

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM  
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO COM  
DIFERENTES ADIÇÕES**

**Ludmila Rodrigues Costa Tavares**

**Belo Horizonte**

**2008**

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM  
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO COM  
DIFERENTES ADIÇÕES**

**Ludmila Rodrigues Costa Tavares**

**Ludmila Rodrigues Costa Tavares**

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM  
CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO COM  
DIFERENTES ADIÇÕES**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da  
Universidade Federal de Minas Gerais como parte  
dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Construção Civil

Área de concentração: Materiais de Construção Civil

Linha de pesquisa: Materiais cimentícios

ORIENTADOR: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008



*Ficha elaborada pelo Processamento Técnico da Biblioteca da EE/UFMG*

LUDMILA RODRIGUES COSTA TAVARES

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETOS  
DE ALTO DESEMPENHO COM DIFERENTES ADIÇÕES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2008

---

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva  
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

Banca Examinadora

---

ORIENTADOR: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes (DEMC/UFMG)

---

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior (DEMC/UFMG)

---

Profa. Dra. Carmen Couto Ribeiro (DEMC/UFMG)

---

Prof. Dr. Eduardo Chahud (FEA/FUMEC)

***Aos meus pais amados Carlos Alberto e Mariza,***

***Ao meu Juninho,***

***À minha querida irmã Laura,***

***À Gogoia e Vovô Márcio.***

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo é necessário agradecer a Deus que fez de mim um ser vivo nesse mundo maluco que acreditamos um dia ser um lugar digno para nossos filhos viverem.

Aos meus pais Carlos Alberto e Mariza que sem muitas palavras:

SÃO TUDO PRA MIM!

Sem eles eu não seria NADA nessa vida.

Pai, mesmo não podendo estar ao seu lado na Antilhas obrigada por se orgulhar de mim e me apoiar.

Mãe, seu apoio incondicional em TODAS as horas me faz te amar cada vez mais.

À minha irmãzinha Laura, que só de tê-la como irmã é um presente. Obrigada por me ajudar tanto junto da mamãe quando eu estava para casar e sem tempo por causa do mestrado e do trabalho.

Ao meu amor Juninho que quando comecei era apenas meu namorado e que durante esse período tornou-se meu noivo e depois meu marido, peça fundamental nesse “quebra-cabeça”. Obrigada por estar cada minuto ao meu lado, me apoiando, me incentivando e sendo essa pessoa maravilhosa na minha vida e que eu tanto amo e admiro como pessoa e profissional.

Aos meus avós Gogoia e Vovô Márcio por serem tão orgulhosos de mim e me dizerem isso sempre! Amo vocês pela rezas e pela força que me dão sempre!

A toda minha família e em especial aos meus padrinhos Titia e Tio Marcinho, por serem tão importantes pra mim.

Tio, você sempre falou e eu não acreditava que poderia. Aqui estou eu agora!

Aos meus melhores e verdadeiros amigos que vocês sabem quem são.

Fab's, Carol e Mary minhas eternas madrinhas e amigas, minha ausência nesse período acho que pode ser justificada não é mesmo?

Aos meus amigos e colegas do mestrado, em especial à minha amiguinha Paula e ao meu amiguinho Augusto, pelas inúmeras ajudas e apoio.

Ao meu orientador Abdias que esteve ao meu lado nesses últimos 2 anos me ensinando, me ajudando e, sobretudo acreditando e confiando em mim, o meu muitíssimo obrigada.

À Professora Maria Teresa pelo incentivo à pesquisa e pela amizade. Você é um exemplo!

Aos Professores Antônio Júnior e Adriano pela amizade e ensinamentos.

Aos amigos do DEMC pela ajuda e amizade, em especial ao Marco Aurélio, Isa, Gilmar, Admilson e Ivonete.

Aos labrudi e Tavares, uma família de mestres e doutores, o meu muito obrigada por terem me acolhido como “agregada”. Em especial ao meu sogro Joaquim e à minha sogra Tânia, uma mestra! Alguém que me ajudou muito me incentivando para que eu fizesse o mestrado e sendo um exemplo para mim.



