pasta-agregado, melhorando a resistência à compressão e a resistência a tração do concreto. A magnitude do aumento na resistência a tração se mantém pequena até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de transição seja majorada, ou seja, continuará a ser fraca enquanto um grande número de cristais orientados de  $\text{Ca(OH)}_2$  estiver presente (DAL MOLIN, 2005, p 370).

Deste modo, o aumento da resistência a compressão devido ao efeito microfíler não corresponderá a um aumento proporcional na resistência à tração. Um aumento significativo na resistência a tração somente ocorrerá quando ocorrerem as reações pozolânicas das adições minerais, com conseqüente redução do tamanho e concentração dos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  na zona de transição pasta-agregado.

De acordo com Aïtcin (2000), a resistência a tração é usualmente determinada por via indireta, tais como a determinação do módulo de ruptura ou da resistência a tração por compressão diametral. Porém, quando se observa a superfície de ruptura após um ensaio de resistência à tração por compressão diametral, é fácil ver que a ruptura do concreto não ocorre devido ao desenvolvimento do mecanismo de ruptura: a resistência ao esmagamento do agregado graúdo é acionado neste momento. A resistência à tração por compressão diametral pode variar dentro de um intervalo muito grande para os mesmos valores de resistência a compressão devido às diferentes composições cimentíceas utilizadas nos CADs. Deste modo, as relações que tem sido propostas entre a resistência a compressão e a resistência a tração por compressão diametral para os concretos usuais perdem um pouco do seu valor de previsão quando aplicadas para o CAD.

Porém para Mehta (1994), a resistência à compressão é um indicador de todos os tipos de resistência, e por esta razão deve existir uma relação direta entre a resistência a compressão e a resistência à tração de um dado concreto. Estas relações, entre os vários tipos de resistência, são influenciadas por fatores como os métodos pelas quais a resistência à tração é medida, a qualidade do concreto, as características dos agregados, aditivos e adições minerais utilizadas.

Mehta (1994) descreve a ruptura relativamente frágil do concreto nos ensaios de tração devido à fissuração conseqüente de uma ruptura por tração causada pela retração restringida, geralmente devido a redução da temperatura do concreto ou à secagem do concreto úmido. A razão entre as resistências à tração e à compressão é em torno de 0.07 a 0.11, dada a facilidade com que as fissuras podem se propagar sob uma tensão de tração.

Apesar das resistências à compressão e à tração estarem relacionadas, não há uma proporcionalidade direta entre ambas. À medida que a resistência a compressão aumenta, a resistência a tração também aumenta, porém a uma velocidade decrescente, ou seja, a razão resistência à tração/ compressão depende do nível da resistência à compressão: quanto maior esta, menor será a relação.

Conforme apresentado por Mehta (1994), a razão entre a resistência a tração/ compressão para concretos de baixa resistência (até 14 MPa) é em torno de 10% a 11%, para concretos de média resistência (entre 21 e 41 MPa) entre 8% e 9%, sendo para os CAD (acima de 48 MPa) em torno de 7%. Esta relação parece ser determinada pelo efeito de vários fatores nas propriedades da matriz (pasta) e da zona de

transição (interface pasta-agregado). O tempo de cura e as características da mistura do concreto, como fator a/c, tipos de agregados e aditivos também afetam a relação tração/ compressão em vários níveis. Para concretos com adições minerais, Mehta (1994) afirma ser possível obter após cura adequada, uma razão tração/ compressão relativamente alta, mesmo para altos níveis de resistência a compressão. Em investigações realizadas, observou que, para um concreto comum, com resistência à compressão alta, entre 55 MPa e 62 MPa, a razão tração/ compressão direta ficou em torno de 7% (sendo a razão tração por compressão diametral/ compressão axial ligeiramente maior). Para CAD contendo cinza volante, a razão tração por compressão diametral/ compressão axial apresentou-se maior quando comparado aos CAD sem cinza volante, cuja razão situou-se entre 7% e 8%. A redução do tamanho do agregado graúdo, assim como o tipo de agregado, também influenciou nos resultados obtidos.

Enquanto que os fatores que causam uma diminuição na porosidade da matriz e da zona de transição implicam em uma melhora geral de ambas as resistências à compressão e à tração do concreto, parece que a magnitude do aumento na resistência à tração do concreto permanece relativamente pequena a não ser que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação que compreendem a zona de transição seja melhorada ao mesmo tempo. Isto é, a resistência a tração do concreto com uma zona de transição de baixa porosidade continuará sendo fraca enquanto estiverem presentes um grande número de cristais orientados de  $\text{Ca(OH)}_2$ . O tamanho e a concentração dos cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  na zona de transição pode ser reduzido como resultado de reações químicas quando uma adição pozolânica ou agregado reativo estiver presente. (MEHTA, 1994).

## 2.2.2. Enfoque nas deformações e propriedades elásticas

### 2.2.2.1. Módulo de elasticidade

Segundo Aïtcin (2000), o conhecimento do módulo de elasticidade de um concreto é muito importante do ponto de vista do projeto, quando se calcula as deformações dos diferentes elementos estruturais que compõem a estrutura. Teoricamente, o módulo é calculado baseado em modelos que supõem representar o com-

portamento elástico do material, sendo o mais simples, os de duas fases, envolvendo o agregado e a pasta de cimento hidratado, no qual acredita-se que os constituintes suportem a mesma deformação ou desenvolvam a mesma tensão.

Para Neville (1997), o módulo de elasticidade do concreto depende do módulo de elasticidade do agregado e da proporção em volume deste no concreto. Porém o crescimento do módulo de elasticidade é progressivamente menor do que o crescimento da resistência à compressão. Observou também, que o módulo não é influenciado pelas condições de cura, mas sim pelo módulo de deformação do agregado graúdo do concreto – dependência esta conseqüente da natureza bifásica do concreto. A aderência entre estas duas fases (pasta e agregado) torna-se muito importante em concretos de alto desempenho (CAD), podendo influenciar o módulo quando esta for muito elevada. A natureza bifásica do concreto também significa que as proporções em volume do agregado e da pasta de cimento hidratada influenciam o valor do módulo para uma dada resistência. Como agregados normais apresentam um módulo de elasticidade maior que a pasta de cimento hidratada, um teor maior de um agregado resulta em um valor maior de módulo para uma mesma resistência.

De acordo com Kim, Han e Park (2002) *apud* SHEHATA (2005), o tipo de cimento, temperatura durante a cura e a idade do concreto não afetam significativamente a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência. Neville (1997) não acredita que as condições de cura tenham influência sobre o módulo senão através da influência da cura sobre a resistência.

Almeida (2005) afirma que o módulo de elasticidade ocorre de modo não proporcional à elevação da resistência a compressão. Esta não proporcionalidade tem uma importância muito grande em termos de cálculo estrutural: as extrapolações das formas tradicionais de correlação podem gerar deflexões excessivas. Em termos absolutos, o módulo de elasticidade dos CAD podem chegar a 50 GPa, embora se situem na faixa de 30 GPa a 40 GPa.

Araújo (2000) estudou a formulação utilizada para a correlação entre o módulo de elasticidade e sua resistência à compressão. Experimentalmente, verificou que o módulo depende de diversos fatores, sendo o valor da resistência a compressão do concreto apenas um deles, e que as propriedades elásticas dos agregados tem grande influência sobre o módulo de elasticidade, devendo ser consideradas nas formulações de correlação. Em seus experimentos, observou que a dispersão dos resultados foi muito grande, e que deste modo, qualquer formulação que correlaciona



módulo com resistência fornece apenas uma estimativa do real valor do módulo. Conclui que o tipo de agregado graúdo tem grande influência sobre o valor do módulo de elasticidade, porém é difícil definir um coeficiente de correlação para cada tipo de agregado utilizado.

Para Dal Molin (2005), as características do agregado é o fator limitante. As características superiores da zona de transição pasta-agregado na presença de adições minerais não são suficientes para melhorar o módulo de deformação do concreto, e do mesmo modo, os aumentos da resistência não se reproduzem com a mesma intensidade no módulo de elasticidade, cujo aumento é mais ameno. Na correlação resistência X módulo, este varia com a resistência independente do teor de adição incorporada, entretanto, o aumento percentual da resistência ocorre numa taxa média 3 vezes superior ao aumento percentual do módulo correspondente.

Conforme Mehta (1983) citado por ISAIA (1995), de acordo com as várias experiências, o módulo de elasticidade do concreto é pouco influenciado pelo uso de adições minerais, apresentando maior sensibilidade às variações da quantidade e rigidez do agregado e pela resistência a compressão, através da relação  $a/ag$  e cura. Deste modo, o módulo somente será afetado à medida que as pozolanas influenciam na resistência mecânica. Porém, em concretos de alta resistência (CAR), a melhoria da zona de transição pasta - agregado causada pelas adições minerais não aumenta o módulo na mesma razão da resistência devido ao fator limitante do agregado.

Isaia (1995) referenciando Lane e Best (1982), afirmam que o módulo de elasticidade, assim como a resistência a compressão, é baixo nas primeiras idades e mais elevado a longo prazo, quando utilizado adições de cinza volante, sendo que isto está relacionado a maior resistência desenvolvida pelos concretos com cinza em idades tardias.

Na pesquisa realizada por Isaia (1995), descrita no item 2.2.1.1, o comportamento do módulo de elasticidade foi semelhante ao da resistência a compressão. Analisando os índices médios dos módulos de elasticidade, observou que os concretos com cinza volante apresentaram, em média, valores abaixo do concreto referência, diferença esta reduzida na medida em que aumentou-se o teor de cinza volante.

O efeito das pozolanas sobre o módulo de elasticidade é explicado por Isaia (1995) pelo aumento do volume da pasta à medida que cresce o teor de pozolana, que ocorre em função da dosagem do material cimentante, por substituição em

massa, acarretando no aumento de pasta devido a menor massa específica das pozolanas, assim como o reforço da interface pasta- agregado pelo efeito microfíler e pozolânico, dependente da reatividade e finura da pozolana utilizada, sendo no caso da cinza volante, predominado o efeito de aumento de volume da pasta.

Na pesquisa realizada por Meira *et al.* (2007), utilizando concretos com 15% e 25% de cinza de casca de arroz moída e natural, e relações a/ag 0.45, 0.55 e 0.65, verificou, aos 28 dias, um aumento no módulo para teores de 15% e relações a/ag 0.55, 0.65 e 25% e relação a/ag 0.55 para cinza moída, enquanto que os demais traços com cinza moída apresentaram decréscimos, porém pouco significativos. Já os concretos utilizando cinza natural, o decréscimo foi acentuado, ficando 30% menores, em relação ao referência.

Aos 91 dias, os resultados de módulo dos concretos com adição de 15% e 25% de cinza moída, e 15% de cinza natural, apresentaram queda pouco significativa em relação ao referência, enquanto que nos concretos com 25% de cinza natural, o decréscimo foi mais acentuado, chegando a 36%.

Neto *et al.* (1995), investigaram concretos de alta resistência com sílica ativa (ou microsilica) e consumo de cimento de 550 kg/m<sup>3</sup>, utilizando 05 tipos de agregados diferentes (um granito, um gnaisse, um basalto, um diabásico e um calcário), cada um com 03 dimensões máximas diferentes, concentrando-se na medição das tensões em função das deformações e posterior cálculo do módulo de elasticidade. Concluíram que os agregados graúdos, de diferentes mineralogias, tem influência sobre o módulo de elasticidade dos concretos, sendo que os confeccionados com agregados do tipo basalto e calcário apresentaram os maiores valores de módulo: 43.9 GPa e 44.3 GPa respectivamente. Microfissuras instáveis começaram a se desenvolver na interface pasta agregado a aproximadamente 65% da carga de ruptura para concretos de resistência de aproximadamente 30 MPa. Para o concreto de alta resistência, da ordem de 76 MPa, esta falha na ligação pasta- agregado começa se propagar a 90% da carga última de ruptura resultando numa relação tensão-deformação mais linear até este nível de carregamento. Concluíram também, que o processo de capeamento ou retificação dos topos dos corpos-de-prova de concreto influenciam nas determinações da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade, assim como o valor do módulo muda com a idade do concreto, sendo este fato particularmente importante para concretos de alta resistência.

### 2.2.2.2. Retração total

De acordo com Hasparik *et al.*(2005), a retração está associada a deformação, sem que haja qualquer tipo de carregamento, sendo a principal causa, a perda de água da pasta de cimento. Estas variações dimensionais estão direta e principalmente ligadas a remoção da água adsorvida da pasta de cimento, ou seja, aquela aderida fisicamente no produto de hidratação C-S-H. Citando AİTCIN (2000), o autor afirma que deve-se falar em retrações, pois as deformações medidas são resultante da combinação de várias destas: plástica, autógena, hidráulica (por secagem), térmica e por carbonatação.

Segundo Neville (1997), em relação a pastas de cimento hidratadas, a retração é tanto maior quanto maior a relação a/c, pois esta determina a quantidade de água evaporável na pasta de cimento, assim como a velocidade de deslocamento desta água para a superfície. Citando BROOKS (1989), este afirma que a retração da pasta de cimento hidratada é diretamente proporcional a relação a/c entre os valores 0.2 e 0.6, porém a maior influência é exercida pelo agregado, que restringe a quantidade de retração que efetivamente poderia ocorrer. O tamanho e granulometria do agregado por si mesmos não têm influência sobre a magnitude da retração, mas agregados maiores permitem misturas mais pobres, resultando em menores retrações.

Com o concreto no estado fresco, antes do fim de pega e por meio da evaporação da água da superfície ocorre a chamada retração plástica ou dessecação superficial. A intensidade desta, segundo Neville (1997), é influenciada pela temperatura, umidade relativa do ambiente e velocidade do vento. Segundo Hasparik *et al.*(2005), durante a hidratação do cimento ocorre uma redução de volume absoluto total decorrente do fato de o volume dos hidratos formados serem menores que os volumes iniciais de cimento anidro e água. Isto será mais frequente e intenso quanto maior for o consumo de cimento, a relação a/c e as proporções de finos no concreto. A retração plástica está ligada ao fenômeno de exsudação. Fissuras por retração plásticas podem ser formadas caso a evaporação da água superficial seja mais rápida que a exsudação.

No concreto endurecido, a retração autógena e a retração por secagem são as principais causas de fissuração.

A retração autógena é para Hasparik *et al.* (2005), a redução volumétrica macroscópica dos materiais cimentícios após o início de pega, sem que ocorra mudanças de volume devido a perda ou ingresso de substâncias, variações de temperatura, desenvolvendo-se através do surgimento de meniscos dentro dos capilares, resultando em tensões de tração, sendo uma das principais causas de fissuração dos concretos de alto desempenho. De acordo com Neville (1997), é consequência da remoção da água dos poros capilares pela hidratação do cimento ainda não hidratado, restringindo a contração da pasta de cimento pelo esqueleto rígido da pasta de cimento já hidratado e também pelas partículas de agregado.

A auto dessecação ocorre pela diminuição da umidade relativa no interior do concreto endurecido sob condições isoladas, sem qualquer perda de massa, devido ao consumo de água pelas reações de hidratação, formando meniscos cujos esforços levam a retração autógena (HASPARYK *et al.*, 2005). Geralmente ocorre em maior incidência nos concretos de alto desempenho.

Conforme Hasparik *et al.* (2005), muitos são os fatores que influencia na retração autógena, sendo eles: a relação a/c ou a /m.c., a composição do cimento, teor de adições minerais, finura do cimento e das adições, volume de agregados e temperatura de exposição. Quando a relação a/ m.c. é reduzida, há um aumento expressivo na retração, devido ao aumento da tensão capilar da água dos poros. Propõe-se também que a grande concentração iônica entre a água dos poros e a água adsorvida na frente de hidratação seja a principal causa da retração autógena, devido ao movimento da água pelo efeito de sucção resultante desta diferença de concentração, produzindo este aumento na tensão capilar.

A retração autógena depende também do tipo de cimento. Cimentos com adição de sílica ativa e escória dão origem a concretos mais susceptíveis a este fenômeno, enquanto que os com cinza volante, apresentam uma leve diminuição desta retração, quando comparados com um concreto sem adição.

No concreto de alto desempenho (CAD), a retração autógena é intensa e mais importante que a retração por secagem nas primeiras idades (AÏTCIN, 1999 *apud* HASPARYK *et al.*, 2005).

Em relação a retração hidráulica, ou por secagem, Cánovas (1988) *apud* HASPARAKY *et al.* (2005) define como um fenômeno natural que ocorre como consequência da hidratação dos compostos anidros dos cimento Portland e que é tanto mais acentuada quanto maior é a perda de água que estes sofrem como conse-

qüência de um ambiente mais ou menos seco. Mehta & Monteiro (1994) classificam as águas presentes na pasta de concreto em capilar, interlamelar, quimicamente combinada, e água adsorvida, sendo a perda desta última do C-S-H a principal causa da retração hidráulica. Para Neville (1997), a retração hidráulica é causada pela secagem do concreto, e nela está incluída a contração devido a variação autógena de volume. Uma parte dessa variação de volume é irreversível e deve ser diferenciada das variações reversíveis de umidade causadas por exposição alternadas a condições secas e úmidas. Estudos demonstram que até 25% da retração hidráulica se dá em 14 dias, e 60% ocorre em até 90 dias. Porém a diferença entre o módulo de elasticidade da pasta e dos agregados afeta significativamente as deformações por retração. De acordo com Mehta & Monteiro (1994), esta retração aumenta quando um agregado de alto módulo de deformação é substituído por um de baixo módulo, assim como a utilização de adições minerais como escória e pozolanas que tendem a aumentar o volume de poros finos nos produtos de hidratação do cimento, e estando a retração associada a água contida em pequenos poros e com o refinamento destes pelas adições, normalmente resultam em acréscimos de retração por secagem.

Para Brooks (2000) *apud* HASPARAKY *et al.* (2005), aditivos superplastificantes causam uma melhor dispersão das partículas que leva ao refinamento dos poros, fazendo com que as deformações por retração hidráulica sejam maiores. Entretanto, reduzindo-se a relação a/c com o uso destes, o efeito é contrário, pois para uma mesma resistência será necessário menos água, ocorrendo uma menor deformação.

Em relação ao teor de cimento Neville (1997) afirma que, com relação a/c constante, a retração aumenta com o teor de cimento porque isto resulta em um maior volume de pasta, que é sujeita a retração, porém para uma mesma trabalhabilidade, que significa um mesmo teor de água, a retração não é alterada pelo aumento do teor de cimento, podendo ser menor, porque é reduzida a relação a/c, e consequentemente o concreto estará mais capacitado para resistir a retração. Do mesmo modo, com a adição de cinzas volantes ou escória granulada de alto-forno, a retração é aumentada. Com uma relação a/c constante, uma proporção maior de cinza ou de escória, nos cimentos compostos, resulta em retrações 20% maior com o primeiro material e até 60% maior com altos teores de escória.

De acordo com Isaia (1995), que estudou os efeitos da retração total, ou seja, a soma da retração autógena e da retração por secagem, em concretos com eleva-

dos teores de pozolanas, a influência destas na retração dos concretos com elevado desempenho, depende da quantidade de água adicionada, do nível de resistência, assim como o tipo e teor de pozolanas. As baixas relações a/c dos CED aliadas ao teor de finos presentes levam a uma retração autógena elevada, tanto maior quanto menor a relação a/c, entretanto, a retração por secagem é reduzida devido a baixa quantidade de água na mistura. Deste modo, a retração total será maior ou menor conforme o teor de pozolana, dimensões da peça e condições de cura.

Em relação a influência da cinza volante sobre a retração, seu efeito está condicionado à qualidade e ao teor de pozolana, pois determinam a maior ou menor quantidade de água adicionada para manter dada trabalhabilidade. Algumas pesquisas evidenciam que a cinza volante em concretos bem dosados e adequadamente curados, proporciona retração similar ao concreto sem cinza, enquanto que outras investigações constataam decréscimo sensível da retração total. Este fato pode ser explicado pela estrutura mais homogênea da pasta e pelo refinamento dos poros que retém maior teor de água em seu interior, reduzindo a retração (ISAIA, 1995).

Para Schubert (1991) *apud* ISAIA (1995), a adição de cinza volante reduz a retração em concretos de igual consistência, devido ao efeito plastificante e redutor de água conferido pela mesma, assim como em igualdade de trabalhabilidade e de resistência, as retrações em concretos com e sem cinza volante são aproximadamente iguais, havendo pouca diferença na retração de concretos com e sem cinza volante com igual relação a/ag.

Em pesquisa realizada por Isaia (1995) com misturas binárias e ternárias com teores normais e elevados de cinza volante, cinza de casca de arroz e microsilica em substituição parcial do cimento, relatado no item 2.2.1.1., o autor buscou, também, investigar os efeitos da retração total sobre estas misturas. Analisando os resultados, observou-se que, na idade de 14 dias (idades iniciais), todos os concretos apresentaram retrações superiores ao traço de referência, na ordem de 1.7 a 2.6 vezes maior, para todas as misturas pozolânicas, com exceção da mistura com 25% de cinza volante, e aos 182 dias, a retração média foi praticamente igual ou inferior ao referência para todas as misturas, o que comprova que a retração autógena prepondera sobre a retração total nas idades iniciais, quando ocorrem as principais reações que contribuem para a redução do volume.

Os concretos com cinza volante foram os que apresentaram menor retração. Aos 182 dias, a retração total das misturas com cinza situou-se abaixo do concreto de referência.

A retração foi mais elevada em misturas com relação a/ag mais altas, demonstrando que o acréscimo de água prepondera sobre o decréscimo do volume da pasta. A exceção a este comportamento foi a mistura com 50% de cinza volante, a qual a relação mais baixa apresentou retração maior que os de relação a/ag mais alta, o que mostra que o efeito do acréscimo da pasta foi preponderante em relação ao efeito da diminuição da água.

Meira *et al.* (2007) em pesquisa realizada, verificou a retração total de concretos moldados com 15% e 25% de cinza de casca de arroz, na forma natural e moída, em substituição ao cimento em massa, com relações a/mc iguais a 0.45, 0.55 e 0.65, comparando os resultados obtidos destas misturas com os resultados de ensaio realizado com uma mistura referência, sem adição mineral.

Através da análise de seus resultados, podemos verificar que as misturas de referências apresentaram, na média das 03 relações a/c, um incremento de 74% entre os 28 e os 91 dias, mantendo-se estável até a idade de 300 dias. As misturas com 15% e 25% de cinza moída apresentaram um aumento médio na retração para as relações a/mc consideradas de 55% e 36% entre 28 e 91 dias, sendo que o primeiro, do mesmo modo que o referencia, estabilizou-se a partir desta idade, enquanto o segundo, apresentou um incremento de 15%. Para as misturas com cinza natural, a mistura com 15% obteve um incremento de 23%, enquanto a mistura com 25% triplicou o índice de retração entre 28 e 91 dias. Até os 300 dias, o aumento na retração foi de 23% e 12% para as misturas com 15% e 25% de cinza, respectivamente.

Nota-se que, em relação ao referência, os traços com 15% de cinza, tanto moída como natural, apresentavam em média, 73% da retração apresentada pelo referência aos 28 dias, e 66% aos 300 dias. Porém a mistura com 25% de cinza moída praticamente igualou-se ao referência na primeira idade, chegando a 85% da retração deste aos 300 dias. Já a mistura com 25% de cinza natural demonstrou grande retração entre a idade inicial e os 91 dias, praticamente 03 vezes maior que a primeira idade, atingindo na última idade ensaiada, 70% do traço comparativo.

Conclui-se, através dos dados apresentados por Meira *et al.*(2007), que há um grande incremento de retração nas idades iniciais para as misturas, reduzindo-se

a partir dos 91 dias e chegando praticamente estável na idade final ensaiada. Apesar do incremento de retração ser muito similar entre as misturas, tanto as com adição de cinza de casca de arroz quanto as referências, os índices das misturas com adição mineral sempre apresentaram-se significativamente menores que os traços comparativos.

### 2.2.3. Influência da cal hidratada

Dalla Lana (2005), assim como Stumpp (2003), referenciam investigação realizada por Mira, Papadakis e Tsimas (2001), na qual estudaram a adição de cal hidratada em concretos com cimento Portland comum, pozolânico e comum com adição de 20% de cinza volante, utilizando um teor de cal de 10% e 20%. Analisaram os efeitos na resistência à compressão, tempo de pega, variação dimensional, porosidade, carbonatação e corrosão de barras de aço imersas no concreto.

Em relação à resistência à compressão, observaram que para o concreto com cimento Portland comum, houve uma significativa variação dos valores com adição em relação aos valores sem adição de cal. Os concretos com cimento Portland pozolânico não apresentaram variações significativas de resistência. Mostra que o material pozolânico apresenta elevado teor de cálcio, sendo a adição de cal não tão significativa como seria para baixos teores de cálcio. Aos 360 dias, as misturas com adição de cal apresentaram relativo aumento de resistência a compressão em relação as misturas sem cal. A adição de 10% de cal sobre a massa de cimento em concreto com cimento Portland comum, retardou o início de pega, enquanto que para o cimento pozolânico houve aceleração do início da pega, o mesmo ocorrendo para o concreto com cinza volante, no qual esta aceleração foi mais significativa. Já o aumento do teor de adição de cal hidratada de 10% para 20% apresentou pouca variação. Da mesma forma a adição de cal interfere no fim de pega, retardando o tempo para concretos com cimento Portland comum, e acelerando para o cimento pozolânico e comum com adição de cinza volante, este último também numa ordem mais significativa. Em relação à porosidade do concreto, a adição de cal provocou um aumento significativo para a mistura com cimento Portland comum, ao contrario do concreto comum com adição de cinza volante e do pozolânico, no qual a porosi-



dade foi reduzida, sendo para o cimento pozolânico esta redução muito pouco significativa.

Assim, inferiu-se que concretos que incorporam material pozolânico não apresentam grande variação de resultados, e exibem um incremento estável especialmente em idades avançadas, devido a rápida formação de C-S-H como resultado da aceleração das reações pozolânicas, com a adição de cal hidratada.

Ensaio de difração de raio-x mostram elevado teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  com adição de cal aos 3, 28 e 91 dias. Concretos com adições minerais, contêm elevado teor de C-S-H no começo da hidratação. A rápida formação inicial de C-S-H nestes concretos com adição de cal explica a relativa melhora na resistência. A adição de cal foi bastante efetiva para o cimento Portland pozolânico e para o comum com adição de cinza volante quanto a variação dimensional, reduzindo o percentual de variação. Para o cimento Portland comum, a adição de cal provocou um pequeno aumento nesta variação.

Deste estudo, Mira, Papadakis e Tsimas (2001) concluíram que quando a cal hidratada é adicionada em concretos que contenham materiais pozolânicos, um significativo incremento de durabilidade é observado, uma estrutura mais densa é criada.

Na pesquisa realizada por Brizola (2007), apresentada anteriormente no item 1.2.1.1, investigou-se 03 misturas com três relações a/mc cada, sendo uma somente com cimento Portland, tida como referência, com relações a/mc iguais a 0.4, 0.6 e 0.8, e outras duas compostas de 70% de escória de alto-forno mais 20% de cinza volante em substituição de igual massa ao cimento, totalizando esta em 90%. A uma destas adicionou-se 20% de cal hidratada em relação à massa de aglomerantes. Comparando-se estas duas misturas – com e sem adição de cal hidratada – observou-se resultados muito interessantes em relação a resistência a compressão axial.

Aos 28 dias as misturas com cal apresentaram um incremento de 40% de resistência, na média das 03 relações a/mc para este traço, em relação as obtidas pela mistura sem cal hidratada. Aos 91 dias, esta relação foi de 16%, sendo observado uma contribuição da cal na resistência até os 300 dias de idade. Para a relação a/mc = 0.3, aos 300 dias, a mistura com cal obteve resistência 13% superior a mistura sem adição de cal hidratada, enquanto que para as outras relações a/mc, 0.4 e 0.5, as resistências praticamente igualou-se entre as misturas com e sem adição de cal.

