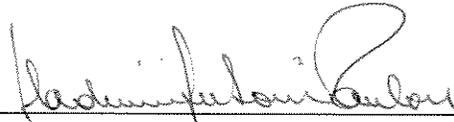


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS E  
MECÂNICAS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE INIBIDORES

Autora: Michele Dechichi

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca constituída por:



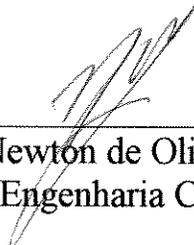
---

Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon  
Fac. Engenharia Civil - UNICAMP



---

Prof.a. Dra. Inês Joeques  
Instituto de Química - UNICAMP



---

Prof. Dr. Newton de Oliveira Pinto Jr.  
Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**Reação álcali-agregado : Estudo das propriedades elásticas e  
mecânicas através da utilização de inibidores**

Michele Dechichi

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração de Estruturas de Concreto.

Campinas, SP  
1998

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.

21/09

Prof. Dr. *Vladimir Antonio Paulon*

Matrícula: 042480

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:			
V.	Ex.		
TOMBO BC/	37608		
PROC.	229199		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00		
DATA	05/05/99		
N.º CPD			

CM-00122863-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D356r Dechichi, Michele  
Reação álcali-agregado: estudo das propriedades elásticas e mecânicas através da utilização de inibidores. / Michele Dechichi.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Vladimir Antonio Paulon  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Álcalis. 2. Sílica. 3. Cinza volante. I. Paulon, Vladimir Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

A autora agradece a todas as pessoas e entidades que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, entre as quais destacam-se:

- O orientador, Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon, por todo seu conhecimento técnico, fundamental na interpretação dos resultados e pela revisão do texto;
- O Laboratório de Furnas Centrais Elétricas, pelo apoio técnico e financeiro, sem o qual não seria possível a realização desta pesquisa;
- A Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas;
- A FAPESP pelo apoio financeiro.

## **RESUMO**

A finalidade deste trabalho é de mostrar os efeitos da reação álcali-agregado em concretos e argamassas, no que diz respeito ao comportamento elástico e mecânico. Buscando minimizar os efeitos expansivos da reação através da substituição de parte do cimento por pozolana e analisando quais as consequências mecânicas que a reação pode causar ao concreto.

Para tal, foram realizados ensaios de reatividade, utilizando combinações com dois tipos de pozolana, o Fumo de Sílica e a Cinza Volante. Além dos ensaios de expansão, foram feitos também ensaios mecânicos, como resistência à compressão simples e diametral, módulo de deformação e ensaios de porosidade, permeabilidade e microscopia eletrônica.

Através destes ensaios foi possível analisar se a reação álcali-agregado pode comprometer os concretos e argamassas no que diz respeito à expansão e aos esforços mecânicos.

## **SUMMARY**

The purpose of this paper is to report the effects of alkali-aggregate reaction in concrete and mortar, analyzing the mechanical and elastical behavior. Looking for minimize the expansive effects of the reaction through the substitution of part of the cement by pozzolan and analyzing which mechanical consequences the reaction can cause to the concrete.

To reach this objective, it was made reactivity tests, using two differents pozzolans, Silica Fume and Fly Ash. Besides these tests, it was also analyzed the mechanical and elastical behaviour by resistance tests and verifying de modulus of elasticity, water absorption and eletronic analysis in microscope.

Through these tests, it was possible to analyse if the alkali-aggregate reaction can cause any damage to concrete or mortar when it considered expansion and mechanical properties.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
SUMMARY	III
SUMÁRIO	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE GRÁFICOS	X
1- INTRODUÇÃO	1
1.1 - Reação álcali-sílica	2
1.2 - Reação álcali-carbonato	2
1.3 - Reação álcali-silicato	2
2 - OBJETIVOS	3
2.1 - Objetivo geral	3
2.2 - Objetivo específico	3
3 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS	4
4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1 - Histórico	5
4.1.1 - ASTM C 295 “PETROGRAPHIC EXAMINATION”	6
4.1.2 - ASTM C 289 “CHEMICAL METHOD”	7
4.1.3 - ASTM C 277 “MORTAR BAR METHOD”	7
4.1.4 - ASTM C 1260 “ACCELERATED MORTAR BAR METHOD”	8
4.2- Exemplos de estruturas afetadas por reação álcali-agregado	10
4.2.1- Sintomas mais frequentes da reação álcali-agregado	11
4.2.2- Problemas causados pela reação álcali-agregado	12
4.3 - Fatores influentes	13
4.3.1 - Teor de álcalis no cimento	13
4.3.2- Quantidade e granulometria dos grãos reativos no agregado	14

4.3.3 - Influência da umidade e temperatura	15
4.4 - Inibidores da reação álcali-agregado	16
4.4.1 - Utilização de pozolana como inibidor da reação	16
4.5 - Influência da armadura em elementos de concreto	20
5- METODOLOGIA	22
5.1 - Experimentos em argamassa	22
5.1.1- Ensaio de reatividade	22
5.1.2- Ensaio de porosidade	23
5.1.3- Ensaio de resistência à compressão simples	23
5.1.4- Ensaio de resistência à compressão diametral	23
5.1.5- Ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade	23
5.2 - Experimentos em concreto	24
5.2.1 - Ensaio de reatividade	24
5.2.2- Ensaio de porosidade	24
5.2.3- Ensaio de resistência à compressão simples	25
5.2.4- Ensaio de resistência à compressão diametral	25
5.2.5- Ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade	25
5.2.6 - Ensaio de módulo de deformação	25
5.2.7 - Ensaio de microscopia eletrônica	26
5.3 - Materiais utilizados	26
5.3.1 - Experimentos em argamassa	26
5.3.2 - Experimentos em concreto	28
5.4 - Composição química dos materiais utilizados	29
6- RESULTADOS EXPERIMENTAIS	31
6.1- Ensaio em argamassa	31
6.1.1- Porosidade	31
6.1.2- Ensaio de absorção de água por capilaridade	32
6.1.3- Ensaio de reatividade	37
6.1.4- Ensaio de resistência à compressão simples e diametral	45

6.2- Ensaio em concreto	51
6.2.1- Porosidade	51
6.2.2- Ensaio de Reatividade	53
6.2.3- Ensaio de absorção de água por capilaridade	57
6.2.4-Ensaio de resistência à compressão simples	60
6.2.5- Ensaio de resistência à compressão diametral	62
6.2.6- Ensaio de módulo de deformação	65
6.2.7- Ensaio de Microscopia Eletrônica	68
7- CONCLUSÕES	73
7.1- Ensaio de porosidade	73
7.2- Ensaio de permeabilidade	73
7.3- Ensaio de reatividade	73
7.4- Ensaio de compressão simples e diametral	74
7.5- Ensaio de Módulo de Deformação	75
8.6- Ensaio de Microscopia Eletrônica	75
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Análise petrográfica do Quartzito de Corumbá	6
FIGURA 2 - Forma para o ensaio de reatividade em barras de argamassa	7
FIGURA 3 - Tanque de cura térmica	8
FIGURA 4 - Extensômetro	8
FIGURA 5 - Relação entre o conteúdo de álcalis ativos no cimento, teor de cimento no concreto e os limites de potencialidade deletéria.	14
FIGURA 6 - Proporção péssima ; relação - a/c = 0,4 e agregado/cimento = 0,75; conteúdo de álcalis = 6 kg/m <sup>3</sup>	15
FIGURA 7 - Fissuras devido à Reação álcali-silica em laje contendo escória	21
FIGURA 8 - Produto de reação álcali-agregado	68
FIGURA 9 - Produto crisralizado de reação álcali-agregado	69
FIGURA 10 - Produto crisralizado de reação álcali-agregado	69
FIGURA 11 - Produto de reação álcali-agregado	70
FIGURA 12 - Produto de reação álcali-agregado- gel maciço gretado	70
FIGURA 13 - Produto de reação álcali-agregado	71
FIGURA 14 - Produto de reação álcali-agregado	71

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Composição química dos principais elementos componentes do cimento	4
TABELA 2 - Estrut. de concreto no Brasil com evidências e/ou suspeitas de RAA	11
TABELA 3 - Composição química do fumo de sílica	19
TABELA 4 - Dosagens utilizadas para os corpos de prova com fumo de sílica	26
TABELA 5- Dosagens utilizadas para os corpos de prova com cinza volante	27
TABELA 6- Dosagens utilizadas para os corpos de prova sem adição	27
TABELA 7- Dosagens utilizadas para os corpos de prova com fumo de sílica	28
TABELA 8- Dosagens utilizadas para os corpos de prova com cinza volante	28
TABELA 9 - Composição química do cimento TIPO C- I	29
TABELA 10 - Composição química do cimento TIPO C- II	29
TABELA 11 - Composição química da cinza volante TIPO CV - I	30
TABELA 12 - Composição química do fumo de sílica TIPO FS - I	30
TABELA 13- Resultados do ensaio de porosidade em argamassa	31
TABELA 14- Resultados do ensaio de absorção por capilaridade em argamassa	33
TABELA 15-Ensaio de reatividade em argamassa. Sem adição relação a/c=0.35	37
TABELA 16- Ensaio de reatividade em argamassa. 15% de fumo de sílica, relação a/c=0.35	38
TABELA 17- Ensaio de reatividade em argamassa. 30% de fumo de sílica, relação a/c=0.35	38
TABELA 18- Ensaio de reatividade em argamassa. sem adição, relação a/c=0.60	39
TABELA 19- Ensaio de reatividade em argamassa. 15% de fumo de sílica, relação a/c=0.60	39
TABELA 20- Ensaio de reatividade em argamassa. 30% de fumo de sílica, relação a/c=0.60	40
TABELA 21- Ensaio de reatividade em argamassa. 20% de cinza volante, relação a/c=0.35	40
TABELA 22- Ensaio de reatividade em argamassa. 40% de cinza volante, relação a/c=0.37	41
TABELA 23- Ensaio de reatividade em argamassa. 20% de cinza volante, relação a/c=0.60	41
TABELA 24- Ensaio de reatividade em argamassa. 40% de cinza volante, relação a/c=0.60	42
TABELA 25- Resultado dos ensaios de resistência à compressão simples e diametral	46
TABELA 26- Resultados do ensaio de porosidade	51
TABELA 27- Resultado do ensaio de reatividade Fumo de Sílica (0%); a/c = 0,35	54

TABELA 28- Resultado do ensaio de reatividade Fumo de Sílica (15%); a/c = 0,35	54
TABELA 29- Resultado do ensaio de reatividade Fumo de Sílica (30%); a/c = 0,35	55
TABELA 30- Resultado do ensaio de reatividade Cinza Volante (0%); a/c = 0,35	55
TABELA 31- Resultado do ensaio de reatividade Cinza Volante (20%); a/c = 0,35	56
TABELA 32- Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade	57
TABELA 33- Resultado do ensaio de compressão simples	60
TABELA 34- Resultado do ensaio de compressão diametral	63
TABELA 35- Resultado do ensaio de módulo de deformação	65

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1-Porosidade em argamassa	32
GRÁFICO 2.1- Permeabilidade em argamassas, 0% de adição, $a/c=0,35$	33
GRÁFICO 2.2- Permeabilidade em argamassas, 15% de Fumo de sílica, $a/c=0,35$	34
GRÁFICO 2.3- Permeabilidade em argamassas, 30% de Fumo de sílica, $a/c=0,35$	34
GRÁFICO 2.4- Permeabilidade em argamassas, 0% de adição, $a/c=0,60$	34
GRÁFICO 2.5- Permeabilidade em argamassas, 15% de Fumo de sílica, $a/c=0,60$	35
GRÁFICO 2.6- Permeabilidade em argamassas, 30% de Fumo de sílica, $a/c=0,60$	35
GRÁFICO 2.7- Permeabilidade em argamassas, 20% de Cinza volante, $a/c=0,35$	35
GRÁFICO 2.8- Permeabilidade em argamassas, 40% de Cinza volante, $a/c=0,37$	36
GRÁFICO 2.9- Permeabilidade em argamassas, 20% de Cinza volante, $a/c=0,60$	36
GRÁFICO 2.10- Permeabilidade em argamassas, 40% de Cinza volante, $a/c=0,60$	36
GRÁFICO 3.1- Relação entre dosagens de fumo de sílica, relação $a/c=0.35$	42
GRÁFICO 3.2- Relação entre dosagens de fumo de sílica, relação $a/c=0.60$	42
GRÁFICO 3.3- Relação entre dosagens de cinza volante, relação $a/c=0.35$ e $a/c=0.37$	43
GRÁFICO 3.4- Relação entre dosagens de cinza volante, relação $a/c=0.60$	43
GRÁFICO 3.5- Diferença de expansão, mesma % de adição e diferente relação $a/c$	44
GRÁFICO 3.6- Diferença de expansão, mesma % de adição e diferente relação $a/c$	44
GRÁFICO 3.7- Diferença de expansão, mesma % de adição e diferente relação $a/c$	44
GRÁFICO 3.8- Diferença de expansão, mesma % de adição e diferente relação $a/c$	45
GRÁFICO 3.9- Diferença de expansão, mesma % de adição e diferente relação $a/c$	45
GRÁFICO 4.1- Ensaio de resistência à compressão simples	46
GRÁFICO 4.2- Ensaio de resistência à compressão simples	46
GRÁFICO 4.3- Ensaio de resistência à compressão simples	47
GRÁFICO 4.4- Ensaio de resistência à compressão simples	47
GRÁFICO 4.5- Ensaio de resistência à compressão simples	47
GRÁFICO 4.6- Ensaio de resistência à compressão simples	47
GRÁFICO 4.7- Ensaio de resistência à compressão simples	48

GRÁFICO 4.8- Ensaio de resistência à compressão simples	48
GRÁFICO 4.9- Ensaio de resistência à compressão simples	48
GRÁFICO 4.10- Ensaio de resistência à compressão simples	48
GRÁFICO 4.11- Ensaio de resistência à compressão simples	49
GRÁFICO 4.12- Ensaio de resistência à compressão simples	49
GRÁFICO 4.13- Ensaio de resistência à compressão simples	49
GRÁFICO 4.14- Ensaio de resistência à compressão simples	49
GRÁFICO 4.15- Ensaio de resistência à compressão simples	50
GRÁFICO 4.16- Ensaio de resistência à compressão simples	50
GRÁFICO 4.17- Ensaio de resistência à compressão simples	50
GRÁFICO 4.18- Ensaio de resistência à compressão simples	50
GRÁFICO 5.1- Relação entre a porosidade, 0% de fumo de sílica e relação a/c=0.35	51
GRÁFICO 5.2- Relação entre a porosidade, 15% de fumo de sílica e relação a/c=0.35	52
GRÁFICO 5.3 - Relação entre a porosidade, 30% de fumo de sílica e relação a/c=0.35	52
GRÁFICO 5.4 - Relação entre a porosidade, 0% de cinza volante e relação a/c=0.35	52
GRÁFICO 5.5 - Relação entre a porosidade, 20% de cinza volante e relação a/c=0.35	53
GRÁFICO 5.6 - Relação entre a porosidade, 40% de cinza volante e relação a/c=0.35	53
Gráfico 6.1 - Reatividade em concreto; Fumo de Sílica; a/c = 0,35	56
Gráfico 6.2 - Reatividade em concreto; Cinza Volante; a/c = 0,35	57
GRÁFICO 7.1- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	58
GRÁFICO 7.2- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	58
GRÁFICO 7.3- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	58
GRÁFICO 7.4- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	59
GRÁFICO 7.5- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	59
GRÁFICO 7.5- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	59
GRÁFICO 8.1- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	60
GRÁFICO 8.2 - Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	61
GRÁFICO 8.3 - Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	61
GRÁFICO 8.4 - Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	61

GRÁFICO 8.5 - Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	61
GRÁFICO 8.6 - Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	62
GRÁFICO 9.1- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	63
GRÁFICO 9.2- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	63
GRÁFICO 9.3- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	64
GRÁFICO 9.4- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	64
GRÁFICO 9.5- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	64
GRÁFICO 9.6- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	65
GRÁFICO 10.1- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	66
GRÁFICO 10.2- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	66
GRÁFICO 10.3- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	66
GRÁFICO 10.4 - Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	67
GRÁFICO 10.5- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	67
GRÁFICO 10.6- Relação entre “CP” com mesma dosagem e diferente condição de cura	67

## 1- INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e ainda é objeto de pesquisa, pois existem diversos fatores que afetam sua durabilidade que não são totalmente conhecidos. Sua exposição à ambientes agressivos facilita a ocorrência de reações ou processos que iniciam a degradação e, é uma destas reações que será discutida neste trabalho: a reação álcali-agregado, que tem sido bastante estudada, principalmente no que diz respeito à medidas preventivas.

Os fenômenos da reação álcali-agregado já são conhecidos desde a década de 30, quando foram observados problemas em estruturas de concreto na Califórnia e a partir de então, STANTON (1940) depois de vários experimentos em argamassa, publicou detalhadamente suas observações sobre esta reação.

Esta reação ocorre somente na presença de água, é lenta e expansiva que se manifesta no concreto através de fissuras. A expansão pode atingir uma certa magnitude onde problemas mecânicos começarão a aparecer, como foi o caso da Usina Hidroelétrica Apolônio Sales de Oliveira ( Moxotó ), onde as pás das turbinas começaram a raspar no concreto, o que ocasionou a desativação da mesma.

São diversos os fatores que podem afetar a reação álcali-agregado. Basicamente trata-se de uma reação entre os álcalis contidos no cimento e certos tipos de agregado.

Atualmente são conhecidos três tipos de reação álcali-agregado:

- a- Reação álcali-sílica
- b- Reação álcali-carbonato
- c- Reação álcali-silicato

### **1.1 - Reação álcali-silica**

É a reação entre as hidroxilas provenientes dos álcalis do cimento (Na e K) e a sílica amorfa dos agregados, como a opala, calcedônia, cristobalita, tridimita e certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais HOBBS (1988). A reação ocorre somente quando a concentração de hidroxilas na solução dos poros do concreto está suficientemente alta, isto é, quando a solução já está muito alcalina.

A reação se caracteriza pela formação de um gel ao redor do agregado que, em contato com a água, pode se expandir e provocar pressões que podem ultrapassar a resistência à tração do concreto, começando então as primeiras fissuras.

### **1.2 - Reação álcali-carbonato**

O mecanismo desta reação é diferente do descrito para a álcali-silica GRATTAN-BELLEW & GILLOTT (1987), neste caso, a reação acontece entre os álcalis do cimento e o calcário dolomítico, acarretando na formação da burcita ( $Mg(OH)_2$ ), não havendo portanto a formação do gel expansivo, porém o processo de expansão é devido ao processo de desdolomitização, que modifica o arranjo da textura do calcário, causando um aumento de volume.

### **1.3 - Reação álcali-silicato**

Esta reação ocorre entre os álcalis do cimento e os silicatos presentes nos feldspatos, folhelhos argilosos e certas rochas sedimentares (p.ex., argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (p.ex., ardósia, filitos, quartzitos e xistos) e magmáticas (p.ex., granitos).

Existe uma lacuna sobre os estudos da reação álcali-agregado no Brasil, no que diz respeito à sua influência nas propriedades mecânicas e elásticas do concreto e a proposta desta pesquisa é estudar as possibilidades, que podem ser desde muita alteração nas propriedades mecânicas e elásticas, pouca ou nenhuma.

## **2 - OBJETIVOS**

Buscou-se avaliar se a reação álcali-agregado, além da expansão, que pode causar sérios danos ao concreto, afeta também as propriedades mecânicas do concreto.

### **2.1 - OBJETIVO GERAL**

O objetivo deste estudo é o da verificação do efeito inibidor das adições (fumo de sílica e cinza volante) sobre a expansão da reação álcali-agregado nos concretos e argamassas e através da medida das propriedades elásticas e físicas conhecer o quanto esta reação é prejudicial à resistência mecânica, elasticidade e permeabilidade.

### **2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Estabeleceu-se as seguintes etapas para o desenvolvimento da proposta estabelecida:

- estudar a expansão em corpos de prova de argamassa e concreto, tendo como adição o fumo de sílica e a cinza volante, em diferentes dosagens.

- analisar o comportamento mecânico e elástico através de ensaios de resistência à compressão simples e diametral, módulo de deformação, porosidade e permeabilidade.

### 3 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O concreto se caracteriza basicamente por uma mistura de cimento, agregados e água. O cimento possui em sua composição química, elementos que podem ou não reagir com certos elementos dos agregados. De acordo com MEHTA (1988), os cimentos são compostos basicamente por:

**TABELA 1 - Composição química dos principais elementos componentes do cimento**

ÓXIDO	ABREVIACÃO	COMPOSTOS	ABREVIACÃO
CaO	C	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
SiO <sub>2</sub>	S	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
MgO	M	4CaO.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .SiO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S
SO <sub>3</sub>	S*	4CaO.2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O	H	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	CSH <sub>2</sub>

Fonte: MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Ed. Pini, 1a. Edição, 1994. p. 190

Ao se hidratar, o cimento produz o silicato de cálcio hidratado (CSH), que é o principal responsável pela resistência do concreto, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e o sulfo-aluminato de cálcio. Conforme a hidratação vai continuando, a solução dos poros do concreto vai se tornando muito alcalina (pH ≈ 13,5). Esta alcalinidade elevada, desde que haja os fatores decisivos (agregado reativo e álcalis disponíveis no concreto), pode favorecer o aparecimento de problemas de deterioração no concreto, como é o caso da reação álcali-agregado PREZZI (1995), objeto deste estudo.

## 4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde as publicações de STANTON (1940), a reação álcali-agregado tem sido muito estudada, tanto no ponto de vista da prevenção como da recuperação de estruturas.

Sabe-se hoje que se trata de uma reação entre a solução alcalina nos poros dos concretos e argamassas, com certos agregados ácidos, sendo geralmente referida como um relação ácido-base PREZZI (1995). Esta reação produz um gel expansivo ou apenas um aumento de volume, que por sua vez podem causar fissuras NIXON & PAGE (1987).

Ainda não se conhece plenamente as condições para que a reação ocorra, pois já se constatou casos em que a utilização de um mesmo agregado em diferentes obras comportou-se de forma distinta quanto à reação álcali-agregado KIHARA & SCANDIUZZI (1993). O fenômeno da reação álcali-agregado é muito complexo, por se tratar de vários parâmetros independentes interagindo, que influenciam sua ocorrência SWAMY (1992). Esta reação torna-se facilmente evidenciada pelo padrão de fissuras que apresenta ( em forma de mapa ), estas, por sua vez, originam-se geralmente devido à formação do gel expansivo, que depende da quantidade de álcalis solúveis, natureza, dimensão e quantidade de agregados reativos e das condições ambientais em que o concreto ficará exposto RODRIGUES (1994).

### 4.1 - HISTÓRICO

Este fenômeno está geralmente ligado a barragens, pois é o tipo de estrutura que apresenta maior dificuldade de recuperação e um risco muito maior em caso de desastre, mas este tipo de reação pode ocorrer em qualquer estrutura hidráulica de concreto desde que haja condições, como por exemplo piers, fundações e pontes PAULON (1981).



#### 4.1.2 - ASTM C 289 “CHEMICAL METHOD” (MÉTODO QUÍMICO)

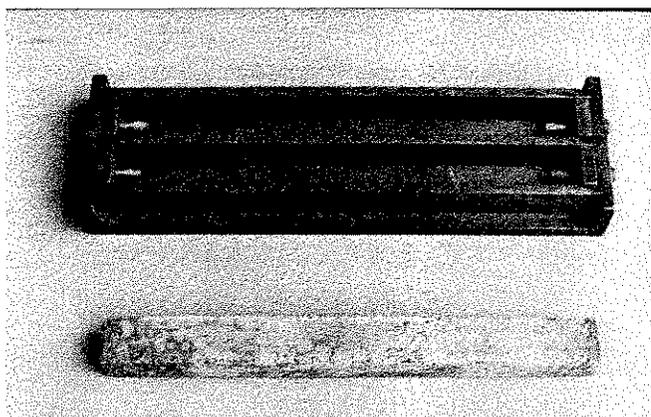
No método químico, verifica-se a reatividade potencial do agregado em função da sílica dissolvida e da redução da alcalinidade, caracterizando-o como inócuo, deletério ou potencialmente deletério.

Após a análise do agregado, faz-se necessário um método para estabelecer limites para estimar se a expansão causada pela reação seria prejudicial à estrutura, que são os métodos ASTM C-227, ASTM C-1260 e ASTM C-1293.

#### 4.1.3 - ASTM C 277 “MORTAR BAR METHOD” (MÉTODO DAS BARRAS DE ARGAMASSA)

Neste método, barras de argamassa são moldadas com o agregado a ser estudado em diferentes granulometrias e proporções indicadas pela norma, moldados em forma como mostra a **figura 2**, e ficam estocadas em água a 38°C por no mínimo 3 meses.

**FIGURA 2 - Forma para o ensaio de reatividade em barras de argamassa**



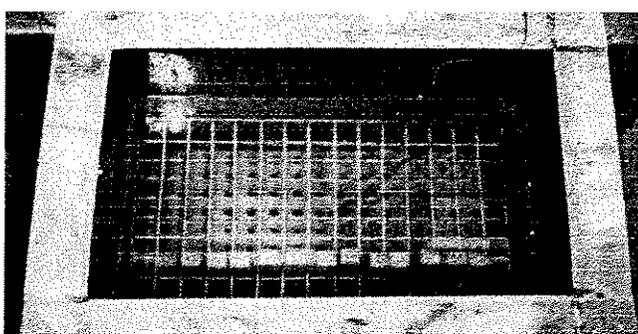
**FONTE: FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS - LABC.T/GOIÂNIA**

Além de ser um processo demorado, também não se aplica ao caso das reações álcali-carbonato e álcali-silicato, também mostrou ser incapaz de detectar a reatividade em muitos agregados, em particular grauvacas e argilitos BÉRUBÉ & FOURNIER (1993).