## RESUMO

O concreto de alto desempenho é atualmente muito utilizado, por sua performance, resistência, durabilidade, trabalhabilidade, dentre outras qualidades. A retração autógena do concreto pode ser considerada como uma das causas das fissuras em concretos de alto desempenho em idades jovens. Ela pode ser influenciada por diversos fatores: dimensões da peça, teor da água de amassamento, dosagem do cimento, natureza do inerte, granulometria, cura, umidade ambiente, composição do cimento, etc. Estudos detalhados e experimentos cuidadosamente realizados foram aspectos de suma importância neste trabalho, que teve como objetivo estudar e avaliar a retração autógena em concretos de alto desempenho em função, principalmente, do tipo, teor e combinações binárias e ternárias de diferentes adições empregadas (escórias de alto-forno, metacaulim e sílica ativa), utilizando um aditivo superplastificante, de última geração. Outros ensaios foram realizados para avaliar o comportamento desses concretos com adições: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico, absorção por imersão, absorção por capilaridade, abrasão e ultra-sonografia. A composição com as adições de sílica ativa e escória granulada de alto-forno quando comparada aos outros concretos com adições e ao concreto referência foi aquela que apresentou o melhor comportamento global, haja vista que propiciou pequena retração, boas resistências e um consumo de cimento inferior a todos os outros que continham grandes percentuais de adições.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho, retração autógena, adições, sílica ativa, metacaulim, escória de alto-forno, aditivo superplastificante.

## ABSTRACT

High performance concrete is commonly useful by its performance, strength, durability, workability and others. Autogenous shrinkage can be considering one of the reasons of cracks on high performance concretes at early ages. The concrete shrinkage can be influenced by different reasons: piece measurements, water content of mashing, dosage of cement, inert nature, grain size, cure, relative humidity, cement's compounds, etc. Detailed studies and experiments carefully done were very important in this paper, which had as objective to study and evaluate the autogenous shrinkages on high performance concrete. And this was function, mainly by kind, content and binary and ternary mixes of different admixtures (blast furnace slag, metacaulim and silica fume), using a superplasticizing of new generation. Other tests were used to evaluate of these concretes with admixtures: compressive strength, tensile strength by diametrical compressive, dynamic modulus of elasticity, absorption (by capillarity and immersion), abrasion and ultrasonography. The concrete with silica fume and blast furnace slag if compared with the others concretes had the best performance because of small shrinkage, good strength and little cement.

Key Words: high performance concrete, autogenous shrinkage, admixtures, silica fume, metacaulim, blast furnace slag, superplasticizing.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>xviii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1. Objetivos.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2. Métodos .....</b>	<b>21</b>
<b>1.3. Justificativa e relevância do tema .....</b>	<b>22</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. Concreto .....</b>	<b>24</b>
2.1.1. Histórico e Definições .....	24
2.1.2. Tipos de Concretos.....	25
2.1.2.1. Concretos de Alto Desempenho .....	26
2.1.3. Constituintes do Concreto.....	28
2.1.3.1. Cimento Portland .....	28
2.1.3.2. A água e a hidratação do cimento .....	30
2.1.3.3. Agregados para concreto.....	31
2.1.3.4. Adições minerais .....	32
2.1.3.5. Aditivos .....	41
<b>2.2. Retração.....</b>	<b>44</b>
2.2.1. Retração no concreto fresco .....	45
2.2.1.1. Assentamento plástico.....	45
2.2.1.2. Retração plástica .....	45
2.2.2. Retração no concreto endurecido .....	47