Silveira (2004), que pesquisou concretos com adição de 50% de cinza volante em substituição em massa ao cimento e outra mistura com mesma substituição, porém com adição de 20% de cal hidratada em relação a massa de aglomerantes para 03 relações a/mc distintas, observa que a adição de cal ao concreto com cinza volante proporciona uma retenção de água que fica disponível para a hidratação, assim como para a cura, resultando em resistências um pouco maiores do que as apresentadas pelas misturas sem adição de cal.

Deve-se salientar que os traços com cal, em geral, apresentaram resistências superiores aos traços correspondentes com cinza volante sem cal para esta idade. A causa provável deste comportamento é a retenção de água proporcionada pela cal, fornecendo uma reserva interna de umidade para as reações de hidratação durante o período de cura, bem como a maior reserva de  $\text{Ca(OH)}_2$  para a formação de novas fases de C-S-H secundário formado nesta idade (SILVEIRA, 2004, p. 67).

Aos 91 dias, as diferenças entre as resistências a compressão das misturas diminuíram entre si com o aumento da relação a/mc, sendo que as misturas com adição de cal hidratada demonstraram resistências ligeiramente maiores em relação às obtidas pelas misturas sem incorporação de cal, principalmente nos traços com menor relação a/mc.

Visto que as reações pozolânicas continuam ocorrendo no concreto após o período de cura, Silveira (2004) supõe que o maior teor de CH conferido pela cal promova em idades mais avançadas, a formação de fases adicionais de C-S-H em relação ao concreto de referência ou o concreto com adição de cinza volante sem incorporação de cal hidratada.

## CAPITULO 03

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Introdução

O uso de adições minerais incorporadas ao concreto em substituição de parte do cimento constituinte pode trazer inúmeros benefícios e conhecimentos. Tecnicamente, há um aumento do desempenho das estruturas durante sua vida útil, através do incremento da durabilidade do concreto, acarretando na diminuição de custos de manutenção, e assim, menores intervenções. A substituição de parte do cimento por adições minerais, materiais de baixo valor agregado contribuem para a redução dos custos totais envolvidos na execução das estruturas, trazendo deste modo benefícios econômicos. Ressalta-se também, que o uso de altos teores de adições minerais diminui os custos da produção do concreto pelo uso de subprodutos industriais, reduzindo o consumo de clínquer, e respectivamente, de energia utilizada em sua fabricação.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados visam contribuir no embasamento de diretrizes para a utilização de estruturas de concreto com o uso de altos teores de adições minerais, em substituição parcial do cimento.

#### 3.2. Variáveis envolvidas

A definição e quantificação das variáveis envolvidas no experimento objetivam delinear as estratégias de ação para alcançar as metas desejadas. Estas dividem-se em:

- *Variáveis independentes* - são variáveis inerentes à natureza do concreto, influenciando na compacidade do material ou relação sólido/ espaço da pasta ao longo do tempo, sendo estas variáveis:
  - *relação água/material cimentício (a/mc)*, em massa:
    - mistura referência utilizando 100% cimento Portland: relações  $a/mc = 0.40, 0.60$  e  $0.83$ ;
    - mistura 70% escória + 20% cinza volante: relações  $a/mc = 0.30, 0.40$  e  $0.49$ ;

- mistura 70% escória + 20% cinza volante + 20% cal hidratada em adição: relações  $a/mc = 0.33, 0.40$  e  $0.49$ .

▪ *idades de ensaio* :

- resistência à compressão axial (RCA): aos 07, 28, 91 e 300 dias;

- resistência à tração por compressão diametral (RCD): aos 28, 91 e 300 dias;

- módulo de elasticidade (deformação tangente inicial): aos 28, 91 e 300 dias;

- retração total: aos 28, 91, 180 e 300 dias.

▪ *tipo de adição mineral* – cinza volante e escória granulada de alto forno, devido à maior disponibilidade destes materiais na região sul do Brasil, em especial no Rio Grande do Sul.

▪ *teor de adição mineral* – foi estudada a substituição total, em massa, de 90% do cimento Portland por pozolana, sendo 70% de escória granulada de alto forno, e 20% de cinza volante.

▪ *adição de cal hidratada*- o teor de cal hidratada adicionado à mistura foi de 20% em relação à massa total de material cimentício, utilizada como ativador das adições minerais, em especial da escória de alto forno, assim como para repor o CH não formado pela substituição de parte do cimento.

▪ *cura* – a cura foi em câmara úmida climatizada, com temperatura média de 25°C e umidade relativa média de 95%, até as idades de ensaio para os corpos de prova utilizados para determinação de resistência a compressão axial (RCA), resistência à tração por compressão diametral (RCD) e módulo de elasticidade. Para os ensaios de retração total, os corpos de prova foram curados em câmara úmida até a idade de 07 dias, sendo após este período, armazenados em temperatura ambiente.

➤ *Variáveis dependentes*: são as variáveis diretamente influenciadas por alguma variável independente ou interveniente, sendo:

▪ *resistência à compressão axial (RCA)*;

▪ *resistência à tração por compressão diametral (RCD)*;

▪ *variação dimensional: retração total*;

▪ *módulo de elasticidade longitudinal (deformação tangente inicial)*.

### 3.3. Caracterização dos materiais

#### 3.3.1. Cimento e Adições minerais

O cimento foi selecionado entre os disponíveis no mercado. Por esta pesquisa ser a terceira fase de um projeto mais abrangente, na qual os materiais utilizados devem ser os mesmos da fase II, utilizou-se o aglomerante com o menor teor de adições existente, optando-se pelo cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI (NBR 5733/ABNT, 1991).

As pozolanas utilizadas foram as seguintes:

- cinza volante proveniente de termoelétrica regional (Candiota/RS), utilizada conforme fornecida;
- escória granulada de alto forno, proveniente de siderúrgica nacional (Companhia Siderúrgica de Tubarão /ES), moída por 01 hora em moedor de bolas do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).
- Cal hidratada do tipo cálcica, de origem nacional, moída em moedor de bolas por 01 hora no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

Os ensaios de composição química do cimento e adições minerais foram realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP/SP), e os resultados estão apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química do cimento e adições minerais

Componentes	Teor em massa (%)			
	CPV-ARI	Escória	Cinza volante	Cal
Perda ao fogo	3,00	1,7	0,6	23,9
SiO <sub>2</sub>	19,30	31,5	63,4	0,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70	11,9	19,8	0,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,00	0,3	5,2	0,3
CaO	63,4	42,6	4,8	73,9
MgO	1,80	10,6	2,6	0,2
SO <sub>3</sub>	3,10	2,5	0,1	0,1
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,2	0,3	0,02
K <sub>2</sub> O	0,80	0,3	2,0	0,07
Resíduo insolúvel	-----	-----	-----	0,1

O ensaio de distribuição granulométrica a laser, cujos resultados encontram-se na tabela 3.2, que apresenta o diâmetro médio das partículas e os diâmetros abaixo do qual se encontram 10% e 90% das partículas.

Tabela 3.2- Dimensões características do cimento e adições minerais.

Material	Dimensão média ( $\mu\text{m}$ )	$\varnothing$ abaixo do qual encontram-se 10% das partículas ( $\mu\text{m}$ )	$\varnothing$ abaixo do qual encontram-se 90% das partículas ( $\mu\text{m}$ )
CP V- ARI	8,70	0,9	29,3
Escória	5,9	0,8	23,4
Cinza volante	58,7	6,3	266,1
Cal	5,4	1,1	14,1

Na tabela 3.3, encontram-se os resultados dos ensaios para as características físicas do cimento e adições minerais, realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, determinados durante a fase II da pesquisa por Brizola (2007).

Tabela 3.3 - Características físicas do cimento e adições minerais

Material	CP V-ARI	Cinza volante	Escória	Cal Hidratada
Massa específica ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ )	3,15	2,28	2,89	2,23
Área específica Blaine ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	428	420	510	773
Resíduo na # 0.075 (%)	0,16	9,38	2,46	0,90
Início de pega (min.)	125	-----	-----	-----

A figura 3.1 apresenta o gráfico da atividade pozolânica do cimento CPV-ARI aos 14 dias de idade, também realizados pela ABCP/SP. Na figura 3.2 e 3.3 são apresentados os gráficos de atividade pozolânica aos 14 dias para as misturas das adições minerais indicadas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Composição das amostras

Amostra	Composição (%)			
	Escória	Cinza volante	Cal hidratada	Cimento
Mistura 01	70	20	-----	10
Mistura 02	56	16	20	8

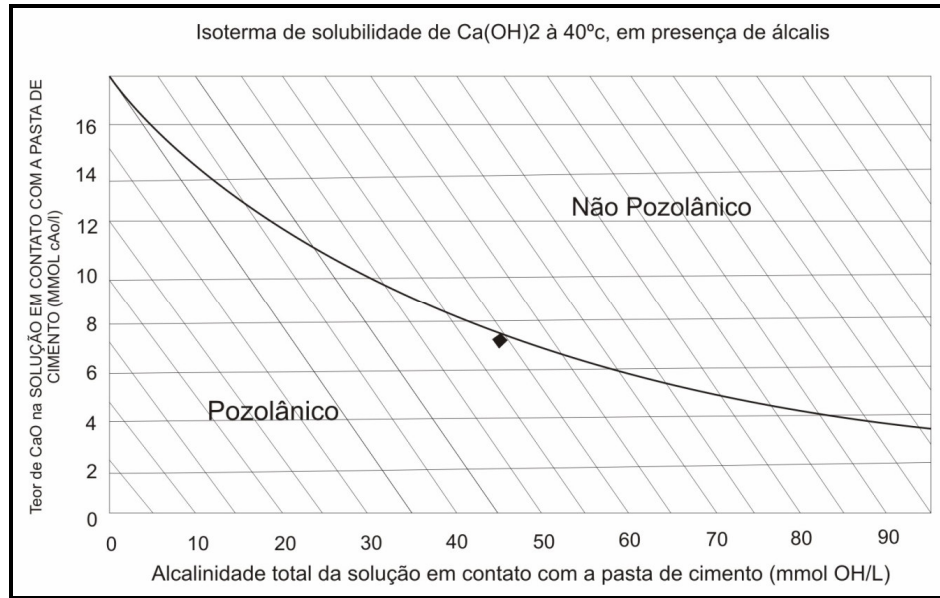


Fig. 3.1 - Atividade pozolânica do cimento CP V- ARI aos 14 dias.

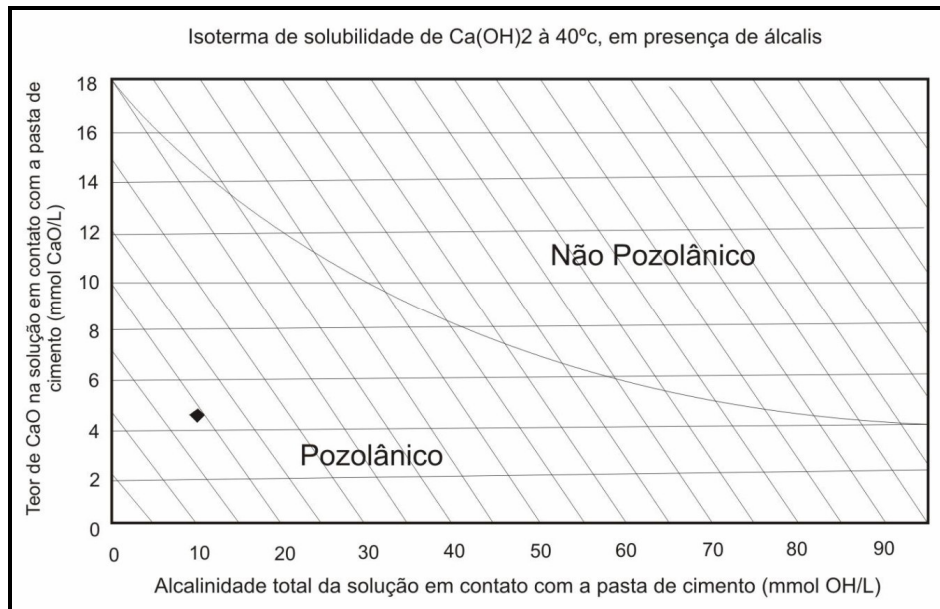


Fig. 3.2 - Atividade pozolânica da mistura 01 aos 14 dias

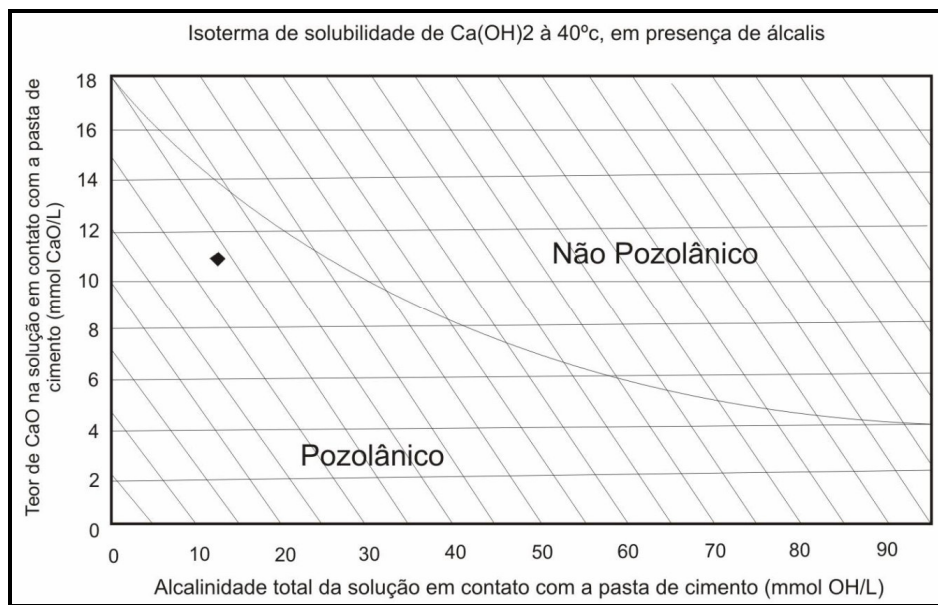


Fig. 3.3 - Atividade pozolânica da mistura 02 aos 14 dias

A tabela 3.5 apresenta os resultados dos ensaios BET das amostras de cimento e adições minerais utilizadas na pesquisa, determinados por ensaios realizados pela Escola Politécnica/ USP.

CPV- ARI	1,6007 $\text{m}^2/\text{g}$
Escória	4,1685 $\text{m}^2/\text{g}$
Cinza volante	0,5453 $\text{m}^2/\text{g}$
Cal hidratada	8,8706 $\text{m}^2/\text{g}$

A figura 3.4 apresenta a distribuição granulométrica das amostras dos aglomerantes utilizados, por ensaio realizado pela ABCP.



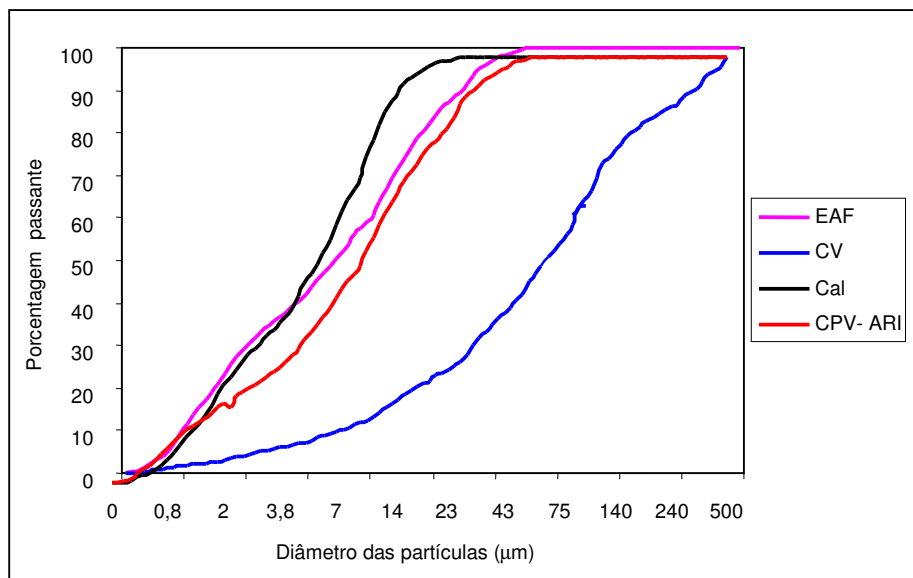


Fig. 3.4 - Distribuição granulométrica das amostras

### 3.3.2. Agregados

Para a presente pesquisa foi utilizado como agregado miúdo areia natural lavada, de origem local, do tipo quartzosa, seca em estufa para retirada da umidade, com diâmetro máximo de 4.80 mm.

Como agregado graúdo usou-se pedra basáltica (rocha diabásica) britada, de origem local, lavada para retirada de impurezas e seca em estufa, com diâmetro máximo igual a 19 mm.

A tabela 3.6 e as figuras 3.5 e 3.6 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, realizadas durante a fase II desta pesquisa.

Tabela 3.6 - Caracterização dos agregados

Material	Pedra Britada	Areia natural lavada
Módulo de finura	5,36	1,88
Ø máximo (mm)	19,00	4,75
Ø máximo característico (mm)	19,00	1,18
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,49	2,61
Massa unitária solta (kg/dm <sup>3</sup> )	1,34	1,64
Absorção de água (%)	3,03	-----
Umidade crítica	-----	3,20
Coeficiente de inchamento médio	-----	1,23
Abrasão Los Angeles (%)	16,36	-----
Índice de forma	2,70	-----

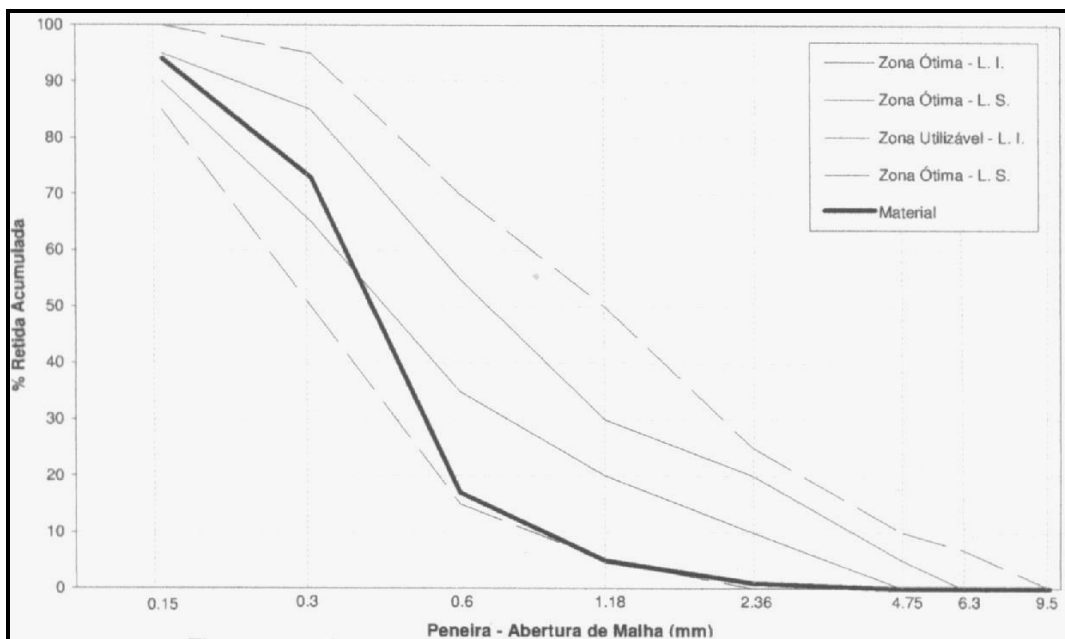


Figura 3.5 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

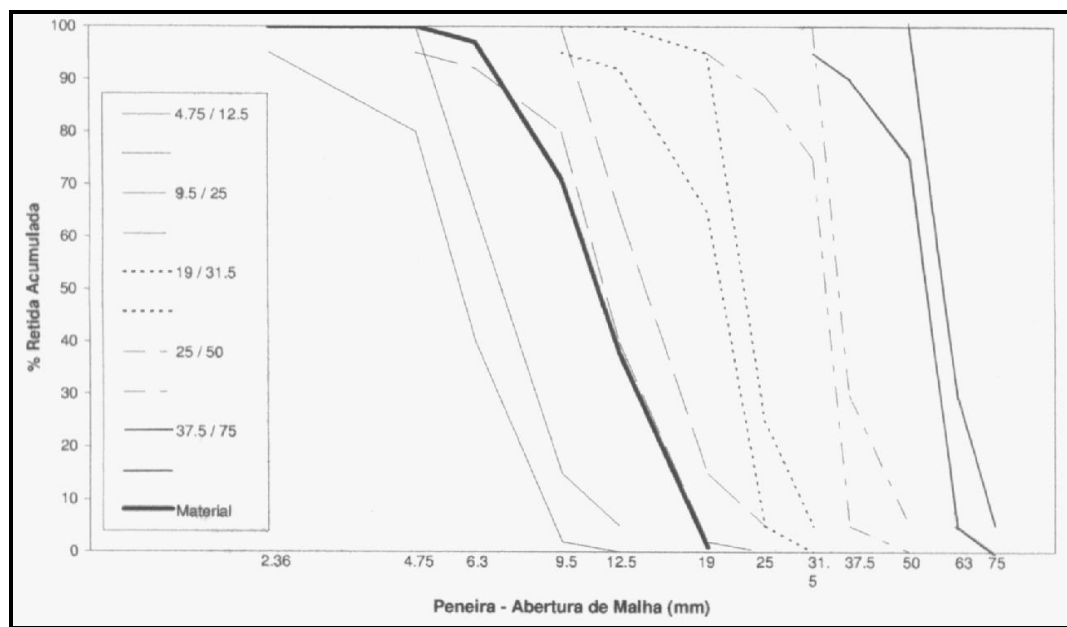


Figura 3.6 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

### 3.3.3. Aditivo superplastificante

Para atingir o abatimento especificado ( $80 \pm 20$  mm), de modo que não houvesse alterações nas relações água/ aglomerante em cada mistura estudada, utili-

zou-se aditivo superplastificante, a base de éter- carboxílico modificado de produção nacional, com pH entre 5 e 7, massa específica de  $1,10 \text{ kg/dm}^3$  e teor de sólidos de 30%.

### 3.4. Proporcionalamento e dosagem dos concretos

Devido ao aumento de argamassa resultante da substituição parcial do cimento por adições minerais devido à menor massa específica destes materiais, corrigiu-se ainda na fase II desta pesquisa os volumes dos aglomerantes reduzindo o volume do agregado fino (areia), de modo a evitar uma maior demanda de água. Assim, manteve-se constante o teor de argamassa seca em aproximadamente 52% para todos os traços estudados.

A presente pesquisa estudou três misturas com três relações água/aglomerante cada, sendo uma mistura composta apenas com cimento Portland (100%), para relações a/c 0.400, 0.600 e 0.827.

Na segunda mistura, substituiu-se parcialmente o cimento Portland por escória granulada de alto forno na razão de 70% e cinza volante em 20%, sendo a parcela de cimento existente de 10%, totalizando 90% de substituição em igual massa. As relações a/mc especificadas foram 0.302, 0.402 e 0.491.

Para a terceira mistura, repetiu-se a substituição de 90% do cimento por adições minerais em igual massa, como efetuado na segunda mistura, sendo que nesta foram acrescentados 20% de cal hidratada em relação à massa de aglomerantes em adição ao cimento Portland e substituição de parte do agregado miúdo. Para estas misturas foram utilizadas relações a/mc iguais a 0.331, 0.402 e 0.491.

Os teores de adições minerais especificados são os mesmos utilizados em trabalhos anteriores, da fase II deste programa de pesquisa que vem sendo desenvolvido pelo Grupo de Estudos e Pesquisa em Concreto (GEPECON) da UFSM. Desta forma, para dar continuidade a esta pesquisa, que vem apresentando resultados viáveis e satisfatórios em relação à substituição em massa de 90% do cimento por adições minerais, justifica-se a repetição destes traços, com a finalidade de estudar propriedades não contempladas nas investigações anteriores (fase I e II). Cabe salientar que a fase I da presente pesquisa, desenvolveu estudos relativo a camada de cobrimento do concreto com altos teores de cinza volante em misturas bi-

nárias. A fase II investigou a microestrutura e durabilidade da camada de cobrimento com adição de escória de alto-forno em misturas binárias e ternárias com cinza volante, mais especificamente através de absorção capilar e difusividade de água, carbonatação acelerada, penetração de cloretos, cloretos retidos, solução iônica dos poros,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  remanescente e potencial hidrogeniônico.

Os consumos de materiais utilizados nas misturas estudadas estão indicados na tabela 3.7.

Tab. 3.7 - Consumo de materiais por  $\text{m}^3$  de concreto.

Mistura	a/mc	CP V-ARI	E	CV	Cal	Areia	Pedra	Água	Aditivo	Slump
		Kg/ $\text{m}^3$	Kg/ $\text{m}^3$	Kg/ $\text{m}^3$	Kg/ $\text{m}^3$	Kg/ $\text{m}^3$	Kg/ $\text{m}^3$	Kg/ $\text{m}^3$	Kg/ $\text{m}^3$	mm
R	0.400	462	-----	-----	-----	637	1014	185	-----	75
R	0.600	313	-----	-----	-----	792	980	188	-----	95
R	0.827	227	-----	-----	-----	914	933	188	-----	65
EV	0.302	66	462	132	-----	371	1001	198	2,1	145
EV	0.402	47	332	95	-----	564	1009	189	1,2	95
EV	0.491	38	265	76	-----	690	987	185	0,8	100
EVC	0.331	65	457	131	131	194	989	209	9,8	155
EVC	0.402	47	331	94	95	455	1007	186	5,5	140
EVC	0.491	37,7	264,2	75,5	75,5	581,9	1006.4	183,8	2,0	100

Para manter o abatimento especificado ( $80 \pm 20$  mm) com a mesma relação a/mc, utilizou-se aditivo plastificante nos traços em que houve substituição de parte do cimento por adições minerais.

Na tabela 3.8 resumem-se os teores de cimento e adições substituídas, relações a/ag e nomenclatura utilizada.

Tab. 3.8 - Nomenclatura, relação a/mc e teores substituídos.

Mistura	a/mc	CP V-ARI (%)	Escória (%)	Cinza (%)	Cal (%)
R 0.40	0.400	100	-----	-----	-----
R 0.60	0.600	100	-----	-----	-----
R 0.83	0.827	100	-----	-----	-----
EV 0.30	0.302	10	70	20	-----
EV 0.40	0.402	10	70	20	-----
EV 0.49	0.491	10	70	20	-----
EVC 0.33	0.331	10	70	20	20
EVC 0.40	0.402	10	70	20	20
EVC 0.49	0.491	10	70	20	20

Como 70% do volume de aditivo adicionado é líquido (pois seu teor de sólidos é de 30%), esta quantidade foi reduzida do volume da água de mistura. Conforme

apresentado por Brizola (2007), os traços EV 0.302, EVC 0.331 e EVC 0.402 foram auto-adensáveis, devido aos elevados teores de finos e ao aditivo empregado, o que se confirmou nos ensaios de “*slump*” das misturas produzidas. Para o traço de referência, não foi utilizado aditivo para atingir o abatimento requerido.

#### 3.4.1. Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem e cura dos corpos de prova para os ensaios de resistência a compressão axial (RCA), resistência a tração por compressão diametral (RCD) e módulo de elasticidade foram efetuadas de acordo com a NBR 5738/2003: Concreto - Procedimento para moldagem cura de corpos-de-prova.

Para os ensaios de resistência a compressão axial – RCA - foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, para ensaios às idades de 07, 28, 91 e 300 dias de acordo com a NBR 5739/1994.