#### 4.1.4 - ASTM C 1260 “ACCELERATED MORTAR BAR METHOD” (MÉTODO DAS BARRAS DE ARGAMASSA ACELERADO) E ASTM C1293 “CONCRETE AGGREGATES BY DETERMINATION OF LENGTH CHANGE OF CONCRETE DUE TO ALKALI-SILICA REACTION ( DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DO CONCRETO DEVIDO À REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA)

Neste método, as barras de argamassa são moldadas com o mesmo procedimento do ASTM C 277 mas, ao invés de permanecerem estocadas na água a 38°C, passam a ser curadas em uma solução de NaOH 1N (Hidróxido de Sódio - 1 Normal) a 80°C em um tanque térmico como mostra a **figura 3**, por apenas 14 dias.

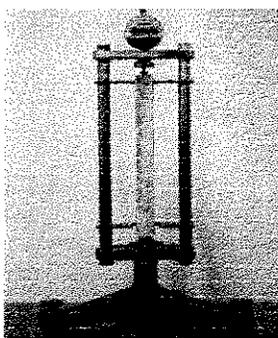
**FIGURA 3 - Tanque de cura térmica**



FONTE: FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS - LABC.T/GOIÂNIA

São feitas leituras diárias em extensômetro que possibilita o conhecimento exato do comprimento das barras, fornecendo medidas em milímetros. Como faz-se três corpos de prova para cada combinação, os resultados são anotados e a média da expansão é plotada em um gráfico onde as curvas de expansão são analisadas. O extensômetro é mostrado na **figura 4**.

**FIGURA 4 - Extensômetro**



FONTE: FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS - LABC.T/GOIÂNIA

As expansões menores que 0.10% aos 16 dias, demonstram comportamento inócuo. Expansões maiores que 0.20% aos 16 dias, são consideradas potencialmente deletérias e as expansões entre 0.10% e 0.20%, possuem agregados inócuos e deletérios e precisariam de mais informações. Esse valores de expansão também têm sido modificados, pois STARK (1995) considera como inócuo os corpos de prova que apresentarem expansão de 0.08% até o 14º dia.

O método ASTM C-1293 avalia a expansão em corpos de prova de concreto, seguindo os mesmos procedimentos dos métodos anteriores.

São vários os artigos publicados que tratam da eficiência dos métodos de cura para avaliar a potencialidade reativa dos concretos e argamassas.

CRIAUD E DEFOSSÉ (1995), com o intuito de averiguar até que ponto um método só acelera a reação sem alterar o conteúdo de álcalis do concreto, testaram corpos de prova curados em NaOH, KOH e água e, puderam comprovar que para os corpos de prova curados em água, existe uma diluição dos álcalis da solução contida nos poros do concreto, isto é, ocorre uma migração dos ions hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) para a água, fazendo com que a concentração de ions hidroxila não seja suficientemente alta para manter a reação álcali-agregado. Já no caso dos corpos de prova curados em solução alcalina (NaOH ou KOH), existe uma migração dos álcalis da solução de cura para os poros do concreto, fornecendo alcalinidade suficiente para que a reação ocorra. Constataram também que existe uma diferença de comportamento quanto à solução alcalina de cura.

BÉRUBÉ E FRENETTE (1994), também preocupados com as condições de cura, analisaram corpos de prova curados em solução de NaOH, NaCl (Cloreto de Sódio) e água e verificaram que para os corpos de prova com permeabilidade normal, a cura em NaOH tende a acelerar a reação pelo aumento da concentração de álcalis no concreto, caso os corpos de prova sejam curados em água, existe uma diluição dos álcalis. Quando curados em solução de NaCl, apresentam uma expansão muito maior que os outros e ainda continuaram expandindo mesmo depois que as expansões dos corpos de prova estocados em NaOH e água já haviam parado.

Através de microscópio eletrônico, puderam comprovar que nos corpos de prova curados em solução de NaCl, houve a formação de um sal (cloroaluminato de cálcio) que também é expansivo. Este fato evidenciou que a cura em solução de NaCl é inadequada.

KAWAMURA et all (1988), após análise em corpos de prova curados em solução de NaOH e NaCl, concluiu que quando curados em solução de NaOH, as hidroxilas da solução atacam diretamente o agregado. Se a solução de cura for o NaCl, as expansões começam quando a concentração de OH da pasta for maior que o valor crítico de 300 mmol/l e a expansão não depende só desta concentração. As expansões no NaCl são bem maiores que no NaOH, o que indica que o ion cloreto promove a reação álcali-agregado dentro da argamassa, funcionando como um catalisador. Isso explica por que as reações em ambientes marinhos são tão rápidas.

#### **4.2 - EXEMPLOS DE ESTRUTURAS AFETADAS POR REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Um exemplo de deterioração em pier, é o da Baía de Lanarca no Chipre, que já apresentava sinais de deterioração desde sua conclusão em 1966 PAULON (1981).

No sudoeste da Inglaterra e no sul do País de Gales, várias subestações elétricas apresentaram problemas de deterioração nas fundações entre 8 e 10 anos de construção PAULON (1981).

Na Bélgica, uma ponte rodoviária teve que ser demolida devido à deterioração causada pela reação álcali-agregado RODRIGUES (1991).

A Barragem de Coniston, em Ontário, ficou muito deteriorada devido aos efeitos combinados da reação álcali-agregado e os ciclos de gelo-degelo READ & THOMAS (1995).

No Brasil, ainda não se têm muitos registros de obras afetadas pela reação álcali - agregado, pois somente a partir de 1985 que se tomou conhecimento da reação álcali - silicato nas barragens de Moxotó e Joanes II, situadas na região nordeste KIHARA & SCANDIUZZI (1993).

A **tabela 2**, mostra estruturas de ocorrências e/ou suspeitas de reação álcali-agregado no Brasil.

**TABELA 2 - Estruturas de concreto no Brasil com evidências e/ou suspeitas de reação álcali-agregado.**

ESTRUTURA	EST.	CONCLUSÃO	TIPO DE REAÇÃO
Barragem de Itapacurá	PE	-	suspeita de reação álcali-silicato
Base de concreto/BENJI	PE	-	reação álcali-silicato
Base de concreto/Angelin	PE	-	reação álcali-silicato
Base de concreto/White Martins	PE	1982	reação álcali-silicato
Barragem de Paulo Afonso I- IV	BA/AL	1955-1979	reação álcali-silicato
Barragem de Moxotó	BA/AL	1977	reação álcali-silicato
Barragem de Pedras	BA	1970	reação álcali-silicato
Barragem de Joanes II	BA	1971	reação álcali-silicato
Barragem de Peti	MG	1946	suspeita de reação álcali-silicato
Barragem de Billings/Pedras	SP	1926	reação álcali-silicato
Barragem de Pedro Bight	SP	1932	suspeita de reação álcali-silicato

Fonte: KIHARA & SCANDIUZZI. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. 3º Congresso Brasileiro de Cimento. São Paulo: EDITORA, v. 1, p. 319-335, nov. 1993.

#### 4.2.1- SINTOMAS MAIS FREQUENTES DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

De acordo com SILVEIRA (1994), o primeiro sintoma é o aparecimento de bordas escuras ao redor do agregado, com espessura entre 0,1 e 0,5 mm, o que caracteriza a formação do gel expansivo.

Pode-se notar também, uma fissuração interna das partículas do agregado e a microfissuração da massa de concreto. Devido á fissuração, existe uma perda de aderência entre as partículas de agregado graúdo e a argamassa exterior. Encontra-se também o gel expansivo preenchendo vazios, microfissuras e fissuras do concreto.

Estes sintomas, nem sempre aparecem de forma nítida ou afetam toda a massa de concreto. O sintoma mais marcante da reação é a fissuração em forma de mapa, que ocorrem superficialmente nas regiões mais afetadas da estrutura.

#### 4.2.2- PROBLEMAS CAUSADOS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Entre os problemas causados pela reação álcali-agregado, SILVEIRA (1994) cita:

- **abertura de juntas de concretagem;**
- **fissuras superficiais** que geralmente não são superiores a 25 cm de extensão;
- **fissuras transversais** que geralmente se manifestam na crista da barragem ou pisos superiores da casa de força, como ocorreu em Moxotó;
- **fissuras estruturais a 45°** nos contrafortes das barragens, nos pilares internos da tomada d'água e caixa espiral de sucção;
- **fissuras transversais** em barragens com eixo curvo na região das ombreiras;
- **alteamento permanente da crista**, uma barragem com 50 m de altura e taxa de deformação de 60 micro deformações, apresenta um alteamento de 3 mm por ano;
- **deflexão da crista para a montante**, a barragem de Stewart Mountain, tipo arco, com 65 m de altura, a deflexão da crista atingiu 152 mm para a montante entre 1939 e 1968;
- **deslocamentos diferenciais entre blocos**, esses deslocamentos são permanentes e provocados pela deformabilidade diferencial entre blocos, devido às diferentes taxas de expansão do concreto.

Esses problemas causados pela reação álcali-agregado, devem ser acompanhados através de instrumentação, a qual pode ser feita por:

- **extensômetros múltiplos de hastes**, usados para observar as deformações do concreto;
- **extensômetro horizontal de fio ou barra**, observam as deformações longitudinais do concreto;
- **pêndulos diretos ou invertidos**, observam as deflexões das barragens (deslocamento horizontal da crista);
- **medidores triortogonais de juntas**, acompanham os deslocamentos diferenciais entre blocos ou a movimentação diferencial entre os lados opostos de uma fissura;
- **marcos superficiais**, deslocamentos horizontais ou verticais da crista da barragem;

- **piezômetro de fundação**, como existe uma tendência de abertura do contato concreto-rocha na base da estrutura é aconselhável prever a instalação de alguns piezômetros com o objetivo de estudar as subpressões e verificar se pode haver incremento das mesmas ao longo do tempo;
- **termômetros**, são recomendados para o acompanhamento das temperaturas no interior do concreto como do ar exterior.

### 4.3 - FATORES INFLUENTES NA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

#### 4.3.1 - Teor de álcalis no cimento

No cimento existe uma grande quantidade de sódio (Na) e potássio (K), que são os álcalis que reagirão com o agregado. O fato de se recomendar que se use cimentos com teores de álcalis menores que 0,6% não é garantia de que a reação não vai ocorrer

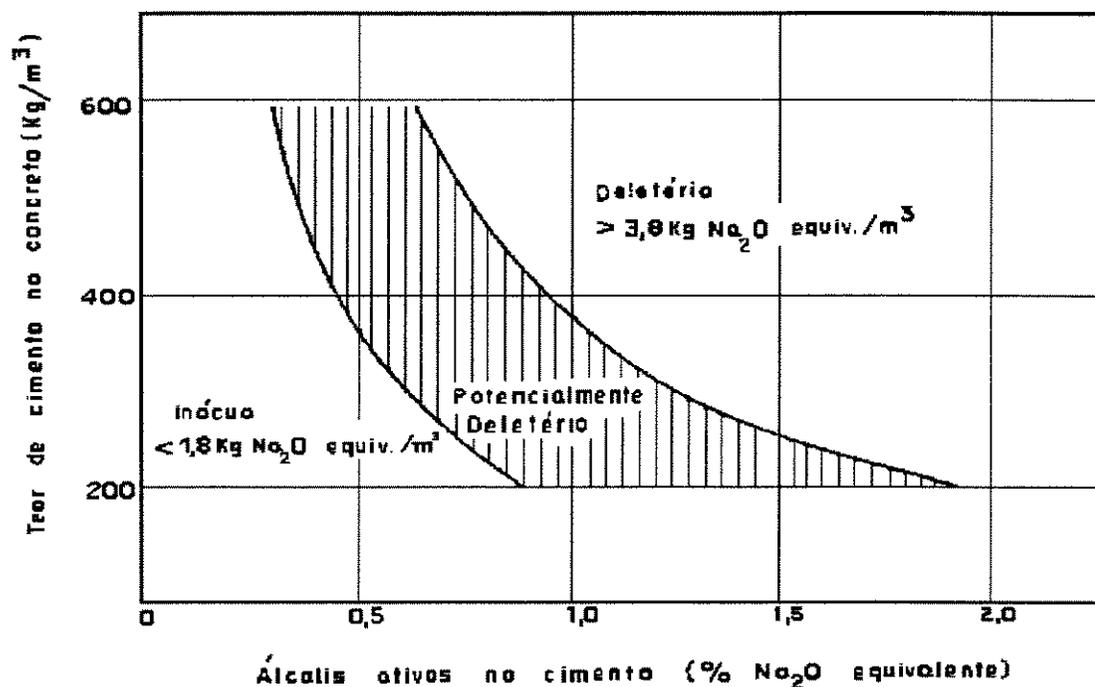
Um outro fator muito importante é o consumo de cimento, pois aumentando a quantidade de cimento, aumenta-se também o conteúdo de álcalis por  $m^3$  de concreto. OBERHOLSTER (1983), após estudos com agregados da África do Sul suscetíveis à reação álcali-sílica conseguiu impor limites para delimitar o consumo de cimento quanto à sua potencialidade deletéria. Através de ensaios com diferentes agregados e diferentes tipos de cimento, chegou à seguinte conclusão:

a- abaixo de 1,8 kg de  $(Na_2O)_e$  disponível por  $m^3$  de concreto, não ocorrem reações expansivas.

b- entre 1,8 e 3,8 kg de  $(Na_2O)_e$  disponível por  $m^3$  de concreto, podem ocorrer reações expansivas.

c- acima de 3,8 kg de  $(Na_2O)_e$  disponível por  $m^3$  de concreto, ocorrem reações expansivas.

**FIGURA 5 - Relação entre o conteúdo de álcalis ativos no cimento, teor de cimento no concreto e os limites de potencialidade deletéria.**



Fonte: OBERHOLSTER, R.E., VAN AARDT, J.M.P., Durability of cementitious systems. In: BARNES, P. Structures and performance of cements. London: Applied Science, 1983, p. 380- 397.

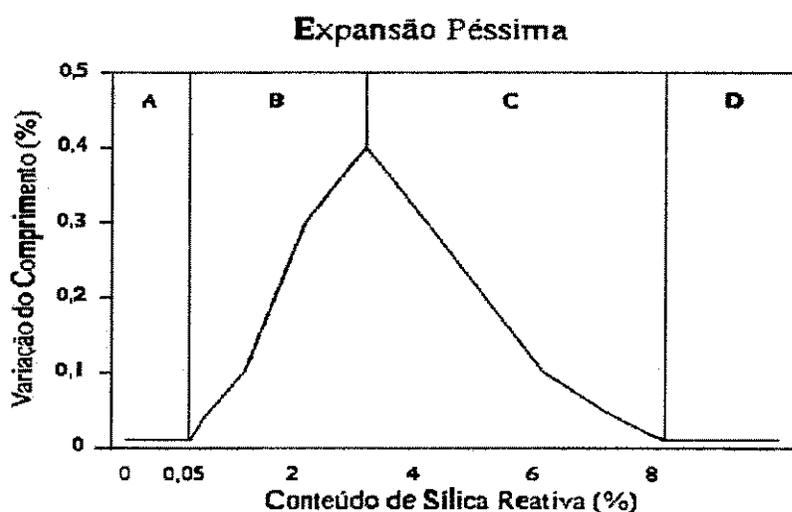
Através da **figura 5** pode-se observar claramente que para um consumo de 200 Kg/m<sup>3</sup> e um teor de álcalis ativos no cimento de 0,5 (Na<sub>2</sub>O)<sub>eq</sub> o concreto apresenta-se como inócua e para a mesma porcentagem de álcalis ativos, um consumo de cimento da ordem de 400 Kg/m<sup>3</sup>, passa a apresentar-se como potencialmente deletéria.

#### 4.3.2 - Quantidade e granulometria dos grãos reativos no agregado

Quanto menor a área específica dos grãos, maior a velocidade de reação. Por sua vez, quanto maior a velocidade da reação menor a probabilidade que a formação do gel venha ocorrer. Isso explica o fato de se usar o agregado pulverizado como um “inibidor” da reação. Na verdade ele reage primeiro, fazendo com que a concentração de álcalis diminua de tal forma que os agregados maiores não chegam a reagir HOBBS (1988).

Quanto menor a quantidade dos elementos reativos no agregado, menos álcalis irão reagir. Com isso, a solução ainda fica com uma concentração de álcalis suficiente para que ocorra a formação do gel expansivo. Caso contrário, os álcalis são consumido rapidamente, diminuindo o risco de expansões futuras. Existe uma proporção de materiais reativos no agregado que leva a uma máxima expansão, a quantidade de material reativo correspondente ao pico da expansão é chamada de “proporção péssima” HOBBS (1988). Na **Figura 6** a expansão é mostrada para a opala como agregado reativo. Nas regiões A e D, existe a expansão mas não fissuração. Na região B, existe expansão, fissuração e excesso de álcalis. Na região C, existe expansão, fissuração e excesso de sílica reativa.

**FIGURA 6 - Proporção péssima ; relação - a/c = 0,4 e agregado/cimento = 0,75; conteúdo de álcalis = 6 kg/m<sup>3</sup>**



Fonte: HOBBS, D.W. Alkali-silica reaction in concrete. Trowbridge: Redwood Burn Ltd., 1988. Cap. 2: Effect of mix proportions constituents on expansion. p. 33-55.

#### 4.3.3 - Influência da umidade e temperatura

A reação ocorre somente na presença de água, portanto as estruturas que ficam em contato direto com a água, estão mais sujeitas aos efeitos da reação álcali-agregado, pois a exposição das estruturas de concreto à umidade contínua ou cíclica, favorece a solubilização e migração dos íons alcalinos na solução dos poros e, as altas temperaturas aceleram a hidratação do cimento e aumentam a agressividade das soluções alcalinas KIHARA & SCANDIUZZI (1993).

#### 4.4 - INIBIDORES DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

São vários os recursos utilizados para tentar evitar a expansão devido a reação álcali-agregado. Em primeiro lugar pode-se citar as características do concreto PAULON (1981). Um concreto com um elevado índice de vazios pode servir de acomodação para o gel, conforme este vai se formando. Um outro fator muito importante para a diminuição dos efeitos da expansão é a adição de pozolanas, que além de contribuir para a diminuição da expansão devido à reação, melhora muitas outras qualidades do concreto, como aumento da resistência à compressão, diminuição da permeabilidade, tornando assim o concreto mais durável.

##### 4.4.1 - Utilização de pozolana com inibidor da reação

As pozolanas são materiais silicosos ou silico-aluminosos que, finamente divididos e em presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento e formam compostos com propriedades aglomerantes PAULON (1981). Sua eficácia sob a reação álcali-agregado, quando substitui-se parte do cimento por pozolana é bastante significativa.

A porcentagem ótima de pozolana é um dado empírico, pois a área específica e a composição química são variáveis muito importantes durante a reação ANDRADE et al (1990).

SWAMY (1992), descreve que a atividade pozolânica de um material cimentício é influenciada pelo tamanho das partículas, área específica, composição química, percentual de reposição e mecanismos de incorporação ao concreto.

Quanto à reação álcali-agregado, também existe um “conteúdo péssimo” para a adição de pozolanas, pois também são uma fonte de álcalis e seu uso indiscriminado pode acabar por aumentar a expansão. FARBIARZ & CARRASQUILLO (1987), fizeram várias pesquisas com agregados de diversas fontes, cimentos e pozolanas com diferentes teores de álcalis e conseguiram comprovar que pode haver mais de um “conteúdo péssimo” para substituições entre 0% e 100% de cimento por pozolana.

As pozolanas são classificadas em naturais ou artificiais. As naturais, são provenientes de rochas que já apresentam atividade pozolânica, necessitando apenas de uma moagem. As artificiais compreendem as rochas silicosas, sílico-aluminosas e aluminosas que são ativadas através de calcinação. Também são consideradas como pozolanas artificiais alguns subprodutos industriais, como cinzas de fornos e caldeiras, cinzas provenientes de folhelhos betuminosos, cinzas de coque, cinzas volantes além de cacos de tijolo ou telhas moídas. PRISZKULNIK (1980).

Nesta pesquisa utilizou-se o fumo de sílica e a cinza volante com a finalidade de avaliar a eficácia dessas pozolanas como inibidores da reação álcali-agregado.

- **CINZA VOLANTE**

A cinza volante consiste basicamente de pequenas partículas esféricas de vidro sílico-aluminosos produzidas a partir da combustão de carvão pulverizado nas usinas termoeletricas. As variações na finura e no teor de carbono nas cinzas volantes, são os principais problemas no controle da sua qualidade MEHTA (1994).

Segundo PICCOLI (1995), para a cinza ter o efeito pozolânico desejado, é necessário que seja suficientemente fina, podendo assim afetar todas as propriedades do concreto, por exemplo:

- aumenta a trabalhabilidade;
- retarda a pega e endurecimento do concreto;
- aumenta a resistência mecânica final;
- reduz o calor de hidratação;
- reduz a permeabilidade e a absorção, reduzem o teor de ar incorporado;
- não influencia o módulo de deformação e a retração hidráulica.

O principal motivo da escolha da cinza volante para este trabalho é o de evitar problemas com a reação álcali-agregado.

O parâmetro mais importante que governa a reação álcali-agregado é o teor de álcalis disponível no concreto. Geralmente a cinza volante contém um teor de álcalis mais elevado

que o cimento protland comum, então a substituição de parte do cimento por cinza volante, leva a um aumento no conteúdo total de álcalis entretanto, a solubilidade dos álcalis provenientes da cinza tem que ser investigada para determinar a quantidade de álcalis solúveis que poderiam participar efetivamente da reação álcali-agregado TENOUTASSE & MARION (1986).

A ASTM C-618, sugere um limite de 1,5% de álcalis disponíveis para cinzas volantes que serão usadas com a finalidade de reduzir os efeitos da reação álcali-agregado. FABIARZ et al (1989) comprovou através de testes laboratoriais que utilizar somente este limite, não assegura que os efeitos da reação serão reduzidos a níveis não prejudiciais à estrutura do concreto.

A atividade da cinza volante quanto à reação álcali-agregado, pode ser explicada através de sua área específica, pois por serem partículas muito finas, a superfície específica reativa à solução é muito grande. Se a quantidade de partículas finas é adequada, a reação inicial diminui a concentração de álcalis até o nível do que seria uma reação com cimento de baixo teor de álcalis e as partículas maiores podem continuar sua reação sem expansão PAULON (1981).

Diferentes tipos de cinza volante permitem reduções em diferentes graus. Nos corpos de prova que contém cinzas volantes com baixa concentração de álcalis e elevada atividade pozolânica, a concentração de OH se reduz consideravelmente em 5 meses, já os que contém cinzas volantes com alta concentração de álcalis e atividade pozolânica relativamente alta, a concentração de OH reduz um pouco e, cinzas volantes com alta concentração de álcalis e atividade pozolânica alta, a concentração de OH fica entre os dois casos anteriores KAWAMURA et al (1988).

- **FUMO DE SÍLICA**

O fumo de sílica é um subproduto da fabricação de ligas de ferro-silício, cujo componente principal é a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a substituição de parte do cimento por esta pozolana favorece um aumento na resistência mecânica, torna o concreto menos poroso, conferindo à estrutura uma maior durabilidade. Além dos efeitos mecânico, o fumo de sílica reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), formado na hidratação do cimento, transformando-os em

silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), que são responsáveis pela resistência do concreto DA SILVA FILHO et al (1996).

**TABELA 3 - Composição química do fumo de sílica.**

COMPOSIÇÃO	%
SiO <sub>2</sub>	75-99
Carbono	1-10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1
Outros	<1

Fonte: DA SILVA FILHO, A. F. et al. Emprego de microssílica em obras de reabilitação de estruturas de concreto armado. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). 38ª Reunião do Ibracon, Ribeirão Preto, 1996, p. 297-301.

Por apresentar partículas muito pequenas (de 1 micron a 2 micras), o fumo de sílica tornou-se uma opção como material cimentício por seu efeito microfiller e sua ação pozolânica. De acordo com HOBBS (1988), o mecanismo com que o fumo de sílica atua face a reação álcali-agregado é diferente das outras pozolanas, pois enquanto as outras diminuam a concentração dos ions hidroxila, ele atua promovendo a reação no concreto ainda no estado fresco, se usado em quantidades adequadas, faz com que os ions hidroxila atinjam quantidade insignificante.

Após vários ensaios, ALVES et al (1995), concluíram que para resistências de concreto equivalentes, a utilização do fumo de sílica resulta em reduções do consumo de cimento da ordem de 25%, mas seu uso eficaz está associado ao uso de um superfluidificante, pois além de proporcionar maior dispersão das partículas, evita um aumento no consumo de água.

Além de substituir parte do cimento por pozolanas, outros métodos, têm sido constantemente estudados para minimizar os efeitos da reação álcali-agregado. Muitos materiais como sais de lítio e bário, incorporadores de ar, redutores de água, têm se mostrado eficazes na redução da expansão devido à reação álcali-agregado RAMACHANDRAN, apud FACTOR (1986).

QUINGHAN et al (1995), verificaram a eficácia do  $\text{LiNO}_2$ , através de vários ensaios e concluíram que o ele pode reduzir a expansão devido à reação álcali-sílica com adições apropriadas. O efeito do  $\text{LiNO}_2$  aumenta com o aumento do conteúdo de álcalis, pois está relacionado com a relação Li/Na nas argamassas. Os íons  $\text{Li}^+$ , atuam como estabilizadores do aumento de volume dos géis de silicato de sódio, mas quantidades excessivas de  $\text{Li}^+$ , podem causar mais formação de gel, provocando expansão.