2.2.2.1.	Retração autógena .....	47
2.2.2.2.	Retração por secagem ou hidráulica .....	54
2.2.2.3.	Retração térmica .....	59
2.2.2.4.	Retração por carbonatação .....	60
<b>2.3.</b>	<b>Ensaio realizado em corpos-de-prova de concreto (avaliados no presente trabalho) .....</b>	<b>61</b>
2.3.1.	Resistência à compressão do concreto .....	61
2.3.2.	Resistência à tração por compressão diametral .....	62
2.3.3.	Módulo de elasticidade dinâmico do concreto .....	62
2.3.4.	Absorção.....	64
2.3.5.	Abrasão .....	64
2.3.6.	Ultra-sonografia .....	65
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>66</b>
<b>3.2.</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>68</b>
3.2.1.	Execução do ensaio.....	68
3.2.1.1.	Avaliação da retração autógena .....	71
3.2.2.	Testes Mecânicos .....	75
3.2.2.1.	Resistência do concreto .....	75
3.2.2.2.	Módulo de elasticidade dinâmico .....	76
3.2.2.3.	Absorção por capilaridade e absorção por imersão.....	78
3.2.2.4.	Abrasão .....	79
3.2.2.5.	Ultra-sonografia .....	80
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>4.1.</b>	<b>Avaliação da retração autógena .....</b>	<b>81</b>
<b>4.2.</b>	<b>Ensaio de resistência à compressão axial .....</b>	<b>83</b>

<b>4.3.</b>	<b>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....</b>	<b>89</b>
<b>4.4.</b>	<b>Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....</b>	<b>90</b>
<b>4.5.</b>	<b>Ensaio de absorção .....</b>	<b>92</b>
4.5.1.	Absorção por capilaridade .....	92
4.5.1.1.	Antes da estufa.....	92
4.5.1.2.	Após a estufa.....	93
4.5.2.	Absorção por imersão .....	95
<b>4.6.</b>	<b>Ensaio de Abrasão.....</b>	<b>96</b>
<b>4.7.</b>	<b>Ensaio de ultra-sonografia.....</b>	<b>97</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>99</b>
<b>6.</b>	<b>PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS .....</b>	<b>101</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>102</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fissuras devido à retração do concreto (AGUIAR, 2006) .....	23
Figura 2 – Influência da sílica ativa na resistência à compressão. (Adaptado de ALDRED et al., ACI 234R, 2006) .....	40
Figura 3 – Concreto feito com cimento Portland sem adição mineral (TAZAWA e KYŌKAI, 1999).....	53
Figura 4 – Concreto feito com cimento Portland e escória de alto-forno (TAZAWA e KYŌKAI, 1999).....	53
Figura 5 – Concreto feito com cimento Portland e sílica ativa (TAZAWA e KYŌKAI, 1999) .....	54
Figura 6 – Características da retração hidráulica ou por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	55
Figura 7 – Umidade relativa do ar como fator influente na retração por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994) .....	56
Figura 8 - Influência do tipo de agregado na retração por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	57
Figura 9 - Teor de cimento influenciando a retração (MEHTA e MONTEIRO, 1994)	58
Figura 10 – Influência da geometria da peça na retração por secagem, onde $h_0$ é a espessura fictícia. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	58
Figura 11 – Slump Test feito no laboratório de concreto da UFMG .....	69
Figura 12 – Concreto sendo misturado na betoneira – Laboratório de Concreto da UFMG.....	70
Figura 13 – Forma para avaliação da retração autógena já com o isolamento em suas faces .....	71
Figura 14 – Detalhe de um pino de contato .....	72

Figura 15 – Pinos de contato.....	73
Figura 16 – Detalhe do pino de contato que será liberado após o início de pega para que o concreto retraia .....	73
Figura 17 – Fixação do relógio comparador na extremidade do pino de contato .....	74
Figura 18 – Prensa hidráulica utilizada no rompimento dos corpos-de-prova cilíndricos .....	75
Figura 19 – Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico do corpo-de-prova de concreto .....	76
Figura 20 - Freqüência ressonante longitudinal aproximada (BEZERRA, 2007).....	77
Figura 21 – Absorção por capilaridade. Corpo-de-prova em lâmina de água .....	79
Figura 22 – Ensaio de abrasão .....	80
Figura 23 – Prisma de concreto sendo submetido ao ensaio de ultra-sonografia .....	80
Figura 24 – Retração autógena dos 5 traços dosados.....	81
Figura 25 – Corpo-de-prova rompido .....	83
Figura 26 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do Concreto Referência – Traço 1 – C1: 100% cimento.....	83
Figura 27 – Resultados do Traço 2 – C2: 40% de cimento, 10% de metacaulim, 50% escória do tipo 1. ....	84
Figura 28 – Resultados do Traço 3 – C3: 91% de cimento, 9% de sílica ativa. ....	84
Figura 29 – Resultados do Traço 4 – C4: 61% de cimento, 9% de sílica ativa, 30% de escória do tipo 1. ....	85
Figura 30 – Resultados do Traço 5 – C5: 21% de cimento, 9% de sílica ativa, 70% de escória do tipo 2. ....	85
Figura 31 – Comparação das médias dos 5 traços .....	86