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral – RCD – foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm, para ensaios às idades de 28, 91 e 300 dias, como descritos pela NBR 7222/1983.

Os corpos-de-prova para ensaios de módulo de elasticidade foram moldados nas dimensões de 10 x 20 cm, e ensaiados nas idades de 28, 91 e 300 dias, de acordo com a NBR 8522/2003.

A moldagem foi realizada em duas camadas, utilizando-se mesa vibratória. Após, os corpos de prova tiveram seu topo arrasado com argamassa da moldagem para regularização da superfície, foram cobertos com estopa úmida e mantidos desta maneira por 24 horas. Desformados, estes foram identificados e armazenados na câmara úmida do LMCC, sob uma temperatura média de 25 °C e umidade relativa média de 95%, até as idades de ensaio.

Os ensaios de retração total foram efetuados de acordo com a ASTM C490 e ensaiados aos 7, 28, 91, 180 e 300 dias. A moldagem foi efetuada de acordo com a ASTM C157, com corpos de prova prismáticos de 10 x 10 x 30 cm, realizada em duas camadas, com auxílio de mesa vibratória. Após, tiveram a face superior regularizada com argamassa da moldagem, cobertos com estopa úmida e mantidos desta forma por 24 horas, os quais após este período foram desformados, identificados e armazenados em câmara úmida por 07 dias, quando se realizou o primeiro ensaio.

Decorrido este período, armazenou-se os corpos de prova em temperatura ambiente, em uma sala do LMCC.

### **3.5. Experimentos**

#### **3.5.1. Resistência à compressão axial - RCA**

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados de acordo com a NBR 5739/1994: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos- Método de ensaio, para idades de 07, 28, 91 e 300 dias, sendo ensaiados 03 corpos-de-prova para cada idade. Após a retirada dos corpos-de-prova da câmara úmida, estes foram capeados com uso de enxofre para regularização do topo e base. Para a realização do ensaio utilizou-se prensa hidráulica do LMCC, marca EMIC, com capacidade de 200 tf e precisão de +/- 1%.

#### **3.5.2. Resistência à tração por compressão diametral - RCD**

Para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, foram adotados os procedimentos normatizados pela NBR 7222/1983: Argamassas e concretos - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

Realizou-se ensaios aos 28, 91 e 300 dias, utilizando-se 03 corpos-de-prova para cada idade. Para correção de eventuais irregularidades na distribuição dos esforços ao longo da geratriz de contato entre os pratos e o corpo-de-prova foram utilizadas talas de madeira, conforme indicado pela norma em questão. Para a realização do ensaio utilizou-se a prensa hidráulica do LMCC.

#### **3.5.3. Módulo de elasticidade**

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados de acordo com a NBR 8522/2003: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação.

Para esta pesquisa, optou-se pela determinação do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (ou à origem) -  $E_{ci}$  - considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal entre 0.5 MPa e 30%  $f_c$ , utilizado para caracterizar a deformabilidade do concreto, e o plano de carga tipo II da norma em uso.

Os ensaios foram realizados aos 28, 91 e 300 dias, sendo utilizados 03 corpos-de-prova para cada idade.

#### 3.5.4. Retração total

Para o ensaio de retração total foram adotados os procedimentos da ASTM C 490-96.

Os ensaios foram realizados aos 07, 28, 91, 180 e 300 dias, sendo a leitura da retração determinada com o auxílio de barra de referência e relógio comparador. A leitura realizada aos 07 dias de idade serviu como referência (parâmetro) às demais idades ensaiadas. Adotou-se a média de 03 leituras realizadas com o corpo-de-prova locado na mesma posição e nos mesmos terminais do relógio comparador.

## CAPITULO 04

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será realizada a análise, assim como a discussão e comentários dos resultados obtidos. Todos os índices percentuais apresentados referem-se a média obtida entre as resultantes dos experimentos, dentro do desvio padrão adotado.

### 4.1. Resistência à compressão axial - RCA

Para a análise dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência a compressão axial, foram considerados apenas os valores situados dentro da margem de desvio máximo relativo, ou seja, a diferença entre o maior e o menor valor obtido dividido pela média dos valores, resultantes menores que 10%.

A figura 4.1 apresenta os resultados dos ensaios para os traços referências, com relações a/c 0.40, 0.60 e 0.83, sem adições minerais.

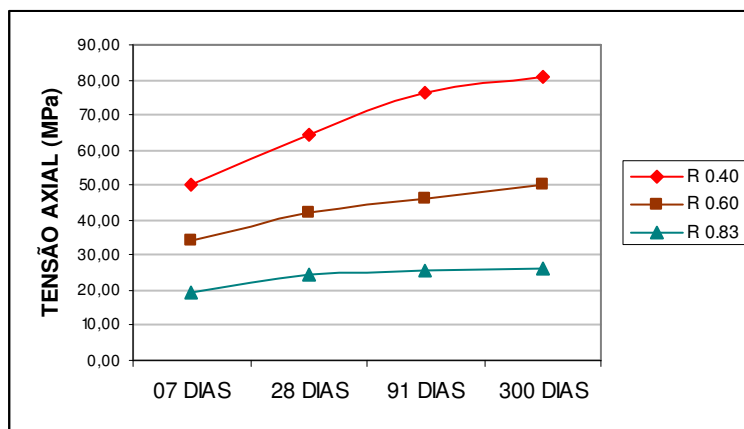


Figura 4.1 - RCA das misturas de referência dos 07 aos 300 dias.

Nota-se para o traço R 0.40 uma variação de 61% entre o resultado obtido aos 07 dias e aos 300 dias, sendo que o maior desenvolvimento da mesma ocorre até os 91 dias. Para a mistura R 0.60, esta variação chega a 47%, e a resistência se desenvolve de forma aproximadamente linear crescente conforme podemos obser-



var, até a última idade ensaiada. Já o traço R 0.83, apresentou um ganho de 37% entre a primeira idade, aos 07 dias e a última, aos 300 dias, sendo que 71% de sua resistência se desenvolveu até os 28 dias.

Observa-se que das relações a/c apresentadas, a mistura R 0.40 ultrapassou 50 MPa aos 07 dias, índice atingido pelo traço R 0.60 apenas aos 300 dias, e não obtido com o R 0.83 nas idades ensaiadas.

Na figura 4.2, estão representados os resultados das misturas com adições minerais em substituição a 90% do cimento em massa, com relações a/mc 0.30, 0.40 e 0.49.

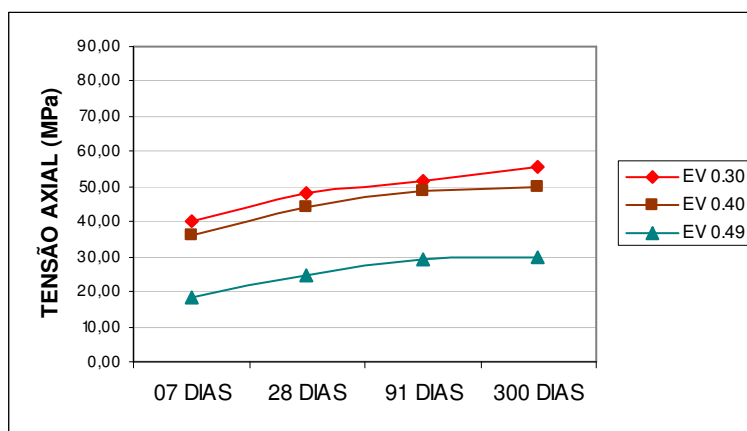


Figura 4.2 - RCA das misturas com adições minerais dos 07 aos 300 dias.

As misturas EV 0.30 e EV 0.40, apresentaram um desenvolvimento de resistência relativamente similares e próximos. Há um desenvolvimento gradual entre o primeiro ensaio e o último, diferentemente do que ocorre com o traço EV 0.49, que apresenta um ganho de resistência maior até os 91 dias, ou seja, aproximadamente 96% do ganho de resistência total se desenvolveram entre 07 e 91 dias.

Os traços EV 0.30 e EV 0.40 apresentaram um ganho de resistência médio na ordem de 38.5% entre 07 dias e 300 dias. Já a mistura EV 0.49 resultou em 59% de acréscimo para o mesmo período.

O índice de 50 MPa foi obtido aos 91 dias com a mistura EV 0.30, e aos 300 dias com a mistura EV 0.40.

Os resultados obtidos para as misturas com relações a/mc 0.33, 0.40 e 0.491, e substituição de 90% do cimento em massa por adições minerais com adição de cal são apresentados na figura 4.3.

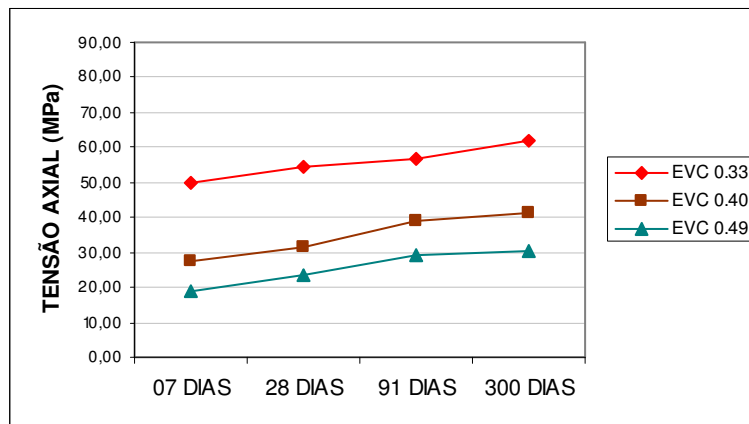


Figura 4.3 - RCA das misturas com adições minerais e cal dos 07 aos 300 dias.

Nota-se para a mistura EVC 0.33, uma variação de 25% entre o primeiro ensaio e o último. Há um lento e gradual aumento da resistência entre 07 e 91 dias, sendo que, a partir dos 91 dias e até os 300 dias, existe um crescimento acentuado, correspondendo a 44.5% do total do ganho de resistência apresentado.

Já a mistura EVC 0.40 demonstra um incremento entre os 07 dias e os 300 dias de aproximadamente 50%, sendo 56% deste ganho de resistência obtido entre 28 e 91 dias.

A mistura EVC 0.491 apresenta um comportamento idêntico ao traço EV 0.40. Houve um ganho de resistência na ordem de 60.5% entre o primeiro ensaio e o último, sendo que 90% deste ganho de resistência foi obtido entre 07 e 91 dias.

Apenas a mistura EVC 0.33 ultrapassou 50 MPa, apresentando este resultado no ensaio aos 28 dias.

Isto valida os resultados obtidos por BRIZOLA (2007), cujas as misturas com adição de cal apresentaram maior desenvolvimento de resistência até os 28 dias, enquanto que as misturas sem adição de cal obtiveram ganho maior entre 28 e 91 dias. Nota-se ai claramente, a função da cal como ativador das adições, como a escória, proporcionando incrementos de resistência nas idades primeiras.

De acordo com a figura 4.4, a qual apresenta os resultados das 09 misturas aos 07 dias, podemos observar a igualdade de resistência da mistura EVC 0.33 com a mistura R 0.40, situando-se na faixa de 50 MPa.

Em relação à mistura referência R 0.40, a mistura EV 0.302 apresentou resistência 21% inferior, enquanto a mistura EVC 0.33, como citado anteriormente, praticamente igualou-se.

Tendo como referência a mistura R 0.60, o traço EV 0.40 resultou em resistência levemente superior, enquanto a mistura EVC 0.40 não ultrapassou em 80% a resistência em comparação.

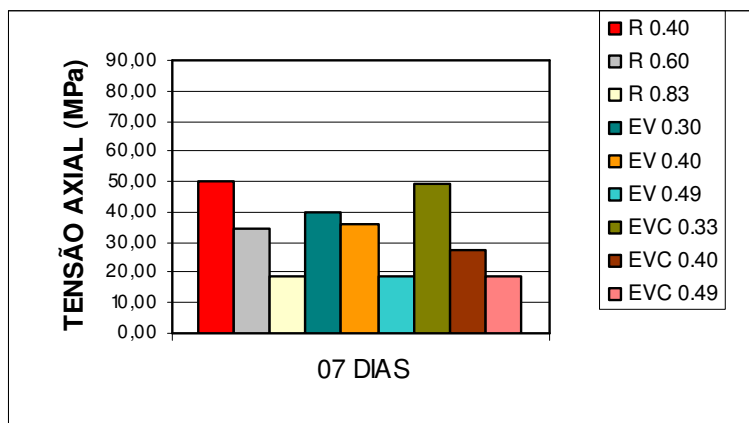


Figura 4.4 - RCA das misturas aos 07 dias.

Já as misturas EV 0.49 e EVC 0.49 atingiram praticamente a resistência apresentada pelo traço referência R 0.827.

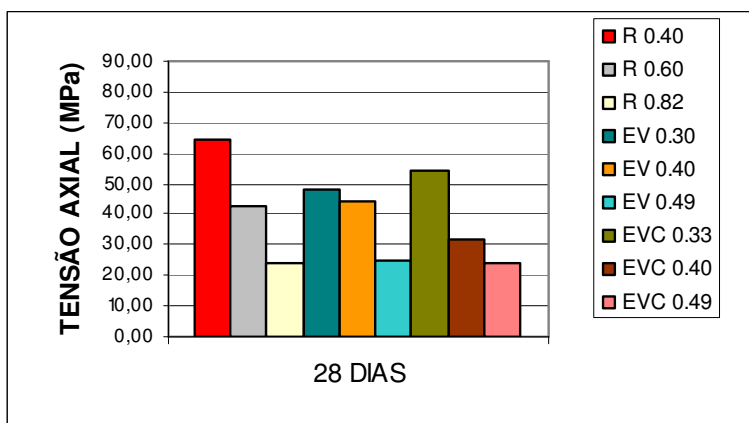


Figura 4.5 - RCA das misturas aos 28 dias.

Aos 28 dias, conforme demonstrado pelo gráfico da figura 4.5, podemos notar que o incremento da resistência é semelhante aos resultados apresentados na figura 4.4.

Nesta idade, as misturas EV 0.30 e EVC 0.33 apresentaram respectivamente, 75% e 84,5% da resistência obtida com o traço R 0.40.

Relacionando os traços EV 0.40 e EVC 0.40 com o referência R 0.60, observa-se que o primeiro apresenta uma resistência praticamente similar enquanto o segundo, apresenta uma resistência 25.5% menor que a obtida pela mistura comparativa.

Os traços EV 0.49 e EVC 0.49 continuaram a manter, praticamente, o mesmo nível de resistência do traço referência R 0.827.

Aos 91 dias, a evolução da resistência torna-se mais lenta, porém proporcional ao apresentado aos 07 e 28 dias, conforme podemos observar no gráfico da figura 4.6, sendo exceção o traço referência R 0.40 e os traços EV 0.49 e EVC 0.49.

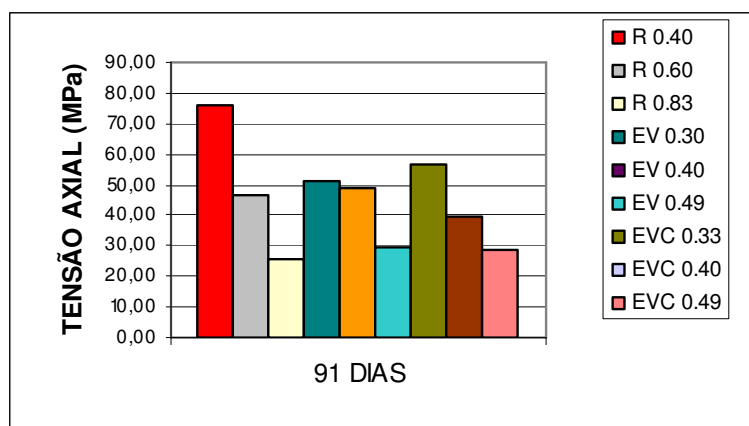


Figura 4.6 - RCA das misturas aos 91 dias.

As resistências apresentadas pelas misturas EV 0.30 e EVC 0.33 foram em média 71.25% da resistência do traço R 0.40, enquanto que em relação ao referência R 0.60, a mistura EV 0.40 continuou apresentando resistência aproximadamente igual, e a mistura EVC 0.40 atingiu 85% do resultado apresentado pelo comparativo.

Já as misturas EV 0.49 e EVC 0.49 apresentaram ambas, uma resistência média ligeiramente superior ao obtido pelo referência R 0.83.

Aos 300 dias, as variações de resistência apresentadas pelas misturas em relação aos seus traços referências foram praticamente as mesmas variações apre-

sentadas aos 91 dias, ou seja, o ganho de resistência entre estas idades tornou-se linearmente uniforme, conforme apresentado pelo gráfico da figura 4.7.

As misturas EV 0.30 e EVC 0.33 chegaram a 68% e 78% da resistência obtida pela mistura referência R 0.40, praticamente o mesmo apresentado aos 91 dias.

Em relação ao referência R 0.60, a mistura EV 0.40 praticamente igualou-se em resistência e a mistura EVC 0.40 chegou a 82% em relação ao índice comparativo.

As misturas EV 0.49 e EVC 0.49 continuaram apresentando resultados levemente superiores ao traço referência 0.83.

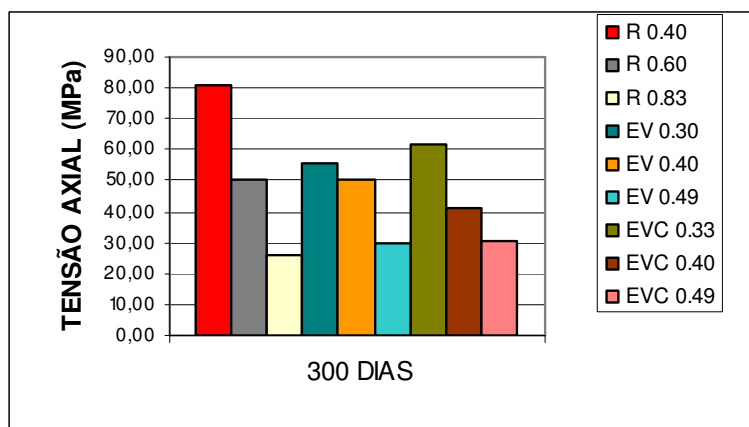


Figura 4.7 - RCA das misturas aos 300 dias.

#### 4.1.1. Evolução da resistência

O gráfico da figura 4.8 apresenta a evolução da resistência ao longo do tempo das misturas estudadas.

Na análise do gráfico, aos 28 dias, a mistura que apresenta um maior ganho de resistência em relação aos resultados obtidos aos 07 dias, é o traço EV 0.49, com um índice de 32%.

As misturas R 0.40, R 0.60, R 0.83 e EVC 0.49 obtiveram um ganho médio de resistência na ordem de 26%, e as misturas EV 0.30 e EV 0.40, em média, 23%, ou seja praticamente igualaram-se na evolução desta.

Já as misturas EVC 0.33 e EVC 0.40 apresentaram o menor ganho de resistências entre os traços estudados, 7% e 15% respectivamente.

Aos 07 dias, as misturas R 0.40 e EVC 0.33 ultrapassaram a resistência de 50 MPa.

Este reduzido ganho de resistência entre 07 e 28 dias, para as misturas em que substituiu-se parcialmente o cimento por cinza volante e escória resulta do lento desenvolvimento das reações de hidratação, conforme descrito no item 2.1.

Papadakis (1999) *apud* GOMES (2003), relata em estudos sobre a atividade da cinza volante de baixo teor de cálcio, que o início da atividade desta ocorre entre 2 e 3 semanas após a mistura, o que reforça este baixo incremento de resistência as primeiras idades. Da mesma forma, Isaia (1992) descreve a influencia das cinzas volantes no concreto endurecido, nos quais as reações pozolânicas fixam o hidróxido de cálcio, aumentando a resistência a longo prazo, havendo um crescimento mais lento desta, com uma maior sensibilidade ao teor de umidade nas idades iniciais.

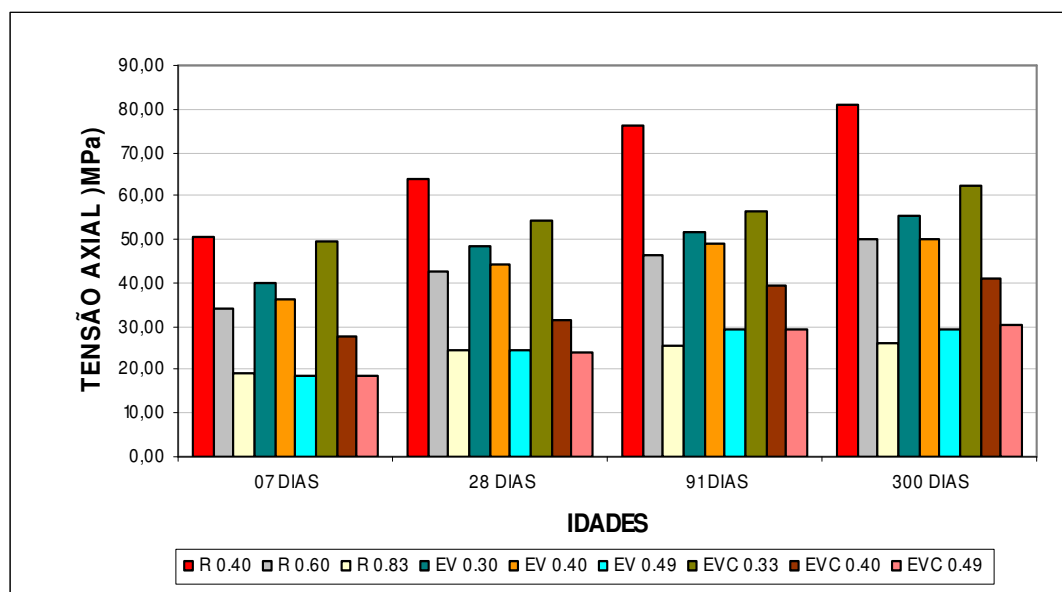


Figura 4.8 - Evolução da RCA das misturas dos 07 aos 28 dias.

Assim como para a cinza volante, a hidratação da escória também é lenta, pois possui baixa velocidade de hidratação devido à baixa solubilidade em água, dificultando a dissolução da sílica, resultando numa reação continuada por longo tempo. Conforme Neville (1997), as misturas de cimento e escórias contêm mais sílica que o cimento puro, e o resultado de hidratação é uma quantidade maior de C-

S-H. Isto pode ser observado no incremento de resistência obtido nas idades avançadas.

Analisando os ganhos de resistência acumulados aos 300 dias, podemos observar a equivalência entre as misturas R 0.40, EV 0.49 e EVC 0.49, que resultou numa média de 60%. As misturas R 0.60 e EVC 0.40 obtiveram em média 48%, e as misturas R 0.83, EV 0.30 e EV 0.40, 37.5%. O menor ganho de resistência acumulado aos 300 dias foi apresentado pelo traço EVC 0.33, resultando em 23% em média.

Além dos traços referências R 0.40, R 0.60, as misturas EV 0.30, EV 0.40 e EVC 0.33 ultrapassaram a resistência de 50 MPa aos 300 dias.

Em relação às misturas referências, a maioria dos traços apresentou similaridade na evolução da resistência. Aos 07 dias a mistura EVC 0.33 apresentava resistência praticamente igual ao R 0.40, reduzindo esta ao longo do tempo, sendo 23% menor aos 300 dias. A mistura EV 0.40 praticamente igualou-se nos índices em relação ao R 0.60, apresentando-se ligeiramente superior aos 28 e 91 dias, mas com os mesmos 50 MPa aos 300 dias, porém a mistura EVC 0.40 foi em média, 20% inferior em todas as idades. Aos 07 e 28 dias os traços EV 0.49 e EVC 0.49 demonstravam os mesmos obtidos pelo R 0.83, no entanto levemente superiores, em torno de 12%, aos 91 e 300 dias.

Na correlação entre as misturas com adições minerais (EV) e as misturas com adição mineral e cal hidratada (EVC), pode-se observar que o traço EV 0.49 apresentou as mesmas resistências que o EVC 0.49 para todas as idades. Já a mistura EVC 0.33 foi superior ao EV 0.30, principalmente nas idades iniciais (em torno de 26%), diminuindo a diferença entre suas resistências ao longo do tempo, chegando a 11% aos 300 dias. O mesmo ocorreu entre as misturas EV 0.40 e EVC 0.40, no qual a primeira apresentou resistência superior em relação a segunda em todas as idades, porém nas idades iniciais esta foi da ordem de 32%, com um leve aumento aos 28 dias, reduzindo-se gradualmente ao longo do tempo, estando 21% superior aos 300 dias.

Cabe ressaltar que, para as misturas sem incorporação de cal, a resistência teve um incremento maior até os 28 dias, reduzindo-se este drasticamente a partir desta idade. Observou-se que à medida que aumentou a relação  $w/mc$ , aumentou o incremento de resistência para estas misturas, devido à maior disponibilidade de água para as reações de hidratação.

Em relação às misturas com adição de cal, a evolução da resistência demonstrou-se gradual. A mistura EVC 0.33 apresentou índices médios de 7% em cada intervalo de idades, ou seja, entre 07-28, 28-91 e 91-300 dias. A mistura EVC 0.40 apresentou evolução maior até os 91 dias, 17.5% em média para cada intervalo de idade, reduzindo para 9% entre 91 e 300 dias. O mesmo acontece para a mistura EVC 0.49, porém com um incremento muito maior que os demais traços entre 07 e 28 dias, em torno de 33%, reduzindo-se gradualmente aos 91 dias e abruptamente aos 300 dias.

#### 4.1.2. Eficiência do uso de cal hidratada

Como visto anteriormente, a cal hidratada constitui-se num ativador natural da escória de alto-forno. Observando a figura 2.2 (página 40) nota-se que a contribuição de escória acontece principalmente, a partir dos 3 dias de idade. A adição de cal hidratada acelera as reações, em consequência da maior disponibilidade de hidróxido de cálcio, diminuindo os tempos de início e fim de pega. De acordo com Brizola (2007), com a adição de até 0.5% de cal hidratada, os tempos de início e fim de pega permanecem iguais aos do cimento Portland, sendo que, a partir deste valor a diminuição é mais acentuada, estabilizando-se quando atingido 5% ou mais.

A eficiência do uso de cal hidratada como adição aos traços com substituição parcial de cimento estudados nesta pesquisa em relação às misturas com adições minerais é apresentada na tabela 4.1.

Segundo Heikal et al (2000) *apud* DAL RI (2002), a aceleração das reações de hidratação ocorre devido ao efeito físico da cal, no qual a finura do material funciona como um fíler, e ao efeito químico, devido à reação entre a cal e as pozolanas, formando C-S-H secundário, aumentando a resistência. Como mencionado no item 3.1.1, as misturas com adição de cal hidratada apresentaram resistências superiores ou similares às misturas sem cal. Nota-se, por exemplo, que aos 07 dias, a mistura EVC 0.33 apresenta resistência 24% superior à mistura EV 0.30, e mantém a média de 11% sobre esta nas idades seguintes.



Tabela 4.1 - Índice de eficiência do uso de cal na RCA

<b>MISTURA</b>	<b>07 DIAS</b>	<b>28 DIAS</b>	<b>91 DIAS</b>	<b>300 DIAS</b>
EV 0.302	1.00	1.00	1.00	1.00
EVC 0.331	1.24	1.12	1.10	1.12
EV 0.402	1.00	1.00	1.00	1.00
EVC 0.402	0.75	0.71	0.81	0.83
EV 0.491	1.00	1.00	1.00	1.00
EVC 0.491	1.02	0.97	0.99	1.02

Para as relações a/mc 0.40 e 0.49, o uso de cal pouco contribuiu no incremento de resistência, apresentando-se igual ou ligeiramente inferior às misturas sem adição de cal nas primeiras idades (07 e 28 dias), porém ao longo do tempo esta contribuição tem um pequeno acréscimo.