HUDEC & LARBI (1989), considerando que a reatividade alcalina é uma reação de superfície e que a superfície ativa é geralmente negativa. Os cátions, sódio e potássio, presente na solução dos poros, são atraídos para a superfície, estes por sua vez, atraem os ions hidroxilas, formando assim um “sanduíche” de cátions e ânions. Se este “sanduíche” for modificado ou destruído, a reatividade alcalina também pode ser reduzida ou eliminada. Este fenômeno foi estudado, utilizando o ion fosfato, que é inorgânico e possui uma grande carga negativa.

Foi considerado que o fosfato poderia atrair os ions sódio e potássio ao invés da hidroxila. Os fosfatos de sódio ou potássio, são muito solúveis e ocorrem em uma variedade de compostos que vão de ácido à básico, já o fosfato de cálcio é insolúvel na água e só um pouco solúvel em soluções muito alcalinas. Neste estudo, optaram pelo fosfato de cálcio, pois acrescentar mais sódio e potássio, parecia contraproducente.

O procedimento utilizado foi similar ao ASTM C 1260, comprovando-se a eficácia do método na redução da expansão devido às reações alcalinas com os silicatos presentes nos agregados. Quanto à reação álcali-carbonato, este método se mostrou menos eficaz. Acredita-se que o fosfato interfere na dissolução da sílica e na formação do gel, reduzindo o potencial osmótico e a pressão formada pelo gel.

#### **4.5 - Influência da armadura em elementos de concreto**

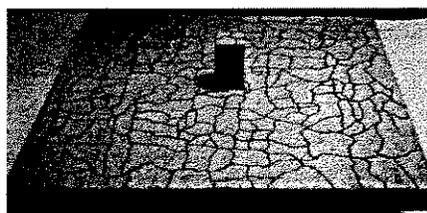
Com o objetivo de estudar o quanto a armadura influencia o comportamento do concreto afetado pela reação álcali-agregado, SWAMY (1992) desenvolveu uma série de testes, com diferentes tipos de adições minerais (fumo de sílica, cinza volante e escória). Os testes foram executados em lajes de concreto com uma coluna central, conforme mostra a **figura 7**. O efeito da reação álcali-agregado é mais pronunciado quando a taxa de armadura não é a mesma na região comprimida (superior) e na tracionada (inferior), então foram

estudadas lajes com taxa de armadura de compressão menor, fazendo com que a capacidade de reduzir a expansão seja menor na área comprimida que na tracionada.

As lajes que não continham adição, apresentaram fissuras na região comprimida e nas laterais da laje, assim como na coluna central. Já as lajes que continham escória como adição, mostraram fissuras similares daquela sem adição, mas estas penetravam menos no concreto. As lajes com cinza volante e fumo de sílica, apresentaram poucas fissuras visíveis, sendo que na área tracionada, não apresentaram fissuras.

As fissuras nos concretos seguem um modelo muito diferente para concretos armados e sem armadura entretanto, no que diz respeito à adição mineral, o grau de fissuração apresentou-se similar.

**FIGURA 7 - Fissuras devido à Reação álcali-silica em laje contendo escória**



**FONTE:** SWAMY, R. N. "Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to alkali silica reaction". In: DURABILITY OF CONCRETE, Detroit: Jens Holm & Mete Geiker, 1992, SP 131-12, ACI, p. 219-254.

## **5- METODOLOGIA**

O objetivo desta pesquisa foi estudar os efeitos da reação álcali-agregado em concretos e argamassas, utilizando como agregado reativo o Quartzito de Corumbá. Para tal, foram realizadas duas séries de experimento, uma onde foram moldados corpos de prova em argamassa e outra em concreto, onde parte do cimento foi substituído ora por fumo de sílica ora por cinza volante.

### **5.1 - Experimentos em argamassa**

Esta etapa se caracterizou por ensaios de reatividade, ensaios de resistência a compressão simples e diametral, permeabilidade e porosidade.

Foram analisadas duas relações água/cimento (0.35 e 0.60) para que fosse avaliada a influência da porosidade na expansão e o cimento foi substituído pelas pozolanas em diferentes adições, ( 0%, 15% e 30% ) para o fumo de sílica e ( 0%, 20% e 40% ) para a cinza volante para melhor análise da expansão.

#### **5.1.1 - Ensaio de reatividade**

Este ensaio seguiu conforme ASTM C 1260-94, onde foram moldadas barras de argamassa. Foi utilizado como agregado miúdo, o próprio agregado em estudo, conforme diz a Norma acima referida. Para acelerar a reação, os corpos de prova foram curados em uma solução de NaOH 1N e ficaram nesta solução por 30 dias, onde diariamente as barras eram retiradas da solução, executava-se as leituras através de extensômetros e colocadas novamente em solução.

### **5.1.2 - Ensaio de porosidade**

Para este ensaio moldou-se cilindros (5 x 10 cm), nas diferentes proporções de adição. Cada relação água/cimento apresentava cinco combinações diferentes 0%, (15% e 20%) para o fumo de sílica e ( 30% e 40%) para a cinza volante. Moldou-se três corpos de prova cada combinação.

Os corpos de prova foram curados por 30 dias em água a temperatura ambiente e pesados assim que retirados da cura em água. Após a pesagem, foram estocados 18 dias em estufa a 40°C e pesados novamente. Calculou-se o volume de vazios através da diferença entre as duas pesagens.

### **5.1.3 - Ensaio de resistência à compressão simples**

Este ensaio seguiu de acordo com a NBR 5739/80, sendo que uma parte dos corpos de prova se destinou a cura em água à temperatura ambiente e, a outra parte, a cura em solução de NaOH 1N à 80°C. Com esse critério, conseguiu-se promover a reação alcalina em uma parte dos corpos de prova e foi possível analisar a diferença de comportamento quanto à resistência à compressão nos corpos de prova antes e depois da reação.

### **5.1.4 - Ensaio de resistência à compressão diametral**

Este ensaio seguiu de acordo com a NBR 7222/83, sendo que uma parte dos corpos de prova se destinou a cura em água à temperatura ambiente e, a outra parte, a cura em solução de NaOH 1N à 80°C. Com esse critério, conseguiu-se promover a reação alcalina em uma parte dos corpos de prova e foi possível analisar a diferença de comportamento quanto à resistência à tração nos corpos de prova antes e depois da reação.

### **5.1.5 - Ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade (Permeabilidade)**

Este ensaio foi executado de acordo com a NBR 9779/87 e teve como objetivo a verificação do aumento da permeabilidade dos corpos de prova que sofreram os efeitos da reação alcalina. Os corpos de prova passaram 30 dias em cura, sendo que uma parte se destinou à cura em água à temperatura ambiente e a outra metade foi curada em solução de

NaOH 1N à 80°C. Em seguida, permaneceram 18 dias em estufa a 40°C. Após este período, colocou-se os corpos de prova em um recipiente com água e foram executadas leituras da quantidade de água que foi absorvida pelos corpos de prova com o passar do tempo. Essas medidas foram feitas em laboratório com controle de temperatura e umidade.

## **5.2 - Experimentos em concreto**

Esta etapa se caracterizou por ensaios de reatividade, ensaios de resistência a compressão simples e diametral, módulo de deformação, permeabilidade e porosidade.

Foi analisado somente uma relação água/cimento (0.35). Também foram analisadas as mesmas pozolanas que na argamassa, o fumo de sílica e a cinza volante, que foram utilizadas em três proporções diferentes ( 0%, 15% e 30% ) para o fumo de sílica e ( 0%, 20% e 40% ) para a cinza volante. Embora nesta etapa tenham sido estudados os efeitos das mesmas pozolanas, utilizou-se o mesmo cimento das argamassas para o fumo de sílica e um novo cimento para a cinza volante. Assim pôde-se estudar a influência do cimento na reação álcali-agregado.

### **5.2.1 - Ensaio de reatividade**

Este ensaio seguiu conforme ASTM C 1293-95, onde foram moldados corpos de prova em concreto que foram curados em solução de NaOH 1N a 80°C por 30 dias e seguiu o mesmo procedimento que para a argamassa.

### **5.2.2 - Ensaio de porosidade**

Para este ensaio utilizou-se um procedimento diferente que o ensaio de argamassa, pois achou-se mais conveniente analisar a diferença de porosidade entre os corpos de prova que ficaram em solução e os que ficaram na água. Para tal, moldou-se cilindros (10 x 20 cm) nas diferentes proporções de pozolana. Os corpos de prova foram pesados assim que retirados da cura e em seguida ficaram estocados 18 dias em estufa a 40°C, Foram pesados novamente e calculou-se o volume de vazios através da diferença entre as duas pesagens e pôde-se então relacionar quais os efeitos da reação sob o ponto de vista da porosidade.

### **5.2.3 - Ensaio de resistência à compressão simples**

Este ensaio seguiu de acordo com a NBR 5739/80, sendo que uma parte dos corpos de prova se destinou a cura em água à temperatura ambiente e, a outra parte, a cura em solução de NaOH 1N à 80°C. Com esse critério, conseguiu-se promover a reação alcalina em uma parte dos corpos de prova e foi possível analisar a diferença de comportamento quanto à resistência à compressão nos corpos de prova antes e depois da reação.

### **5.2.4 - Ensaio de resistência à compressão diametral**

Este ensaio seguiu de acordo com a NBR 7222/83, sendo que uma parte dos corpos de prova se destinou a cura em água à temperatura ambiente e, a outra parte, a cura em solução de NaOH 1N à 80°C. Com esse critério, conseguiu-se promover a reação alcalina em uma parte dos corpos de prova e foi possível analisar a diferença de comportamento quanto à resistência à tração nos corpos de prova antes e depois da reação.

### **5.2.5 - Ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade (Permeabilidade)**

Este ensaio foi executado de acordo com a NBR 9779/87 e teve como objetivo a verificação do aumento da permeabilidade dos corpos de prova que sofreram os efeitos da reação alcalina. Os corpos de prova passaram 30 dias em cura, sendo que uma parte se destinou à cura em água à temperatura ambiente e a outra metade foi curada em solução de NaOH 1N à 80°C. Em seguida, permaneceram 18 dias em estufa a 40°C. Após este período, colocou-se os corpos de prova em um recipiente com água e foram executadas leituras de quanto a água era absorvida pelos corpos de prova com o passar do tempo.

### **5.2.6 - Ensaio de módulo de deformação**

Este ensaio seguiu a NBR 8522/84, sendo que uma parte dos corpos de prova se destinou à cura em água à temperatura ambiente e, a outra parte, à cura em solução de NaOH 1N à 80°C. Com esse critério foi possível analisar a diferença de comportamento quanto ao módulo de deformação nos corpos de prova antes e depois da reação. Para tal, foram colados extensômetros elétricos em todos os corpos de prova.

### 5.2.7 - Ensaio de microscopia eletrônica

Foram efetuados ensaios em microscópio eletrônico de varredura por dispersão de Raio X. Os fragmentos dos corpos de prova que foram rompidos nos ensaios de compressão, foram analisados visualmente e foram escolhidos quais fragmentos seriam metalizados e levados para análise em microscópio. Durante a análise, busca-se estruturas com aparência de produto de reação álcali-agregado. Ao encontrar tal estrutura, escolhe-se vários “pontos” dentro dessa mesma estrutura e analisa-se através de dispersão de Raio X, quais são os elementos que compõe estes “pontos”, para que se possa concluir que se trata ou não de produto de reação álcali-agregado.

## 5.3 - Materiais utilizados

### 5.3.1 - Experimentos em argamassa

A **tabela 4** apresenta as dosagens utilizadas para os corpos de prova que tiveram o fumo de sílica como adição, nas proporções de 15% e 30%.

**TABELA 4 - Dosagens utilizadas para os corpos de prova com fumo de sílica.**

	dosagem I	15% de fs;	30% de fs;	15% de fs;	30% de fs;
		a/c=0,35	a/c=0,35	a/c=0,60	a/c=0,60
	TRAÇO EM PESO				
<b>Materiais</b>	Cimento (g)	793	653.1	793	653.1
	Adição (g)	140	279.9	140	279.9
	Água (g)	326.6	326.6	559.8	559.8
	Peneira 8 (% massa)	10	10	10	10
	Peneira 16, 30 e 50 (% massa)	25	25	25	25
	Peneira 100 (% massa)	15	15	15	15
	Superplastificante (%)	2	2	0	0
	Relação A/C	0.35	0.35	0.60	0.60

A **tabela 5** apresenta as dosagens utilizadas para os corpos de prova que tiveram a cinza volante como adição, nas proporções de 20% e 40%.

**TABELA 5- Dosagens utilizadas para os corpos de prova com cinza volante.**

	dosagem II	15% de fs;	30% de fs;	15% de fs;	30% de fs;
		a/c=0,35	a/c=0,35	a/c=0,60	a/c=0,60
<b>Materiais</b>	TRAÇO EM PESO				
	Cimento (g)	746.4	559.8	746.4	559.8
	Adição (g)	186.6	373.2	186.6	373.2
	Água (g)	326.6	326.6	559.8	559.8
	Peneira 8 (% massa)	10	10	10	10
	Peneira 16, 30 e 50 (% massa)	25	25	25	25
	Peneira 100 (% massa)	15	15	15	15
	Superplastificante (%)	2	2.5	0	0
	Relação A/C	0.35	0.37	0.60	0.60

**TABELA 6- Dosagens utilizadas para os corpos de prova sem adição.**

	dosagem III	0%	0%
		a/c=0,35	a/c=0,60
<b>Materiais</b>	TRAÇO EM PESO		
	Cimento (g)	933	933
	Adição (g)	0	0
	Água (g)	326.6	559.8
	Peneira 8 (% massa)	10	10
	Peneira 16, 30 e 50 (% massa)	25	25
	Peneira 100 (% massa)	15	15
	Superplastificante (%)	2	0
	Relação A/C	0.35	0.60

## 5.3.2 - Experimentos em concreto

TABELA 7- Dosagens utilizadas para os corpos de prova com fumo de sílica.

	dosagem IV	0%	15% de fs;	30% de fs;
		a/c=0,35	a/c=0,35	a/c=0,35
<b>Materiais</b>	TRAÇO EM PESO			
	Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	429	364	300
	Adição (Kg/m <sup>3</sup> )	0	46	93
	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	150	150	150
	Areia Natural (Kg/m <sup>3</sup> )	421	421	421
	Areia Artificial (Kg/m <sup>3</sup> )	346	346	346
	Brita 19mm (Kg/m <sup>3</sup> )	1086	1086	1086
	Superplastificante (Kg/m <sup>3</sup> )	8.6	8.6	8.6
	Relação A/C	.35	0.35	0.35
	<b>Propriedades do Concreto Fresco</b>	Abatimento (cm)	2.3	-
Ar Incorporado(%)		1.6	1.9	1.6
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )		2415	2396	2377

TABELA 8- Dosagens utilizadas para os corpos de prova com cinza volante.

	dosagem V	0%	20% de cv;	40% de cv;
		a/c=0,35	a/c=0,35	a/c=0,35
<b>Materiais</b>	TRAÇO EM PESO			
	Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	400	320	240
	Adição (Kg/m <sup>3</sup> )	0	53	107
	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	140	140	140
	Areia Natural (Kg/m <sup>3</sup> )	427	427	427
	Areia Artificial (Kg/m <sup>3</sup> )	353	353	353
	Brita 19 mm (Kg/m <sup>3</sup> )	1103	1103	1103
	Superplastificante (Kg/m <sup>3</sup> )	8	8	8
	Relação A/C	0.35	0.35	0.35
	<b>Propriedades do Concreto Fresco</b>	Abatimento (cm)	-	-
Ar Incorporado (%)		2.3	2.1	1.6
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )		2402	2396	2377

#### 5.4 - Composição química dos materiais utilizados:

##### Cimento

Foram utilizados dois tipos de cimentos:

- O cimento de alta resistência inicial ( Nome Técnico: CP V - ARI) - para os corpos de prova com fumo de sílica - neste trabalho será chamado de **TIPO C-I** e;
- O cimento comum (Nome Técnico: CP II - F) - utilizados para os corpos de prova com cinza volante - neste trabalho será chamado de **TIPO C-II**.

**TABELA 9 - Composição química do cimento TIPO C- I**

ENSAIO	%	ENSAIO	%
Perda ao fogo	2.22	Óxido de sódio - NaO <sub>2</sub>	0.06
Dióxido de silício total - SiO <sub>2</sub>	19.29	Óxido de potássio - k <sub>2</sub> O	0.86
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.42	Anidrido carbônico - CO <sub>2</sub>	1.28
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.08	Resíduo insolúvel	0.41
Óxido de cálcio total - CaO	64.45	Óxido de cálcio livre	1.26
Óxido de magnésio - MgO	1.40	Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	0.64
Anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub>	3.00	(0.658 * K <sub>2</sub> O% + Na <sub>2</sub> O)	

NOTA: Dados fornecidos por Cimento Eldorado

**TABELA 10 - Composição química do cimento TIPO C- II**

ENSAIO	%	ENSAIO	%
Perda ao fogo	5.84	Óxido de sódio - NaO <sub>2</sub>	0.18
Dióxido de silício total - SiO <sub>2</sub>	18.08	Óxido de potássio - k <sub>2</sub> O	0.67
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.52	Anidrido carbônico - CO <sub>2</sub>	-
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.67	Resíduo insolúvel	0.40
Óxido de cálcio total - CaO	60.30	Óxido de cálcio livre	1.75
Óxido de magnésio - MgO	5.70	Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	0.62
Anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub>	3.60	(0.658 * K <sub>2</sub> O% + Na <sub>2</sub> O)	

NOTA: Dados fornecidos por Furnas Centrais Elétricas - LABC.T/GOIÂNIA

**Obs.I:** Estabeleceu-se a adoção de um outro tipo de cimento para possibilitar mais um fator de análise. Foi utilizado o cimento **tipo C-II** para os corpos de prova moldados com cinza volante.

**Obs.II:** Os dois cimento utilizados continham um baixo teor de álcalis, porém conforme a Norma ASTM C-1293-95, foi aumentado o teor de álcalis para 0,90 ( Eq. alcalino em Na<sub>2</sub>O).

- **Cinza volante - ( Neste trabalho será Chamada de TIPO CV - I)**

**TABELA 11 - Composição química da cinza volante TIPO CV - I**

ENSAIO	%	ENSAIO	%
Perda ao fogo	4.18	Óxido de cálcio total - CaO	1.07
Dióxido de silício total - SiO <sub>2</sub>	53.74	Óxido de sódio - NaO <sub>2</sub>	0.52
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.84	Óxido de potássio - k <sub>2</sub> O	2.60
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.83	Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	2.23
Óxido de magnésio - MgO	0.70	Sulfato de cálcio - CaSo <sub>4</sub>	0.83
Anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub>	0.49		

NOTA: Dados fornecidos por Furnas Centrais Elétricas - LABC.T/GOIÂNIA

- **Fumo de sílica - (Neste trabalho será chamado de TIPO FS - I)**

**TABELA 12 - Composição química do fumo de sílica TIPO FS - I**

ENSAIO	%	ENSAIO	%
Perda ao fogo	2.29	Óxido de cálcio total - CaO	1.07
Dióxido de silício total - SiO <sub>2</sub>	92.12	Óxido de sódio - NaO <sub>2</sub>	0.19
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.15	Óxido de potássio - k <sub>2</sub> O	0.90
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.42	Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	0.78
Óxido de magnésio - MgO	0.60	Sulfato de cálcio - CaSo <sub>4</sub>	-
Anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub>	-		

NOTA: Dados fornecidos por Furnas Centrais Elétricas - LABC.T/GOIÂNIA

## 6- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 6.1- Ensaio em argamassa

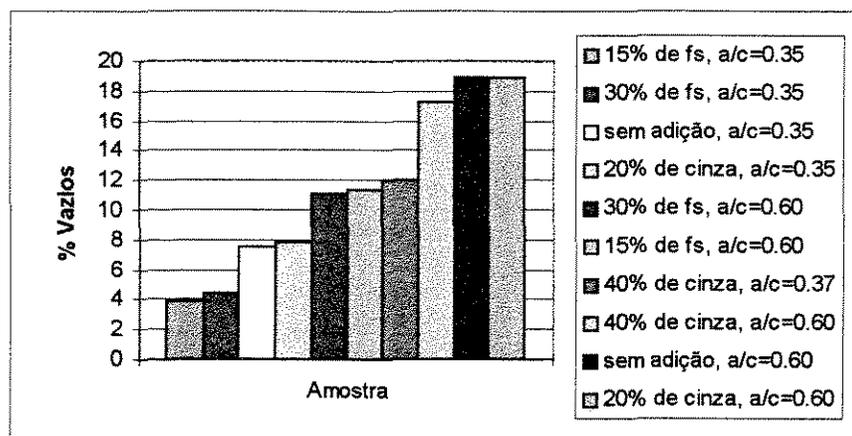
#### 6.1.1- POROSIDADE

Este ensaio foi executado com os corpos de prova que foram curados em água a temperatura ambiente e visou conhecer o índice de vazios de cada combinação. Cada amostra compunha três corpos de prova que foram pesados assim que retirados da cura e depois de saírem da estufa. A diferença entre as pesagens foi transformada em volume e comparada ao volume dos cilindros de argamassa, tirou-se a média dos três corpos de prova e obteve-se os resultados da **tabela 13**.

**TABELA 13- Resultados do ensaio de porosidade em argamassa**

AMOSTRA	DESCRIÇÃO	% VAZIOS
1	15% de fs, a/c=0.35	3.91
2	30% de fs, a/c=0.35	4.52
3	sem adição, a/c=0.35	7.51
4	20% de cinza, a/c=0.35	7.90
5	30% de fs, a/c=0.60	11.02
6	15% de fs, a/c=0.60	11.30
7	40% de cinza, a/c=0.37	12.06
8	40% de cinza, a/c=0.60	17.29
9	sem adição, a/c=0.60	18.91
10	20% de cinza, a/c=0.60	18.97

GRÁFICO 1-Porosidade em argamassa



Pode-se observar que quanto maior a relação água/cimento, maior a porosidade, a exceção da amostra com 40% de cinza volante a relação  $a/c=0,37$ .

Entre corpos de prova de mesma adição, 15% de fumo de sílica, mostrou-se menos poroso que 30% para uma relação água/cimento de 0.35, esse resultado evidencia que não se pode utilizar uma quantidade de pozolana inadequada, pois seu excesso resulta em uma maior absorção de água, já que se trata de partículas com uma área específica muito grande. Entretanto, para uma relação água/cimento de 0.60, 15% de fumo de sílica mostrou-se mais poroso que 30%. O mesmo comportamento ocorreu com os corpos de prova que continham cinza volante como adição. A diferença da relação  $a/c$ , provocou comportamentos diferentes.

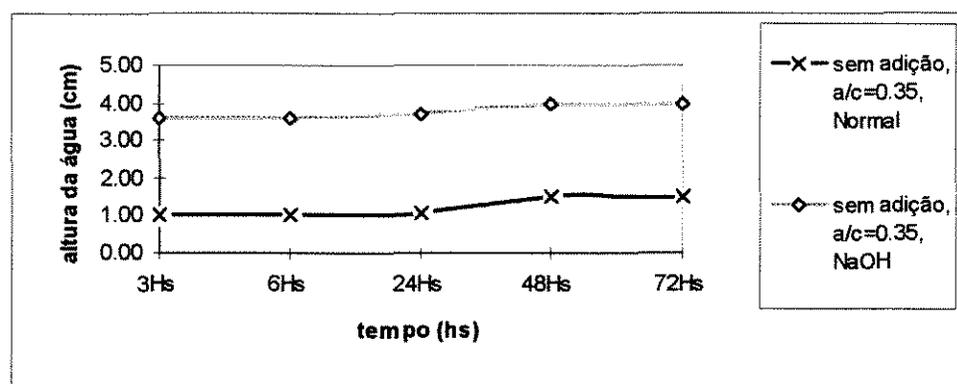
### 6.1.2- ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este ensaio foi executado com os corpos de prova que foram curados em solução de NaOH e água por 30 dias. Após a cura foram levados para a estufa por mais 18 dias e o procedimento seguiu de acordo com a NBR 9779/87, onde foram colocados em um recipiente com 1,5 cm de água e foram feitas leituras diárias de quanto a água penetrava nos corpos de prova, para este ensaio, cada combinação foi composta por três corpos de prova, fêz-se a leitura nos três corpos de prova, tirou-se a média e o resultado está expresso na **tabela 14**.