Figura 32 – Resistência à compressão aos 28 dias .....	87
Figura 33 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	89
Figura 34 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias .....	90
Figura 35 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade dinâmico - 28 dias .....	91
Figura 36 – Resultados da absorção por capilaridade dos corpos de prova antes de serem colocados na estufa.....	92
Figura 37 – Resultados da absorção por capilaridade dos corpos de prova após terem sido colocados na estufa.....	93
Figura 38 – Resultados dos corpos-de-prova imersos para avaliação da absorção .	95
Figura 39 – Resultados do ensaio de abrasão .....	96
Figura 40 – Resultados do ensaio de ultra-sonografia .....	97
Figura 41 – Ultra-sonografia x Retração .....	98



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos de cimento Portland (NEVILLE, 1982).....	29
Tabela 2 - Principais tipos de cimento Portland comercializados no Brasil (KIHARA e CENTURIONE, 2005) .....	29
Tabela 3 - Classificação dos agregados segundo sua obtenção (RIBEIRO, 2000) ..	31
Tabela 4 - Características químicas e físicas do cimento, metacaulim e sílica ativa (BARATA e DAL MOLIN, 2002) .....	35
Tabela 5 -Teores dos componentes do cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733, 1991) .....	66
Tabela 6 - Exigências físicas e mecânicas (NBR 5733, 1991).....	67
Tabela 7 - Traços dosados.....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de alumínio (alumina)

ASTM – American Society for Testing and Materials

BC – Baixo Calor de Hidratação

$\text{C}_2\text{S}$  – Silicato dicálcico

$\text{C}_3\text{A}$  – Aluminato tricálcico

$\text{C}_3\text{S}$  – Silicato tricálcico

$\text{C}_4\text{AF}$  – Ferroaluminato tetracálcico

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  – Portlandita

CAD – Concreto de alto desempenho

$\text{CaO}$  – Óxido de cálcio

CH – Hidróxido de cálcio

$\text{CH}_4$  – Metano

$\text{CO}_2$  – Gás carbônico

CP – Cimento Portland

CPB – Cimento Portland Branco Estrutural

CPI – Cimento Portland Comum

CPII-E – Cimento Portland Composto com Escória

CPII-F – Cimento Portland Composto com Fíler

CPIII – Cimento Portland de Alto Forno

CPII-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana

CPI-S – Cimento Portland Comum com Adição

CPIV – Cimento Portland Pozolânico

CPV-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Óxido de ferro

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

JCI – Japan Concrete Institute

$\text{K}_2\text{O}$  – Óxido de potássio

$\text{MgO}$  – Óxido de magnésio

$\text{Na}_2\text{O}$  – Óxido de sódio

NBR – Norma Brasileira

$\text{P}_2\text{O}_5$  – Óxido de fósforo

RS – Resistente a Sulfatos

$\text{SiO}_2$  – Óxido de silício (sílica)

$\text{SO}_3$  – Óxido de enxofre

$\text{TiO}_2$  – Óxido de titânio

# 1. INTRODUÇÃO

---

Concretos de alto desempenho podem sofrer deformações volumétricas por diversos fatores, dentre eles a retração autógena, que pode ser entendida como o fenômeno caracterizado pela diminuição volumétrica do material cimentício em virtude da redução da umidade relativa dos poros da pasta de cimento, com a evolução da hidratação, sem trocas de umidade com o ambiente e à temperatura constante (BALTHAR et al., 2004).