Comparando as misturas com cal hidratada incorporada com as misturas referências, na primeira idade (07 dias), nota-se uma igualdade de resistência entre ambas.

De suas pesquisas, Brizola (2007) ressalta que as misturas com cal resultaram em maior consumo de aditivo para homogeneizar a mistura devido a sua elevada finura, e que parte deste aumento de resistência pode ser devido a melhor dispersão das partículas e diminuição da tensão superficial da água ocasionada pelo aditivo superplastificante. Porém, acrescenta-se a esta observação de Brizola, que o uso de superplastificante justificou-se também devido a grande quantidade de finos da pasta através da substituição parcial do cimento por escória e cinza volante, materiais estes com finura blaine similar.

#### **4.2. Resistência à tração por compressão diametral - RCD**

Do mesmo modo utilizado para os ensaios de resistência a compressão axial, para a análise dos resultados obtidos pelo ensaio de resistência a tração por compressão diametral foram considerados as médias apenas dos valores situados dentro da margem de desvio máximo menor que 10%, ou seja, os produtos da subtração do maior valor com o menor dividido pela média dos valores devem ser menores que 10%.

O gráfico da figura 4.9 apresenta os resultados de resistência à compressão diametral das misturas de referências.

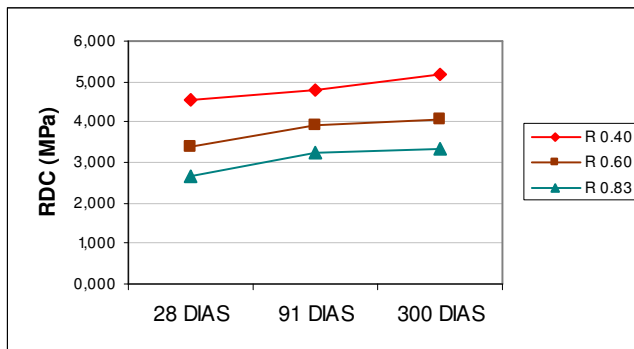


Figura 4.9 - RCD da mistura referência dos 28 aos 300 dias.

Através de uma análise, podemos observar para as misturas R 0.40, R 0.60 e R 0.83 um incremento médio de 15%, 19.65% e 25.15% entre 28 e 300 dias.

Observa-se, para ambos os traços, um aumento lento e gradual do incremento de resistência à compressão diametral entre as idades apresentadas.

Para as misturas com 90% de substituição do cimento por escória e cinza volante, os resultados obtidos estão representados no gráfico da figura 4.10.

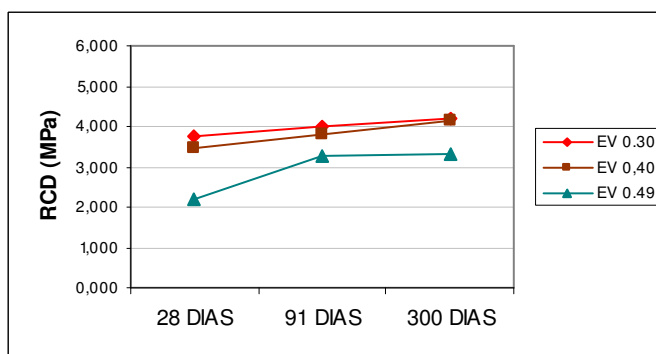


Figura 4.10 - RCD das misturas com adições minerais dos 28 aos 300 dias.

A mistura EV 0.30, assim como a mistura EV 0.40 apresentaram um aumento médio na resistência à compressão diametral de 12% e 20.5%, sendo a resistência final (300 dias) praticamente igual para ambas as misturas.

Já a mistura EV 0.49, apresentou um incremento médio de 51%, sendo que 97.5% deste aumento ocorreu entre 28 e 91 dias.

Para os traços com substituição parcial do cimento por cinza volante e escória com adição de cal hidratada, os resultados obtidos para resistência a compressão diametral são os representados na figura 4.11.

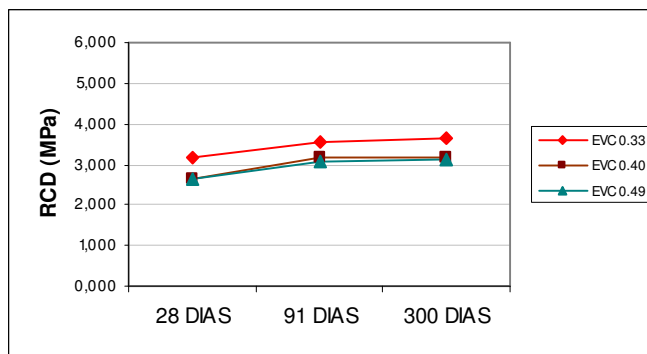


Figura 4.11 - RCD das misturas com adições minerais e cal dos 28 aos 300 dias.

A mistura EVC 0.33, apresenta uma evolução média de 14% entre os 28 e os 300 dias.

Os traços EVC 0.40 e EVC 0.49 obtiveram ambos, um incremento médio de 18%, apresentando resultados praticamente iguais nas idades ensaiadas.

Pode-se observar que o aumento da resistência à compressão devido ao efeito microfíler não corresponde a um aumento proporcional na resistência à tração., porém, observando os gráfico de resistência a compressão axial e os de compressão diametral, nota-se uma certa similaridade das linhas em relação à evolução destas. Em relação a valores absolutos de resistência, o aumento destas em relação à tração somente ocorrerá quando ocorrerem as reações pozolânicas das adições. Mehta (1994), em investigações realizadas, observou que para CADs contendo cinza volante, a razão entre tração e compressão apresenta-se maior quando comparado aos CAD sem cinzas, cuja razão situou-se entre 7% e 8%.

Analisando o gráfico da figura 4.12, observamos os índices de resistência à compressão diametral das misturas estudadas aos 28 dias de idade.

Nota-se que, em relação ao traço referência R 0.40, as misturas EV 0.30 e EVC 0.33 apresentaram, em média, 83% e 70% respectivamente, da resistência do mesmo.

A mistura EV 0.40 praticamente igualou-se ao de referência R 0.60, enquanto a mistura EVC 0.40 ficou 22% abaixo. Já o traço EVC 0.49, também igualou-se em

resistência com o referência R 0.83, e o traço EV 0.49 atingiu 82.5% da resistência do mesmo.

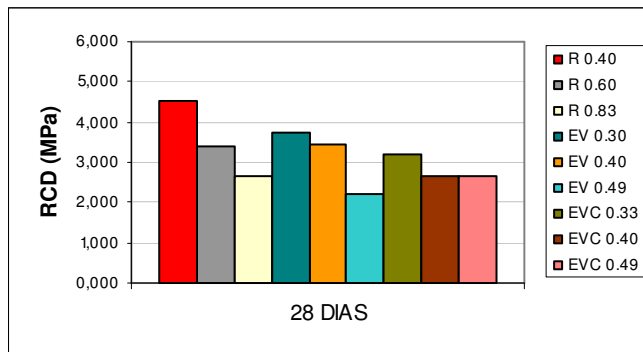


Figura 4.12 - RCD das misturas aos 28 dias.

Aos 91 dias, a proporcionalidade dos índices se manteve para os traços EV 0.30 e EVC 0.33 em relação ao referência R 0.40. Isto pode ser observado no gráfico da figura 4.13.

A mistura EV 0.40 e EVC 0.40, mantiveram as mesmas proporcionalidades apresentadas aos 28 dias em relação ao referência R 0.60.

Em relação ao referência R 0.83, a mistura EV 0.49 obteve um ganho significativo na resistência entre 28 e 91 dias, igualando-se ao mesmo, enquanto que a mistura EVC 0.49, apresentou resultado praticamente similar.

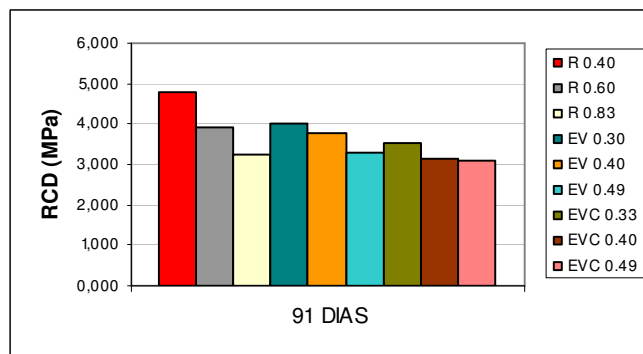


Figura 4.13 - RCD das misturas aos 91 dias.

No gráfico da figura 4.14, observamos os resultados das resistências a compressão diametral das misturas estudadas para a idade de 300 dias.

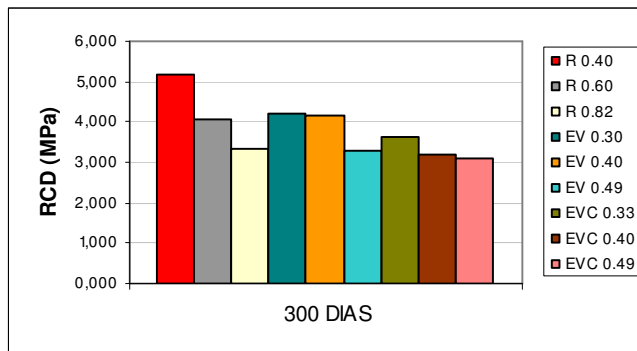


Figura 4.14 - RCD das misturas aos 300 dias.

Em relação ao traço de referência R 0.40, as misturas EV 0.30 e EVC 0.33 mantiveram a tendência de crescimento apresentado aos 28 e 91 dias .

A mistura EV 0.40 igualou-se ao referência R 0.60, enquanto que a mistura EVC 0.40 ficou 22% inferior. Do mesmo modo, o traço EV 0.49 e EVC 0.49 praticamente igualaram-se ao índice do referência R 0.83.

#### 4.2.1. Evolução da resistência à tração por compressão diametral

O gráfico apresentado na figura 4.15 reproduz os resultados da evolução da resistência a tração por compressão diametral das misturas estudadas entre 28 e 300 dias de idade.

Podemos observar para as misturas R 0.60, EV 0.40 e EVC 0.40, um incremento médio na resistência de 19%, entre o primeiro ensaio (28 dias) e o último (300) dias. Os traços R 0.40, EV 0.30 e EVC 0.33 obtiveram um aumento de 13.65% em média. Nota-se que a igualdade de acréscimo de resistência ocorreu com os traços referência e seus comparativos, com exceção do R 0.83, cujo incremento foi de 25%, enquanto que a mistura EV 0.49 apresentou um índice médio de 50,5%, e o EVC 0.49 de apenas 17,5% em média.

Salienta-se que, com exceção dos traços R 0.40, EV 0.30 e EV 0.40, todos os demais tiveram a maior parte de acréscimo de resistência a compressão diametral entre os 28 e 91 dias de idade, variando esta parcela entre 73% e 98% da resistência total apresentada.

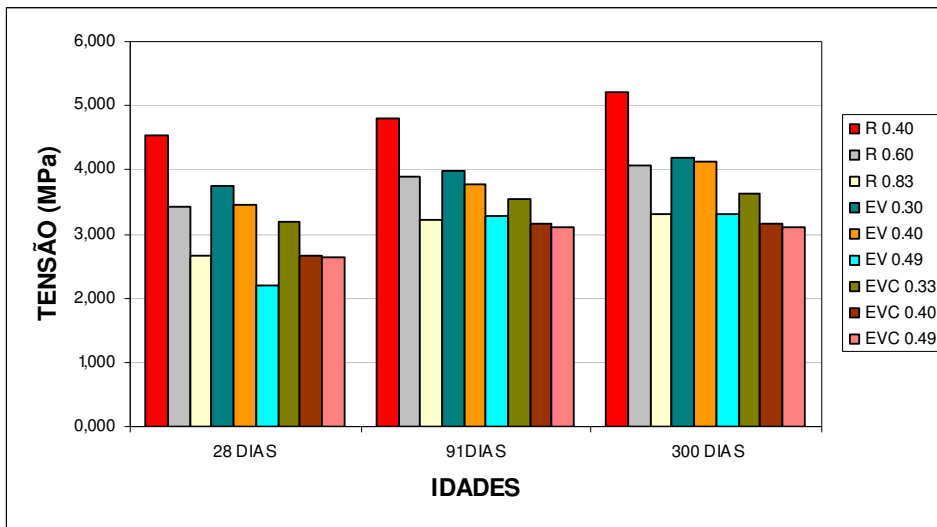


Figura 4.15 - Evolução da RCD das misturas dos 28 aos 300 dias.

Em relação à mistura referência, o traço EV 0.30 e EVC 0.33 apresentaram-se inferior ao R 0.40 na ordem de 20% e 30% respectivamente, em todas as idades estudadas. A mistura EV 0.40 praticamente igualou-se ao R 0.60, enquanto que o EVC 0.40 manteve-se em média 20% inferior. Já a mistura EV 0.49 apresentou-se 15% inferior ao R 0.83 aos 28 dias, reduzindo esta diferença drasticamente, apresentando aos 91 dias valor similar ao obtido pelo referência aos 300 dias, mantendo-se estável até a última idade ensaiada, enquanto que a mistura EVC 0.49 apresentou resultados idênticos ao referencia em todas as idades.

Comparando-se as misturas com adições minerais, com e sem adição de cal hidratada, observou-se que o traço EV 0.30 e EV 0.40 resultaram superiores aos traços EVC 0.33 e EVC 0.40, na ordem de 14% e 20% respectivamente, em todas as idades ensaiadas. Porém a mistura EVC 0.49 mostrou-se superior ao EV 0.49 aos 28 dias, num índice de 20%, invertendo esta relação aos 91 e 300 dias, quando a mistura EV 0.49 apresentou-se ligeiramente superior ao EVC 0.49.

Pode-se observar, analisando estes resultados, que enquanto a resistência a compressão e a resistência a tração tem uma melhora devido a fatores que causam uma diminuição na porosidade da matriz e da zona de transição, a magnitude do aumento da resistência a tração do concreto permanece pequena, a não ser que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação que compreendem a zona de transição seja melhorada ao mesmo tempo, sendo isto buscado através da incorpora-

ção de adições pozolânicas, que através de suas reações químicas reduzem a concentração de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na interface pasta-agregado.

#### 4.2.2. Eficiência do uso da cal hidratada

A eficiência de adição de cal hidratada em relação à resistência a tração por compressão diametral nas misturas com substituição de cimento por escória e cinza volante é demonstrada na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Índice de eficiência do uso de cal na RCD

<b>MISTURA</b>	<b>28 DIAS</b>	<b>91 DIAS</b>	<b>300 DIAS</b>
EV 0.30	1.00	1.00	1.00
EVC 0.33	0.85	0.89	0.86
EV 0.40	1.00	1.00	1.00
EVC 0.40	0.77	0.84	0.76
EV 0.49	1.00	1.00	1.00
EVC 0.49	1.20	0.94	0.94

Pode-se notar que o índice de resistência nas misturas com cal hidratada manteve-se relativamente estável entre o primeiro ensaio, aos 28 dias e o último, realizado aos 300 dias, para cada mistura individualmente. Observa-se que todos os traços, com exceção do EVC 0.49 aos 07 dias, mantiveram-se abaixo do índice das misturas sem adição de cal. Visto que a adição de cal visa aumentar a resistência a compressão das misturas através da ativação da escória e o aumento das reações pozolânicas pela maior disponibilidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , formando C-S-H secundário, assim como contribuindo através da efeito fíler, refinando os poros, sua incorporação às misturas pouco influencia na resistência a tração, apresentando-se esta, em média, inferior a 10% dos resultados obtidos à compressão. Desta forma, conclui-se que, em relação à resistência a tração por compressão diametral, a adição de cal hidratada pouco ou nada contribui no incremento desta resistência.

### 4.3. Módulo de elasticidade

Assim como determinado para os dois ensaios analisados anteriormente, para a análise dos resultados obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade considerou-se apenas as médias dos valores situados dentro da margem de desvio máximo inferior a 10% ou seja, os produtos da subtração do maior valor com o menor dividido pela média dos valores devem ser menores que 10%.

O gráfico da figura 4.16 apresenta os resultados obtidos das misturas referências. Como observado, o traço R 0.40 obteve um aumento pouco expressivo entre 07 e 300 dias. Já o traço R 0.60 obteve um significativo incremento de 26.5% em média entre o primeiro e o último ensaio. Contudo, o traço R 0.83 um aumento insignificante entre as idades ensaiadas, o que pode ser explicado pela maior relação a/mc, visto que pastas com alta porosidade, decido a maior quantidade de água adicionada, apresentam baixos valores para o módulo de elasticidade.

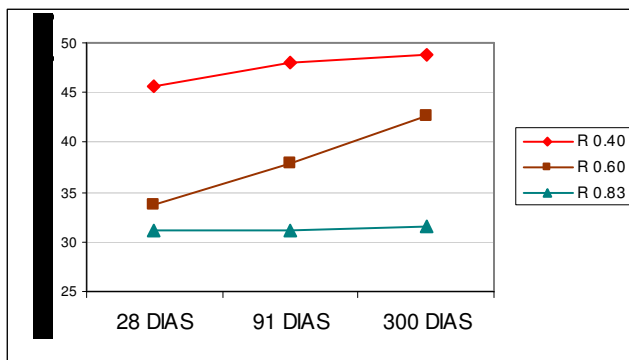


Figura 4.16 - Eci da mistura referência dos 28 aos 300 dias.

Porém, para as misturas com 90% do cimento substituído por escória e cinza volante, a variação do módulo de elasticidade apresentou-se com uma variabilidade entre os primeiros e últimos ensaios mais equilibrada, como podemos observar no gráfico da figura 4.17.

Vemos que a mistura EV 0.30 obteve um ganho médio de 8% entre as idades inicial e final, enquanto que a mistura EV 0.40 e EV 0.49 apresentaram um incremento médio de 5%.



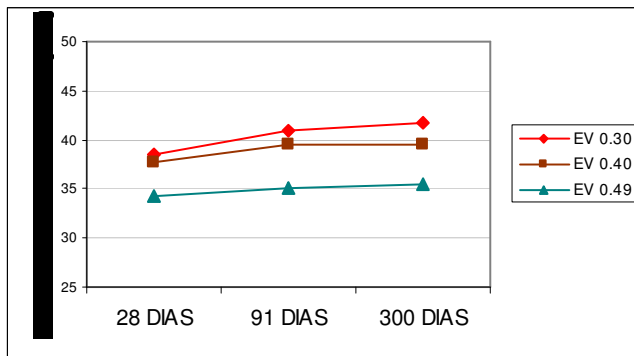


Figura 4.17- Eci das misturas com adições minerais dos 28 aos 300 dias.

Para as misturas com substituição parcial do cimento por cinza volante e escória, com adição de cal hidratada, obteve-se os resultados apresentados no gráfico da figura 4.18.

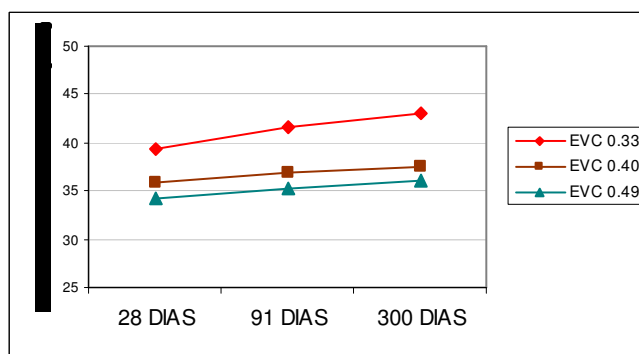


Figura 4.18 - Eci das misturas com adições minerais e cal dos 28 aos 300 dias.

Podemos observar que estas misturas mantiveram as taxas de aumento praticamente iguais às taxas apresentadas pelas misturas sem adição de cal.

Podemos observar a relação de igualdade entre os traços que apresentam substituição parcial do cimento por escória e cinza volante, com e sem adição de cal hidratada, em relação ao incremento do módulo de elasticidade entre 28 e 300 dias.

É interessante observar que, ao compararmos os gráficos de módulo com os de resistência à compressão axial, nota-se uma similaridade em relação ao desenvolvimento destas em relação à evolução destas propriedades. Porém, em relação a índices de resistência, e como afirma Neville (1997), o crescimento do módulo é progressivamente menor que o crescimento da resistência à compressão. Almeida

(2005) já afirmava que o módulo de elasticidade ocorre de modo não proporcional à elevação da resistência à compressão.

Através do gráfico representado na figura 4.19 podemos analisar os resultados obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias das misturas estudadas.

Conforme apresentado, em relação ao traço de referência R 0.40, a mistura EV 0.30 obteve 90.5%, em média do valor do módulo deste, enquanto que a mistura EVC 0.33 atingiu 86%. Em relação ao referência R 0.60, a mistura EV 0.40 e EVC 0.40 apresentaram módulos superiores ao de referência, na ordem de 12% e 6.5% respectivamente. As misturas EV 0.49 e EVC 0.49 apresentaram resultados, em média, 11% acima do módulo obtido pelo referência R 0.827. Nota-se claramente uma melhora do módulo nos traços EV e EVC, comparado aos traços de referência.

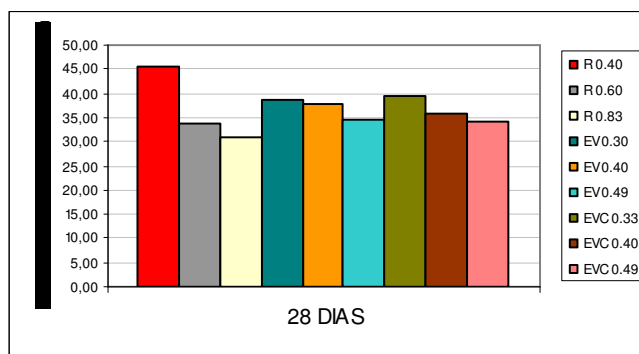


Figura 4.19- Eci das misturas aos 28 dias.

Para os 91 dias, a mistura EV 0.30 apresentou uma pequena redução em relação aos 28 dias, em relação ao módulo do traço de referência R 0.40, enquanto que a mistura EVC 0.33 manteve a média resultante aos 28 dias, conforme demonstrado no gráfico da figura 4.20.

As misturas EV 0.40 e EVC 0.40 também apresentaram uma redução no incremento do módulo, que se apresentava superior ao traço de referência, em relação à idade de 28 dias. Em relação ao traço de referência R 0.60, a mistura EV 0.40 continuou ligeiramente acima deste, enquanto que a mistura EVC 0.40 ficou pouco abaixo do mesmo, podendo considerar-se similares os resultados para estas misturas nesta idade. Já em relação ao referência R 0.83, as misturas EV 0.49 e EVC 0.49 apresentaram, ambas, resultados 13%, em média, acima do traço comparativo.

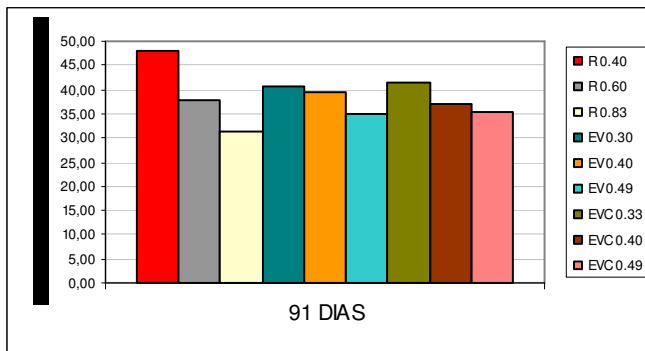


Figura 4.20 - Eci das misturas aos 91 dias

No gráfico da figura 4.21 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios aos 300 dias, e como pode-se observar, as misturas EV 0.30 e EVC 0.33 mantiveram os índices médios de incremento do módulo apresentados aos 91 dias, em relação ao referência R 0.40.

Porém, em relação ao referência R 0.60, as misturas EV 0.40 e EVC 0.40 apresentaram um incremento de módulo inferior aos obtido aos 91 dias, sendo para os 300 dias, de 92.5% e 88% respectivamente. Já os traços EV 0.49 e EVC 0.49 continuaram apresentando incrementos de módulo superior ao referência R 0.83, de mesma ordem obtida aos 91 dias.

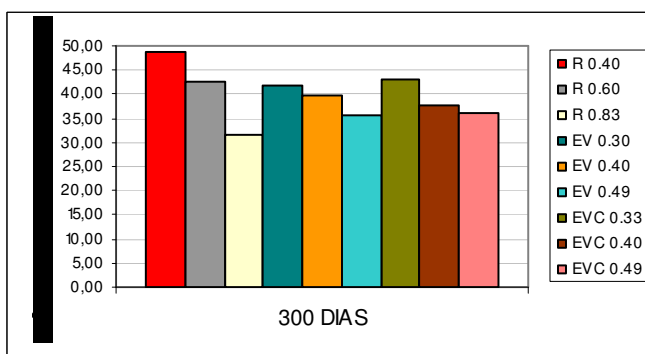


Figura 4.21 - Eci das misturas aos 300 dias.

Verificando estes resultados, pode-se comprovar a influência do módulo de deformação do agregado sobre o módulo de elasticidade das misturas, isto devido à natureza bifásica do concreto. A aderência entre estas duas fases (pasta-agregado) torna-se importante, podendo influenciar quando esta for muito elevado, como é o caso dos CAD, no qual busca-se melhorar as características das pastas através do

refinamento dos poros, e reduzindo-se a zona de transição com o uso das adições minerais, porém a melhora na zona de transição causada por estas não aumentam o módulo na mesma razão da resistência, devido ao fator limitante do agregado. Como apresentado por Isaia (1995), comprova-se que as adições minerais pouco influenciaram diretamente no módulo das misturas, e que este somente será afetado à medida que as pozolanas influenciam na resistência a compressão.

#### 4.3.1. Evolução do módulo de elasticidade

O gráfico da figura 4.22 apresenta os resultados da evolução do módulo de elasticidade das misturas estudadas entre as idades de ensaios de 28 e 300 dias.

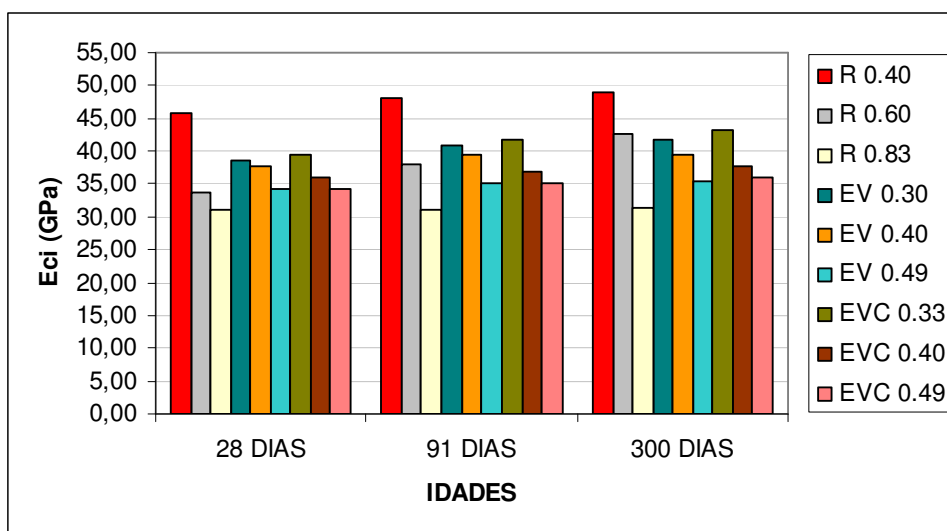


Figura 4.22 - Evolução do Eci das misturas dos 28 aos 300 dias.

Como podemos observar, a variação dos resultados de módulo de elasticidade apresentados pelas misturas entre 28 e 300 dias, tanto individualmente, como em comparação entre si, são muito baixas.