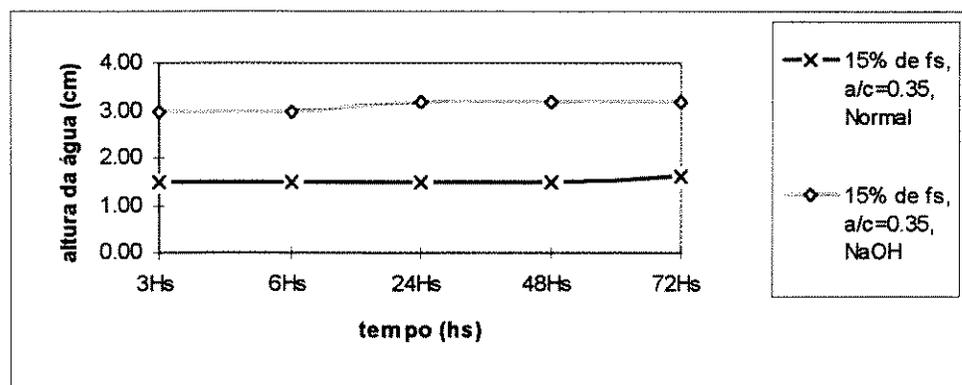
TABELA 14- Resultados do ensaio de absorção por capilaridade em argamassa

CP	DESCRIÇÃO	3Hs	6Hs	24Hs	48Hs	72Hs
1(normal)	sem adição, a/c=0.35	1.00	1.00	1.10	1.50	1.50
1(NaOH)	sem adição, a/c=0.35	3.60	3.60	3.70	4.00	4.00
2(normal)	15% de fs, a/c=0.35	1.50	1.50	1.50	1.50	1.60
2(NaOH)	15% de fs, a/c=0.35	3.00	3.00	3.20	3.20	3.20
3(normal)	30% de fs, a/c=0.35	1.70	1.70	1.90	2.00	2.00
3(NaOH)	30% de fs, a/c=0.35	3.60	3.60	3.70	4.20	4.20
4(normal)	sem adição, a/c=0.60	1.20	1.70	1.90	4.30	4.40
4(NaOH)	sem adição, a/c=0.60	2.60	2.60	2.60	5.80	6.50
5(normal)	15% de fs, a/c=0.60	1.40	1.40	2.10	2.10	2.10
5(NaOH)	15% de fs, a/c=0.60	2.10	2.10	4.40	5.00	5.00
6(normal)	30% de fs, a/c=0.60	1.30	1.30	2.30	2.60	2.60
6(NaOH)	30% de fs, a/c=0.60	3.10	3.30	4.90	5.50	5.50
7(normal)	20% de cinza, a/c=0.35	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
7(NaOH)	20% de cinza, a/c=0.35	2.60	2.70	3.60	3.60	3.70
8(normal)	40% de cinza, a/c=0.37	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
8(NaOH)	40% de cinza, a/c=0.37	3.40	3.70	4.50	5.30	5.30
9(normal)	20% de cinza, a/c=0.60	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
9(NaOH)	20% de cinza, a/c=0.60	2.20	2.30	3.90	4.35	5.20
10(normal)	40% de cinza, a/c=0.60	1.20	1.20	2.30	2.30	2.30
10(NaOH)	40% de cinza, a/c=0.60	3.00	3.40	4.60	5.80	7.00

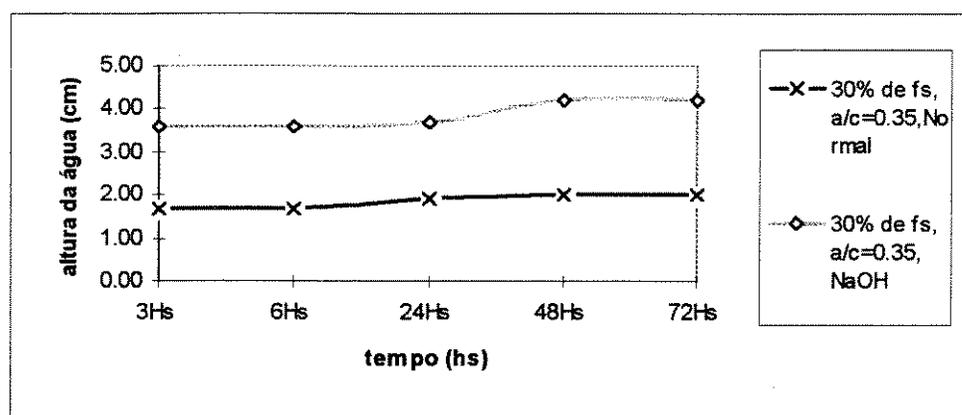
GRÁFICO 2.1- Permeabilidade em argamassas, 0% de adição, a/c=0,35



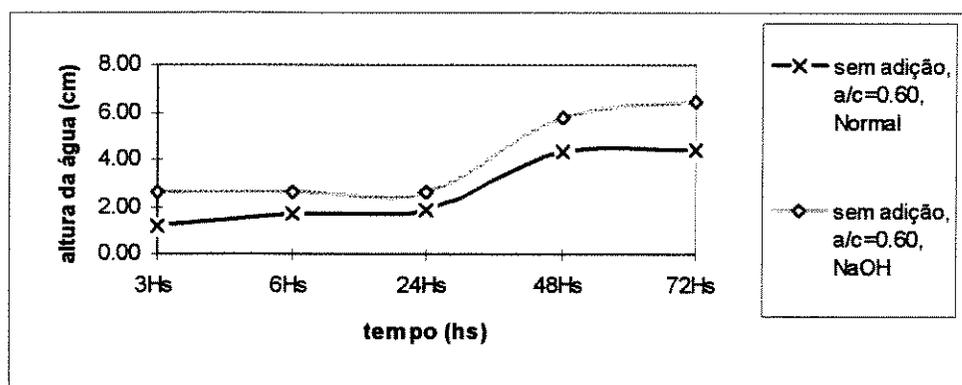
**GRÁFICO 2.2- Permeabilidade em argamassas, 15% de Fumo de sílica,  $a/c=0,35$**



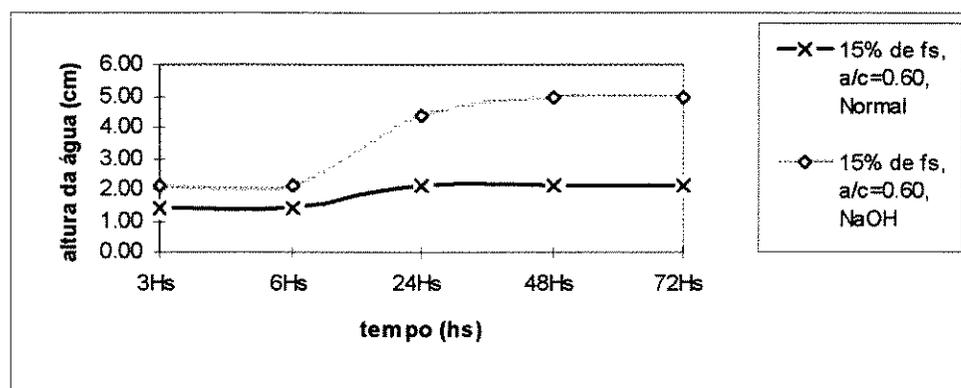
**GRÁFICO 2.3- Permeabilidade em argamassas, 30% de Fumo de sílica,  $a/c=0,35$**



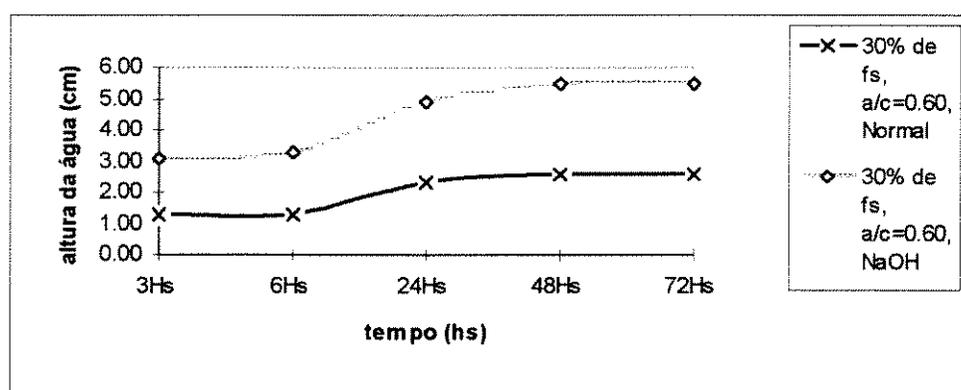
**GRÁFICO 2.4- Permeabilidade em argamassas, 0% de adição,  $a/c=0,60$**



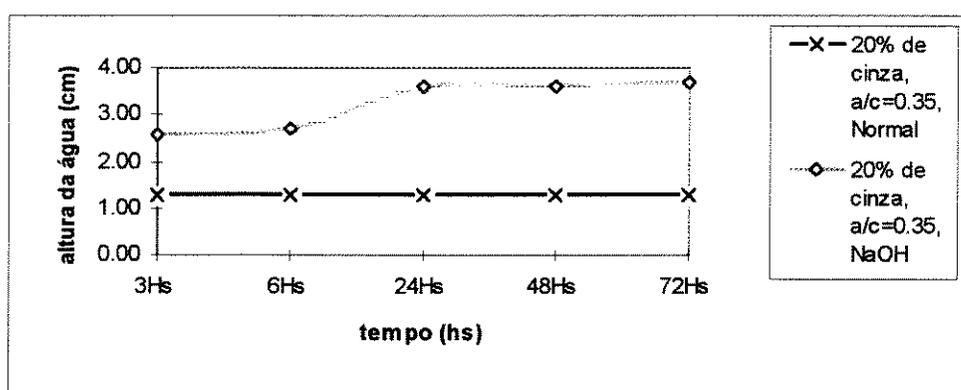
**GRÁFICO 2.5- Permeabilidade em argamassas, 15% de Fumo de sílica, a/c=0,60**



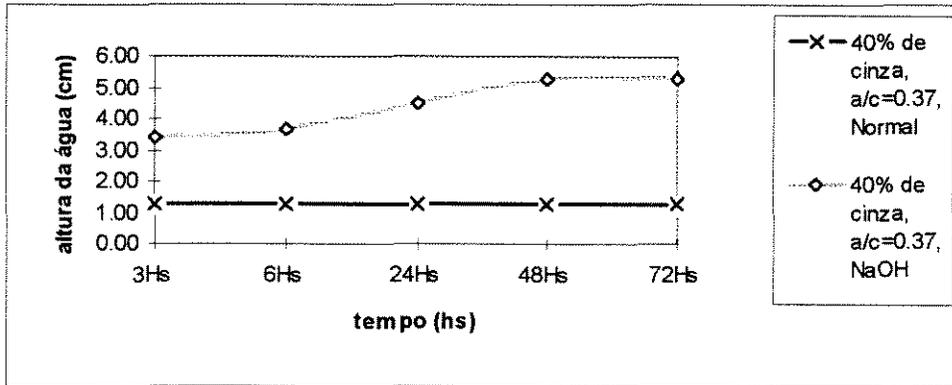
**GRÁFICO 2.6- Permeabilidade em argamassas, 30% de Fumo de sílica, a/c=0,60**



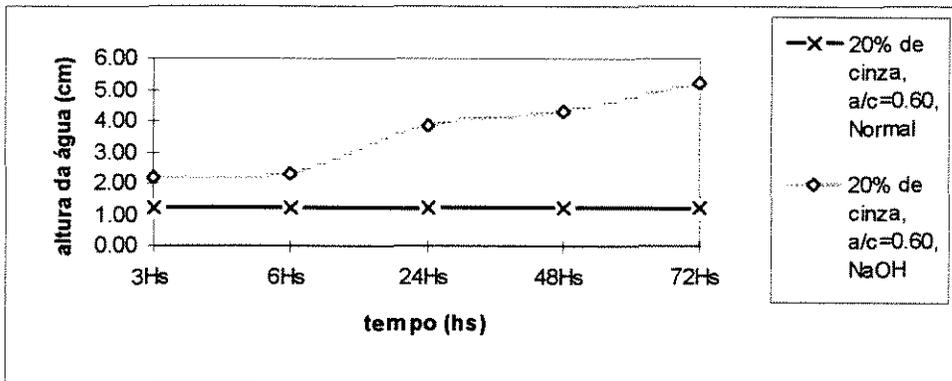
**GRÁFICO 2.7- Permeabilidade em argamassas, 20% de Cinza volante, a/c=0,35**



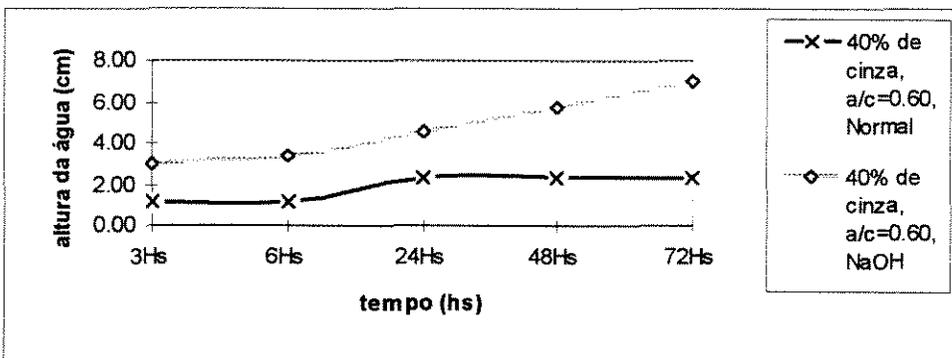
**GRÁFICO 2.8- Permeabilidade em argamassas, 40% de Cinza volante,  $a/c=0,37$**



**GRÁFICO 2.9- Permeabilidade em argamassas, 20% de Cinza volante,  $a/c=0,60$**



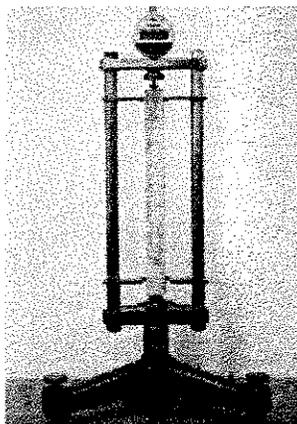
**GRÁFICO 2.10- Permeabilidade em argamassas, 40% de Cinza volante,  $a/c=0,60$**



É possível observar que os corpos de prova que foram curados na solução de NaOH, apresentaram uma permeabilidade maior que os que foram curados na água, tanto para o fumo de sílica como para a cinza volante. Esse fato comprova a microfissuração provocada pela reação álcali-agregado.

### 6.1.3- ENSAIO DE REATIVIDADE

Neste ensaio foram moldadas 3 barras de argamassa para cada combinação conforme a ASTM C-1260, onde foram curadas em solução de NaOH a 80°C. Foram feitas leituras diárias através de extensômetro, conforme figura abaixo. Este extensômetro fornece medidas em milímetros com três casas decimais. A média das três leituras foi plotada em um gráfico para facilitar a análise. Comparo-se a expansão entre as diferentes porcentagens de pozolana e entre as diferentes relações a/c.



FONTE: FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS - LABC.T/GOIÂNIA

**TABELA 15-Ensaio de reatividade em argamassa. Sem adição relação a/c=0.35**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	24	298.547	296.238	296.666	297.150	0.000	1.23
3	24	298.554	296.252	296.674	297.160	0.004	1.23
4	24	298.560	296.259	296.677	297.165	0.006	1.23
6	24	298.574	296.266	296.690	297.177	0.011	1.23
7	24	298.590	296.276	296.700	297.189	0.015	1.23
8	25	298.596	296.310	296.717	297.208	0.023	1.22
9	25	298.619	296.333	296.729	297.227	0.031	1.22
10	25	298.648	296.338	296.745	297.244	0.037	1.23
13	25	298.685	296.371	296.797	297.284	0.054	1.23
14	26	298.706	296.386	296.814	297.302	0.061	1.23
16	26	298.727	296.413	296.849	297.330	0.072	1.23
17	25	298.735	296.451	296.868	297.351	0.081	1.22
20	25	298.772	296.482	296.918	297.391	0.096	1.22
21	26	298.816	296.503	296.939	297.419	0.108	1.23
22	26	298.835	296.530	296.957	297.441	0.116	1.23
23	26	298.835	296.543	296.983	297.454	0.121	1.22
24	26	298.869	296.565	296.992	297.475	0.130	1.23
27	26	298.923	296.622	297.054	297.533	0.153	1.22
28	25	298.905	296.622	297.068	297.532	0.153	1.21
29	26	298.942	296.634	297.083	297.553	0.161	1.22
30	26	298.968	296.642	297.099	297.570	0.168	1.23

**TABELA 16- Ensaio de reatividade em argamassa. 15% de fumo de sílica, relação a/c=0.35**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	24	296.814	296.596	296.076	296.495	0.000	0.38
3	24	296.835	296.608	296.098	296.514	0.007	0.38
4	24	296.840	296.618	296.098	296.519	0.009	0.38
6	24	296.857	296.620	296.132	296.536	0.017	0.37
7	24	296.845	296.626	296.125	296.532	0.015	0.37
8	25	296.852	296.628	296.120	296.533	0.015	0.38
9	25	296.856	296.634	296.124	296.538	0.017	0.38
10	25	296.869	296.636	296.131	296.545	0.020	0.38
13	25	296.885	296.648	296.131	296.555	0.024	0.39
14	26	296.878	296.651	296.140	296.556	0.025	0.38
16	26	296.867	296.651	296.133	296.550	0.022	0.38
17	25	296.884	296.655	296.152	296.564	0.027	0.37
20	25	296.889	296.656	296.156	296.567	0.029	0.37
21	26	296.884	296.664	296.156	296.568	0.029	0.37
22	26	296.888	296.664	296.156	296.569	0.030	0.38
23	26	296.895	296.672	296.156	296.574	0.032	0.38
24	26	296.895	296.673	296.168	296.579	0.033	0.37
27	26	296.895	296.683	296.168	296.582	0.035	0.37
28	25	296.884	296.680	296.163	296.576	0.032	0.37
29	26	296.914	296.686	296.160	296.587	0.037	0.39
30	26	296.902	296.680	296.167	296.583	0.035	0.38

**TABELA 17- Ensaio de reatividade em argamassa. 30% de fumo de sílica, relação a/c=0.35**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	24	296.488	297.269	297.323	297.027	0.000	0.47
4	24	296.492	297.286	297.352	297.043	0.007	0.48
5	24	296.498	297.279	297.368	297.048	0.009	0.48
6	25	296.501	297.287	297.368	297.052	0.010	0.48
7	25	296.501	297.291	297.371	297.054	0.011	0.48
8	25	296.499	297.290	297.365	297.051	0.010	0.48
11	25	296.503	297.287	297.358	297.049	0.009	0.47
12	26	296.507	297.300	297.360	297.056	0.011	0.48
14	26	296.507	297.290	297.360	297.052	0.010	0.47
15	25	296.502	297.298	297.366	297.055	0.011	0.48
18	25	296.506	297.293	297.358	297.052	0.010	0.47
19	26	296.509	297.294	297.370	297.058	0.012	0.48
20	26	296.514	297.294	297.370	297.059	0.013	0.47
21	26	296.517	297.300	297.375	297.064	0.015	0.48
22	26	296.517	297.300	297.376	297.064	0.015	0.48
25	26	296.517	297.320	297.376	297.071	0.018	0.48
26	25	296.510	297.298	297.369	297.059	0.013	0.48
27	26	296.517	297.298	297.373	297.063	0.014	0.47
28	25	296.517	297.300	297.373	297.063	0.015	0.47
29	25	296.527	297.317	297.396	297.080	0.021	0.48
30	26	296.529	297.320	297.398	297.082	0.022	0.48

**TABELA 18- Ensaio de reatividade em argamassa. sem adição, relação a/c=0.60**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	24	297.520	297.515	297.498	297.511	0.000	0.01
4	24	297.536	297.519	297.518	297.524	0.005	0.01
5	24	297.544	297.546	297.518	297.536	0.010	0.02
6	25	297.562	297.544	297.538	297.548	0.015	0.01
7	25	297.570	297.563	297.534	297.556	0.018	0.02
8	25	297.578	297.571	297.543	297.564	0.021	0.02
11	25	297.615	297.618	297.564	297.599	0.035	0.03
12	26	297.621	297.615	297.574	297.603	0.037	0.03
14	26	297.648	297.630	297.596	297.625	0.045	0.03
15	25	297.655	297.640	297.608	297.634	0.049	0.02
18	25	297.696	297.680	297.643	297.673	0.065	0.03
19	26	297.716	297.691	297.661	297.689	0.071	0.03
20	26	297.725	297.700	297.675	297.700	0.076	0.03
21	26	297.740	297.726	297.690	297.719	0.083	0.03
22	26	297.753	297.740	297.708	297.734	0.089	0.02
25	26	297.801	297.788	297.752	297.780	0.108	0.03
26	25	297.820	297.798	297.768	297.795	0.114	0.03
27	26	297.839	297.822	297.787	297.816	0.122	0.03
28	25	297.853	297.834	297.799	297.829	0.127	0.03
29	25	297.867	297.858	297.828	297.851	0.136	0.02
30	26	297.883	297.874	297.848	297.868	0.143	0.02

**TABELA 19- Ensaio de reatividade em argamassa. 15% de fumo de sílica, relação a/c=0.60**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	24	296.158	296.920	296.436	296.505	0.000	0.39
4	24	296.171	296.936	296.454	296.520	0.006	0.39
5	24	296.182	296.967	296.458	296.536	0.012	0.40
6	25	296.184	296.962	296.466	296.537	0.013	0.39
7	25	296.194	297.000	296.478	296.557	0.021	0.41
8	25	296.206	296.998	296.478	296.561	0.022	0.40
11	25	296.212	297.018	296.492	296.574	0.028	0.41
12	26	296.206	297.018	296.497	296.574	0.027	0.41
14	26	296.267	297.018	296.502	296.596	0.036	0.38
15	25	296.263	296.984	296.510	296.586	0.032	0.37
18	25	296.265	297.003	296.512	296.593	0.035	0.38
19	26	296.265	297.004	296.523	296.597	0.037	0.38
20	26	296.265	297.025	296.523	296.604	0.040	0.39
21	26	296.265	297.038	296.531	296.611	0.043	0.39
22	26	296.242	297.052	296.545	296.613	0.043	0.41
25	26	296.268	297.062	296.551	296.627	0.049	0.40
26	25	296.268	297.042	296.551	296.620	0.046	0.39
27	26	297.277	297.050	295.555	296.627	0.049	0.94
28	25	296.270	297.050	296.558	296.626	0.048	0.39
29	25	296.292	297.040	296.573	296.635	0.052	0.38
30	26	296.298	297.040	296.573	296.637	0.053	0.38

**TABELA 20- Ensaio de reatividade em argamassa. 30% de fumo de sílica, relação a/c=0.60**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	24	295.898	296.612	296.606	296.372	0.000	0.41
4	24	295.918	296.631	296.628	296.392	0.008	0.41
5	24	295.922	296.638	296.647	296.402	0.012	0.42
6	25	295.931	296.634	296.643	296.403	0.012	0.41
7	25	295.931	296.640	296.656	296.409	0.015	0.41
8	25	295.930	296.638	296.649	296.406	0.013	0.41
11	25	295.943	296.646	296.650	296.413	0.016	0.41
12	26	295.943	296.650	296.654	296.416	0.017	0.41
14	26	295.936	296.650	296.654	296.413	0.017	0.41
15	25	295.941	296.651	296.656	296.416	0.018	0.41
18	25	295.936	296.645	296.644	296.408	0.015	0.41
19	26	295.946	296.654	296.657	296.419	0.019	0.41
20	26	295.948	296.654	296.658	296.420	0.019	0.41
21	26	295.953	296.656	296.668	296.426	0.021	0.41
22	26	295.953	296.656	296.679	296.429	0.023	0.41
25	26	295.958	296.662	296.679	296.433	0.024	0.41
26	25	295.972	296.662	296.668	296.434	0.025	0.40
27	26	295.955	296.666	296.650	296.424	0.021	0.41
28	25	295.956	296.666	296.667	296.430	0.023	0.41
29	25	295.980	296.676	296.675	296.444	0.029	0.40
30	26	295.980	296.670	296.668	296.439	0.027	0.40

**TABELA 21- Ensaio de reatividade em argamassa. 20% de cinza volante, relação a/c=0.35**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	25	296.272	296.980	297.138	296.797	0.000	0.46
3	25	296.276	296.986	297.138	296.800	0.001	0.46
4	25	296.278	296.986	297.138	296.801	0.001	0.46
7	25	296.287	296.983	297.151	296.807	0.004	0.46
8	26	296.306	296.998	297.151	296.818	0.009	0.45
10	26	296.298	297.001	297.151	296.817	0.008	0.46
11	25	296.300	297.005	297.165	296.823	0.011	0.46
14	25	296.300	297.005	297.165	296.823	0.011	0.46
15	26	296.316	297.015	297.168	296.833	0.014	0.45
16	26	296.316	297.016	297.170	296.834	0.015	0.46
17	26	296.316	297.019	297.174	296.836	0.016	0.46
18	26	296.316	297.028	297.178	296.841	0.017	0.46
21	26	296.322	297.032	297.186	296.847	0.020	0.46
22	25	296.322	297.024	297.186	296.844	0.019	0.46
23	26	296.338	297.030	297.183	296.850	0.021	0.45
24	26	296.332	297.033	297.184	296.850	0.021	0.45
25	25	296.343	297.048	297.201	296.864	0.027	0.46
28	27	296.360	297.067	297.220	296.882	0.034	0.46
29	26	296.364	297.066	297.220	296.883	0.035	0.46
30	25	296.372	297.066	297.222	296.887	0.036	0.45

**TABELA 22- Ensaio de reatividade em argamassa. 40% de cinza volante, relação a/c=0.37**

idade (dias)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	25	297.161	297.018	296.871	297.017	0.000	0.15
3	25	297.157	297.020	296.877	297.018	0.000	0.14
4	25	297.167	297.028	296.890	297.028	0.005	0.14
7	25	297.164	297.042	296.873	297.026	0.004	0.15
8	26	297.157	297.045	296.887	297.030	0.005	0.14
10	26	297.160	297.048	296.882	297.030	0.005	0.14
11	25	297.165	297.048	296.894	297.036	0.007	0.14
14	25	297.160	297.034	296.890	297.028	0.004	0.14
15	26	297.164	297.052	296.890	297.035	0.007	0.14
16	26	297.167	297.032	296.890	297.030	0.005	0.14
17	26	297.169	297.050	296.890	297.036	0.008	0.14
18	26	297.172	297.050	296.895	297.039	0.009	0.14
21	26	297.172	297.050	296.898	297.040	0.009	0.14
22	25	297.166	297.050	296.876	297.031	0.005	0.15
23	26	297.166	297.053	296.891	297.037	0.008	0.14
24	26	297.166	297.053	296.896	297.038	0.009	0.14
25	25	297.189	297.053	296.908	297.050	0.013	0.14
28	27	297.196	297.073	296.912	297.060	0.017	0.14
29	26	297.196	297.082	296.916	297.065	0.019	0.14
30	25	297.201	297.058	296.904	297.054	0.015	0.15