Analisando o gráfico, nota-se que as misturas R 0.40 e EV 0.30 obtiveram um incremento no resultado aos 300 dias, em relação aos 28 dias, de 7% em média. Já as misturas EV 0.40, EVC 0.40 e EVC 0.49, apresentaram 5% em média no mesmo período e a mistura EVC 0.33 chegou a 9%, sendo esta a maior variabilidade encontrada entre as misturas com substituição parcial de cimento por escória e cinza vo-

lante, com ou sem adição de cal, sendo a menor, a obtida com a mistura EV 0.49, 3.32% em média.

Em relação às misturas referências, tanto a mistura EV 0.30 quanto a EVC 0.33 apresentaram resultados significativamente inferiores ao R 0.40 em todas as idades. Já as misturas EV 0.40 e EVC 0.40 apresentaram-se superior aos 28 dias, praticamente igualando-se aos 91, sendo inferiores aos 300 dias, o que demonstra uma gradual redução do valor do módulo ao longo do tempo. Para o R 0.83, as misturas EV 0.49 e EVC 0.49 foram superiores em todas as idades, mantendo o mesmo índice de incremento.

Comparando os resultados de módulo de elasticidade obtidos entre as misturas com adições minerais com e sem adição de cal hidratada, podemos concluir que os dados apresentados pela mistura EV 0.30 praticamente igualam-se aos obtidos pela mistura EVC 0.33 em todas as idades estudadas, o mesmo ocorrendo para as misturas EV 0.49 e EVC 0.49. Porém a mistura EV 0.40 manteve-se ligeiramente superior ao EVC 0.40 em todas as idades.

Podemos observar como visto na bibliografia revisada, que as adições minerais pouco influem diretamente no resultado do módulo de elasticidade das misturas, sendo esta influenciada, sim, pelos agregados que as compõem.

O que ocorre é um acréscimo do módulo nas primeiras idades, principalmente para as misturas com maior relação a/mc, que devido a maior disponibilidade de água, facilita um desenvolvimento mais rápido das reações de hidratação, além do refinamento dos poros conseqüentes do uso da escória e cinza volante, resultando numa pasta com maior resistência, similar à apresentada pelo agregado graúdo.

#### **4.4. Retração total**

Para a análise dos resultados obtidos pelos ensaios de retração total considerou-se as médias dos valores obtidos através das leituras realizadas com o uso de relógio comparador. Utilizaram-se 03 CPs para cada idade ensaiada, para cada mistura, e foram feitas 03 leituras para cada CP. Considerou-se a média destas leituras, desde que dentro do desvio máximo inferior a 10%, ou seja, os produtos da subtração do maior valor com o menor dividido pela média dos valores devem ser menores

que 10%. Os resultados apresentados representam a retração total em percentagem relativa à suas dimensões iniciais, medidas aos 07 dias de idade.

O gráfico da figura 4.23 demonstra a retração das misturas referências R 0.40, R 0.60 e R 0.83.

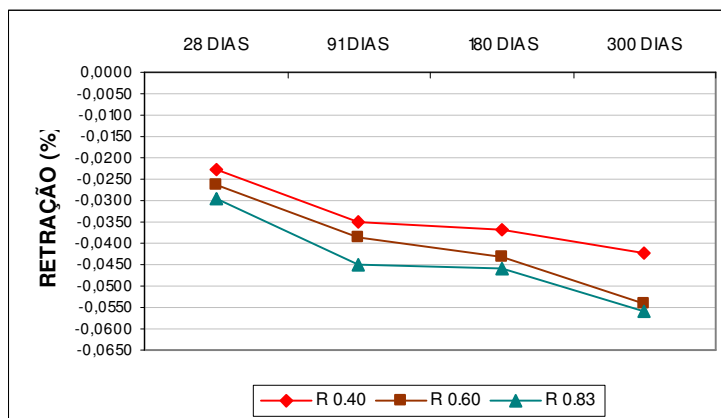


Figura 4.23 - Retração das misturas de referência dos 28 aos 300 dias.

Nota-se para estas misturas uma retração total proporcional à relação a/c utilizada, ou seja, quanto maior a relação a/c, maior a retração apresentada.

Também podemos observar uma similaridade entre as linhas de retração das misturas. Há uma grande evolução na retração entre 28 e 91 dias, assim como entre 180 e 300 dias. No intervalo dos 91 aos 180 dias a retração torna-se quase estacionária.

É importante salientar que as leituras transcorreram entre outubro de 2006 a outubro de 2007, sendo que as leituras aos 180 dias, para todos os traços foram anteriores a junho de 2007, ou seja, realizadas durante o verão e outono, apesar de estarem os corpos-de-prova abrigados de intempéries.

Para as misturas com substituição parcial de cimento por escória e cinza volante, os resultados são os apresentados no gráfico da figura 4.24.

Nota-se uma retração inicial muito próxima entre as misturas EV 0.30 e EV 0.49. Estas se desenvolvem rapidamente até os 91 dias, quando tornam-se mais estáveis, até os 180 dias. A partir desta idade, a mistura EV 0.30 torna a desenvolver uma retração acentuada em relação à idade inicial, enquanto que a mistura EV 0.49 continua com um acréscimo lento e contínuo, até os 300 dias.

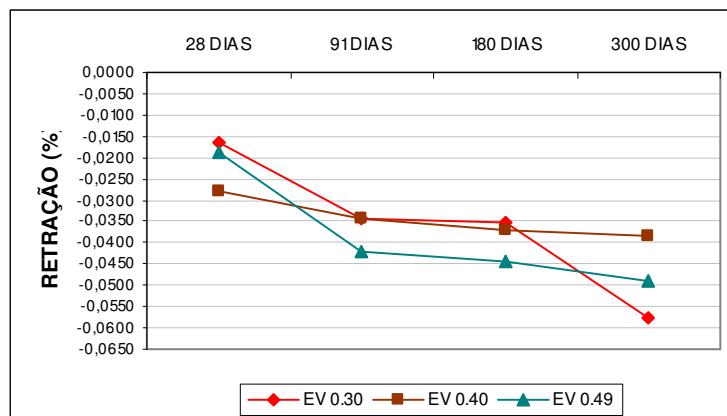


Figura 4.24 - Retração das misturas com adições minerais dos 28 aos 300 dias.

Já a mistura EV 0.40 apresenta uma retração inicial maior em relação às outras duas misturas, e a desenvolve lenta e continuamente, com uma variação pequena em comparação à idade inicial.

Em relação às misturas que tiveram parte do cimento substituído por cinza volante e escória, com adição de cal hidratada, os resultados obtidos estão no gráfico da figura 4.25.

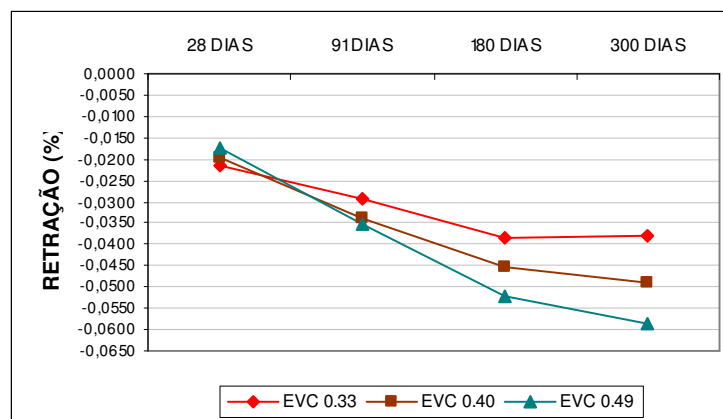


Figura 4.25 - Retração das misturas com adições minerais e cal dos 28 aos 300 dias.

Através da análise do gráfico, observamos que ambas as misturas tiveram retrações iniciais (28 dias) muito próximas, em relação a suas dimensões originais. Esta retração desenvolve-se gradativamente até os 180 dias, quando as misturas demonstram um distanciamento entre si. Entre os 180 e 300 dias a retração torna-se praticamente estável para o traço EVC 0.33, correspondendo a 0,38‰ aos 300 dias,

enquanto que para as misturas EVC 0.40 e EVC 0.49 ela é contínua, porém mais suave, chegando aos 300 dias a 0.5‰ e 0.6 ‰ respectivamente.

Nota-se uma retração maior nas misturas com relação a/mc elevado, e conforme exposto por Neville (1997), isto deve-se ao fato de ser a relação a/mc que determina a quantidade de água evaporável na pasta de cimento, assim como a velocidade de deslocamento desta água para a superfície. Comprova-se também a afirmação de Brooks (1989), de que a retração da pasta de cimento hidratada é diretamente proporcional à relação a/mc, pois quanto maior esta maior a retração apresentada.

O gráfico da figura 4.26 apresenta os resultados de retração aos 28 dias para todas as misturas estudadas.

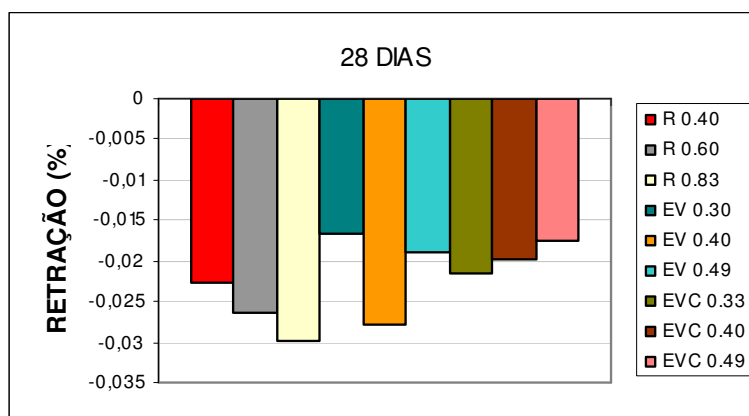


Figura 4.26 - Retração das misturas aos 28 dias.

Podemos observar que, em relação ao traço referência R 0.40, a mistura EV 0.30 apresentou uma retração 26.5% inferior, enquanto que a mistura EVC 0.33, manteve-se muito perto da retração obtida pelo traço referência. Já a mistura EV 0.40 apresentou uma retração levemente superior, e a mistura EVC 0.40, 25% menor em relação ao referência R 0.60. Em relação à mistura R 0.83, as misturas EV 0.49 e EVC 0.49 foram as que apresentaram os menores índices de retração, proporcionalmente em relação à mistura referência, sendo estes 36.5% e 41% inferiores, respectivamente.

Aos 91 dias (figura 4.27), o traço EV 0.30 apresentou uma retração maior, aproximando-se do traço R 0.40, porém ligeiramente inferior, enquanto que o traço



EVC 0.33 teve um índice de retração menor que o apresentado aos 28 dias, sendo este 17.5% abaixo do obtido pela referência.

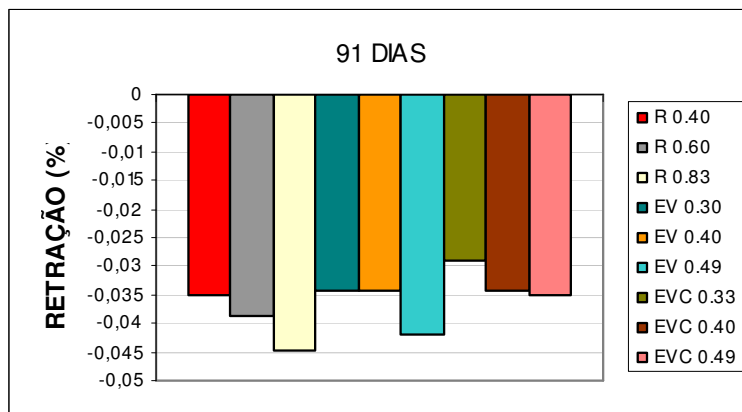


Figura 4.27 - Retração das misturas aos 91 dias.

Em relação ao referência R 0.60, a mistura EV 0.40 obteve uma retração inferior, enquanto que a mistura EVC 0.40 apresentou uma retração superior em comparação à apresentada aos 28 dias,

Porém as misturas EV 0.49 e EVC 0.49 apresentaram um incremento significativo na retração, em relação aos 28 dias. Na idade de 91 dias, EV 0.49 apresenta certa similaridade na retração com a apresentada pelo referência, enquanto que a mistura EVC 0.49 continua com uma retração muito menor em relação ao mesmo.

Aos 180 dias, a mistura EV 0.30 manteve o patamar apresentado aos 91 dias, enquanto que a mistura EVC 0.33 obteve uma retração pouco superior ao R 0.40. Já a mistura EVC 0.40, assim como o EVC 0.33, também superou em o referência R 0.60, enquanto que a mistura EV 0.40 manteve-se significativamente abaixo do mesmo. Em relação ao R 0.83, a mistura EV 0.49 atingiu o mesmo índice de retração apresentada pelo mesmo, porém a mistura EVC 0.49 o superou em aproximadamente 15%.

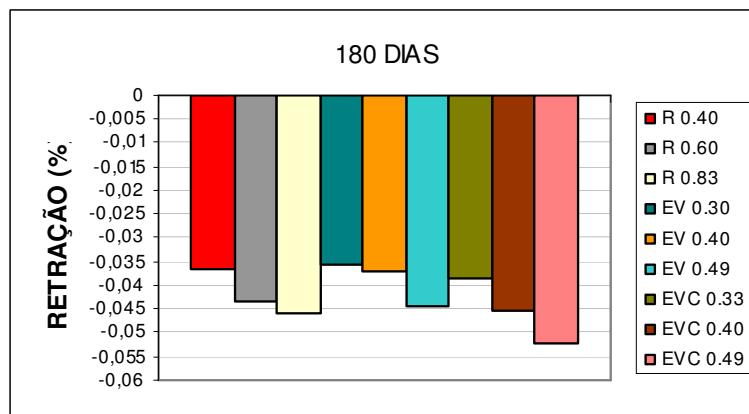


Figura 4.28 - Retração das misturas aos 180 dias.

O gráfico da figura 4.29 demonstra os resultados de retração obtidos aos 300 dias, e nele podemos observar um incremento de 37,5% na retração da mistura EV 0.30 em relação ao R 0.40, enquanto que a mistura EVC 0.33 manteve-se próximo, porém inferior ao mesmo.

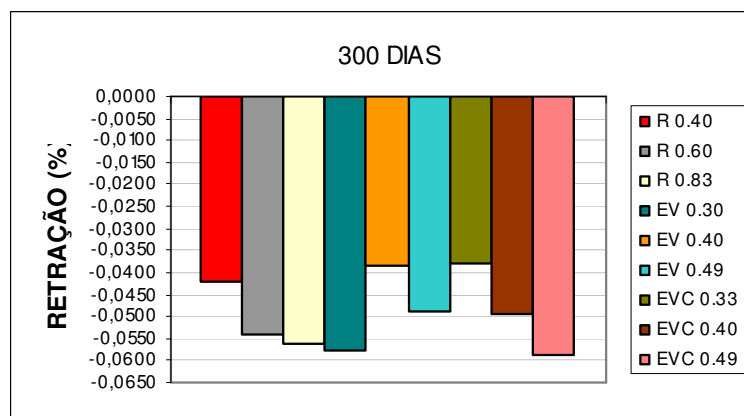


Figura 4.29 - Retração das misturas aos 300 dias.

As misturas EV 0.40 e EVC 0.40 apresentaram um recuo na taxa de evolução da retração em relação aos 180 dias, sendo a primeira muito inferior à retração apresentada pelo traço referência R 0.60.

Do mesmo modo, a mistura EV 0.49 também teve um recuo em relação aos 180 dias, mantendo-se relativamente abaixo da retração da mistura referência R 0.83 aos 300 dias, enquanto que a mistura EVC 0.49 apresentou resultado similar, no entanto um pouco acima do mesmo.

Através dos gráficos acima, que comparam as diferentes misturas nas diversas idades ensaiadas, observa-se uma maior retração nas primeiras idades devido à retração autógena, ou seja, uma redução volumétrica macroscópica dos materiais cimentícios que ocorre após o início de pega, ou conforme afirma Hasparik *et al.* (2005), uma redução do volume absoluto total que ocorre durante a hidratação do cimento, decorrente do fato de os volumes de hidratos formados serem menores que os volumes iniciais de cimento anidro e água, sendo mais freqüente e intenso quanto maior for o consumo de cimento, proporção de finos e relação a/mc.

#### 4.4.1. Evolução da retração total

O gráfico da figura 4.30 demonstra a evolução da retração total apresentada pelas misturas estudadas obtida pelos ensaios realizados entre 28 e 300 dias de idades.

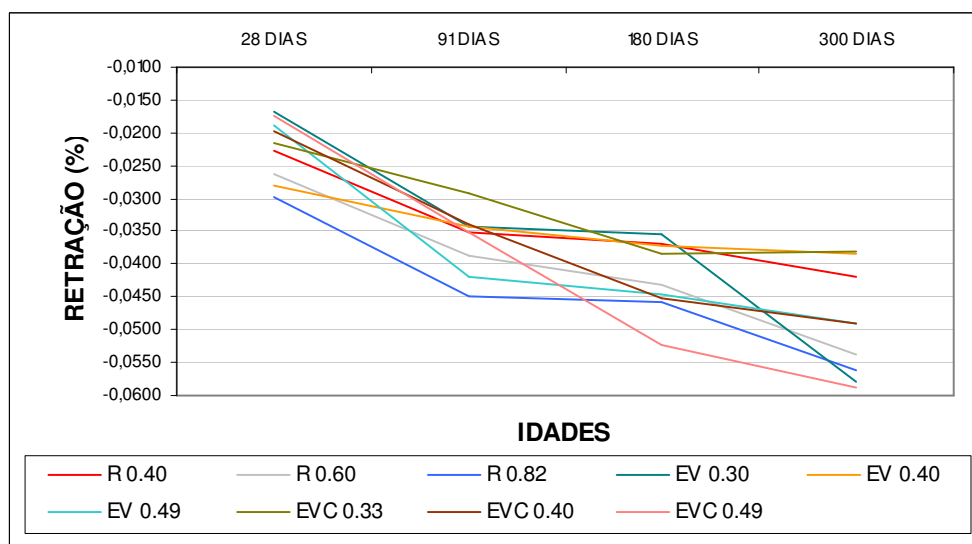


Figura 4.30 - Evolução da retração das misturas dos 28 aos 300 dias.

Relacionando-se as misturas com suas referências, podemos observar que com exceção das misturas EVC 0.33 e EV 0.40 que apresentaram retrações similares a estes, todas as demais misturas resultaram em retrações significativamente menores nas idades iniciais de ensaio, ou seja, aos 28 dias. Porém, aos 91 dias esta diferença começa a diminuir, aproximando-se dos valores das misturas referências,

sendo que a mistura EV 0.30 praticamente iguala-se ao R 0.40. Aos 180 dias, todas as misturas demonstram valores similares às misturas de referência, sendo exceção a mistura ECV 0.49, que apresenta retração superior ao R 0.83. Contudo aos 300 dias todos os traços apresentam retrações relativamente menores, sendo que a mistura EVC 0.49 iguala-se ao R 0.83 nesta idade, e o EV 0.30 supera significativamente o R 0.40.

Comparando os resultados de retração total obtidos entre as misturas com adições minerais com e sem incorporação de cal hidratada, podemos observar que as misturas EVC 0.33 e EV 0.30 apresentam uma evolução alternada, ou seja, em cada idade ensaiada um apresenta valor maior que o outro. Já para as misturas EV 0.40 e EVC 0.40, o primeiro demonstra uma retração maior aos 28 e 91 dias em relação ao segundo, invertendo-se estas posições para os 180 e 300 dias. O mesmo ocorre para as misturas EV 0.49 e EVC 0.49. Pode-se concluir que a retração inicial menor nas duas primeiras idades, para as misturas EVC 0.40 e EVC 0.49, seja em decorrência da adição de cal hidratada nas misturas, visto que esta retém água, liberando-a ao longo do tempo, promovendo a cura interna do concreto, enquanto que as misturas sem cal desenvolvem a retração gradualmente.

#### **4.5. Análise das misturas em igualdade de relação a/mc 0.400.**

Através dos resultados quantificados nos ensaios experimentais, e para uma melhor comparação entre ambos, realizou-se uma análise entre traços para igualdade de relação  $a/mc = 0.40$ . Para isto tomou-se os resultados obtidos nos experimentos para a mistura R 0.40, tido como referência, EV 0.40, com substituição parcial do cimento por cinza volante e escória em 90%, e EVC 0.40, com a mesma substituição, porém com adição de cal hidratada em 20% da massa de aglomerante. Para isto, compararam-se os traços em cada ensaio realizado – resistência à compressão axial (RCA), resistência à tração por compressão diametral (RCD), retração total e módulo de elasticidade.

#### 4.5.1. Resistência à compressão axial - RCA

Para a correlação entre as resistências unitárias à compressão e as relações  $a/mc = 0.4$ , ou seja, a relação mútua entre as duas variáveis envolvidas, utilizou-se equações logarítmicas, e os coeficientes de determinação  $r^2$  são apresentados na figura 4.31.

Analisando o gráfico desta figura, observa-se uma variação entre 07 e 300 dias de 60.85% para a mistura referência R 0.40, 37.47% para a mistura EV 0.40 e 49.82% para mistura EVC 0.40. Para a correlação entre os valores unitários de cada mistura utilizaram-se equações logarítmicas, e os coeficientes de determinação  $r^2$  demonstrados no gráfico apresentam-se muito próximos. A mistura EVC 0.40 apresenta o menor valor de determinação, devido à maior concentração de finos, pois este traço incorpora cal hidratada, porém com a mesma relação  $a/mc$  da mistura EV 0.40, disponibilizando menos água e tornando as reações, assim como a hidratação dos aglomerantes mais lentas, com conseqüente decréscimo da formação de CH, como constatado também por Isaia (1995).

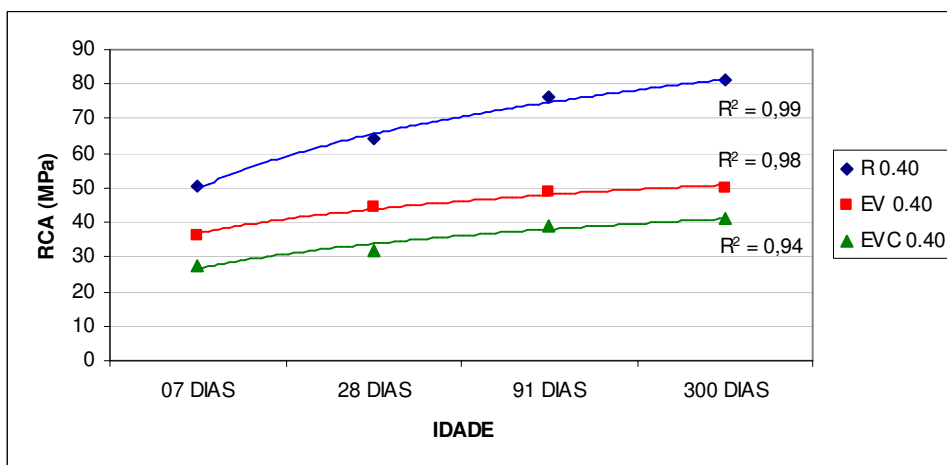


Figura 4.31 - Resistência à compressão axial em igualdade de relação  $a/mc$  0.4.

Aos 07 dias, as misturas EV 0.40 e EVC 0.40 apresentavam em média, respectivamente, 72% e 55% da resistência do traço referência R 0.40. Porém ao longo do tempo, observa-se que a mistura referência segue numa curva crescente até os 300 dias (última idade ensaiada). Em relação a este, há uma redução na evolução da mistura EV 0.40 e EVC 0.40, as quais tendem a se distanciar em relação ao refe-

rência aos longo deste período, porém ambas descrevem uma curva paralela entre si, levemente crescente, o que demonstra igualdade no incremento da evolução. Aos 300 dias, a mistura EV 0.40 atingiu 65% da resistência do R 0.40, enquanto que o EVC 0.40 apresenta 50% do mesmo, com claros sinais de pouco acréscimo de resistência para ambas as misturas partir deste limite.

#### 4.5.2. Resistência à tração por compressão diametral - RCD

Da mesma forma que efetuado para a resistência à compressão, para a correlação entre as resistências unitárias a tração e a relação  $a/mc = 0.4$ , utilizou-se equações logarítmicas, e os coeficientes de determinação  $r^2$  são demonstrados na figura 4.32.

O gráfico da figura 4.32 demonstra os resultados obtidos pelos ensaios para a resistência à tração por compressão diametral das mistura com igualdade de relação  $a/mc = 0.40$ .

Nota-se para o traço referência R 0.40 um ganho de 15% na resistência a compressão entre 28 e 300 dias, enquanto que os traços EV 0.40 e EVC 0.40 apresentam um incremento, em média, 5% acima do referência. Porém, observa-se que as curvas apresentam-se muito idênticas em relação à evolução apresentada.

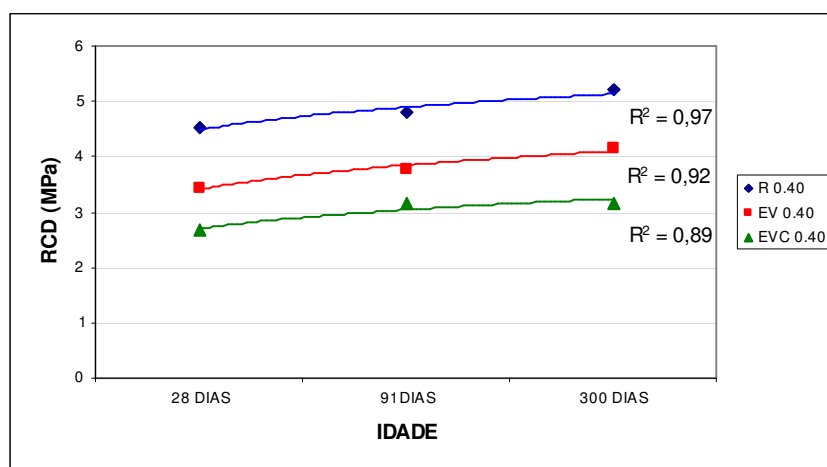


Figura 4.32 - Resistência à compressão diametral em igualdade de relação  $a/mc$  0.4.

Com relação ao traço de referência R 0.40, as misturas EV 0.40 e EVC 0.40 apresentaram em média aos 28 dias, 76% e 58% da resistência do mesmo. Como

demonstrado no gráfico, esta relação se mantém similar, com um leve acréscimo no incremento de resistência para as misturas com adições minerais ao longo do tempo, principalmente para o EV 0.40 em relação ao EVC 0.40, porém de forma muito idêntica entre as três misturas até a idade de 300 dias.

#### 4.5.3. Módulo de elasticidade

Para correlação das resistências unitárias entre o módulo de elasticidade e a relação  $a/mc = 0.4$ , foi utilizado-se equações logarítmicas, e os coeficientes de determinação  $r^2$  estão indicados no gráfico.

Analisando o gráfico da figura 4.33, que apresenta os resultados de módulo de elasticidade para as misturas estudadas entre 28 e 300 dias, podemos observar que a mistura R 0.40 apresenta uma variação aproximada de 7% neste período, enquanto que as misturas EV 0.40 e EVC 0.40 obtiveram, em média, 4,75%. Observa-se praticamente, uma igualdade de evolução no módulo de elasticidade das misturas com substituição parcial de cimento por adições minerais, com e sem adição de cal hidratada, representadas no gráfico por curvas paralelas que apresentam um gradual crescimento ao longo do tempo.

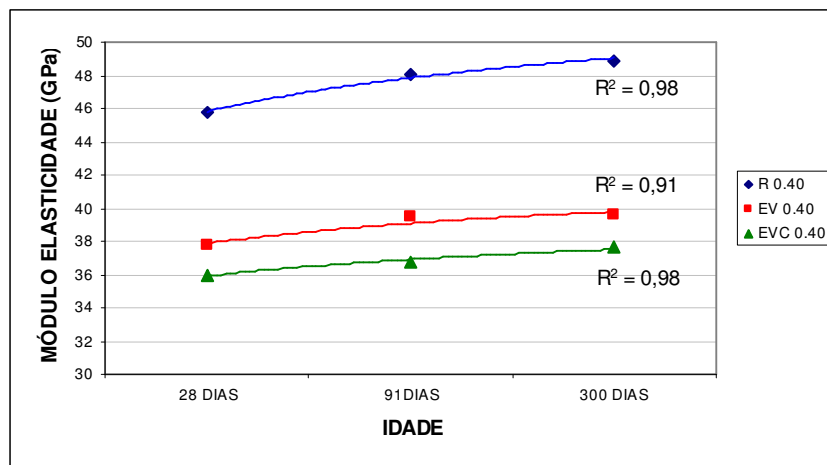


Figura 4.33 - Módulo de elasticidade em igualdade de relação  $a/mc$  0.4.

Deve-se ressaltar, porém, que segundo alguns autores como Neville (1997), Kliszewicz & Ajdukiewicz (2002) apud Shehata (2005), entre outros, afirmam que parte do resultado do módulo de elasticidade está relacionado ao tipo de agregado

utilizado, e que este deve ser levado em conta quando do ensaio, como faz, por exemplo o CEB/90.

Em relação ao referência R 0.40, as misturas EV 0.40 e EVC 0.40 apresentaram em média, 82.5% e 70.5% aos 28 dias. Esta relação entre as misturas manteve-se praticamente estável para cada idade ensaiada.

De acordo com Isaia (1995), o efeito da pozolanas sobre o módulo de elasticidade pode ser explicado pelo aumento do volume da pasta devido ao acréscimo das adições minerais, assim como o reforço da interface pasta agregado pelo efeito filer e pozolânico, conforme abordado anteriormente no item 2.2.

#### 4.5.4. Retração total

Dos ensaios de retração total obtiveram-se os resultados apresentados no gráfico da figura 4.34. Para a correlação dos resultados unitários de retração e a relação  $a/mc = 0.4$  utilizou-se equações logarítmicas, que melhor se adaptaram aos dados apresentados. Os coeficientes de determinação  $r^2$  são demonstrados no gráfico.

Analisando-se estes dados observa-se que a mistura referência R 0.40 apresenta uma retração aos 300 dias na ordem de 1.84 vezes em relação à retração aos 28 dias. Esta relação é de 1.38 vezes para a mistura EV 0.40 e 2.5 para a mistura EVC 0.40, neste período.

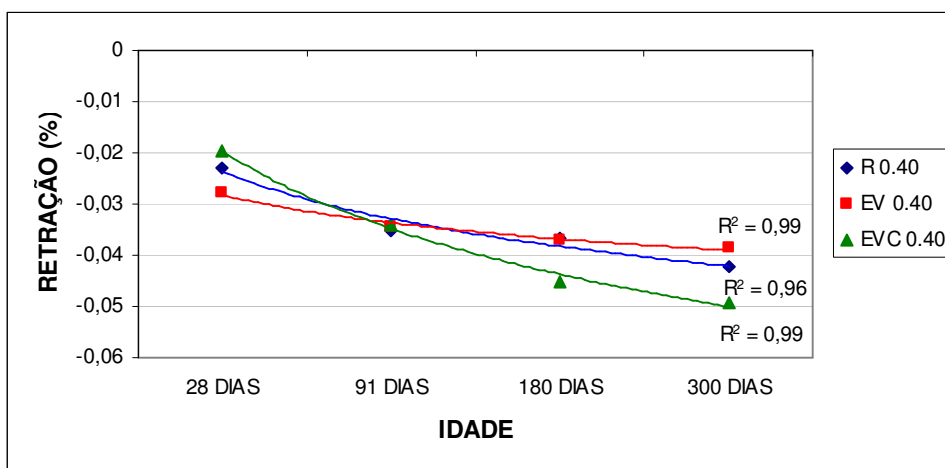


Figura 4.34 - Retração em igualdade de relação  $a/mc$  0.4 e coeficientes de determinação.



Nota-se aos 28 dias, que em relação ao referência R 0.40, a mistura EV 0.40 apresenta uma retração maior, enquanto a mistura EVC 0.40 apresenta uma retração inferior, porém ambas na mesma proporção, para mais e para menos, em relação ao referência. Aproximadamente aos 91 dias, há uma inversão de valores entre o EV 0.40 e EVC 0.40, na qual o primeiro começa a ter uma redução gradual no incremento de retração que se mantém ao longo do tempo, aproximando seu resultado final do obtido pelo traço referência, porém ainda inferior a este. Já a mistura EVC 0.40 segue numa curva acentuada e decrescente, desenvolvendo uma maior retração a partir desta idade, chegando aos 300 dias muito acima da mistura referência.

De um modo geral, observa-se que a mistura EV 0.40 apresenta uma retração inicial acentuada aos 28 dias, vindo a reduzir-se e chegar aos 300 inferior ao referência em torno de 10%. Já a mistura EVC 0.40 apresenta uma retração inicial, aos 28 dias, inferior ao referência, mas que ao longo do tempo sofre acréscimos que ao atingir os 300 dias, está 16% superior ao referência R 0.40.

O gráfico da figura 4.35, apresenta os resultados de retração total correlacionando-a a igualdade de relação  $a/mc = 0.40$  e à igualdade de resistência. Nota-se uma retração muito superior da mistura de referência, quando comparada às misturas com adições minerais em igualdade de resistência, assim como uma proximidade entre estas duas.

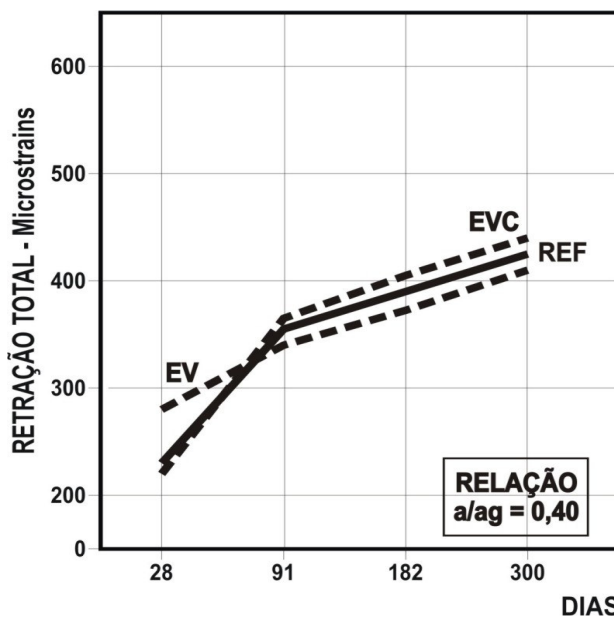


Figura 4.35 - Retração em igualdade de relação  $a/mc$  0.4 e igualdade de resistência.

#### 4.6. Correlação entre RCD x ACI x NBR 6118

Através das tabelas 4.3 e 4.4, podemos observar a correlação entre os resultados obtidos nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral aos 28 e 91 dias, com os resultados calculados pelas equações e prescrições da NBR 6118/2003 e do ACI 318/89, para as mesmas idades e  $f_c$ . O índice apresentado nas tabelas corresponde à relação entre os resultados obtidos nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral com os resultados obtidos através das formulações apresentadas pelas normas.

Aos 28 dias, nota-se uma variação muito estreita entre os dados calculados e os dados resultantes dos ensaios. As misturas com relação  $a/mc$  elevada, apresentam uma variação maior entre os resultados, com exceção da mistura EV 0.49. Já as misturas com adição de cal hidratada e baixa relação  $a/mc$ , foram as que apresentaram as menores variações.

TAB 4.3 - Correlação entre RCD calculado pelo ACI/NBR e resultados aos 28 dias

MISTURA	Fc (MPa)	ACI /NBR (MPa)	ENSAIO (MPa)	ÍNDICE
	COMPRESSÃO AXIAL 28 DIAS	COMPRESSÃO DIAMETRAL		
R 0.40	64.10	4.80	4.66	0.97
R 0.60	42.35	3.64	3.41	0.94
R 0.83	24.24	2.51	2.56	1.02
EV 0.30	48.26	3.98	3.75	0.94
EV 0.40	44.40	3.76	3.44	0.91
EV 0.49	24.57	2.54	2.19	0.86
EVC 0.33	54.20	4.30	3.23	0.75
EVC 0.40	31.57	3.00	2.66	0.88
EVC 0.49	23.70	2.48	2.64	1.05

Aos 91 dias nota-se claramente a maior dispersão entre as misturas com relação  $a/mc$  mais elevada, e do mesmo modo que aos 28 dias, a menor diferença está entre as misturas com cal hidratada adicionada e baixa relação  $a/mc$ . Nesta idade, o traço EV 0.49, que apresentou baixa disparidade aos 28 dias, aos 91 dias elevou a diferença como os demais traços com elevada relação  $a/mc$ .

Concluindo, nota-se através da análise dos índices de correlação, que os dados obtidos nos ensaios apresentam-se ligeiramente inferiores ou similares aos resultados obtidos através das fórmulas prescritas pelas normas em questão, com exceção das misturas de maior relação a/mc, que apresentam-se um pouco superiores aos resultados oriundos do cálculo. Este pequeno incremento torna-se mais evidente aos 91 dias de idades. Porém, as misturas com pozolanas, assim como as com adição de cal, para baixas relações a/mc, apresentaram pouca variação no índice de correlação, entre 28 e 91 dias, mostrando-se estáveis, mas inferiores aos resultados calculados pelas normas.

TAB 4.4 - Correlação entre RCD calculado pelo ACI/NBR e resultados aos 91 dias

MISTURA	Fc (MPa)	ACI /NBR	ENSAIO	ÍNDICE
		(MPa)	(MPa)	
	COMPRESSÃO AXIAL	COMPRESSÃO DIAMETRAL		
	91 DIAS			
R 0.40	76.10	5.39	4.79	0.89
R 0.60	46.27	3.87	3.90	1.00
R 0.83	25.57	2.60	3.22	1.23
EV 0.30	51.55	4.16	4.00	0.96
EV 0.40	48.80	4.01	3.78	0.94
EV 0.49	29.17	2.84	3.27	1.15
EVC 0.33	56.60	4.42	3.54	0.80
EVC 0.40	39.23	3.46	3.16	0.91
EVC 0.49	29.03	2.83	3.09	1.09

#### 4.7. Correlação entre Módulo de Elasticidade x CEB x ACI x NBR 6118

Do mesmo modo como se realizou a correlação dos resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral com os resultados calculados conforme as prescrições de normas específicas comparou-se também os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, com os resultados obtidos através de cálculos utilizando as diretrizes do CEB/90, do ACI e da NBR 6118. Cabe salientar que o CEB/90 utiliza em sua fórmula um coeficiente que corresponde a uma correção relativa ao tipo de agregado utilizado na composição do concreto sendo, no caso desta pesquisa, que utilizou pedra basáltica, igual a 1.20. Deste modo, os resultados calculados pelo CEB/90 apresentam-se superior aos calculados pelo ACI e NBR.

Observando-se a tabela 4.5, com os resultados obtidos aos 28 dias, nota-se uma regularidade entre os dados apresentados, com muito pouca variação entre os módulos para cada mistura.

A maior disparidade encontra-se entre as misturas com maior relação a/mc, com exceção da mistura referência R 0.60, que se mostrou inferior aos resultados calculados, e a mistura EVC 0.40, que se mostrou superior.

TAB 4.5 - Correlação entre Eci calculado pelo CEB,ACI e NBR e resultados aos 28 dias

MISTURA	Fc (MPa)	CEB/90	ACI	NBR	ENSAIO
		(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
	COMPRESSÃO AXIAL	MÓDULO DE ELASTICIDADE			
	28 DIAS				
R 0.40	64.10	47.93	44.55	44.83	45.72
R 0.60	42.35	41.74	36.22	36.44	33.73
R 0.83	24.24	34.66	27.40	27.57	31.07
EV 0.30	48.26	43.60	38.66	38.90	38.60
EV 0.40	44.40	42.40	37.08	37.31	37.74
EV 0.49	24.57	34.81	27.58	27.76	34.37
EVC 0.33	54.20	45.32	40.97	41.23	39.39
EVC 0.40	31.57	37.85	31.27	31.46	35.94
EVC 0.49	23.70	34.40	27.09	27.26	34.30

Como observado na tabela acima, o mesmo ocorre com os resultados aos 91 dias, e demonstrados na tabela 4.6, ou seja, para maior relação a/mc, maior a diferença entre os módulos calculados e o módulo obtido através de ensaios. Quanto aos demais traços nota-se uma clara regularidade.

Conclui-se, comparando os resultados obtidos tanto pelo ensaio, como pelas formulas prescritas pelas normas em questão, que as misturas com maior relação a/mc demonstram valores de ensaio superiores aos valores calculados em ambas as idades apresentadas, sendo estes os traços R 0.83, EV 0.49, EVC 0.40 e EVC 0.49.

Para as demais relações a/mc, os resultados são similares. Ressalta-se porém, que todos apresentam-se inferiores aos dados calculados pelo CEB/90, por este ter seu valor multiplicado por 1.2, devido a correlação relativa ao agregado utilizado. Em termos gerais, há uma boa relação entre os resultados comparados.

TAB 4.6 - Correlação entre Eci calculado pelo CEB, ACI e NBR e resultados aos 91 dias.

MISTURA	Fc (MPa)	CEB/90	ACI	NBR	ENSAIO
		(GPa)	(GPa)	(GPa)	(GPa)
		MÓDULO DE ELASTICIDADE			
	91 DIAS				
R 0.40	76.10	50.75	48.55	48.85	48.10
R 0.60	46.27	42.99	37.85	38.09	37.97
R 0.83	25.57	35.28	28.14	28.32	31.17
EV 0.30	51.55	44.57	39.96	40.21	40.84
EV 0.40	48.80	43.76	38.88	39.12	39.43
EV 0.49	29.17	36.86	30.06	30.25	35.12
EVC 0.33	56.60	45.98	41.87	42.13	41.63
EVC 0.40	39.23	40.69	34.86	35.07	36.79
EVC 0.49	29.03	36.80	29.98	30.17	35.18

#### 4.8. Correlação entre os resultados das resistências mecânicas, elásticas e de deformações com variáveis intervenientes e independentes.

4.8.1. Correlação entre resistência a compressão axial e resistência à tração por compressão diametral.

Através do gráfico apresentado pela figura 4.36, podemos analisar a correlação existente entre os dados obtidos pelo ensaio de resistência a compressão axial e os resultantes dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

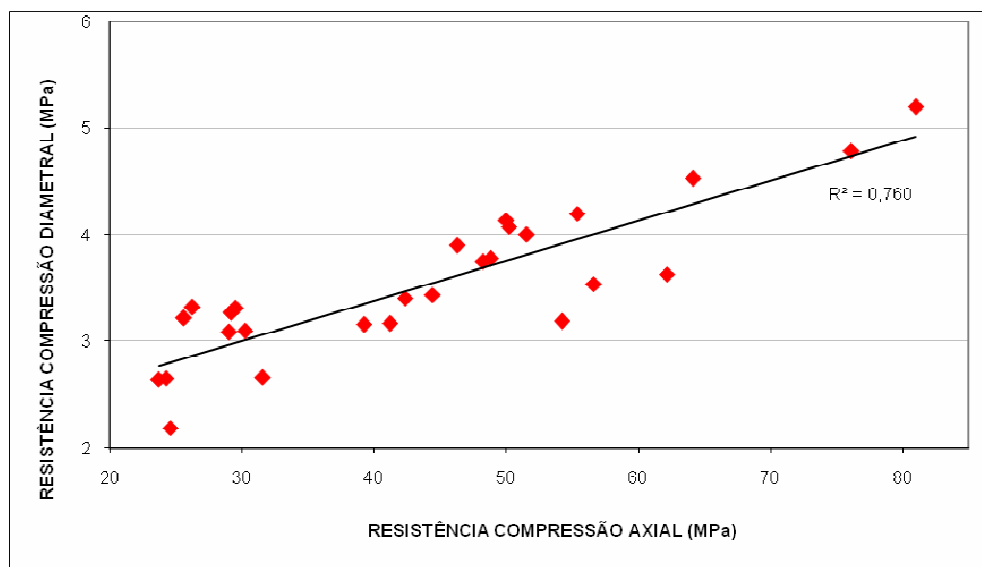


Figura 4.36 - Correlação entre RCA e RCD para todas as idades das misturas estudadas.

Correlacionou-se os resultados unitários utilizando-se equação linear por melhor se adaptar aos dados apresentados.

A relação entre a resistência à compressão axial e a resistência à tração por compressão diametral depende do nível de resistência do concreto, conforme apresentado no item 2.2, ou seja, quando aumenta a resistência à compressão, aumenta também a resistência a tração, porém numa razão decrescente.

Para Mehta (1994), a razão entre a resistência a tração/compressão para concretos de baixa resistência será em torno de 10% a 11%, para concretos de média resistência, entre 8% e 9%, sendo para os CAD em torno de 7%, sendo esta relação determinada pelo efeito de vários fatores nas propriedades da matriz e da zona de transição. O gráfico da figura 4.37 correlaciona os resultados obtidos pelas misturas, assim como os prescritos por Mehta (1994) e a NBR 6118/2003.

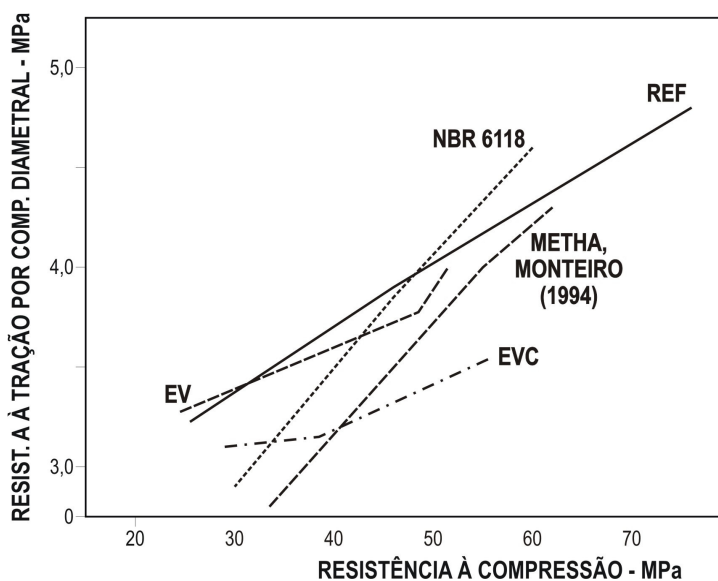


Figura 4.37 - Correlação entre RCA e RCD para as misturas estudadas.

#### 4.8.2. Correlação entre a resistência a compressão axial e módulo de elasticidade

A correlação entre os resultados obtidos da resistência a compressão axial e os dados de módulo de elasticidade, ensaiados entre 28 e 300 dias são apresentados no gráfico da figura 4.38.

Para correlação dos resultados das resistências unitárias à compressão e os resultados de módulo de elasticidade, utilizou-se equação linear por melhor se adaptar aos dados apresentados.

Conforme Neville (1997), a diferença entre o módulo de elasticidade da pasta de cimento endurecida de altíssima resistência e do agregado é pequena, o comportamento do CAD é mais monolítico, sendo maior a resistência da interface pasta-agregado, sendo menor a fissuração de aderência. A ruptura ocorre através do agregado graúdo e da matriz.

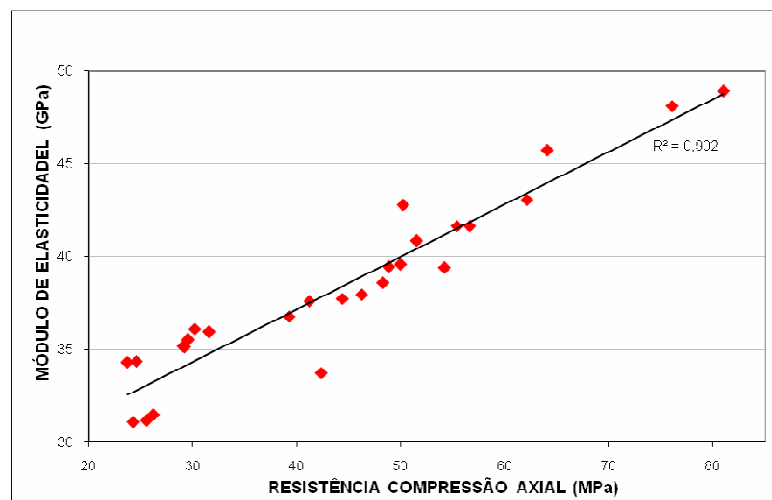


Figura 4.38 - Correlação entre RCA e módulo de elasticidade para todas as idades das misturas estudadas e fator  $r^2$ .

Devido a esta forte aderência, as propriedades elásticas do agregado exercem influência considerável sobre o módulo de elasticidade, o que torna a correlação com a resistência muito menos consistente.

Na análise do gráfico, podemos observar uma dispersão em torno da reta da equação linear utilizada para esta correlação de dados unitários, mas o coeficiente de determinação  $r^2$  apresenta um índice de 0.90, ou seja, 90% da variação de correlação é explicada pelo ajuste de regressão. Nota-se um bom comportamento linear para os módulos entre 37 GPa e 42 GPa, com relações  $a/mc$  variando entre 0.4 e 0.55.

Algumas normas, como a do CEB, do ACI e a NBR/ABNT apresentam equações para correlação destes valores, algumas delas levando em consideração o tipo

de agregado, como apresentado no item 4.8. O gráfico da figura 4.39, correlaciona os resultados obtidos pelas misturas estudadas, com as prescrições do CEB/90 e NBR 6118/2003. Porém, Neville (1997), como o ACI sugerem que estas expressões seja utilizadas para resistências até 83 MPa.

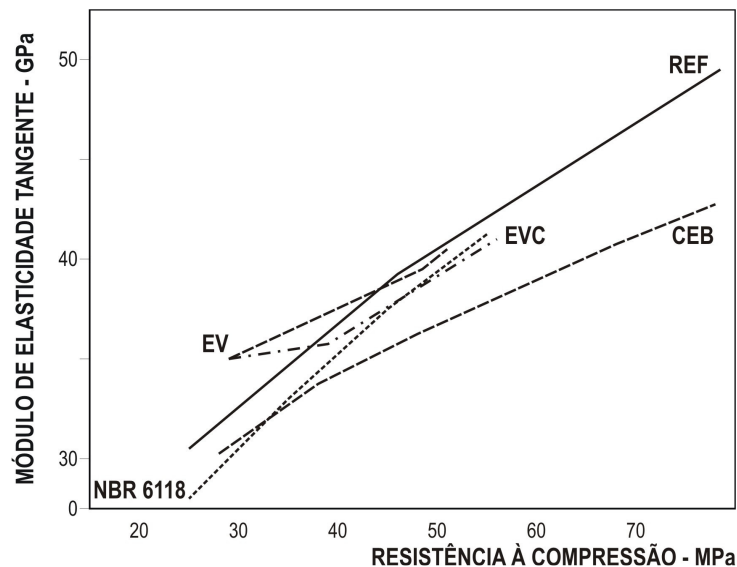


Figura 4.39 - Correlação entre RCA e módulo de elasticidade para todas as idades das misturas estudadas.

#### 4.8.3. Correlação entre retração total e resistência a compressão axial.

As correlações entre os resultados obtidos pelos ensaios de retração total com as resistências à compressão axial para cada mistura, são apresentadas pelos gráficos da figura 4.40, assim como as linhas de tendência e os coeficientes de determinação  $r^2$ .

Nota-se que para as misturas com baixa relação  $a/mc$  (0.30/0.33), quando se incorporou a cal hidratada, obteve-se uma resistência superior em relação à mistura sem cal, contudo com uma retração total significativamente menor.

Para as demais misturas ocorre o inverso: a mistura EVC 0.40, apresentou resistências inferiores ao seu comparativo EV 0.40, porém com retração superior a este. O mesmo ocorre para as misturas EV 0.49 e EVC 0.49, que apesar de apresentarem resistências finais similares, a retração do primeiro é 25% inferior ao segundo.



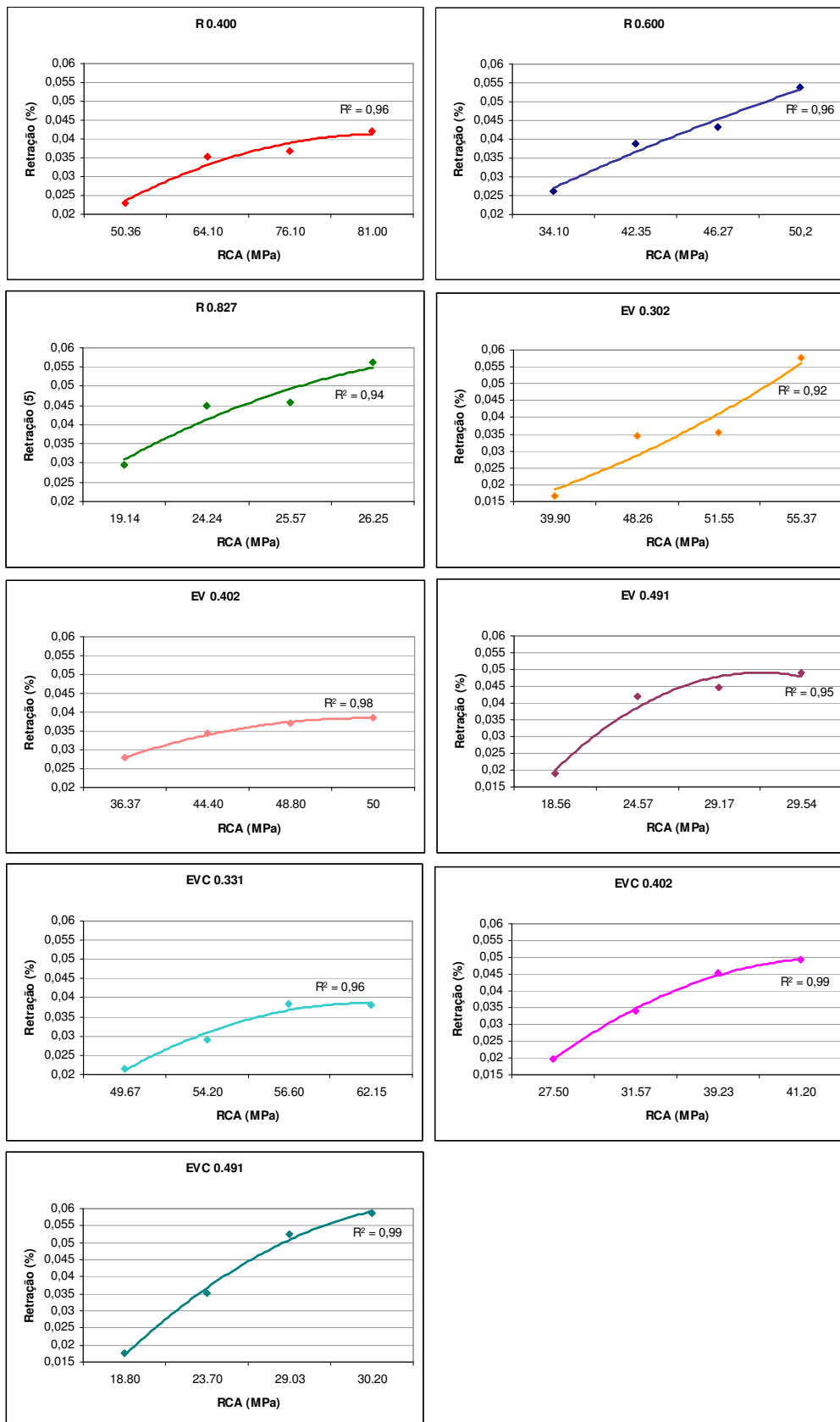


Figura 4.40 - Correlação entre retração total e resistência a compressão axial para as misturas estudadas.

Na análise em igualdade de resistência, para relações  $a/mc = 0.400$ , observa-se uma similaridade na retração entre as misturas com pozolanas, porém estas demonstram em média, uma retração 25% inferior em comparação às misturas referências.