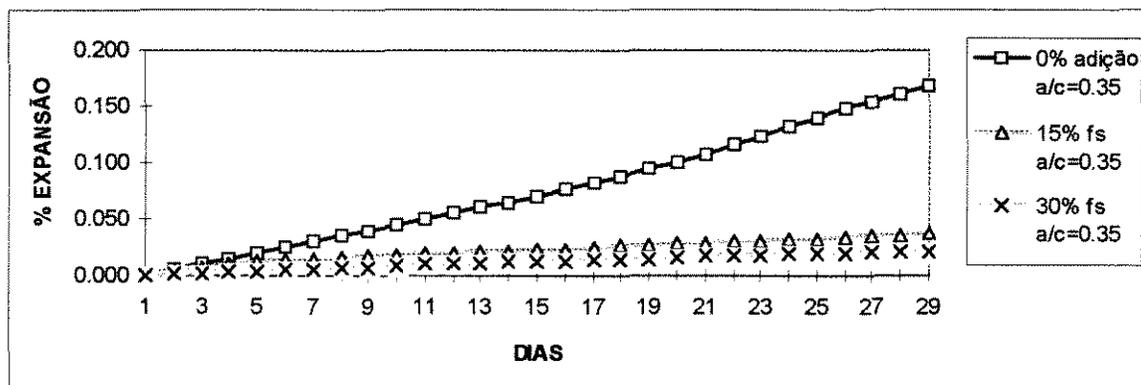
**TABELA 23- Ensaio de reatividade em argamassa. 20% de cinza volante, relação a/c=0.60**

idade (dia)	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	25	297.523	296.376	296.344	296.748	0.000	0.67
3	25	297.518	296.355	296.339	296.737	-0.004	0.68
4	25	297.522	296.358	296.342	296.741	-0.003	0.68
7	25	297.543	296.395	296.363	296.767	0.008	0.67
8	26	297.550	296.412	296.374	296.779	0.012	0.67
10	26	297.571	296.434	296.391	296.799	0.020	0.67
11	25	297.588	296.458	296.420	296.822	0.030	0.66
14	25	297.619	296.468	296.448	296.845	0.039	0.67
15	26	297.638	296.470	296.466	296.858	0.044	0.68
16	26	297.650	296.481	296.482	296.871	0.049	0.67
17	26	297.666	296.528	296.500	296.898	0.060	0.67
18	26	297.685	296.560	296.518	296.921	0.069	0.66
21	26	297.720	296.548	296.556	296.941	0.077	0.67
22	25	297.725	296.578	296.564	296.956	0.083	0.67
23	26	297.732	296.578	296.566	296.959	0.084	0.67
24	26	297.740	296.603	296.590	296.978	0.092	0.66
25	25	297.763	296.622	296.614	297.000	0.101	0.66
28	27	297.809	296.661	296.640	297.037	0.115	0.67
29	26	297.820	296.680	296.660	297.053	0.122	0.66
30	25	297.825	296.704	296.672	297.067	0.128	0.66

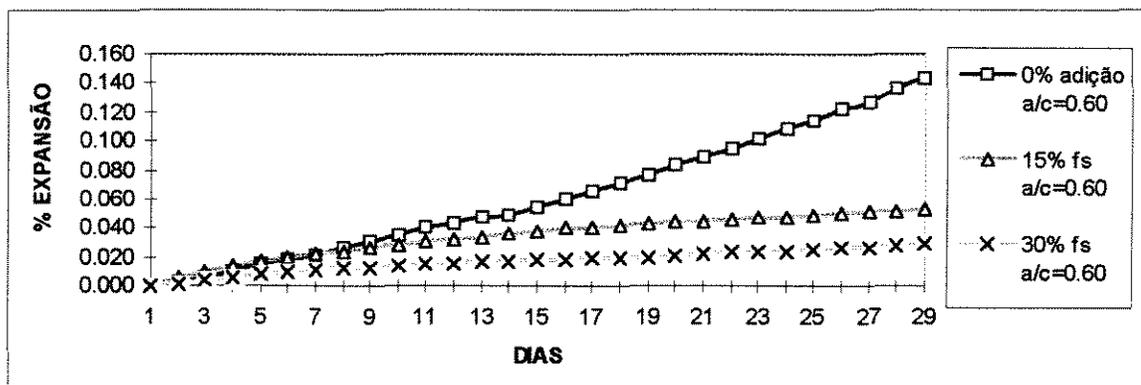
**TABELA 24- Ensaio de reatividade em argamassa. 40% de cinza volante, relação a/c=0.60**

idade	temp. (C)	amostra 1	amostra 2	amostra 3	média	% exp.	Desvio Padrão
2	25	295.520	296.294	296.329	296.048	0.000	0.46
3	25	295.523	296.294	296.334	296.050	0.001	0.46
4	25	295.526	296.298	296.337	296.054	0.002	0.46
7	25	295.526	296.292	296.348	296.055	0.003	0.46
8	26	295.530	296.294	296.350	296.058	0.004	0.46
10	26	295.531	296.305	296.350	296.062	0.006	0.46
11	25	295.538	296.316	296.350	296.068	0.008	0.46
14	25	295.534	296.319	296.345	296.066	0.007	0.46
15	26	295.538	296.319	296.360	296.072	0.010	0.46
16	26	295.538	296.313	296.348	296.066	0.007	0.46
17	26	295.542	296.329	296.356	296.076	0.011	0.46
18	26	295.546	296.333	296.362	296.080	0.013	0.46
21	26	295.546	296.330	296.356	296.077	0.012	0.46
22	25	295.546	296.313	296.366	296.075	0.011	0.46
23	26	295.550	296.315	296.359	296.075	0.011	0.45
24	26	295.550	296.315	296.350	296.072	0.009	0.45
25	25	295.563	296.328	296.373	296.088	0.016	0.46
28	27	295.574	296.356	296.371	296.100	0.021	0.46
29	26	295.578	296.346	296.374	296.099	0.021	0.45
30	25	295.578	296.358	296.380	296.105	0.023	0.46

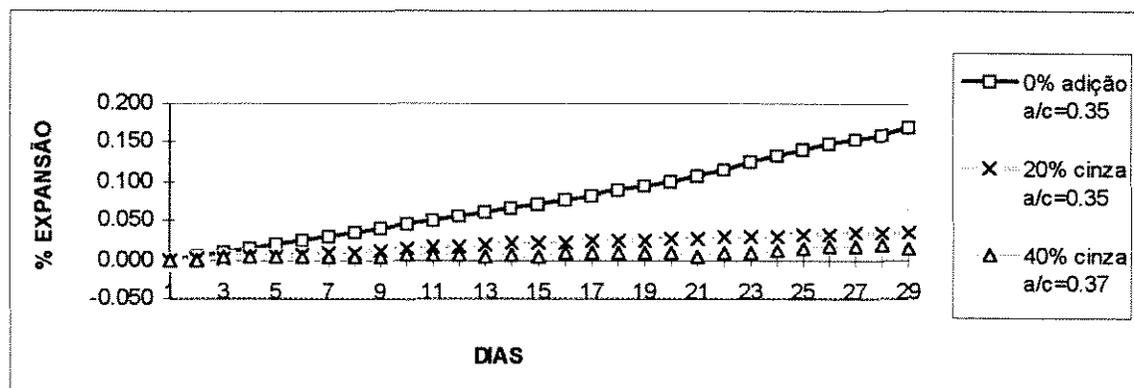
**GRÁFICO 3.1- Relação entre dosagens de fumo de sílica, relação a/c=0.35**



**GRÁFICO 3.2- Relação entre dosagens de fumo de sílica, relação a/c=0.60**

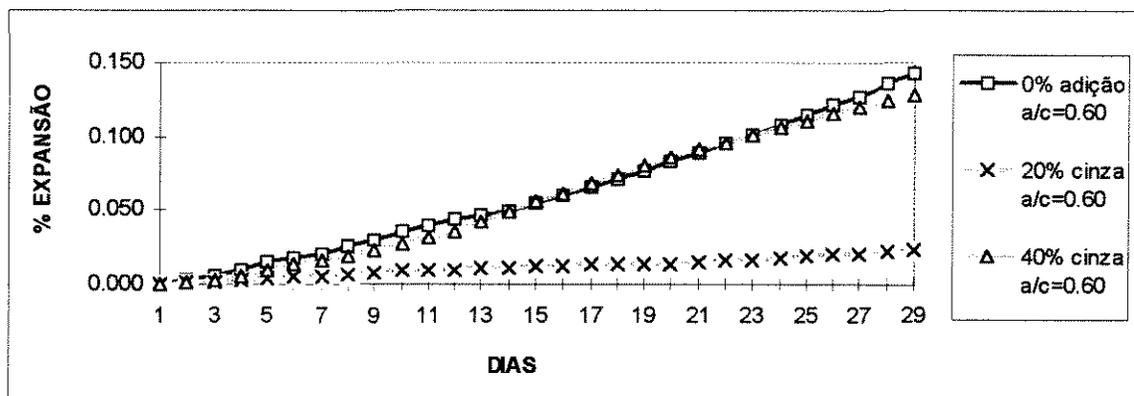


**GRÁFICO 3.3- Relação entre dosagens de cinza volante, relação a/c=0.35 e a/c=0.37**



Nos gráficos 3.1, 3.2 e 3.3 constatou-se que a medida que a porcentagem de adição aumentou, a expansão diminuiu, como era esperado.

**GRÁFICO 3.4- Relação entre dosagens de cinza volante, relação a/c=0.60**

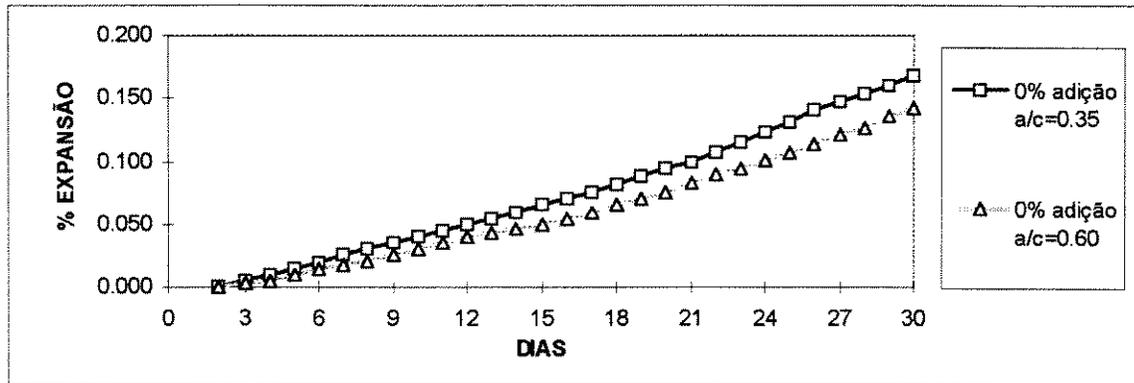


Ao comparar a expansão entre os corpos de prova que continham cinza volante e relação a/c = 0,60 (Gráfico 3.4), nota-se que aqueles com 40%, apresentaram os mesmos níveis de expansão que 0%. Esse fato comprova que atingiu-se a “proporção péssima”.

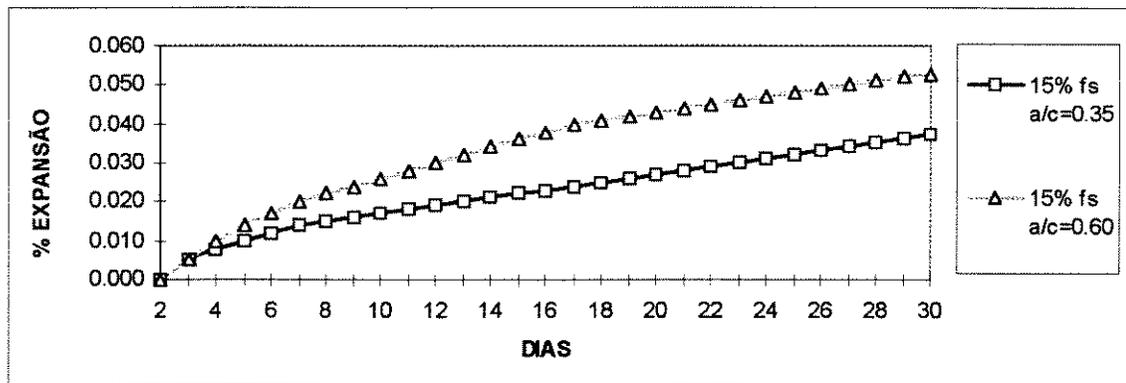
Nos Gráficos 3.5 a 3.9, procurou-se analisar a influência da porosidade na expansão, pois acredita-se que os espaços vazios podem acomodar o gel expansivo, minimizando a expansão em concretos e argamassas, PAULON (1981).

Pudemos observar esse fato no gráfico 3.5, onde o corpo de prova em análise é a combinação 0%, que é a mais porosa de todos. Nos outros gráfico, a pozolana influenciou nesse comportamento, a exceção do gráfico 3.8, com 20% de cinza volante.

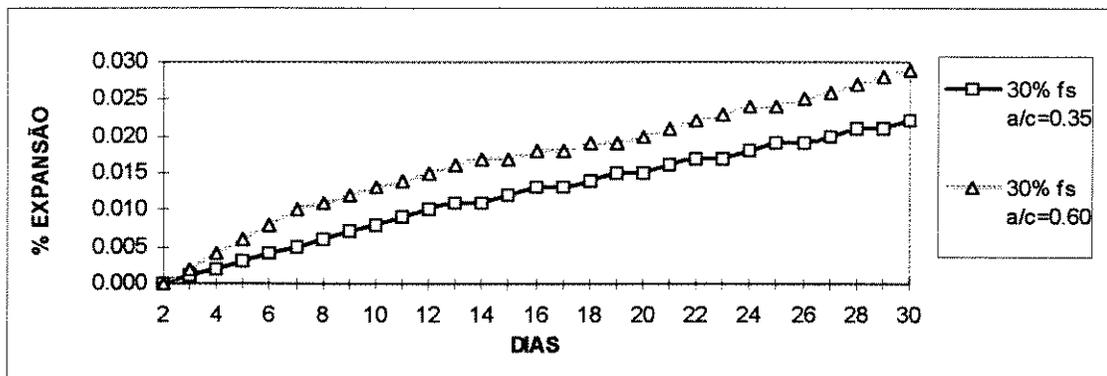
**GRÁFICO 3.5- Diferença de expansão, mesma % de adição e diferente relação a/c**



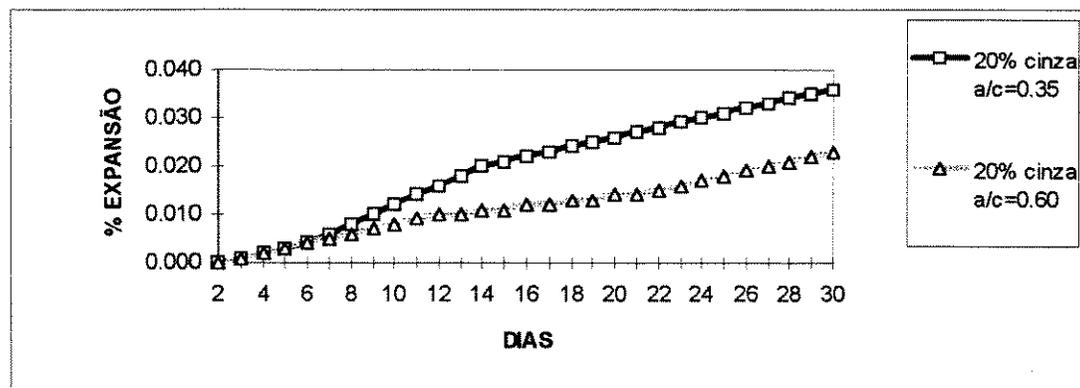
**GRÁFICO 3.6- Diferença de expansão, 15 % de Fumo de Sílica e diferente relação a/c**



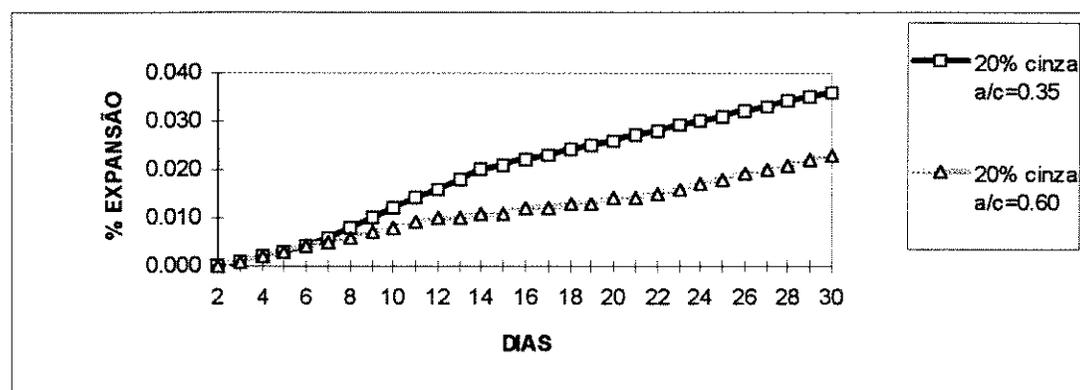
**GRÁFICO 3.7- Diferença de expansão, 30% de Fumo de Sílica e diferente relação a/c**



**GRÁFICO 3.8- Diferença de expansão, 20% de Cinza Volante e diferente relação a/c**



**GRÁFICO 3.9- Diferença de expansão, 40% de Cinza Volante e diferente relação a/c**



#### 6.1.4- ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E DIAMETRAL

Este ensaio visa estabelecer o quanto a reação álcali-agregado interfere na Resistência a compressão simples e diametral. Para tal, o ensaio seguiu conforme NBR 5739/80 (compressão simples) e 7222/83 (compressão diametral). Foram moldados 6 corpos de prova para cada combinação, três foram curados em água a temperatura ambiente e três em solução de NaOH a 80°C. A média das cargas de ruptura foi analisada através de gráficos, a primeira série apresenta os resultados do ensaio de compressão simples, onde os gráficos 4.1 a 4.5, compara as cargas de ruptura entre corpos de prova com mesma porcentagem de pozolana e diferente relação a/c e os gráficos 4.6 a 4.9, compara as diferentes porcentagens de pozolana para a mesma relação a/c.

A segunda série de gráficos apresenta os resultados de resistência a compressão diametral. Do gráfico 4.10 ao 4.14, compara-se as cargas de ruptura entre corpos de prova com mesma porcentagem de pozolana e diferente relação a/c e do 4.15 ao 4.18, compara-se as diferentes porcentagens de pozolana para a mesma relação a/c.

TABELA 25-Resultado dos ensaios de resistência à compressão simples e diametral

amostra	cura simples		cura NaOH	
	simples	diametral	simples	diametral
	tensão(MPa)	tensão(MPa)	tensão(MPa)	tensão(MPa)
0% adição, a/c=0.35	41.60	3.60	45.70	3.21
0% adição, a/c=0.60	38.70	2.15	25.10	1.76
15% fs, a/c=0.35	61.00	3.44	66.90	3.96
30% fs, a/c=0.35	60.50	4.25	60.80	3.78
15% fs, a/c=0.60	55.10	2.10	45.30	1.95
30% fs, a/c=0.60	57.60	2.17	54.80	2.17
20% cinza, a/c=0.35	58.30	3.41	60.90	3.29
40% cinza, a/c=0.37	34.50	3.27	43.20	2.51
20% cinza, a/c=0.60	30.80	2.11	30.60	1.79
40% cinza, a/c=0.60	30.80	2.38	26.80	1.56

GRÁFICO 4.1- Ensaio de resistência à compressão simples

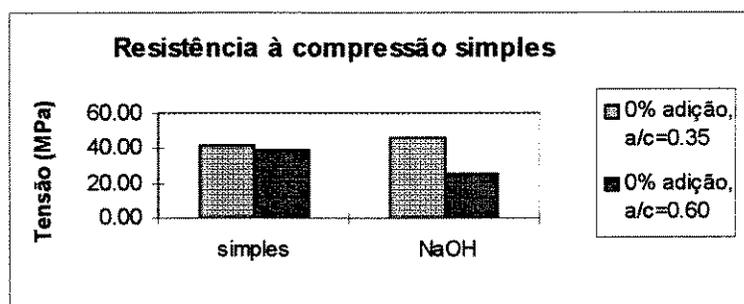


GRÁFICO 4.2- Ensaio de resistência à compressão simples

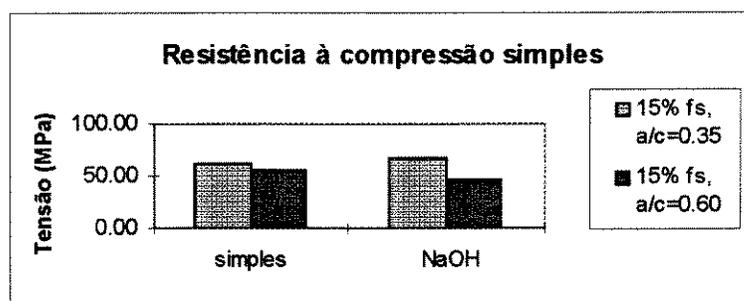


GRÁFICO 4.3- Ensaio de resistência à compressão simples

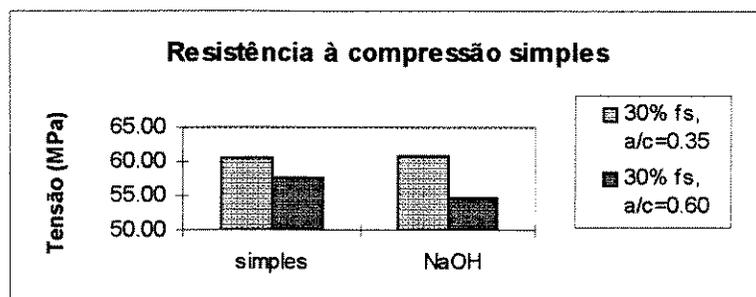


GRÁFICO 4.4- Ensaio de resistência à compressão simples

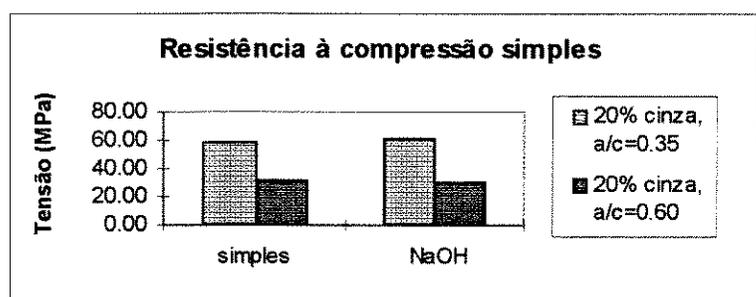


GRÁFICO 4.5- Ensaio de resistência à compressão simples

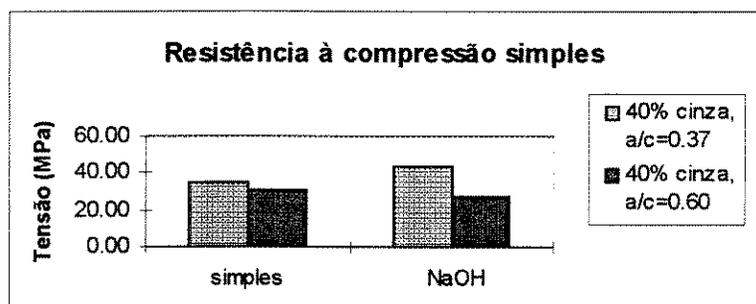


GRÁFICO 4.6- Ensaio de resistência à compressão simples

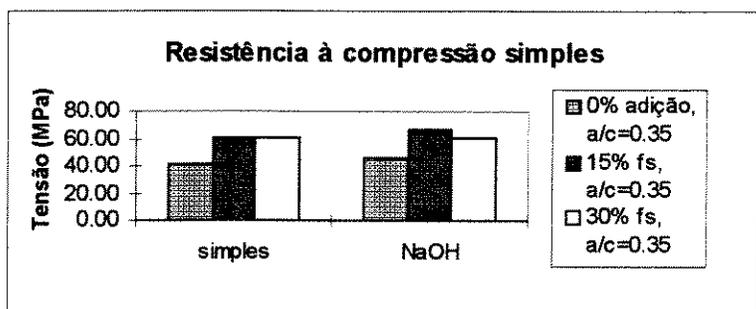


GRÁFICO 4.7- Ensaio de resistência à compressão simples

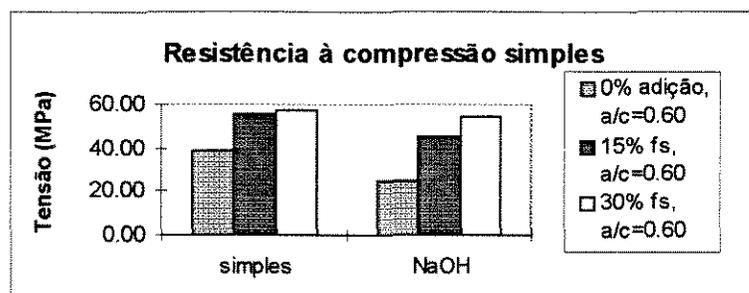


GRÁFICO 4.8- Ensaio de resistência à compressão simples

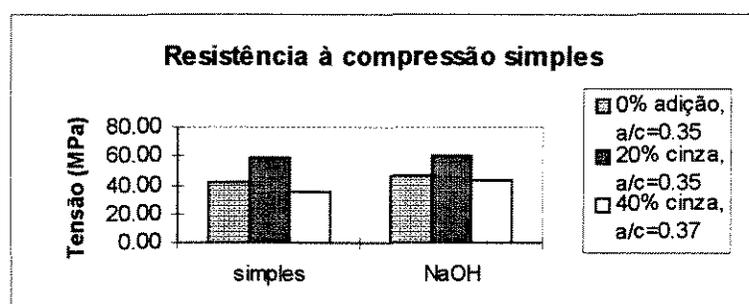


GRÁFICO 4.9- Ensaio de resistência à compressão simples

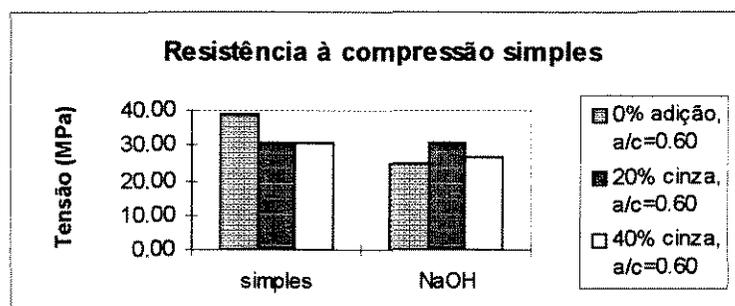


GRÁFICO 4.10- Ensaio de resistência à compressão diametral

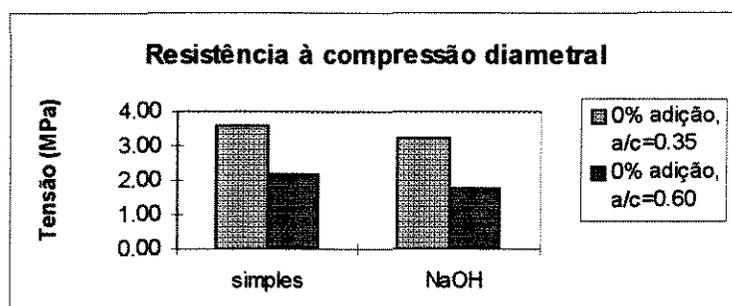


GRÁFICO 4.11- Ensaio de resistência à compressão diametral

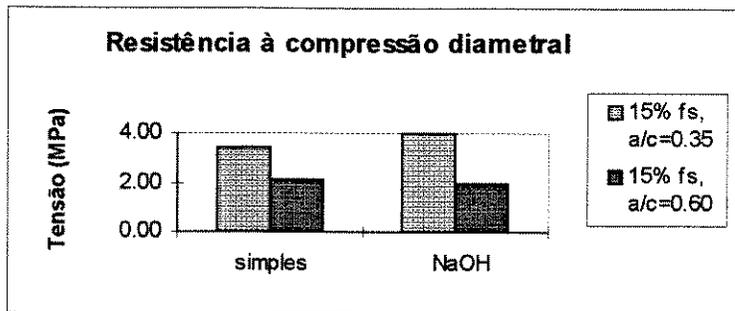


GRÁFICO 4.12- Ensaio de resistência à compressão diametral

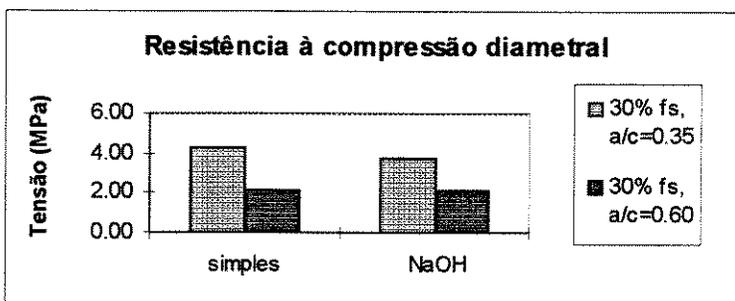


GRÁFICO 4.13- Ensaio de resistência à compressão diametral

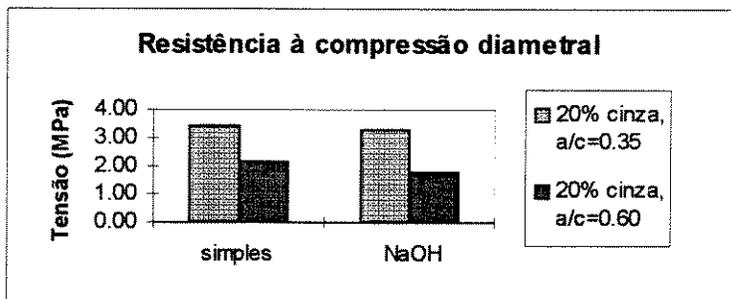


GRÁFICO 4.14- Ensaio de resistência à compressão diametral

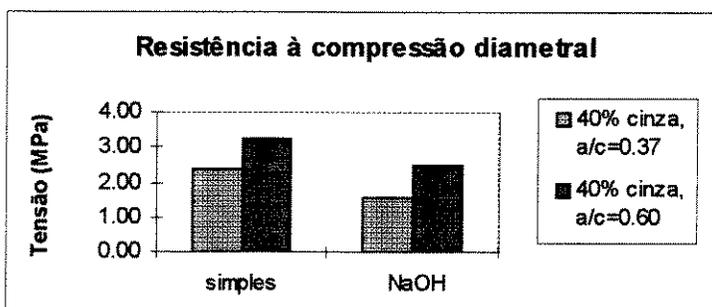


GRÁFICO 4.15- Ensaio de resistência à compressão diametral

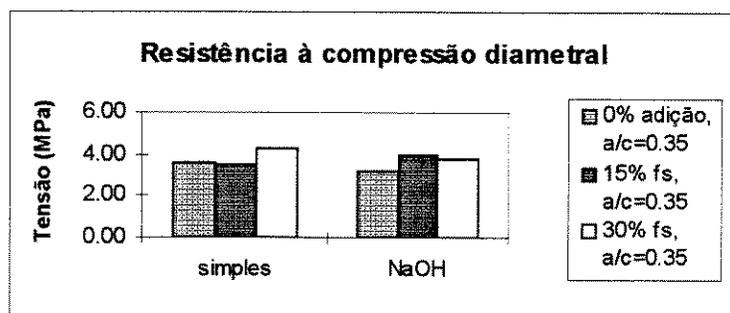


GRÁFICO 4.16- Ensaio de resistência à compressão diametral

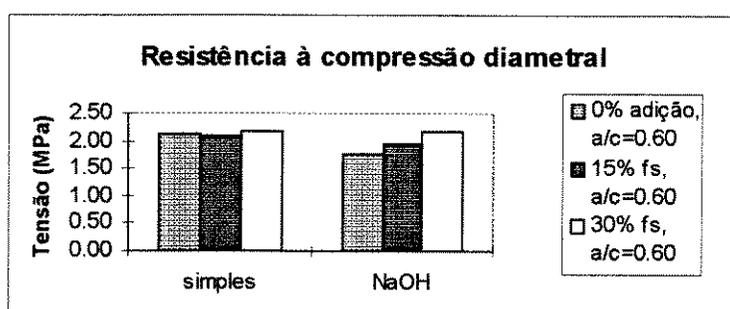


GRÁFICO 4.17- Ensaio de resistência à compressão diametral

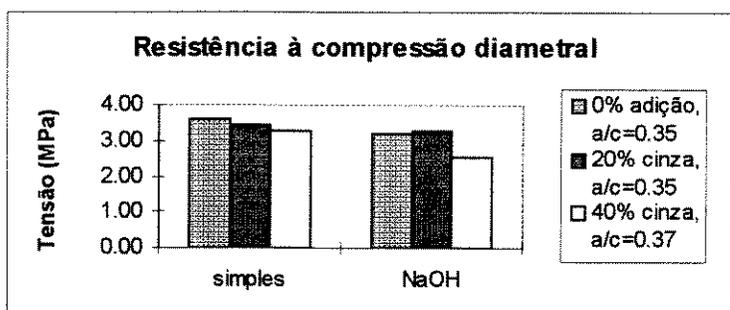
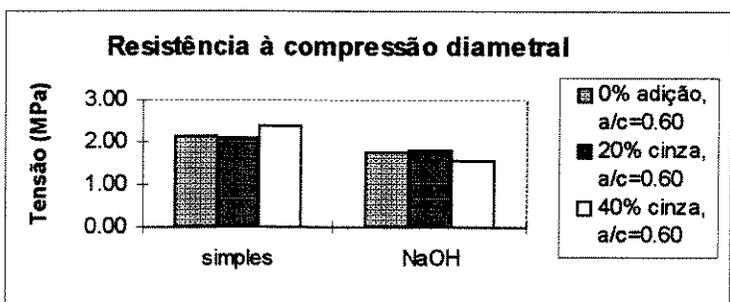


GRÁFICO 4.18- Ensaio de resistência à compressão diametral



Através destes resultados, observa-se que os corpos de prova que foram curados em solução de NaOH, apresentaram pouca alteração em suas cargas de ruptura, sendo que muitas vezes apresentaram uma resistência maior. Parece incoerência, pois um corpo de prova microfissurado não deveria apresentar uma resistência maior que um corpo de prova não fissurado. Ao estipular-se o tempo de cura (30 dias) imaginava-se que os corpos de prova teriam atingido 90% de sua resistência. Como os corpos de prova que foram curados em solução de NaOH ficaram em uma temperatura muito elevada (80°C), acredita-se que atingiram 100% de sua resistência enquanto que aqueles que foram curados em água não.

## 6.2- Ensaio em concreto

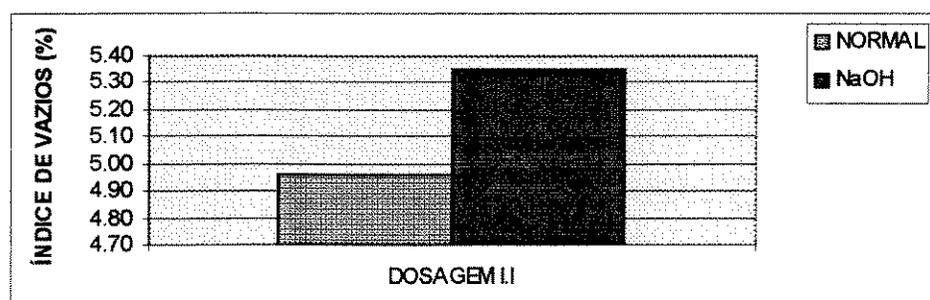
### 6.2.1- POROSIDADE

O procedimento utilizado nesse ensaio foi diferente da argamassa, pois decidiu-se analisar a porosidade dos corpos de prova que sofreram os efeitos da reação (cura em NaOH) comparados aos que foram curados em água.

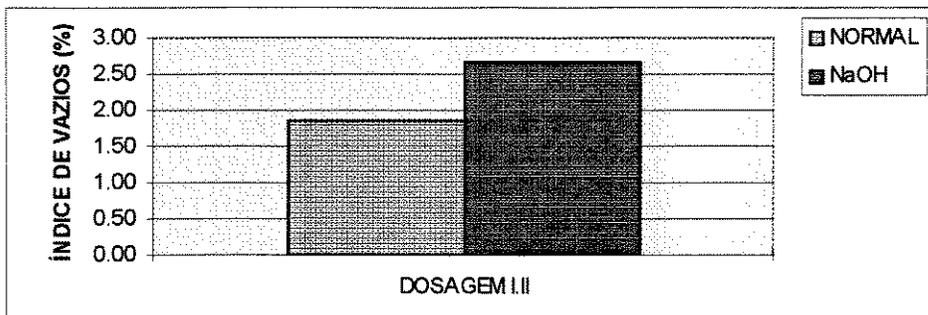
**TABELA 26- Resultados do ensaio de porosidade**

DOSAGENS	COMPOSIÇÃO	NORMAL	NaOH
DOSAGEM I.I	0% fs, a/c=0.35	5.74%	5.35%
DOSAGEM I.II	15% fs, a/c=0.35	1.85%	2.67%
DOSAGEM I.III	30% fs, a/c=0.35	1.72%	2.55%
DOSAGEM II.I	0% cv, a/c=0.35	5.34%	5.60%
DOSAGEM II.II	20% cv, a/c=0.35	3.37%	5.28%
DOSAGEM II.III	40% cv, a/c=0.35	3.56%	5.41%

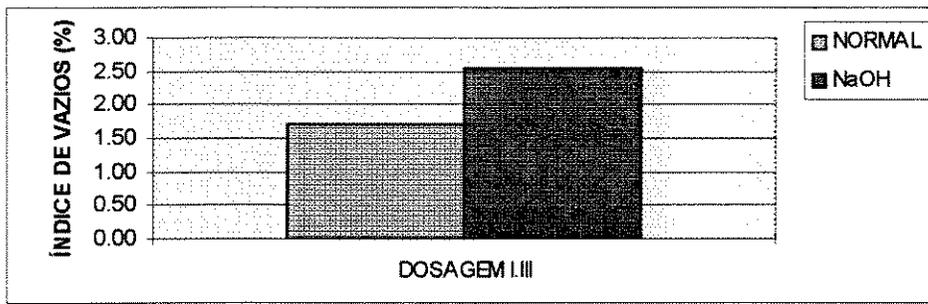
**GRÁFICO 5.1- Relação entre a porosidade de corpos de prova com 0% de fumo de sílica e relação a/c=0.35.**



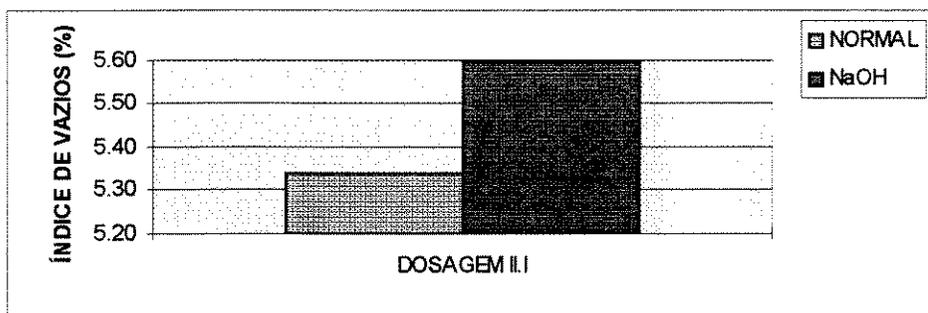
**GRÁFICO 5.2-** Relação entre a porosidade de corpos de prova com 15% de fumo de sílica e relação  $a/c=0.35$ .



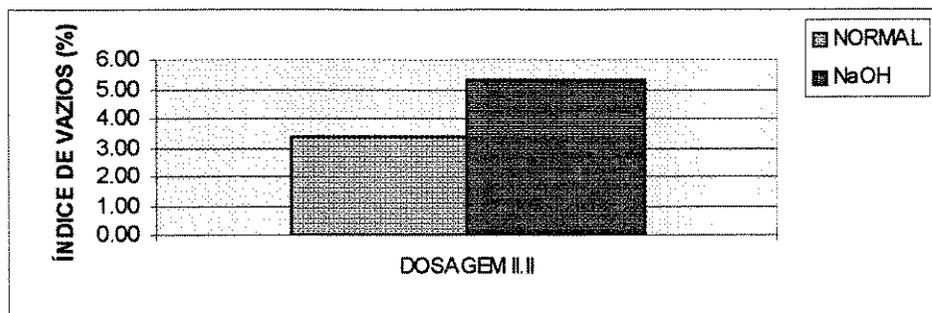
**GRÁFICO 5.3 -** Relação entre a porosidade de corpos de prova com 30% de fumo de sílica e relação  $a/c=0.35$ .



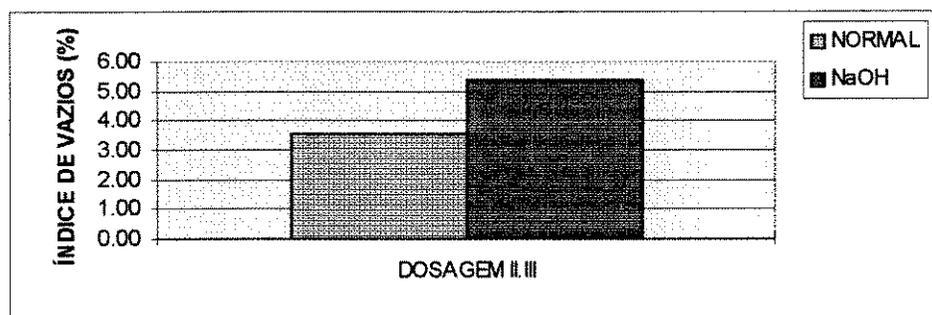
**GRÁFICO 5.4 -** Relação entre a porosidade de corpos de prova com 0% de cinza volante e relação  $a/c=0.35$ .



**GRÁFICO 5.5 - Relação entre a porosidade de corpos de prova com 20% de cinza volante e relação  $a/c=0.35$ .**



**GRÁFICO 5.6 - Relação entre a porosidade de corpos de prova com 40% de cinza volante e relação  $a/c=0.35$ .**



A exceção dos corpos de prova da dosagem I.I (0% de adição) todos os outros corpos de prova apresentaram-se mais porosos após sofrerem a aceleração da reação. Para a dosagem I.I, acredita-se que o gel tenha preenchido alguns espaços vazios o tornando um pouco menos poroso.

### 6.2.2- ENSAIO DE REATIVIDADE

Este ensaio seguiu conforme a ASTM C-1239, onde moldou-se cilindros em concreto, e foram curados por 30 dias em solução de NaOH a 80°C. Foram moldados dois corpos de prova para cada combinação e foram feitas leituras diárias através de extensômetro e a média dos resultados foi plotada em gráficos.

**TABELA 27- Resultado do ensaio de reatividade Fumo de Sílica (0%); a/c = 0,35**

idade	amostra 1	% exp.	amostra 2	% exp.	média	Desvio Padrão
2	2.282	0.000	0.000	0.000	0.000	0.46
3	2.282	0.000	0.000	0.000	0.000	0.46
4	2.282	0.000	2.933	0.000	0.000	0.46
7	2.286	0.003	2.947	0.011	0.007	0.47
9	2.300	0.015	2.950	0.014	0.014	0.46
11	2.302	0.016	2.954	0.017	0.016	0.46
14	2.322	0.032	2.963	0.024	0.028	0.45
16	2.337	0.044	2.974	0.033	0.039	0.45
18	2.356	0.060	2.980	0.038	0.049	0.44
21	2.389	0.086	3.007	0.059	0.073	0.44
23	2.409	0.102	3.020	0.070	0.086	0.43
25	2.427	0.117	3.029	0.077	0.097	0.43
27	2.443	0.130	3.052	0.095	0.113	0.43
29	2.468	0.150	3.066	0.106	0.128	0.42
32	2.475	0.156	3.068	0.108	0.132	0.42
35	2.520	0.192	3.089	0.125	0.158	0.40

**TABELA 28- Resultado do ensaio de reatividade Fumo de Sílica (15%); a/c = 0,35**

idade	amostra 1	amostra 2	média	% exp.	Desvio Padrão
2	3.147	3.574	3.361	0.000	0.30
3	3.139	3.580	3.360	-0.001	0.31
4	3.140	3.582	3.361	0.000	0.31
7	3.149	3.589	3.369	0.006	0.31
9	3.159	3.596	3.378	0.013	0.31
11	3.151	3.596	3.374	0.010	0.31
14	3.162	3.602	3.382	0.017	0.31
18	3.152	3.598	3.375	0.011	0.32
21	3.175	3.606	3.391	0.023	0.30
23	3.175	3.606	3.391	0.023	0.30
25	3.165	3.603	3.384	0.018	0.31
27	3.165	3.600	3.383	0.017	0.31
29	3.162	3.600	3.381	0.016	0.31
32	3.168	3.601	3.385	0.019	0.31
35	3.169	3.612	3.391	0.023	0.31
37	3.168	3.609	3.389	0.022	0.31

**TABELA 29- Resultado do ensaio de reatividade Fumo de Sílica (30%); a/c = 0,35**

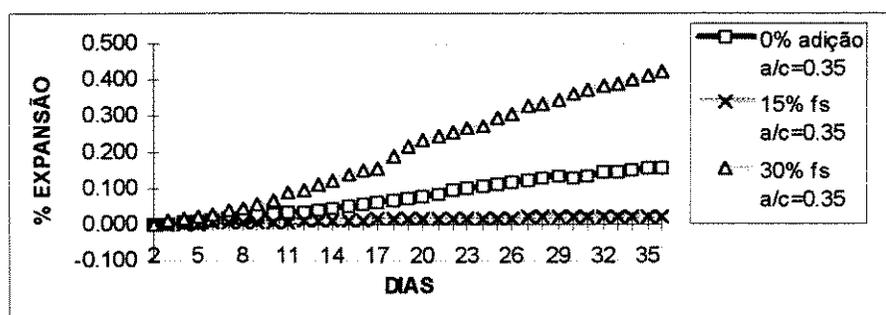
idade	amostra 1	amostra 2	média	% exp.	Desvio Padrão
2	1.400	1.990	1.695	0.000	0.42
3	1.422	2.000	1.711	0.013	0.41
6	1.448	2.017	1.733	0.030	0.40
8	1.467	2.035	1.751	0.045	0.40
10	1.490	2.064	1.777	0.066	0.41
13	1.549	2.116	1.833	0.111	0.40
15	1.585	2.146	1.866	0.138	0.40
17	1.608	2.174	1.891	0.158	0.40
19	1.690	2.236	1.963	0.216	0.39
21	1.725	2.276	2.001	0.246	0.39
24	1.758	2.315	2.037	0.275	0.39
27	1.825	2.372	2.099	0.325	0.39
29	1.853	2.397	2.125	0.347	0.38
31	1.880	2.432	2.156	0.372	0.39
34	1.916	2.460	2.188	0.398	0.38
36	1.945	2.495	2.220	0.423	0.39

**TABELA 30- Resultado do ensaio de reatividade Cinza Volante (0%); a/c = 0,35**

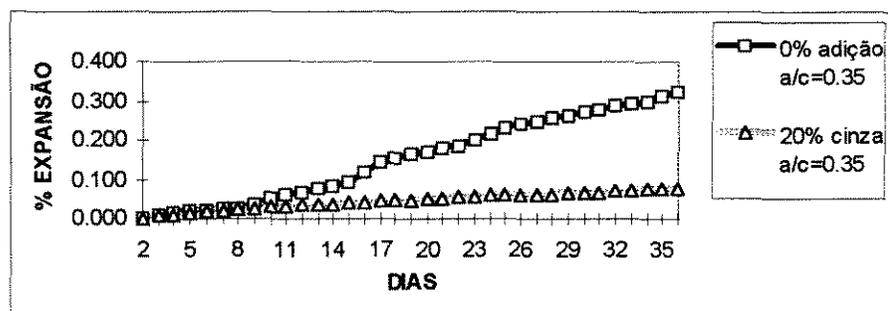
idade	amostra 1	% exp.	amostra 2	% exp.	média	Desvio Padrão
2	5.792	0.000	0.055	0.000	0.000	0.52
3	5.817	0.019	0.072	0.014	0.017	0.53
6	5.823	0.024	0.081	0.021	0.023	0.52
8	5.813	0.016	0.098	0.035	0.026	0.51
11	5.871	0.061	0.132	0.063	0.062	0.52
13	5.888	0.074	0.146	0.075	0.075	0.52
15	5.912	0.093	0.165	0.090	0.092	0.53
17	5.981	0.147	0.225	0.139	0.143	0.53
19	6.007	0.167	0.252	0.161	0.164	0.53
22	6.033	0.187	0.280	0.184	0.186	0.53
25	6.092	0.233	0.337	0.231	0.232	0.53
27	6.108	0.245	0.355	0.246	0.245	0.53
29	6.132	0.264	0.373	0.261	0.262	0.54
32	6.163	0.288	0.408	0.289	0.288	0.53
34	6.182	0.302	0.416	0.296	0.299	0.54
36	6.199	0.316	0.456	0.329	0.322	0.53

**TABELA 31 - Resultado do ensaio de reatividade Cinza Volante (20%); a/c = 0,35**

idade	amostra 1	% exp.	amostra 2	% exp.	média	Desvio Padrão
2	0.661	0.000	0.871	0.000	0.000	0.47
3	0.685	0.020	0.891	0.016	0.018	0.47
6	0.682	0.017	0.889	0.015	0.016	0.47
8	0.693	0.026	0.893	0.018	0.022	0.47
11	0.705	0.036	0.915	0.035	0.036	0.47
13	0.704	0.035	0.911	0.032	0.034	0.47
15	0.700	0.032	0.921	0.040	0.036	0.47
17	0.709	0.039	0.936	0.052	0.046	0.47
19	0.706	0.037	0.933	0.050	0.043	0.47
22	0.709	0.039	0.934	0.051	0.045	0.47
25	0.725	0.052	0.960	0.072	0.062	0.48
27	0.722	0.050	0.961	0.073	0.061	0.48
29	0.725	0.052	0.965	0.076	0.064	0.48
31	0.728	0.054	0.971	0.081	0.068	0.48
33	0.733	0.059	0.980	0.088	0.073	0.48
35	0.737	0.062	0.982	0.090	0.076	0.48

**Gráfico 6.1 - Reatividade em concreto; Fumo de Sílica; a/c = 0,35**

Através dos resultados do gráfico 6.1, observa-se que o concreto comportou de maneira diferente que a argamassa, pois no ensaio de argamassa a maior expansão se deu para 0%, a expansão intermediária 15% e a menor expansão 30%. No concreto observamos que a expansão de 30% foi maior que a expansão de 0%. Neste caso, 30% de fumo de sílica, representa que já chegamos na “proporção péssima”.