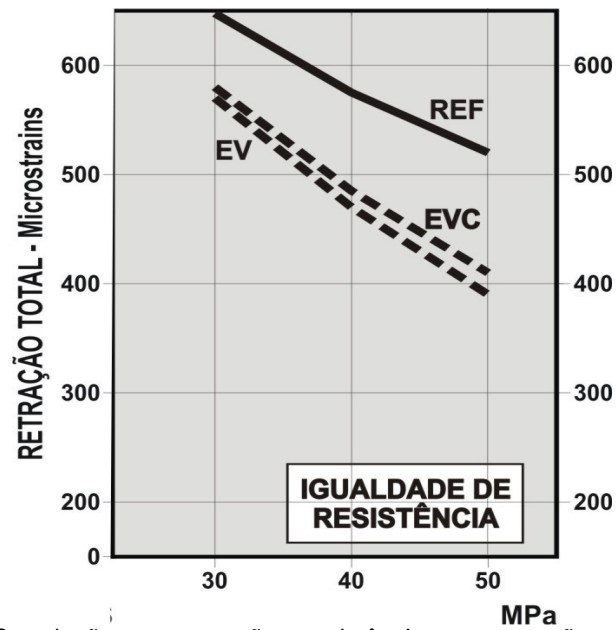


Figura 4.41 - Correlação entre retração e resistência a compressão em igualdade de resistência.

## CAPITULO 05

**5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS****5.1. Variação das principais propriedades mecânicas do concreto – resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral – módulo de elasticidade e retração total, com o uso de teores muito altos de adições minerais.**

Através da realização dos ensaios laboratoriais, cujos resultados foram apresentados e discutidos no Capítulo 4 da presente pesquisa, podemos verificar as variações apresentadas pelas propriedades estudadas, quando a estes concretos foram incorporados elevados teores de adições minerais em substituição ao cimento em massa.

A substituição do cimento Portland, na ordem de 90%, por escória granulada de alto-forno e cinza volante, na proporção de 70% e 20% respectivamente, em massa, teve como objetivo alterar a microestrutura destes concretos, de modo a melhorar o seu desempenho frente às ações e solicitações destes requeridas.

**5.1.1. Resistência à compressão axial - RCA**

Na verificação da resistência a compressão axial, notou-se para as misturas com adições minerais um significativo ganho de resistência até os 28 dias, mais precisamente 87% em média da resistência total apresentada aos 300 dias. Em relação ao ganho total de resistência, a mistura EV 0.49 foi a que apresentou o maior incremento, 60% aproximadamente, em relação à resistência apresentada aos 07 dias.

Com a adição de 20% de cal em relação à massa de aglomerantes nas misturas, observou-se uma alteração dos resultados de ganho de resistência, principalmente nas primeiras idades. Aos 28 dias, o incremento médio apresentado pelas misturas foi de 80% da resistência total aos 300 dias, ou seja, com a adição da cal hidratada, o desenvolvimento da resistência foi 7% inferior em comparação com as misturas sem cal. A mistura EVC 0.49 foi a que apresentou o maior ganho de resistência, em relação ao incremento total entre 07 e 300 dias, na ordem de 73%, sendo também significativo o ganho total da mistura EVC 0.40, de 50%.

Comparando-se os resultados das misturas com e sem adição de cal hidratada, podemos concluir que para a relação a/mc 0.33, a adição de cal hidratada aumentou as resistências em todas as idades, contudo, para a relação a/mc 0.40 ocorre o oposto, pois a cal diminui a resistência em todas as idades ensaiadas. Já para a relação a/mc 0.49, a adição de cal gerou resistências superiores apenas aos 300 dias, igualando-se em resistência ao traço sem cal nas demais idades.

Observa-se a atuação da cal hidratada através da retenção de água, pois com a cal, o incremento foi estável e contínuo, e sem a adição de cal, o incremento concentrou-se nas idades iniciais. Para as relações a/mc maiores, a retenção de liberação gradual de água, além das reações antes especificadas, contribuíram significativamente para o incremento de resistência.

#### 5.1.2. Resistência à tração por compressão diametral - RCD

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, os incrementos de resistência aos 28 dias foram muito variáveis para as misturas sem adição de cal hidratada. O traço EV 0.30 apresentava 90% da resistência total nesta idade em relação ao apresentado aos 300 dias, enquanto que a mistura EV 0.40 e EV 0.49 obtiveram 83% e 66%. Com a adição de cal hidratada, o incremento médio das misturas foi de 86% em relação à resistência total aos 300 dias.

Comparando-se, podemos observar que não há uma proporcionalidade direta entre os incrementos de resistência à compressão axial e os incrementos de resistência diametral, apesar das resistências estarem relacionadas.

Analisando os resultados obtidos através da relação RCD/RCA, confirmaram-se os dados apresentados por Mehta (1994), de que esta relação situa-se em torno de 7% e 11%. Para concretos de baixa resistência, esta relação ficou em torno de 10% a 11%, o que coincide com as misturas de alta relação a/mc (0.49); para concretos de média resistência, em torno de 8% a 9%, correspondendo às misturas de relação a/mc intermediário (0.40), e para os CAD, ou seja, aqueles com resistência superior a 50 MPa, em torno de 7%, o que obteve-se com as misturas EV 0.30 e EVC 0.33.

Porém, em valores absolutos de resistência, as misturas sem cal hidratada foram superiores às misturas com adição de cal na idade final (300 dias).

### 5.1.3. Módulo de elasticidade

Através dos resultados obtidos pelos ensaios de módulo de elasticidade, pôde-se comprovar o exposto por Mehta (1983), em que afirma ser o módulo de elasticidade pouco influenciado pelo uso de adições minerais, apresentando maior sensibilidade às variações da quantidade e rigidez do agregado e pela resistência a compressão, através da relação  $a/ag$  e cura. Em valores absolutos, os resultados obtidos para os módulos de elasticidades foram maiores para as misturas com baixa relação  $a/mc$ , e menores para as relações  $a/mc$  mais altas, visto que este se relaciona também com a resistência a compressão, como citado anteriormente. Contudo, conforme Almeida (2005), o aumento do módulo ocorre de modo não proporcional à elevação da resistência a compressão. Os valores do módulo apresentaram-se altos, entre 36.10 GPa e 41.64 GPa aos 300 dias, confirmando o exposto por Almeida (2005), que afirma que em termos absolutos, o módulo de elasticidade dos CAD podem chegar a 50 GPa, embora se situem na faixa de 30 GPa a 40 GPa.

Observa-se que ambas as misturas - com ou sem adição de cal hidratada, para todas as relações  $a/mc$ , aos 28 dias de idades - apresentavam 95% do valor do módulo final obtido aos 300 dias. Assim como ocorreu para a RCA, para a relação  $a/mc$  0.33 a cal adicionada aumentou o valor do módulo em relação à mistura sem adição de cal, porém para a relação  $a/mc$  0.40, a cal diminuiu o módulo, enquanto que para a relação  $a/mc$  0.49, a adição da cal hidratada gerou um valor maior somente aos 300 dias.

### 5.1.4. Retração total

Analisando os índices de incremento das retrações dos traços, observa-se que para as misturas com adições minerais a retração seguiu a regra de ser proporcionalmente inversa à relação  $a/mc$ , ou seja, quanto menor a relação  $a/mc$ , maior a retração, como constatado por Isaia (1995), e que pode ser observado pelo incremento obtido pelo traço EV 0.30 aos 300 dias, na ordem de 246%, em relação à retração apresentada aos 28 dias. Cabe salientar que esta retração elevada deve-se,

a maior parte, à retração autógena, pois a retração por secagem é baixa devido às reduzidas relações  $a/mc$ , ou seja, menor quantidade de água nas misturas.

Com a adição da cal hidratada às misturas, reduziu-se a retração nas idades iniciais (28 e 91 dias), principalmente para as relações  $a/mc$  0.40 e 0.49, mas esta se manteve constante, porém decrescente para as demais idades, geralmente na ordem de 50%. Isto se deve a lenta liberação de água pela cal, hidratando aos poucos a pasta, controlando o incremento de retração entre os períodos analisados. Contudo, houve uma inversão em relação aos concretos sem cal hidratada, pois com a adição de cal, as misturas com maior relação  $a/mc$  foram as que apresentaram maior retração. Aos 300 dias, os incrementos de retração adquiridos pelas misturas EVC 0.33, EVC 0.40 e EVC 0.49 em relação aos 28 dias foram 77%, 150% e 235% respectivamente. Para todas as relações  $a/mc$ , a cal gerou retrações menores ou similares nas primeiras idades (28 e 91 dias), e maiores nas idades finas (180 e 300 dias), quando comparados com misturas sem adição de cal hidratada.

Através da análise das propriedades estudadas em relação aos concretos com adições minerais, com e sem incorporação de cal, podemos concluir que em termos de incremento de resistência, tanto RCA como RCD, assim como melhor relação RCD/RCA, a mistura que apresentou os melhores resultados na conjunção destas propriedades foi o traço EV 0.49. Já em termos de módulo de elasticidade, assim como em relação à retração total, o traço EVC 0.33 foi o que demonstrou melhor desempenho. Em termos gerais, a adição de cal hidratada melhorou, tanto a RCA, como o módulo de elasticidade e a retração nas misturas com relação  $a/mc$  0.30, em relação às misturas sem cal. Para a RCD, as misturas sem cal hidratada apresentaram resultados melhores para todas as relações  $a/mc$ .

## **5.2. Variações constatadas nas misturas com altos teores de pozolanas, em termos das propriedades estudadas, em relação ao concreto referência somente com cimento Portland.**

### **5.2.1 Resistência à compressão axial - RCA**

Em relação à resistência a compressão axial, as misturas com baixo fator  $a/mc$ , ou seja, EV 0.30 e EVC 0.33, mostraram-se inferiores a mistura de referência R 0.40 em todas as idades ensaiadas. Aos 91 dias a mistura EV 0.30 atingiu em

média 67% da resistência apresentada pelo R 0.40, enquanto que a mistura EVC 0.33 chegou a 76% da resistência do mesmo, índices estes mantidos aos 300 dias. Deste modo, com baixas relações a/mc, observa-se que o uso da cal hidratada foi fundamental para o incremento de resistência, principalmente nas idades iniciais como ativador da escória e da cinza volante, antecipando sua ação.

Para as relações a/mc intermediárias, ou seja, R 0.60, EV 0.40 e EVC 0.40, aos 91 dias os dois primeiros apresentaram resistências praticamente iguais, enquanto que o terceiro obteve 82%, em média, da resistência da mistura referência.

Com relações a/mc mais altas, as misturas com adições minerais, ou seja, EV 0.49 e EVC 0.49, mostraram-se similares à mistura referência R 0.83 aos 07 e 28 dias, sendo superiores a este na ordem de 15% em média, a partir dos 91 dias.

#### 5.2.2. Resistência á tração por compressão diametral - RCD

Para a resistência a tração por compressão diametral, as misturas com baixa relação a/mc, ou seja, EV 0.30 e EVC 0.33 apresentaram-se inferiores aos referencia R 0.40, na ordem de 20% e 30% respectivamente, aos 300 dias. Porém as relações RCD/RCA para cada mistura, foram similares, em média na ordem de 7%. As melhores respostas obtiveram-se com as misturas com elevada relação a/mc, ou seja, EV 0.49 e EVC 0.49, que apresentaram resultados muito próximos do referência R 0.83, assim como uma relação RCD/RCA igual a 11% em média. Observou-se que as relações RCD/RCA obedecem às prescritas por Mehta (1994), transcritas no item 2.2.1.2, e esta relação é determinada pelo efeito de vários fatores nas propriedades da pasta e da zona de transição pasta-agregado, como as descritas quando da análise da resistência à compressão axial.

#### 5.2.3. Módulo de elasticidade

Na análise dos resultados obtidos pelos ensaios de módulo de elasticidade, as misturas com adições minerais, com ou sem incorporação de cal hidratada, mostraram-se, aos 300 dias, inferiores às misturas referências, na ordem de 10% em média para os traços EV 0.30 e EVC 0.33, e 15%, também em média, para o EV 0.40 e EVC 0.40, em relação ao R 0.40 e R 0.60 respectivamente. A exceção foram

as misturas EV 0.49 e EVC 0.49, que se mostraram superiores ao referência R 0.83, na ordem de 13% em média. Estes índices entre as misturas foram constantes para todas as idades, com exceção para as misturas com relação a/mc 0.40, que aos 28 dias mostravam-se superiores ao referência e aos 300 dias resultaram em média 10% menores.

#### 5.2.4. Retração total

Observando os resultados de retração apresentados pelas misturas durante os procedimentos experimentais, notou-se que aos 91 dias de idade, as misturas sem incorporação de cal hidratada demonstraram retrações muito próximas ou similares às apresentadas pelos seus respectivos traços de referência, enquanto as misturas com adição de cal tiveram retração inferior aos mesmos. Isto se deve ao fato que o ritmo de hidratação das misturas com adições minerais foi idêntico aos das misturas de referência, ou seja, há uma hidratação mais acentuada nestas primeiras idades, devido às reações pozolânicas iniciais, enquanto que nas misturas com cal hidratada, devido à retenção de água proporcionada por esta, a hidratação ocorre mais lentamente, ou seja, as partículas ainda não hidratadas removem a água dos poros capilares, conforme ocorre a hidratação, concluindo-se que há uma preponderação da retração autógena sobre a retração total nas idades iniciais como afirmado por Isaia (1995).

Aos 180 dias, as misturas com cal hidratada incorporada apresentaram retrações similares ou levemente superiores aos respectivos traços referências, enquanto que as misturas sem cal mantiveram uma retração aproximadamente igual aos seus traços referentes. Pelos resultados obtidos aos 300 dias, nota-se que todas as misturas obtiveram nesta idade retração inferior (em média 10%) ou similar às apresentadas pelas respectivas misturas referência.

#### 5.2.5. Análise em igualdade de relação a/mc = 0.4

► para a resistência á compressão axial - RCA, as misturas EV e EVC apresentaram aos 28 dias, 70% e 50% da resistência obtida pelo referencia, respectivamente, porém o ganho de resistência da mistura EV foi de 38% entre os 07 e os 300 dias, e



de 50% para a mistura EVC no mesmo período, em comparação ao obtido pelo traço referência, que foi de 61%.

► para a resistência à tração por compressão diametral - RCD, aos 28 dias a mistura EV obteve 76% da resistência apresentada pelo referência, enquanto que aos 300 dias esta relação foi de 80%. Para a mistura EVC estes índices foram em média, 60% para ambas as idades. Contudo, ambos apresentaram um incremento de resistência de 20% entre a idade inicial e final enquanto o referência obteve 12%.

► na análise da retração total, aos 28 dias a mistura EV apresentou uma retração 22% superior ao referência, enquanto a mistura EVC manteve-se 14% inferior aos mesmo. Aos 300 dias esta relação se inverteu; a mistura EV apresentou 92% da retração obtida pelo referência, enquanto que a mistura EVC foi 17% superior. Enquanto a mistura referência apresentou um incremento de 84% na retração entre 28 e 300 dias, as misturas EV e EVC obtiveram de 38% e 150%, respectivamente.

► em relação ao módulo de elasticidade, a mistura EV atingiu 83% do valor apresentado pelo referência aos 28 dias, enquanto que a mistura EVC chegou a 79%. Estas relações mantiveram-se nestas médias para os 91 e 300 dias. O incremento no módulo de elasticidade para ambas as misturas foi de 5%, enquanto o referência apresentou 7%, entre 28 e 300 dias.

### 5.3. Conclusão

Através da análise em conjunto dos resultados obtidos para as propriedades estudadas em relação às misturas investigadas, confirma-se a eficiência e benefícios do uso de adições minerais como substituto parcial do cimento Portland, assim como a incorporação de cal hidratada à mistura.

Salienta-se que os melhores resultados foram obtidos para as misturas com relações a/mc elevadas, ou seja, EV 0.49 e EVC 0.49, que apresentaram valores de RCA, assim como de RCD similares à mistura referência, e superiores a estas quando adicionado cal hidratada na mistura. As melhores relações RCD/RCA também foram obtidas por estas misturas, assim como os maiores incrementos de RCA e RCD. Em relação ao módulo de elasticidade, este mostrou-se superior ao R 0.83 em todas as idades independente da incorporação ou não de cal.

Tratando-se da retração, a incorporação de cal hidratada nas misturas proporcionou retrações menores nas idades iniciais, quando em comparação às misturas sem cal, porém na idade final (300) dias, as retrações das misturas investigadas foram similares aos traços de referência.

Deste modo, confirma-se que a substituição parcial do cimento Portland pelos teores de adições minerais utilizados nesta investigação, com incorporação de cal hidratada, aliada a uma relação a/mc 0.49 apresenta resultados similares ao concreto correspondente somente com cimento Portland.

Com a conclusão desta pesquisa - na qual objetivou-se estudar os efeitos nas propriedades mecânicas, elásticas e de deformação em concretos com altos teores de adições minerais, pôde-se observar a influência destas e da cal hidratada, assim como a correlação entre estas propriedades, e a importância de seu estudo em conjunto para uma correta determinação do comportamento do concreto em relação ao desempenho solicitado e à durabilidade exigida.

Sugere-se para futuros estudos, a determinação destas mesmas propriedades estudadas através de protótipos, com extração de testemunhos, com o intuito de verificar estas através da simulação das condições de obra, e do mesmo modo, a determinação da retração desmembrada em retração autógena e hidráulica através de corpos-de-prova.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. S. **Efeito físico e químico de misturas pozolânicas na carbonatação e permeabilidade a água em concretos de alto desempenho.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

AÏTCIN, P. C. **Autogenous shrinkage measurement.** In: TAZAWA, E. Autogenous shrinkage of concrete. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP organized by Japan Concrete Institute. London, 1999. P 257-268.

\_\_\_\_\_. **Concreto de alto desempenho.** Pini. São Paulo, 2000.

ALMEIDA, I. R. **Concretos de Alto Desempenho.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações/ ed. ISAIA, G. C. 1ª edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code Requirements for reinforced concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 3: Use of Concrete in Buildings- Design. Specifications and related topics (ACI 318-89, Revised 1992).** Detroit, Michigan, 1994.

\_\_\_\_\_. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95).** Detroit, Michigan, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 490-96: Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete.** West Conshohocken, 1996.

ARAÚJO, J. M. **O módulo de deformação longitudinal do concreto.** IN: Teoria e Prática na Engenharia Civil, Nº 1, p. 9-16, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova: NBR 5738.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial: NBR 5733.** Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: NBR 5739.** Rio de Janeiro, 1980.

\_\_\_\_\_. **Projeto de estruturas de concreto- procedimentos: NBR 6118.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland - determinação da resistência à compressão: NBR 7215.** Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **Argamassas e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222.** Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação: NBR 8522.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Materiais pozolânicos: especificação NBR 12653.** Rio de Janeiro, 1992.

BROOKS, J. J. **Influence of mix proportions, plasticizers and superplasticizers on creep and drying shrinkage of concrete, Mag. Concr. Res.** 41, nº 148, pp 145-154, 1989.

BRIZOLA, R.M. **Microestrutura do cobrimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativadas por cimento Portland e cal hidratada.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CEMBUREAU. Bruxelas, Bélgica. 2000. Disponível em :<<http://www.cembureau.be>>. Acesso em 24 Jan. 2009.

CIMENTO.ORG. 2005. Disponível em <<http://www.cimento.org>>. Acesso em 24 Jan. 2009.

CINCOTTO, M. A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, A. **Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Boletim 65, 1992.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **CEB- FIP Model Code 1990**. Lausanne, 1993.

DALLA LANA, E. F. **Carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com cinza volante e cal**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

DAL MOLIN, D.C.C. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações/ ed. ISAIA, G.C. 1ª edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

DAL RI, M. **Efeitos da Adição de Cal Hidratada em Concretos com Altos Teores de Adição Mineral na Penetração de Cloretos e na Solução Aquosa dos Poros de Concreto**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GASTALDINI, A. L. G. **Influência das adições minerais na porosidade de pastas de cimento Portland**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 1996, São Paulo. Anais. Porto Alegre: ABCP, 1996, 3v, v1, p119-136.

GOMES, A. J. P. **Carvão do Brasil /turfa agrícola: geologia, meio ambiente e participação estratégica na produção de eletricidade no sul do Brasil**. 2002. Porto Alegre.

GOMES, N. S. **Influência de ativadores químicos e adições minerais no comportamento de concretos frente a cloretos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal- Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. Pini. São Paulo. 1997.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. **Deformações por retração e fluência**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações/ ed. ISAIA, G. C. 1ª edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

ISAIA, G. C. **Cinzas volantes nos concretos: importância e aplicações**. Revista Latino-americana de Engenharia. V.1, nº. 1- Santa Maria,1992. p. 21-51.

\_\_\_\_\_.; HELENE, P. R. L.. **Durabilidade de concreto de elevado desempenho com pozolanas**. In: Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto. Anais.Seminário, NORIE/ UFRGS. Porto Alegre, 1993.

\_\_\_\_\_. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

\_\_\_\_\_.; GASTALDINI, A. L.G. **Concreto “verde” com teores muito elevados de adições minerais: um estudo de sustentabilidade.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10º, 2004. São Paulo. Anais: Escola politécnica da Universidade de São Paulo

JACINTHO, A. E. P. G de A.; GIONGO, J. S. **Resistência mecânica do concreto.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações/ ed. ISAIA, G. C. 1º edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio.** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

JUESHI, Q; SHI, C.; ZHI, W. **Activation of blended cements containing fly ash.** Cement and Concrete Research, v 31, 2001, p. 1121-1127.

LEVY, S. **Sustentabilidade na construção civil: a contribuição do concreto.** In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações/ ed. ISAIA, G. C. 1º edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete. A critical review.** In: MALHOTRA, V. M. (ed.) International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-products in Concrete, 1 st, Monte Bello, 1983. *Proceedings*. Detroit: American Concrete Institute, 1983, 2V, V. 1, p. 1-46. (SP-79)

\_\_\_\_\_.; **Pozzolanic and cementitious by-products in concrete.** In: MALHOTRA, V. M. (ed). International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 3<sup>rd</sup>. Trondheim, Norway 1989. *Proceedings*. Detroit: American Concrete Institute, 1989, 2v, v1, p 1-44 (SP- 114)

\_\_\_\_\_.; MONTEIRO, J. P. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

\_\_\_\_\_. **Bringing the concrete industry into a new era of sustainable development.** In: MARIO COLLEPARDI. SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE SCIENCE AND TECHNOLOGY. *Proceedings*. Rome. 1997. p. 49-67.

MEIRA, L. R.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; CERVO, T. C.; SENSALÉ, G. R.; ZERBINO, R. **Propriedades mecânicas do concreto com cinza de casca de arroz sem queima controlada e sem moagem.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49º, 2007, Bento Gonçalves, RS. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 2007.

MORAES, R. da C.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Efeitos da cinza volante, cinza de casca de arroz e fíler calcário sobre a resistência mecânica do concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42º, 2000, Fortaleza, CE. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 2000.

NETO, P. M. P.; DJANIKIAN, J. G. **Algumas características do módulo de elasticidade de concretos de alta resistência.** In: Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 37º. Anais. Goiânia, GO, 1995.

NEVILLE, A. M. **Concrete in the year 2000.** IN: MALHOTRA, V. M. (ed). *Advances in Concrete Research*. Ottawa. Energy Mines and Resources, 1992, p. 21-78.

\_\_\_\_\_. **Propriedades do concreto.** Tradução: Salvador E. Giammusso. 2º edição. São Paulo: Pini, 1997.

POOM, C. S.; LAM, L.; WONG, Y. L.. **A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash.** CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. Nº 30, 2000. P. 447-455.

ROHDE, G. M. **Cinzas de carvão no Brasil: restrições ambientais e medidas mitigadoras.** In: ROHDE, G. M. *et al.* **Cinzas de carvão fóssil no Brasil - aspectos técnicos e ambientais.** Porto Alegre: CIENTEC, 2006. Cap. 2, p. 137-195.

SHEHATA, L. D. **Deformações instantâneas do concreto.** In: *Concreto: Ensino, pesquisa e realizações/ ed.* ISAIA, G. C. 1º edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

SILVEIRA, R. G. **Estudo da microestrutura da camada de cobertura de concretos com altos teores de cinza volante.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. Disponível em:<<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 24 Jan. 2009.

STUMPP, M. J.; ISAIA, G.C.; GASTALDINI, A.L.G.**Efeito da adição de cal hidratada sobre a carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais:abordagem preliminar.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44º, 2002, Belo Horizonte, MG. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 2002.