**Gráfico 6.2 - Reatividade em concreto; Cinza Volante; a/c = 0,35**

**Obs.:** Os corpos de prova com 40% de Cinza Volante não adquiriram consistência suficiente para serem moldados.

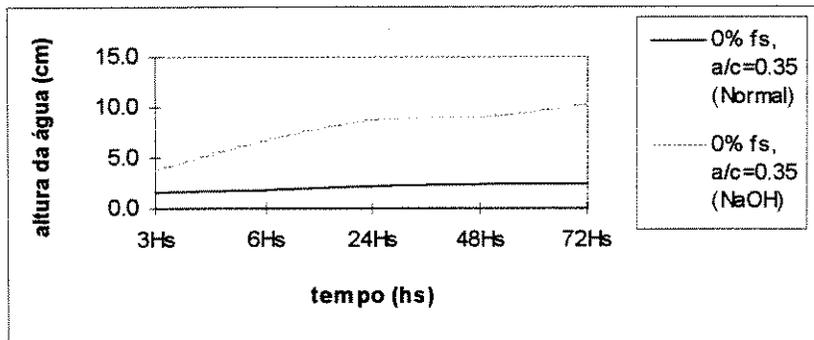
### 6.2.3- ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O procedimento deste ensaio seguiu conforme a NBR 9779/87, onde foram moldados corpos de prova que foram curados em solução de NaOH e água por 30 dias. Após a cura foram levados para a estufa por mais 18 dias quando foram colocados em um recipiente com 1,5 cm de água e foram feitas leituras diárias de quanto a água penetrava nos corpos de prova.

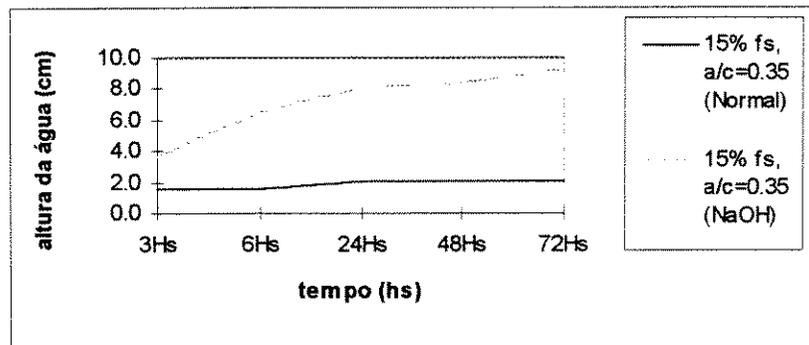
**TABELA 32- Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade**

DOSAGEM	3Hs	6Hs	24Hs	48Hs
0% fs, a/c=0.35 (Normal)	1.7	1.8	2.3	2.5
0% fs, a/c=0.35 (NaOH)	3.9	6.8	8.9	9.1
15% fs, a/c=0.35 (Normal)	1.5	1.6	2.1	2.1
15% fs, a/c=0.35 (NaOH)	3.7	6.5	8.1	8.5
30% fs, a/c=0.35 (Normal)	1.0	1.5	1.8	2.1
30% fs, a/c=0.35 (NaOH)	3.1	6.0	7.8	8.2
0% cv, a/c=0.35 (Normal)	0.8	1.2	1.5	1.8
0% cv, a/c=0.35 (NaOH)	3.2	4.8	6.2	7.4
20% cv, a/c=0.35 (Normal)	0.6	1.1	1.3	1.5
20% cv, a/c=0.35 (NaOH)	2.8	4.2	5.7	6.9
40% cv, a/c=0.35 (Normal)	0.5	0.9	1.1	1.3
40% cv, a/c=0.35 (NaOH)	2.5	3.8	5.1	6.0

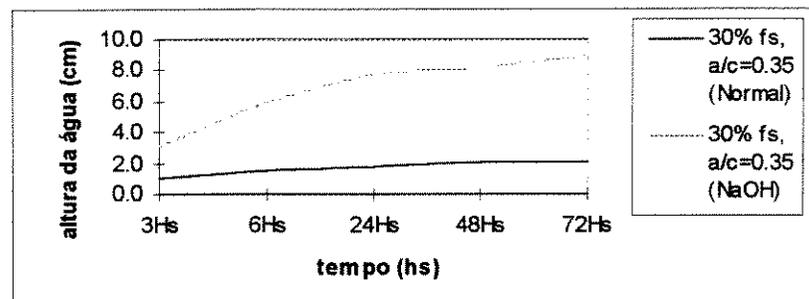
**GRÁFICO 7.1-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



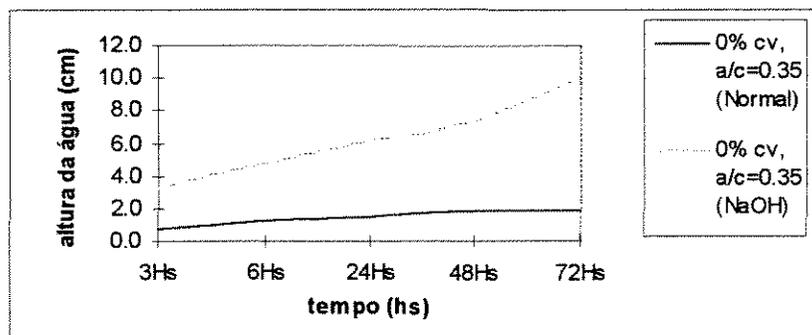
**GRÁFICO 7.2-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



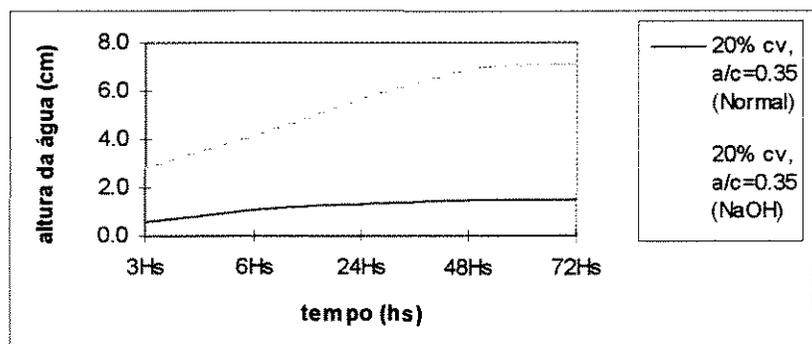
**GRÁFICO 7.3-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



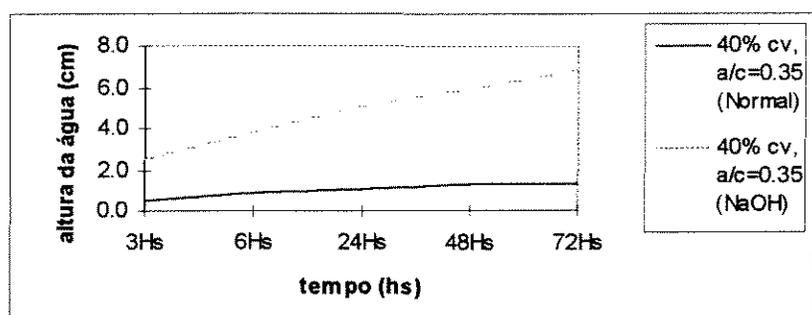
**GRÁFICO 7.4-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



**GRÁFICO 7.5-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



**GRÁFICO 7.6-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



Através dos resultados mostrados na tabela e nos gráficos, observa-se que também no concreto todos os corpos de prova que foram curados em solução de NaOH, isto é, sofreram a aceleração da reação, mostraram-se muito mais permeáveis que os que foram curados em água. O que confirma a microfissuração devido a reação álcali-agregado.

## 6.2.4- ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

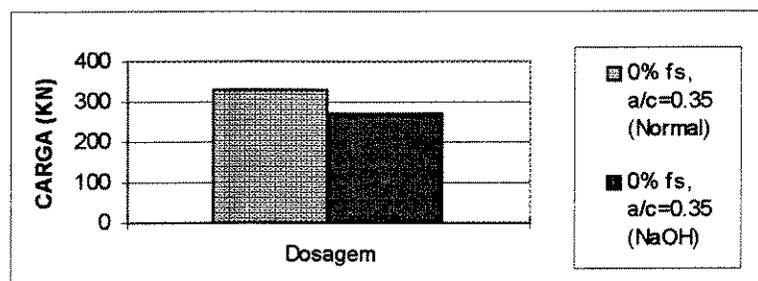
Este ensaio visa estabelecer o quanto a reação álcali-agregado interfere na Resistência a compressão simples. Para tal, o ensaio seguiu conforme NBR 5739/80. Foram moldados 6 corpos de prova para cada combinação, três foram curados em água a temperatura ambiente e três em solução de NaOH a 80°C. A média das cargas de ruptura foi analisada através de gráficos.

Do gráfico 8.1 a 8.6, compara-se a carga de ruptura entre os corpos de prova com mesma porcentagem de adição e diferente relação a/c. O gráfico 8.7 e 8.8, compara corpos de prova com mesma relação a/c e diferentes proporções de pozolana.

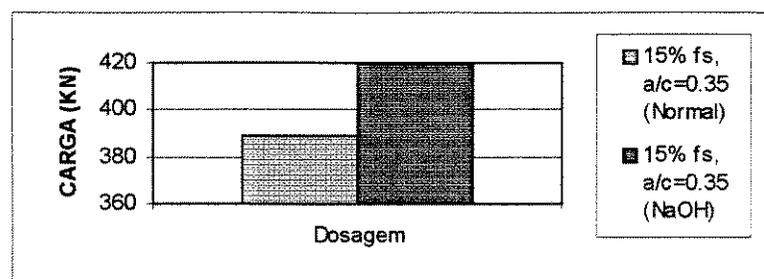
**TABELA 33- Resultado do ensaio de compressão simples**

DOSAGEM	CARGA (KN)
0% fs, a/c=0.35 (Normal)	332
0% fs, a/c=0.35 (NaOH)	270
15% fs, a/c=0.35 (Normal)	389
15% fs, a/c=0.35 (NaOH)	420
30% fs, a/c=0.35 (Normal)	346
30%fs, a/c=0.35 (NaOH)	406
0% cv, a/c=0.35 (Normal)	233
0% cv, a/c=0.35 (NaOH)	280
20% cv, a/c=0.35 (Normal)	225
20% cv, a/c=0.35 (NaOH)	310
40% cv, a/c=0.35 (Normal)	183
40% cv, a/c=0.35 (NaOH)	266

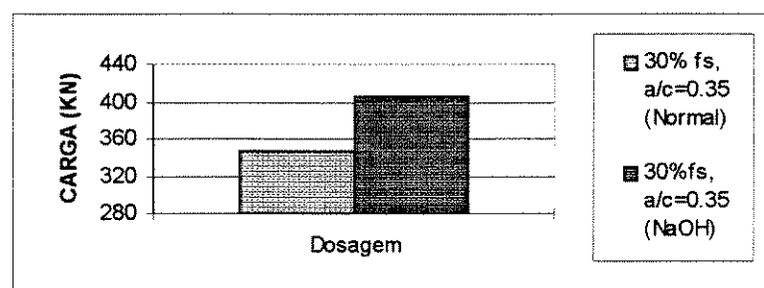
**GRÁFICO 8.1- Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



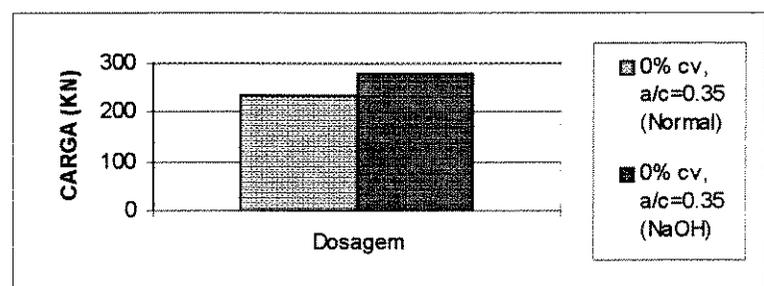
**GRÁFICO 8.2 - Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



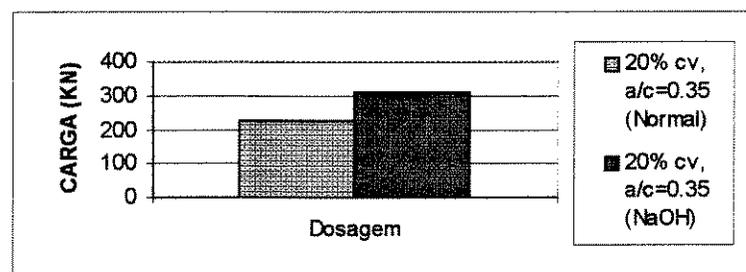
**GRÁFICO 8.3 - Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



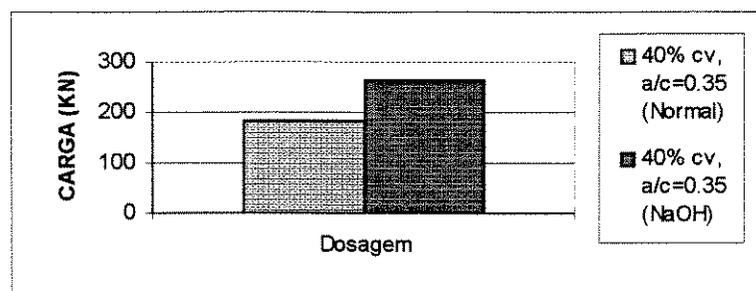
**GRÁFICO 8.4 - Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



**GRÁFICO 8.5 - Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



**GRÁFICO 8.6 - Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



A exceção do gráfico 8.1, pode-se observar que a carga de ruptura foi maior para os corpos de prova que sofreram a aceleração da reação (cura em solução de NaOH). Novamente a incoerência de um corpo de prova microfissurado apresentar-se com resistência maior que um corpo de prova não fissurado é explicada pelo tempo de cura (30 dias) onde acredita-se que os corpos de prova atingem 90% de sua resistência. Como os corpos de prova que foram curados em solução de NaOH ficaram em uma temperatura muito elevada (80°C), acredita-se que atingiram 100% de sua resistência enquanto que aqueles que foram curados em água não.

### 6.2.5- ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

Este ensaio visa estabelecer o quanto a reação álcali-agregado interfere na Resistência a compressão diametral. Para tal, o ensaio seguiu conforme NBR 7222/83. Foram moldados 6 corpos de prova para cada combinação, três foram curados em água a temperatura ambiente e três em solução de NaOH a 80°C. A média das cargas de ruptura foi analisada através de gráficos.

Do gráfico 9.1 a 9.6, compara-se a carga de ruptura entre os corpos de prova com mesma porcentagem de adição e diferente relação a/c. O gráfico 9.7 e 9.8, compara corpos de prova com mesma relação a/c e diferentes proporções de pozolana.

TABELA 34- Resultado do ensaio de compressão diametral

DOSAGEM	CARGA (KN)
0% fs, a/c=0.35 (Normal)	5.4
0% fs, a/c=0.35 (NaOH)	7.1
15% fs, a/c=0.35 (Normal)	6.9
15% fs, a/c=0.35 (NaOH)	8.1
30% fs, a/c=0.35 (Normal)	6.9
30%fs, a/c=0.35 (NaOH)	6.3
0% cv, a/c=0.35 (Normal)	5.2
0% cv, a/c=0.35 (NaOH)	5.8
20% cv, a/c=0.35 (Normal)	5.9
20% cv, a/c=0.35 (NaOH)	7.1
40% cv, a/c=0.35 (Normal)	6.6
40% cv, a/c=0.35 (NaOH)	6.1

GRÁFICO 9.1- Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura

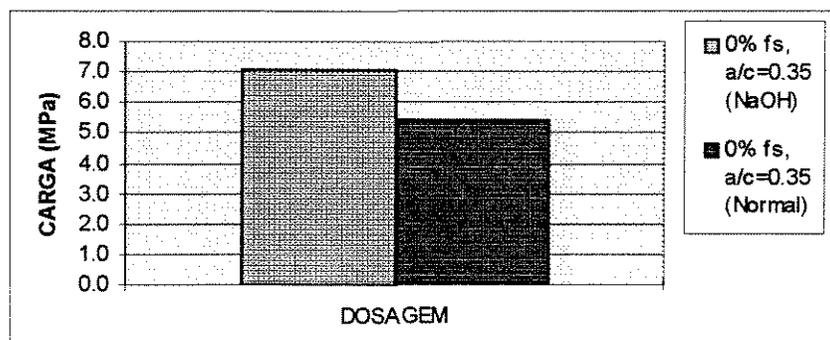
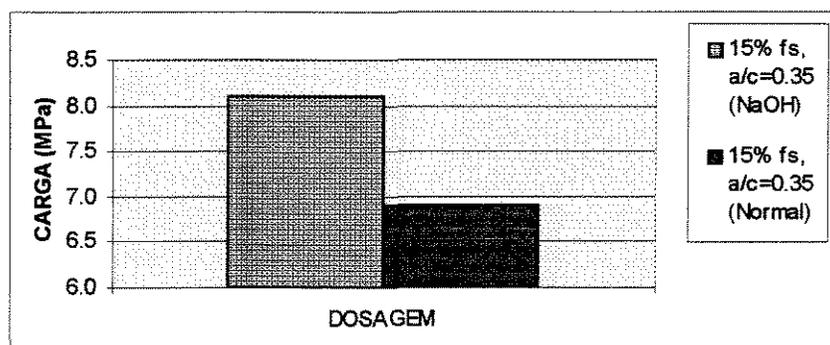
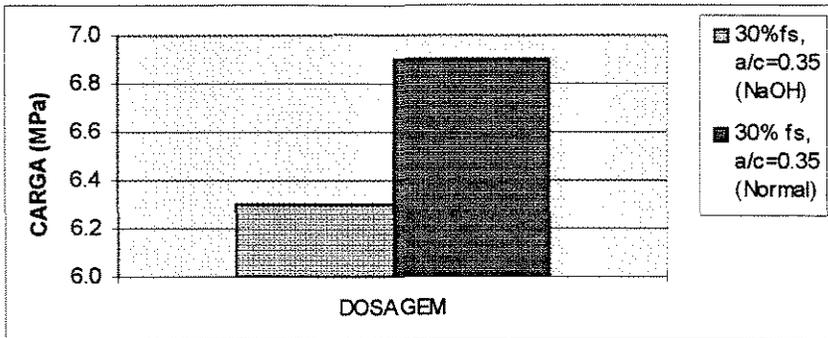


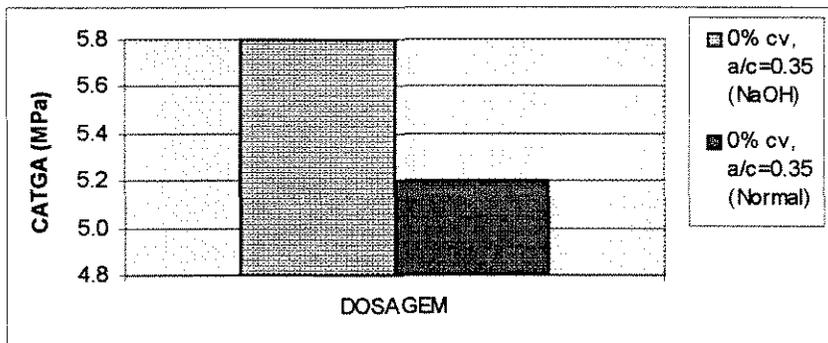
GRÁFICO 9.2- Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



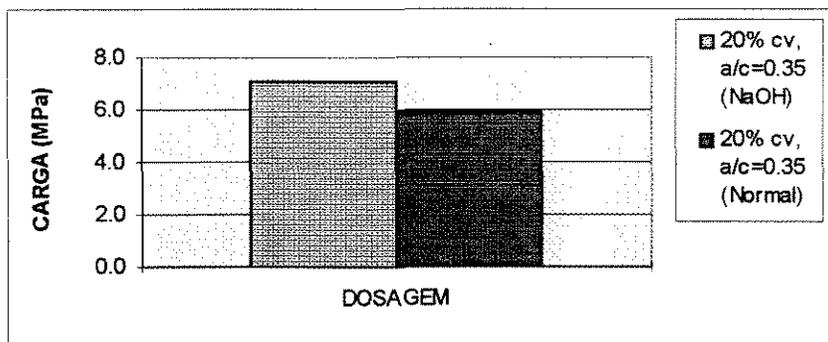
**GRÁFICO 9.3-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



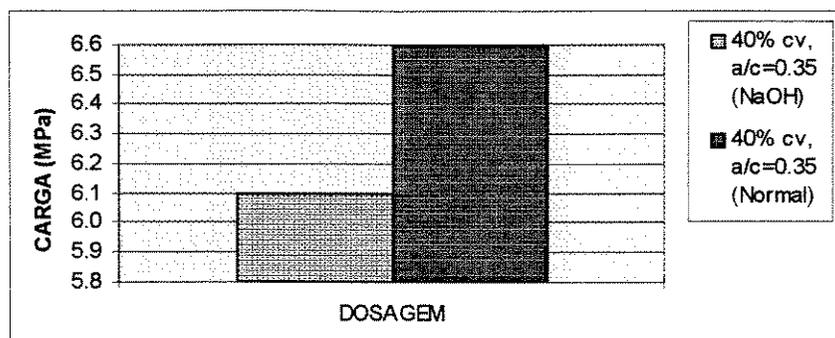
**GRÁFICO 9.4-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



**GRÁFICO 9.5-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



**GRÁFICO 9.6- Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



A exceção do gráfico 9.3 e 9.6 que são os corpos de prova que apresentam maior porcentagem de adição, pode-se observar que a carga de ruptura foi maior para os corpos de prova que sofreram a aceleração da reação (cura em solução de NaOH). Novamente a incoerência de um corpo de prova microfissurado apresentar-se com resistência maior que um corpo de prova não fissurado é explicada pelo tempo de cura (30 dias) onde acredita-se que os corpos de prova atingem 90% de sua resistência. Como os corpos de prova que foram curados em solução de NaOH ficaram em uma temperatura muito elevada (80°C), acredita-se que atingiram 100% de sua resistência enquanto que aqueles que foram curados em água não.

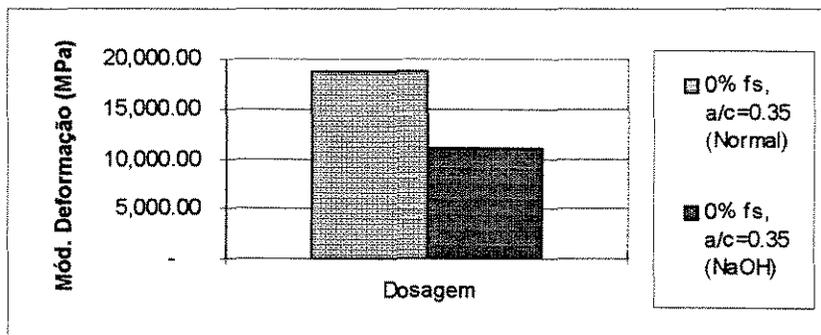
### 6.2.6- ENSAIO DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Este ensaio seguiu conforme a NBR 8522/84. Foram moldados 6 corpos de prova para cada combinação, três foram curados em água a temperatura ambiente e três em solução de NaOH a 80°C. A média das cargas de ruptura foi analisada através de gráficos.

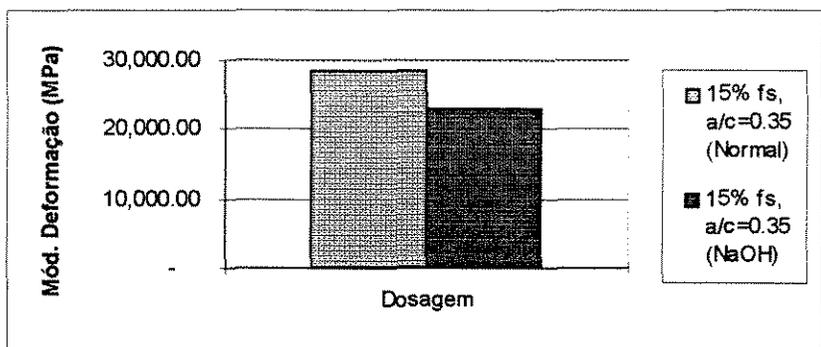
**TABELA 35- Resultado do ensaio de módulo de deformação**

DOSAGEM	MÓD. DE ELAST. (MPa)
0% fs, a/c=0.35 (Normal)	18,855.10
0% fs, a/c=0.35 (NaOH)	11,111.11
15% fs, a/c=0.35 (Normal)	28,552.46
15% fs, a/c=0.35 (NaOH)	23,085.59
30% fs, a/c=0.35 (Normal)	27,594.94
30%fs, a/c=0.35 (NaOH)	26,946.85
0% cv, a/c=0.35 (Normal)	14,663.14
0% cv, a/c=0.35 (NaOH)	8,650.52
20% cv, a/c=0.35 (Normal)	21,875.00
20% cv, a/c=0.35 (NaOH)	24,342.11
40% cv, a/c=0.35 (Normal)	17,295.60
40% cv, a/c=0.35 (NaOH)	18,220.95

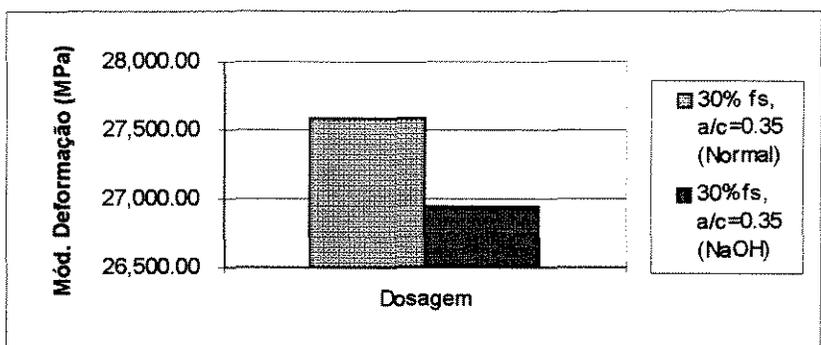
**GRÁFICO 10.1-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



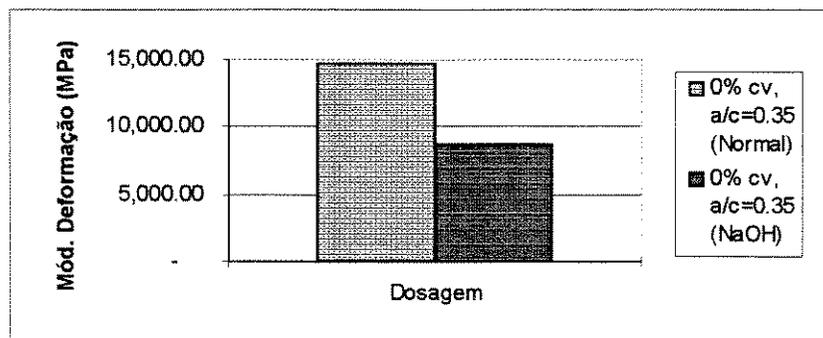
**GRÁFICO 10.2-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



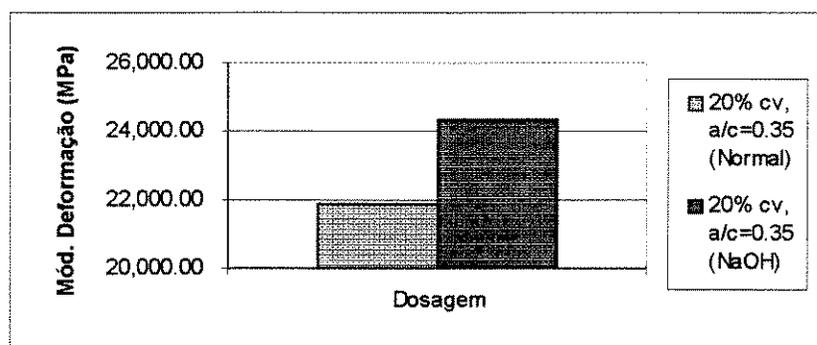
**GRÁFICO 10.3-** Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura



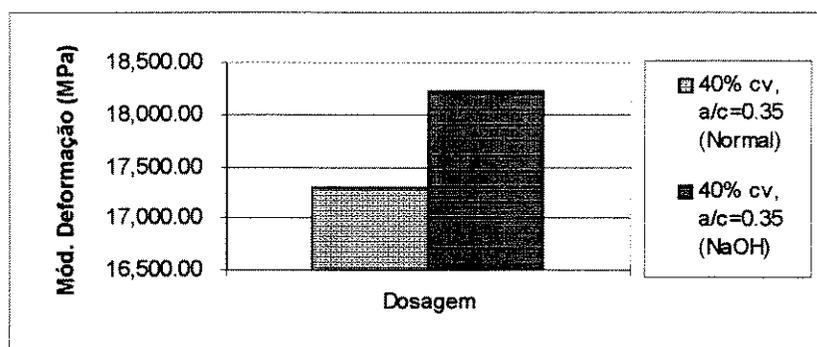
**GRÁFICO 10.4 - Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



**GRÁFICO 10.5- Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



**GRÁFICO 10.6- Relação entre corpos de prova com mesma dosagem e diferente condição de cura**



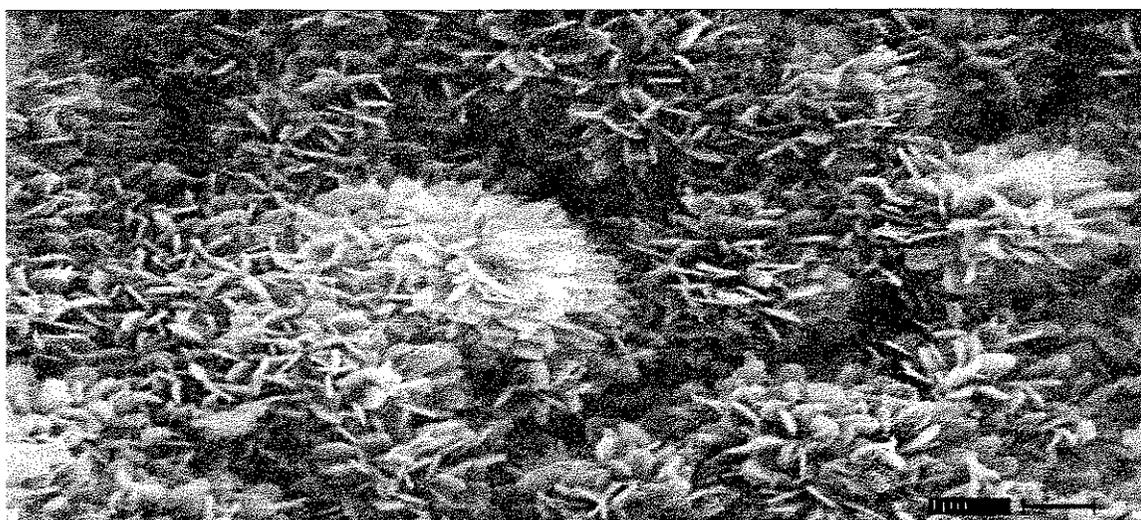
A exceção dos gráficos 10.5 e 10.6, que contém cinza volante, em todas as outras combinações o módulo de deformação foi menor para os corpos de prova que foram curados em NaOH, esse fato mais uma vez comprova a microfissuração causada pela reação. No caso dos corpos de prova que contém cinza volante, acredita-se que esta interfere no módulo de deformação de alguma forma não estudada nesta pesquisa.

## 6.2.7- ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA

Para este ensaio, utilizou-se os fragmentos provenientes dos ensaios de compressão simples e diametral. Através de análise visual, escolheu-se os fragmentos de concreto a serem observados. Para análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV), os fragmentos necessitam se metalizados, após a metalização, são colocados dentro do microscópio a análise começa a ser feita. Ao se observar estruturas com aparência de produto de reação álcali-agregado, escolhe-se vários pontos, dentro dessa estrutura e por difração de Raio X, pode-se conhecer quais elementos compõe essa estrutura e decidir se trata de um produto de reação ou não.

Pode-se encontrar produtos de reação álcali-agregado de diversas formas, portanto faz-se necessário uma análise minuciosa da amostra em observação. As **figuras 8 a 13**, mostram produtos de reação álcali-agregado e algumas das várias formas que podem ser observados.

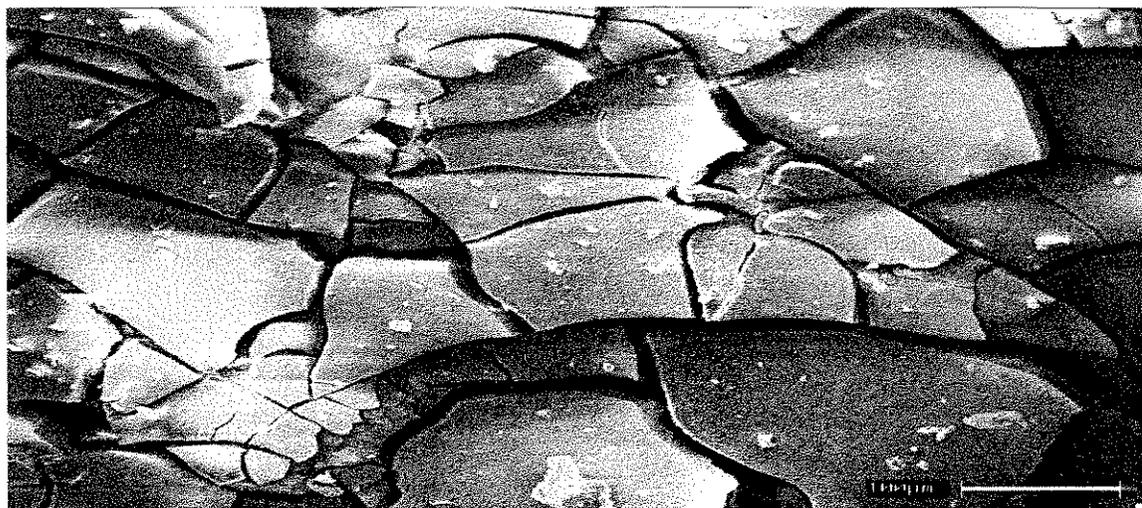
**Figura 8 - Produto cristalizado de reação álcali-agregado**



Amostra contendo cimento tipo C-II e 0% de adição

Composição química - % dos elementos prováveis							
Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
0.5	-	0.1	<b>48.3</b>	<b>5.8</b>	<b>45.1</b>	-	0.3

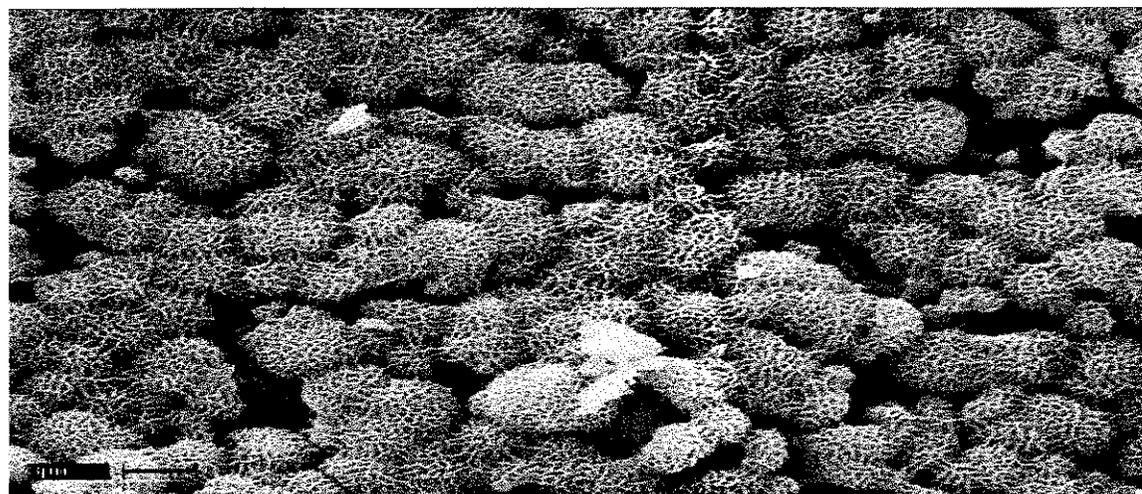
**Figura 9 - Produto de reação álcali-agregado**



Amostra contendo cimento tipo C-II e 0% de adição

Composição química - % dos elementos prováveis							
Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
2	-	-	<b>56.1</b>	<b>6.9</b>	<b>35</b>	-	-

**Figura 10 - Produto cristalizado de reação álcali-agregado**



Amostra contendo cimento tipo C-II e 20% de adição de cinza volante

Composição química - % dos elementos prováveis							
Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
1.9	-	2.5	<b>64.3</b>	<b>10.2</b>	<b>20.8</b>	-	0.2

**Figura 11 - Produto de reação álcali-agregado**



Amostra contendo cimento tipo C-II e 40% de adição de cinza volante

Composição química - % dos elementos prováveis							
Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
2.8	-	0.8	47.1	2.5	46.6	-	0.2

**Figura 12 - Produto de reação álcali-agregado**



Amostra contendo cimento tipo C-II e 40% de adição de cinza volante

Composição química - % dos elementos prováveis							
Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
3.2	0.1	-	80.3	5.5	10.6	-	0.3

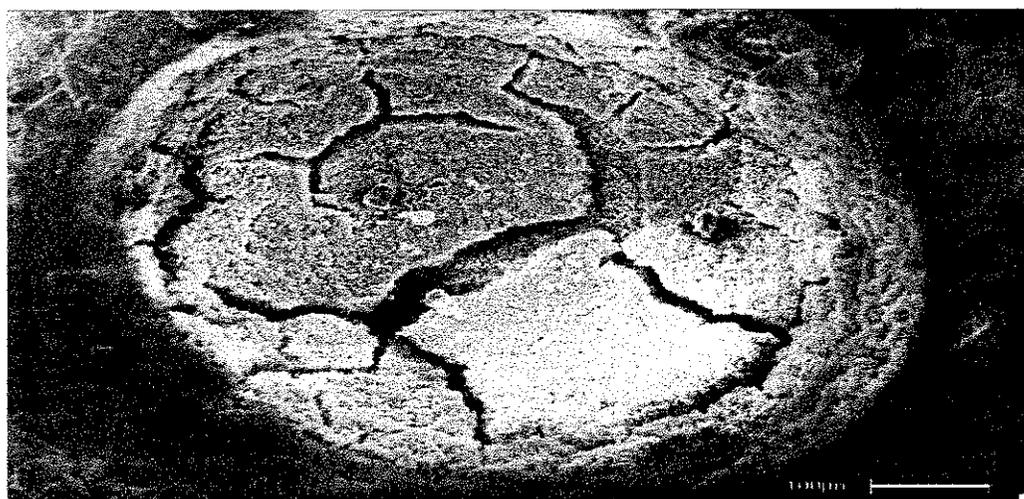
**Figura 13 - Produto de reação álcali-agregado - gel maciço gretado**



Amostra contendo cimento tipo C-II e 40% de adição de cinza volante

Composição química - % dos elementos prováveis							
Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
2.7	-	-	48.8	15.3	33.2	-	-

**Figura 14 - Produto de reação álcali-agregado**



Amostra contendo cimento tipo C-II e 40% de adição de cinza volante

Composição química - % dos elementos prováveis							
Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
4.1	-	-	44.9	5.3	45.6	-	-

As microanálises foram feitas através da técnica de espectrometria por energia dispersiva, onde através de um espectro, é possível analisar semi-quantitativamente os elementos químicos presentes, sabendo-se que os produtos de reação álcali-agregado apresentam uma grande porcentagem de silício (Si), cálcio (Ca) e potássio (K). Através desse dados foi possível saber se os pontos analisados tratavam de produto de reação ou não.

## **7- CONCLUSÕES**

### **7.1- Ensaio de porosidade**

Este ensaio foi executado para verificar o quanto a reação influencia a expansão de acordo com a porosidade dos corpos de prova. Esperava que nos corpos de prova mais porosos a expansão fosse menor, pois os espaços vazios poderiam absorver o gel expansivo. De fato isso ocorreu para os corpos de prova com maior porosidade (0% de adição, 20% de cinza volante).

### **7.2- Ensaio de permeabilidade**

Neste ensaio observou-se que todas as amostras que ficaram em cura de NaOH, tiveram uma permeabilidade bem maior que as que ficaram na água, isso porque a reação deixa o concreto muito microfissurado e, mais uma vez pôde-se verificar que os corpos de prova com porosidade elevada não apresentaram um aumento de permeabilidade tão significativo quanto os de pequena porosidade, isto é, embora fossem mais permeáveis a diferença entre as curvas de cura em água e cura em NaOH foi menor .

### **7.3- Ensaio de reatividade**

Através de análises gráficas, ficou comprovado que a porosidade elevada pode diminuir os níveis de expansão em certos casos, isso é, só conseguimos comprovar a diminuição da expansão nos corpos de prova que não continham pozolana e naqueles que continham 20% de cinza volante. Nos outros corpos de prova a expansão foi maior naqueles com relação a/c =0,60. Fazendo uma análise entre as adições, observou-se que no caso do fumo de sílica, a combinação de 30% foi a que apresentou níveis de expansão menores, tanto para uma relação a/c=0.35, como

para  $a/c=0.60$ . Já no caso do cinza volante para uma relação  $a/c=0.35$ , a expansão foi diminuindo a medida que o conteúdo de adição foi aumentando, mas para uma relação  $a/c=0.60$ , o nível de expansão manteve-se baixo para 20% enquanto que para 40% observamos os mesmos níveis que para 0%, pode-se concluir que a porcentagem péssima foi atingida.

Este ensaio visou analisar quais as condições que regem a expansão, para tal, utilizou-se de diferentes porcentagens de adição e relação água cimento. Comprovou-se que a utilização indiscriminada de pozolana, pode levar à uma expansão ainda maior que sem a utilização da mesma e, que a porosidade excessiva é capaz de absorver a expansão em certos casos.

#### **7.4- Ensaio de compressão simples e diametral**

Neste ensaio observou-se que a reação álcali-agregado não afetou muito as propriedades mecânicas. No ensaio de compressão simples, observou-se que as amostras apresentaram comportamento diferente quanto à porosidade. Somente os corpos de prova com relação água/cimento elevada, apresentaram uma resistência à compressão menor para os corpos de prova que foram curados em NaOH.

No ensaio de compressão diametral, os corpos de prova apresentaram um resultado muito parecido, com uma tendência a apresentar valores um pouco mais baixo para os que ficaram em NaOH.

Em muitos casos os corpos de prova que foram curados em solução de NaOH apresentaram cargas de ruptura maiores que aqueles que foram curados em água. Acredita-se que a temperatura elevada da cura em solução de NaOH possa ter influenciado os resultados em alguns aspectos, pois os corpos ficaram em cura por 30 dias onde acredita-se que mesmo os corpos de prova que ficaram em água teriam atingido cerca de 90% de sua resistência à compressão, aliviando assim os efeitos da temperatura em grande parte.

Esses ensaios foram desenvolvidos para comprovar se a reação álcali-agregado influencia nas propriedades elásticas ou mecânicas do concreto e, através desses resultados observa-se que a reação não chega a comprometer tais propriedades.

### **7.5- Ensaio de Módulo de Deformação**

Devido a microfissuração do concreto, os corpos de prova que continham fumo de sílica como adição apresentaram um módulo de deformação menor, quando imersos em solução de NaOH. Mesmo com microfissuração os corpos de prova que continham cinza volante, apresentaram um módulo de deformação maior quando imersos em solução de NaOH, devido a algum outro fator não observado neste estudo.

### **7.6- Ensaio de Microscopia Eletrônica**

Neste ensaio pode se constatar a presença do gel expansivo, mesmo as amostras não chegando aos índices de expansão crítica.

Através de todos esses dados, comprovou-se que a reação álcali-agregado tem seu maior efeito no que diz respeito à expansão, pois através dos ensaios mecânicos ficou comprovado que a reação não compromete o concreto, como era de se esperar.

## 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR-8522**: concreto - determinação do módulo de deformação estática e diagrama - tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1984. 9 p.

2-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR-9779**: argamassa e concreto endurecido - determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1987. 4 p.

3-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR-5739**: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1980. 3 p.

4-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR-7222**: argamassas e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1983. 3 p.

5-ALVES, E.F.R. et al. Eficiência do uso de microssilica na redução da expansão álcali-agregado. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). **37ª Reunião do Ibracon**, Goiânia, 1995, p. 617-629.

6-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **ASTM C - 277 - 71 ( Reapproved 1976 )**: “potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar bar method)”, Annual Book of ASTM Standards, 1979. 4 p.

7-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **ASTM C - 289 - 71 ( Reapproved 1976 )**: “Standard test method for potential reactivity of aggregates ( chemical method )”, Annual Book of ASTM Standards, 1979. 8 p.

8-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **ASTM C - 295 - 65 ( Reapproved 1973 )**: “Standard recommended practice for petrographic examination of aggregates for concrete”, Annual Book of ASTM Standards, 1979. 8 p.

9-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **ASTM C - 618 - 78**: “Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete”, Annual Book of ASTM Standards, 1979. 4 p.

10-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **ASTM C - 1260 - 94**: “standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar bar method)”, Annual Book of ASTM Standards, 1994. 4 p.

11-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **ASTM C - 1293 - 95**: “standard test method for concrete aggregates by determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction”, Annual Book of ASTM Standards, 1995. 6 p.

12-ANDRADE, W. P., et al. Estudo de inibidores da reação álcali-agregado através de ensaios acelerados. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). **32ª Reunião do Ibracon**, Fortaleza, 1989, p. 413-424.

13-BÉRUBÉ, M. A., FOURNIER, B. Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, n. 1/2, p. 27-47, 1993.

14-BÉRUBÉ, M. A., FRENETTE, J. Testing concrete for alkali-aggregate reaction in NaOH and NaCl solutions at 38°C and 80°C.

15-CRIAUD, A., DEFOSSÉ, C. Evaluating the reaction of actual composition of concrete with respect to alkali-aggregate reaction preliminary testing at 110°C and 150°C. **Material and Structures**, v. 28, n. 175, p. 32-42, Jan/Feb 1995.

16-DA SILVA FILHO, A. F. et al. Emprego de microssilica em obras de reabilitação de estruturas de concreto armado. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). **38ª Reunião do Ibracon**, Ribeirão Preto, 1996, p. 297-301.

17-FABIARZ, J. et al. "Alkali-aggregate reaction in fly ash concrete". In: 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 1989, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: K. Okada, S. Nishibayashi and M. Kawamura, 1989. p. 241-246.

18-FABIARZ, J., CARRASQUILLO, R. "Alkali-aggregate reaction in concrete containing fly ash". In: KATHARINE & BRYANT MATHER **Concrete Durability International Conference**, Detroit: John M. Scanlon, 1987, v. 2, p.1787-1808.

19-FACTOR, D. F. "Inhibition of alkali-silica reaction by nonpozzolanic mechanisms". In: 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 1986, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: Patrick E. Grattan-Bellew, 1986. p. 105-109.

20-GRATTAN-BELLEW, P., GILLOTT, J. "Three decades of studying the alkali reactivity of Canadian aggregates". In: KATHARINE & BRYANT MATHER **Concrete Durability International Conference**, Detroit: John M. Scanlon, 1987, v.2, p.1365-1384.

21-HOBBS, D.W. **Alkali-silica reaction in concrete**. Trowbridge: Redwood Burn Ltd., 1988. Cap. 1: History, the reaction, cracking and pessimum behaviour. p. 1-32.

22-HOBBS, D.W. **Alkali-silica reaction in concrete**. Trowbridge: Redwood Burn Ltd., 1988. Cap. 2: Effect of mix proportions constituents on expansion. p. 33-55.

23-HUDEEC, P. P. & LARBI, J. A. "Chemical treatments and additives to minimize alkali reactivity". In: 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 1989, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: K. Okada, S. Nishibayashi and M. Kawamura, 1989. p. 193-198.

24-IDORN, G.M. Alkali-silica reactions in retrospect and prospect. In: 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 1989, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto: K. Okada, S. Nishibayashi and M. Kawamura, 1989. p. 1-8.

25-KIHARA, Y., SCANDIUZZI, L. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: 3<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, São Paulo, 1993, v. 1, p. 319-338.

26-MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedade e materiais**. São Paulo: Ed. Pini, 1a. Edição, 1994. p. 251.

27-NIXON, P., PAGE, C. "Pore solution chemistry and alkali aggregate reaction". In: KATHARINE & BRYANT MATHER **Concrete Durability International Conference**, Detroit: John M. Scanlon, 1987, v.2, p.1833-1862.

28-OBERHOLSTER, R.E., VAN AARDT, J.M.P., Durability of cementitious systems. In: BARNES, P. **Structures and performance of cements**. London: Applied Science, 1983, p. 380-397.

29-PAULON, V.A. "Reações álcali-agregado em concreto". Dissertação de mestrado, São Paulo, 1981.

30-PICCOLI, G. M. , Considerações sobre a adição de cinzas volantes no concreto. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). **37ª Reunião do Ibracon**, Goiânia, 1995, p. 539-555.

31-PREZZI, M. Mechanism of alkali-aggregate reaction. Berkeley: University of California. Tese (doutorado), 1995. 117p.

32-PRISZKULNIK, S. , Pozolanas para aglomerantes de construção civil. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND ( ABCP). **Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos**, 1981.

33-READ, P.H., THOMAS, M. The rehabilitation of 50-year-old concrete dam affected by alkali aggregate reaction. In: **Alkali-aggregate reactions in hydroelectric plants and dams**. 1995. p. 193-207.

34-RODRIGUES, H.P. Parâmetros texturais de deformação em "granitoides" e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da barragem Pedro Beicht, SP. São Paulo: Universidade Estadual de São Paulo-USP. Tese (doutorado), 270 p, 1994.

35-SILVEIRA, J.F.A. Reatividade expansiva; a deterioração de barragens e usinas hidroelétricas provocadas pela reatividade álcali-agregado. **Revista IBRACON**, ano IV, n. 11, p. 33-42, Dec 1994.

36-STARK, D. Alkali-silica reaction and its effects on concrete. In: **Alkali-aggregate reactions in hydroelectric plants and dams**. 1995. p. 9-17.

37-SWAMY, R.N. Alkali-aggregate reaction in concret: material and structural implications. In: **ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY**, 1992, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: V.M. Malhotra, 1992. p. 533-556.

38-SWAMY, R. N. "Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to alkali silica reaction". In: **DURABILITY OF CONCRETE**, Detroit: Jens Holm & Mete Geiker, 1992, SP 131-12, ACI, p. 219-254.

39-TENOUTASSE, N. , MARION, A. M. , Influence of fly ash in alkali-aggregate reaction. In: **7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE**, 1986, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: Patrick E. Grattan-Bellew, 1986. p. 44-48.