STUMPP, M. J.**Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

VAGUETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço induzida por carbonatação em concretos com adições minerais.** Porto Alegre: UFRGS, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005



**ANEXO A – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial.**

COMPRESSÃO AXIAL - Geral					
		VARIÇÃO NA IDADE (MPa)			
TRAÇO	CP	07 DIAS	28 DIAS	91 DIAS	300 DIAS
R 0.400	1	50,50	64,70	79,80	78,30
	2	49,60	64,20	63,00	83,70
	3	51,00	63,40	72,40	67,80
	Média	<b>50,36</b>	<b>64,10</b>	<b>76,10</b>	<b>81,00</b>
R 0.600	1	32,80	42,10	47,40	48,70
	2	34,10	35,30	45,70	50,40
	3	35,40	42,60	45,70	51,50
	Média	<b>34,10</b>	<b>42,35</b>	<b>46,27</b>	<b>50,20</b>
R 0.827	1	19,10	24,80	25,90	26,30
	2	19,00	23,10	24,40	26,20
	3	19,30	24,80	26,40	21,30
	Média	<b>19,14</b>	<b>24,24</b>	<b>25,57</b>	<b>26,25</b>
EV 0.302	1	39,70	49,70	51,95	55,88
	2	40,40	46,30	50,40	57,31
	3	39,60	48,80	52,30	52,91
	Média	<b>39,90</b>	<b>49,25</b>	<b>51,55</b>	<b>55,37</b>
EV 0.402	1	36,90	43,50	47,10	45,60
	2	36,50	44,60	49,10	49,80
	3	35,70	45,10	50,20	50,20
	Média	<b>36,37</b>	<b>44,40</b>	<b>48,80</b>	<b>50,00</b>
EV 0.491	1	19,20	24,40	29,00	29,60
	2	18,40	24,40	29,90	29,60
	3	18,10	24,90	28,60	29,40
	Média	<b>18,56</b>	<b>24,57</b>	<b>29,17</b>	<b>29,54</b>
EVC 0.331	1	50,40	54,20	58,74	59,20
	2	47,80	54,50	53,20	65,10
	3	50,80	53,90	57,88	53,90
	Média	<b>50,60</b>	<b>54,20</b>	<b>58,31</b>	<b>62,15</b>
EVC 0.402	1	29,10	31,80	38,50	40,70
	2	27,00	31,80	37,30	41,80
	3	26,40	31,10	41,90	41,10
	Média	<b>27,50</b>	<b>31,57</b>	<b>37,90</b>	<b>41,20</b>
EVC 0.491	1	19,90	22,60	30,00	27,60
	2	18,50	24,40	29,20	31,40
	3	18,00	24,10	27,90	31,60
	Média	<b>18,25</b>	<b>24,25</b>	<b>29,60</b>	<b>31,50</b>

**ANEXO B – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.**

COMPRESSÃO DIAMETRAL				
TRAÇO	CP	VARIACÃO NA IDADE (MPa)		
		28 DIAS	91 DIAS	300 DIAS
R 0.400	1	4,520	5,107	4,974
	2	4,794	4,472	5,484
	3	4,272	5,876	5,149
	Média	<b>4,655</b>	<b>4,925</b>	<b>5,200</b>
R 0.600	1	3,211	3,742	3,917
	2	4,186	3,464	4,251
	3	3,612	4,063	3,500
	Média	<b>3,410</b>	<b>3,900</b>	<b>4,080</b>
R 0.827	1	2,836	3,224	3,031
	2	2,521	3,212	3,272
	3	2,603	2,708	3,373
	Média	<b>2,560</b>	<b>3,220</b>	<b>3,320</b>
EV 0.302	1	3,816	3,935	4,008
	2	4,532	4,055	4,386
	3	3,682	3,478	5,166
	Média	<b>3,749</b>	<b>3,995</b>	<b>4,197</b>
EV 0.402	1	3,315	3,675	4,145
	2	3,534	3,904	4,118
	3	3,484	3,764	4,167
	Média	<b>3,440</b>	<b>3,780</b>	<b>4,140</b>
EV 0.491	1	2,147	2,530	3,249
	2	2,233	3,280	2,992
	3	2,521	3,267	3,361
	Média	<b>2,190</b>	<b>3,280</b>	<b>3,305</b>
EVC 0.331	1	3,354	3,475	3,706
	2	3,051	4,124	3,503
	3	3,157	3,608	3,689
	Média	<b>3,225</b>	<b>3,540</b>	<b>3,633</b>
EVC 0.402	1	2,750	3,315	3,329
	2	2,511	2,999	3,560
	3	2,734	3,728	3,007
	Média	<b>2,663</b>	<b>3,155</b>	<b>3,170</b>
EVC 0.491	1	2,731	3,169	3,100
	2	2,726	3,020	3,101
	3	2,468	3,344	2,880
	Média	<b>2,641</b>	<b>3,090</b>	<b>3,100</b>

### ANEXO C – Resultados dos ensaios de retração total.

RETRAÇÃO TOTAL					
TRAÇO	CP	VARIACÃO NA IDADE EM %			
		28 DIAS	91 DIAS	180 DIAS	300 DIAS
R 0.400	1	-0,0292	-0,0420	-0,0436	-0,0472
	2	-0,0164	-0,0284	-0,0300	-0,0372
	3	-0,0228	-0,0352	-0,0368	-0,0420
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0228</b>	<b>-0,0352</b>	<b>-0,0368</b>	<b>-0,0421</b>
R 0.600	1	-0,0192	-0,0300	-0,0340	-0,0416
	2	-0,0304	-0,0428	-0,0468	-0,0532
	3	-0,0292	-0,0432	-0,0488	-0,0668
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0263</b>	<b>-0,0387</b>	<b>-0,0432</b>	<b>-0,0539</b>
R 0.827	1	-0,0220	-0,0380	-0,0392	-0,0532
	2	-0,0256	-0,0448	-0,0456	-0,0464
	3	-0,0416	-0,0520	-0,0524	-0,0688
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0297</b>	<b>-0,0449</b>	<b>-0,0457</b>	<b>-0,0561</b>
EV 0.302	1	-0,0148	-0,0328	-0,0336	-----
	2	-0,0228	-----	-----	-0,0061
	3	-0,0124	-0,0360	-0,0372	-0,0548
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0167</b>	<b>-0,0344</b>	<b>-0,0354</b>	<b>-0,0578</b>
EV 0.402	1	-0,0336	-0,0360	-0,0384	-0,0380
	2	-0,0284	-0,0320	-0,0352	-0,0368
	3	-0,0216	-0,0348	-0,0376	.0,0408
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0279</b>	<b>-0,0343</b>	<b>-0,0371</b>	<b>-0,0385</b>
EV 0.491	1	-0,0280	-0,0444	-----	-----
	2	-0,0124	-0,0352	-0,0376	-0,0420
	3	-0,0164	-0,0464	-0,0516	-0,0560
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0189</b>	<b>-0,0420</b>	<b>-0,0446</b>	<b>-0,0490</b>
EVC 0.331	1	-0,0208	-0,0292	-0,0404	-0,0400
	2	-0,0160	-0,0228	-0,0372	-0,0364
	3	-0,0280	-0,0352	-0,0380	-0,0380
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0216</b>	<b>-0,0291</b>	<b>-0,0385</b>	<b>-0,0381</b>
EVC 0.402	1	-0,0196	-0,0364	-0,0388	-0,0452
	2	-0,0220	-0,0472	-0,0572	-0,0580
	3	-0,0176	-0,0188	-0,0396	-0,0444
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0197</b>	<b>-0,0341</b>	<b>-0,0452</b>	<b>-0,0492</b>
EVC 0.491	1	-0,0156	-0,0352	-0,0480	-0,0572
	2	-0,0204	-0,0372	-0,0560	-0,0624
	3	-0,0164	-0,0332	-0,0532	-0,0564
	<b>MÉDIA</b>	<b>-0,0175</b>	<b>-0,0352</b>	<b>-0,0524</b>	<b>-0,0587</b>

### ANEXO D – Retração total: leituras diretas

TRAÇO	LEITURA (mm x10 <sup>-3</sup> )	07 DIAS	28 DIAS	91 DIAS	180 DIAS	300 DIAS
R 0.400	1	1,813	1,740	1,708	1,704	1,695
	2	1,774	1,733	1,703	1,699	1,681
	3	1,793	1,736	1,705	1,701	1,688
R 0.600	1	2,189	2,141	2,114	2,104	2,085
	2	1,921	1,845	1,814	1,804	1,788
	3	1,756	1,683	1,648	1,634	1,589
R 0.827	1	2,893	2,838	2,798	2,795	2,760
	2	1,901	1,837	1,789	1,787	1,785
	3	2,134	2,030	2,004	2,003	1,962
EV 0.302	1	3,244	3,207	3,162	3,160	3,130
	2	3,975	3,918	3,850	3,848	3,823
	3	2,888	2,857	2,798	2,795	2,751
EV 0.402	1	2,941	2,857	2,851	2,845	2,846
	2	2,415	2,344	2,335	2,327	2,323
	3	2,458	2,404	2,371	2,364	2,356
EV 0.491	1	1,508	1,438	1,213	1,205	1,178
	2	2,741	2,710	2,653	2,647	2,636
	3	2,807	2,766	2,691	2,678	2,667
EVC 0.331	1	1,146	1,094	1,073	1,045	1,046
	2	3,364	3,324	3,307	3,271	3,273
	3	1,524	1,454	1,436	1,429	1,429
EVC 0.402	1	1,315	1,266	1,224	1,218	1,202
	2	0,789	0,734	0,671	0,646	0,644
	3	1,062	1,018	1,015	0,963	0,951
EVC 0.491	1	2,766	2,727	2,678	2,646	2,623
	2	2,448	2,397	2,355	2,308	2,292
	3	1,589	1,548	1,506	1,456	1,448

OBSERVAÇÃO: a idade de 07 dias serve como referência para as medidas seguintes.

**ANEXO E – Comparativo entre os resultados dos ensaios de RCD com os resultados calculados pela NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 28 dias.**

Resistência a Compressão Diametral - ACI / NBR 6118/03

TRAÇO	CP	Fck (MPa)	ACI / NBR 6118	ENSAIO
		28 dias	$F_c = 0,3 (F_{ck})^{2/3}$ (MPa)	(MPa)
R 0.400	1	64,70	4,83	4,52
	2	64,20	4,81	4,79
	3	63,40	4,77	4,27
	<b>Média</b>	<b>64,10</b>	<b>4,80</b>	<b>4,66</b>
R 0.600	1	42,10	3,63	3,21
	2	35,30	3,23	4,19
	3	42,60	3,66	3,61
	<b>Média</b>	<b>42,35</b>	<b>3,64</b>	<b>3,41</b>
R 0.827	1	24,80	2,55	2,84
	2	23,10	2,43	2,52
	3	24,80	2,55	2,60
	<b>Média</b>	<b>24,24</b>	<b>2,51</b>	<b>2,56</b>
EV 0.302	1	49,70	4,06	3,82
	2	46,30	3,87	4,53
	3	48,80	4,01	3,68
	<b>Média</b>	<b>49,25</b>	<b>4,03</b>	<b>3,75</b>
EV 0.402	1	43,50	3,71	3,32
	2	44,60	3,77	3,53
	3	45,10	3,80	3,48
	<b>Média</b>	<b>44,40</b>	<b>3,76</b>	<b>3,44</b>
EV 0.491	1	24,40	2,52	2,15
	2	24,40	2,52	2,23
	3	24,90	2,56	2,52
	<b>Média</b>	<b>24,57</b>	<b>2,54</b>	<b>2,19</b>
EVC 0.331	1	54,20	4,30	3,35
	2	54,50	4,31	3,05
	3	53,90	4,28	3,16
	<b>Média</b>	<b>54,20</b>	<b>4,30</b>	<b>3,23</b>
EVC 0.402	1	31,80	3,01	2,75
	2	31,80	3,01	2,51
	3	31,10	2,97	2,73
	<b>Média</b>	<b>31,57</b>	<b>3,00</b>	<b>2,66</b>
EVC 0.491	1	22,60	2,40	2,73
	2	24,40	2,52	2,73
	3	24,10	2,50	2,47
	<b>Média</b>	<b>24,25</b>	<b>2,51</b>	<b>2,64</b>

**ANEXO F – Comparativo entre os resultados dos ensaios de RCD com os resultados calculados pela NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 91 dias.**

Resistência a Compressão Diametral - ACI / NBR 6118/03

TRAÇO	CP	Fck (MPa)	ACI / NBR 6118	ENSAIO
		91 dias	$F_c = 0,3 (F_{ck})^{2/3}$ (MPa)	(MPa)
R 0.400	1	79,80	5,56	5,11
	2	63,00	4,75	4,47
	3	72,40	5,21	5,88
	<b>Média</b>	<b>76,10</b>	<b>5,39</b>	<b>4,93</b>
R 0.600	1	47,40	3,93	3,74
	2	45,70	3,83	3,46
	3	45,70	3,83	4,06
	<b>Média</b>	<b>46,27</b>	<b>3,87</b>	<b>3,90</b>
R 0.827	1	25,90	2,63	3,22
	2	24,40	2,52	3,21
	3	26,40	2,66	2,71
	<b>Média</b>	<b>25,57</b>	<b>2,60</b>	<b>3,22</b>
EV 0.302	1	51,95	4,18	3,94
	2	50,40	4,09	4,06
	3	52,30	4,20	3,48
	<b>Média</b>	<b>51,55</b>	<b>4,16</b>	<b>4,00</b>
EV 0.402	1	47,10	3,91	3,68
	2	49,10	4,02	3,90
	3	50,20	4,08	3,76
	<b>Média</b>	<b>48,80</b>	<b>4,01</b>	<b>3,78</b>
EV 0.491	1	29,00	2,83	2,53
	2	29,90	2,89	3,28
	3	28,60	2,81	3,27
	<b>Média</b>	<b>29,17</b>	<b>2,84</b>	<b>3,28</b>
EVC 0.331	1	58,74	4,53	3,48
	2	53,20	4,24	4,12
	3	57,86	4,49	3,61
	<b>Média</b>	<b>58,31</b>	<b>4,51</b>	<b>3,54</b>
EVC 0.402	1	38,50	3,42	3,32
	2	37,30	3,35	3,00
	3	41,90	3,62	3,73
	<b>Média</b>	<b>37,90</b>	<b>3,38</b>	<b>3,16</b>
EVC 0.491	1	30,00	2,90	3,17
	2	29,20	2,84	3,02
	3	27,90	2,76	3,34
	<b>Média</b>	<b>29,60</b>	<b>2,87</b>	<b>3,09</b>

**ANEXO G – Comparativo entre os resultados dos ensaios de RCD com os resultados calculados pela NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 300 dias.**

Resistência a Compressão Diametral - ACI / NBR 6118/03

TRAÇO	CP	Fck (MPa)	ACI / NBR 6118	ENSAIO
		300 dias	$F_c = 0,3 (F_{ck})^{2/3}$ (MPa)	(MPa)
R 0.400	1	78,30	5,49	4,97
	2	83,70	5,74	5,48
	3	67,80	4,99	5,15
	<b>Média</b>	<b>81,00</b>	<b>5,62</b>	<b>5,20</b>
R 0.600	1	48,70	4,00	3,92
	2	50,40	4,09	4,25
	3	51,50	4,15	3,50
	<b>Média</b>	<b>50,20</b>	<b>4,08</b>	<b>4,08</b>
R 0.827	1	26,30	2,65	3,03
	2	26,20	2,65	3,27
	3	21,30	2,31	3,37
	<b>Média</b>	<b>26,25</b>	<b>2,65</b>	<b>3,32</b>
EV 0.302	1	55,88	4,38	4,01
	2	57,31	4,46	4,39
	3	52,91	4,23	5,17
	<b>Média</b>	<b>55,37</b>	<b>4,36</b>	<b>4,20</b>
EV 0.402	1	45,60	3,83	4,15
	2	49,80	4,06	4,12
	3	50,20	4,08	4,17
	<b>Média</b>	<b>50,00</b>	<b>4,07</b>	<b>4,14</b>
EV 0.491	1	29,60	2,87	3,25
	2	29,60	2,87	2,99
	3	29,40	2,86	3,36
	<b>Média</b>	<b>29,54</b>	<b>2,87</b>	<b>3,31</b>
EVC 0.331	1	59,20	4,56	3,71
	2	65,10	4,85	3,50
	3	53,90	4,28	3,69
	<b>Média</b>	<b>62,15</b>	<b>4,71</b>	<b>3,63</b>
EVC 0.402	1	40,70	3,55	3,33
	2	41,80	3,61	3,56
	3	41,10	3,57	3,01
	<b>Média</b>	<b>41,20</b>	<b>3,58</b>	<b>3,17</b>
EVC 0.491	1	27,60	2,74	3,10
	2	31,40	2,99	3,10
	3	31,60	3,00	2,88
	<b>Média</b>	<b>31,50</b>	<b>2,99</b>	<b>3,10</b>

**ANEXO H – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.**

MÓDULO DE ELASTICIDADE				
		VARIACÃO NA IDADE - Eci (GPa)		
TRAÇO	CP	28 DIAS	91 DIAS	300 DIAS
R 0.400	1	-----	-----	-----
	2	46,83	48,81	49,58
	3	44,60	47,39	48,20
	Média	<b>45,72</b>	<b>48,10</b>	<b>48,89</b>
R 0.600	1	-----	-----	-----
	2	33,90	38,51	43,14
	3	33,55	37,43	42,36
	Média	<b>33,73</b>	<b>37,97</b>	<b>42,75</b>
R 0.827	1	-----	-----	-----
	2	31,52	32,44	32,78
	3	30,61	29,89	30,20
	Média	<b>31,07</b>	<b>31,17</b>	<b>31,49</b>
EV 0.302	1	-----	-----	41,05
	2	38,67	40,99	41,18
	3	38,52	40,69	42,68
	Média	<b>38,60</b>	<b>40,84</b>	<b>41,64</b>
EV 0.402	1	-----	-----	-----
	2	37,96	39,56	39,72
	3	37,51	39,29	39,44
	Média	<b>37,74</b>	<b>39,43</b>	<b>39,58</b>
EV 0.491	1	-----	-----	-----
	2	34,73	35,40	35,64
	3	34,01	34,84	35,39
	Média	<b>34,37</b>	<b>35,12</b>	<b>35,52</b>
EVC 0.331	1	-----	-----	-----
	2	39,56	41,95	43,54
	3	39,22	41,30	42,55
	Média	<b>39,39</b>	<b>41,63</b>	<b>43,05</b>
EVC 0.402	1	-----	-----	-----
	2	36,06	37,04	37,68
	3	35,81	36,53	37,51
	Média	<b>35,94</b>	<b>36,79</b>	<b>37,60</b>
EVC 0.491	1	-----	-----	-----
	2	34,30	35,80	36,53
	3	34,30	34,56	35,66
	Média	<b>34,30</b>	<b>35,18</b>	<b>36,10</b>



**ANEXO I – Comparativo entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade com os resultados calculados pelo CEB/90, NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 28 dias.**

TRAÇO	CP	28DIAS			
		CEB/90	ACI	NBR 6118	ENSAIO
R 0.400	1	48,08	44,76	45,04	44,59
	2	47,95	44,59	44,87	46,82
	3	47,75	44,31	44,59	44,07
	Média	<b>47,93</b>	<b>44,55</b>	<b>44,83</b>	<b>45,16</b>
R 0.600	1	41,66	36,11	36,34	33,90
	2	39,28	33,06	33,27	33,55
	3	41,82	36,32	36,55	38,74
	Média	<b>41,74</b>	<b>36,22</b>	<b>36,44</b>	<b>33,73</b>
R 0.827	1	34,92	27,71	27,89	37,36
	2	34,11	26,75	26,91	32,44
	3	34,92	27,71	27,89	30,61
	Média	<b>34,66</b>	<b>27,40</b>	<b>27,57</b>	<b>31,52</b>
EV 0.302	1	44,03	39,23	39,48	38,67
	2	43,00	37,87	38,10	38,67
	3	43,76	38,88	39,12	38,52
	Média	<b>43,90</b>	<b>39,05</b>	<b>39,30</b>	<b>38,62</b>
EV 0.402	1	42,12	36,70	36,93	34,77
	2	42,47	37,16	37,40	38,41
	3	42,63	37,37	37,61	36,11
	Média	<b>42,40</b>	<b>37,08</b>	<b>37,31</b>	<b>36,43</b>
EV 0.491	1	34,73	27,49	27,66	36,40
	2	34,73	27,49	27,66	36,65
	3	34,97	27,77	27,94	29,71
	Média	<b>34,81</b>	<b>27,58</b>	<b>27,76</b>	<b>36,52</b>
EVC 0.331	1	45,32	40,97	41,23	37,30
	2	45,40	41,08	41,34	38,79
	3	45,24	40,86	41,11	38,91
	Média	<b>45,32</b>	<b>40,97</b>	<b>41,23</b>	<b>38,34</b>
EVC 0.402	1	37,94	31,38	31,58	36,06
	2	37,94	31,38	31,58	39,22
	3	37,66	31,03	31,23	33,69
	Média	<b>37,85</b>	<b>31,27</b>	<b>31,46</b>	<b>34,68</b>
EVC 0.491	1	33,86	26,46	26,62	34,30
	2	34,73	27,49	27,66	34,30
	3	34,59	27,32	27,49	39,56
	Média	<b>34,66</b>	<b>27,40</b>	<b>27,58</b>	<b>34,30</b>

Equações: CEB/90 →  $EC = 21500(f_{cm}/10)^{1/3} . s$

ACI →  $EC = 5565 (F_{ck})^{1/2}$

NBR 6118/03 →  $EC = 5600 (F_{ck})^{1/2}$

**ANEXO J – Comparativo entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade com os resultados calculados pelo CEB/90, NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 91 dias.**

TRAÇO	CP	91 DIAS			
		CEB/90	ACI	NBR 6118	ENSAIO
R 0.400	1	51,56	49,71	50,03	45,00
	2	47,65	44,17	44,45	48,81
	3	49,91	47,35	47,65	47,39
	Média	<b>50,75</b>	<b>48,55</b>	<b>48,85</b>	<b>47,06</b>
R 0.600	1	43,34	38,31	38,55	35,33
	2	42,81	37,62	37,86	38,51
	3	42,81	37,62	37,86	37,43
	Média	<b>42,99</b>	<b>37,85</b>	<b>38,09</b>	<b>37,09</b>
R 0.827	1	35,43	28,32	28,50	38,25
	2	34,73	27,49	27,66	37,50
	3	35,66	28,59	28,77	39,56
	Média	<b>35,28</b>	<b>28,14</b>	<b>28,32</b>	<b>38,43</b>
EV 0.302	1	44,68	40,11	40,36	39,11
	2	44,23	39,51	39,76	33,52
	3	44,78	40,25	40,50	39,66
	Média	<b>44,57</b>	<b>39,96</b>	<b>40,21</b>	<b>39,39</b>
EV 0.402	1	43,25	38,19	38,43	40,99
	2	43,85	38,99	39,24	40,69
	3	44,18	39,43	39,68	37,96
	Média	<b>43,76</b>	<b>38,88</b>	<b>39,12</b>	<b>39,88</b>
EV 0.491	1	36,79	29,97	30,16	37,51
	2	37,17	30,43	30,62	39,29
	3	36,62	29,76	29,95	33,00
	Média	<b>36,86</b>	<b>30,06</b>	<b>30,25</b>	<b>38,40</b>
EVC 0.331	1	46,55	42,65	42,92	33,00
	2	45,04	40,59	40,85	33,65
	3	46,32	42,33	42,60	33,73
	Média	<b>46,44</b>	<b>42,49</b>	<b>42,76</b>	<b>33,46</b>
EVC 0.402	1	40,44	34,53	34,75	34,24
	2	40,01	33,90	34,20	32,09
	3	41,59	36,02	36,25	33,07
	Média	<b>40,23</b>	<b>34,26</b>	<b>34,48</b>	<b>33,13</b>
EVC 0.491	1	37,21	30,48	30,67	30,20
	2	36,88	30,07	30,26	37,04
	3	36,32	29,39	29,58	34,56
	Média	<b>37,04</b>	<b>30,28</b>	<b>30,47</b>	<b>35,80</b>

Equações: CEB/90 →  $EC = 21500(f_{cm}/10)^{1/3} \cdot s$

ACI →  $EC = 5565 (F_{ck})^{1/2}$

NBR 6118/03 →  $EC = 5600 (F_{ck})^{1/2}$

**ANEXOS K – Comparativo entre os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade com os resultados calculados pelo CEB/90, NBR 6118/2003 e ACI 318/1989 para 300 dias.**

TRAÇO	CP	300 DIAS			
		CEB/90	ACI	NBR 6118	ENSAIO
R 0.400	1	51,23	49,24	49,55	49,58
	2	52,38	50,91	51,23	46,90
	3	48,83	45,82	46,11	48,20
	Média	<b>51,81</b>	<b>50,09</b>	<b>50,40</b>	<b>48,23</b>
R 0.600	1	43,73	38,84	39,08	47,74
	2	44,23	39,51	39,76	43,14
	3	44,55	39,94	40,19	42,36
	Média	<b>44,18</b>	<b>39,43</b>	<b>39,68</b>	<b>42,75</b>
R 0.827	1	35,61	28,54	28,72	28,64
	2	35,57	28,48	28,66	34,91
	3	33,20	25,68	25,85	32,78
	Média	<b>35,59</b>	<b>28,51</b>	<b>28,69</b>	<b>33,84</b>
EV 0.302	1	43,73	38,84	39,08	41,05
	2	44,21	39,47	39,72	41,18
	3	43,37	38,35	38,60	42,68
	Média	<b>43,77</b>	<b>38,89</b>	<b>39,14</b>	<b>41,64</b>
EV 0.402	1	42,78	37,58	37,82	34,94
	2	44,06	39,27	39,52	34,02
	3	44,18	39,43	39,68	34,73
	Média	<b>44,12</b>	<b>39,35</b>	<b>39,60</b>	<b>34,56</b>
EV 0.491	1	37,04	30,28	30,47	34,84
	2	37,04	30,28	30,47	36,76
	3	36,96	30,17	30,36	35,40
	Média	<b>37,02</b>	<b>30,25</b>	<b>30,44</b>	<b>35,66</b>
EVC 0.331	1	46,67	42,82	43,09	48,55
	2	48,17	44,90	45,18	41,95
	3	45,24	40,86	41,11	48,55
	Média	<b>47,44</b>	<b>43,87</b>	<b>44,15</b>	<b>48,55</b>
EVC 0.402	1	41,19	35,50	35,73	44,97
	2	41,56	35,98	36,21	46,74
	3	41,33	35,68	35,90	42,55
	Média	<b>41,36</b>	<b>35,72</b>	<b>35,94</b>	<b>44,75</b>
EVC 0.491	1	36,19	29,24	29,42	37,68
	2	37,78	31,18	31,38	36,53
	3	37,86	31,28	31,38	31,68
	Média	<b>37,82</b>	<b>31,23</b>	<b>31,43</b>	<b>37,11</b>

Equações: CEB/90 →  $EC = 21500(f_{cm}/10)^{1/3} \cdot s$

ACI →  $EC = 5565 (F_{ck})^{1/2}$

NBR 6118/03 →  $EC = 5600 (F_{ck})^{1/2}$

**ANEXOS L – Resultados de resistência a compressão axial e equação de Abrams.**

Mistura	a/ag	07 dias	r <sup>2</sup>	equação exponencial
R 0.400	0.400	50.36	0.987	-2.41(a/mc)
R 0.600	0.600	34.10		fc = 136.7 e
R 0.827	0.827	19.14		
EV 0.302	0.302	39.90	0.813	-3.98 (a/mc)
EV 0.402	0.402	36.37		fc= 146.6 e
EV 0.491	0.491	18.56		
EVC 0.331	0.331	49.67	0.964	-5.99 (a/mc)
EVC 0.402	0.402	27.50		fc = 340.8 e
EVC 0.491	0.491	18.80		
Mistura	a/ag	28 dias	r <sup>2</sup>	equação exponencial
R 0.400	0.400	64.10	0.992	-2.43 (a/mc)
R 0.600	0.600	42.35		fc = 173.6 e
R 0.827	0.827	24.24		
EV 0.302	0.302	48,26	0.815	-3.51 (a/mc)
EV 0.402	0.402	44.40		fc = 152.0 e
EV 0.491	0.491	24.57		
EVC 0.331	0.331	54.20	0.943	-5.08 (a/mc)
EVC 0.402	0.402	31.57		fc = 274.0 e
EVC 0.491	0.491	23.70		
Mistura	a/ag	91 dias	r <sup>2</sup>	equação exponencial
R 0.400	0.400	76.10	0.997	-2.72 (a/mc)
R 0.600	0.600	46.27		fc = 230.1 e
R 0.827	0.827	25.57		
EV 0.302	0.302	51.55	0.795	-2.96 (a/mc)
EV 0.402	0.402	48.80		fc = 136.2 e
EV 0.491	0.491	29.17		
EVC 0.331	0.331	56.60	0.985	-4.14 (a/mc)
EVC 0.402	0.402	39.23		fc= 217.1 e
EVC 0.491	0.491	29.03		
Mistura	a/ag	300 dias	r <sup>2</sup>	equação exponencial
R 0.400	0.400	81.00	0.992	-2.81 (a/mc)
R 0.600	0.600	50.20		fc = 257.1 e
R 0.827	0.827	26.25		
EV 0.302	0.302	55.37	0.844	-3.27(a/mc)
EV 0.402	0.402	50.00		fc = 160.1 e
EV 0.491	0.491	29.54		
EVC 0.331	0.331	62.15	0.979	-4.46 (a/mc)
EVC 0.402	0.402	41.20		fc = 263.7 e
EVC 0.491	0.491	30.20		

**ANEXOS M – Evolução da resistência à compressão e equações de progressão.**

Mistura	a/ag	07 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)	300 dias (MPa)	r <sup>2</sup>	Equação Logarítmica
R 0.400	0,400	50,36	64,10	76,10	81,00	0.992	fc = 22.65 ln(t)+ 49.88
R 0.600	0,600	34,10	42,35	46,27	50,20	0.997	fc = 11.43 ln(t)+ 34.14
R 0.827	0,827	19,14	24,24	25,57	26,25	0.947	fc = 5.207 ln(t)+ 19.66
EV 0.302	0,302	39,90	48,26	51,55	55,37	0.994	fc = 10.93 ln(t)+ 40.08
EV 0.402	0,402	36,37	44,40	48,80	50,00	0.982	fc = 10.17 ln(t)+ 36.80
EV 0.491	0,491	18,56	24,57	29,17	29,54	0.972	fc = 8.407 ln(t)+ 18.78
EVC 0.331	0,331	49,67	54,20	56,60	62,15	0.929	fc = 8.332 ln(t)+ 49.03
EVC 0.402	0,402	27,50	31,57	39,23	41,20	0.941	fc = 10.38 ln(t)+ 26.62
EVC 0.491	0,491	18,80	23,70	29,03	30,20	0.977	fc = 8.633 ln(t)+ 18.57