A retração autógena é conhecida desde o início do século XX, mas apenas na década de 90 é que uma maior ênfase foi dada a ela, por ser uma das principais causas de fissuras em concretos de alto desempenho (CAD) e em idades jovens, causando redução na durabilidade do concreto.

Concretos de alto desempenho podem também apresentar valores de retração autógena superiores aos concretos normais quando se tem o uso de adições minerais em sua composição.

Segundo Balthar (2004) as adições minerais possibilitam melhorias nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, em virtude dos efeitos químicos (ação pozolânica) e físicos (efeito fíler). Além disso, o uso de adições minerais contribui para a diminuição do impacto ambiental causado pela indústria cimenteira. Com a diminuição da quantidade de cimento na composição de concretos, minimiza-se a emissão de CO<sub>2</sub> gerado em sua fabricação. As emissões de CO<sub>2</sub> (gás carbônico) e CH<sub>4</sub> (metano) causam o efeito estufa, sendo assim a substituição parcial do cimento por adições minerais representa um benefício ao meio ambiente.

O comportamento da retração autógena do concreto com adições minerais em conjunto com o cimento ainda é pouco conhecido.

Métodos de previsão e análise estão sendo cada vez mais estudados, com o objetivo de se conhecer ainda mais esse fenômeno, e a partir daí subsidiar os interventores da

cadeia produtiva da Construção Civil com informações para melhor formular, dosar e produzir concretos duráveis.

## **1.1. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo avaliar a retração autógena do concreto, confeccionado com diferentes adições (sílica ativa, escória granulada de alto forno e metacaulim), fazendo-se uma comparação dessas adições através de misturas binárias e ternárias no comportamento do concreto.

As variações volumétricas que o concreto pode sofrer nas primeiras 24 horas são pouco conhecidas, as medições da retração de maneira geral, começam depois de 24 horas. Nesse trabalho as verificações se farão nas primeiras 24 e 48 horas.

Ensaio de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, ultrassonografia, absorção por imersão, absorção por capilaridade, abrasão, resistência à tração por compressão diametral serão também utilizados como fonte de informações para se analisar o comportamento deste concreto.

## **1.2. Métodos**

Nesse trabalho é realizada uma pesquisa bibliográfica em que sua primeira parte aborda um pequeno histórico sobre o concreto e seus constituintes, seguindo pelo principal tema dessa dissertação, a retração do concreto, mais especificamente a retração autógena em concretos de alto desempenho.

Dosagens experimentais foram realizadas para que se chegasse aos traços de referência analisados, bem como os demais traços com substituição parcial do cimento pelas adições minerais.

Corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram então confeccionados para serem submetidos a testes mecânicos. Esses corpos-de-prova foram dosados com e sem

adições minerais, tais como o metacaulim, a escória granulada de alto-forno e a sílica ativa, como substituição parcial do cimento.

Em concretos de alto desempenho com baixa relação água/aglomerante, que é o caso dos concretos desenvolvidos nesse trabalho, na ausência de cura, a retração autógena desenvolve-se rapidamente, pois a água drenada pelos poros muito finos resultantes da contração volumétrica é drenada dos capilares que já têm um diâmetro muito pequeno. Além disso, no caso do CAD, uma vez iniciada, a reação de hidratação desenvolve-se rapidamente, pois a água é drenada de forma rápida dos capilares, desenvolvendo tensões de tração e resultando no desenvolvimento de uma rápida retração autógena.

Por essa razão optou-se pela cura ambiente dos concretos, com ausência de água, para que a avaliação da retração autógena fosse realizada em uma situação crítica.

### **1.3. Justificativa e relevância do tema**

O estudo envolvendo a retração autógena do concreto é de grande relevância, devido à retração autógena, em conjunto com as deformações térmicas, ser responsável pela fissuração nas estruturas de concreto em idades jovens, causando redução na durabilidade. Este fenômeno acontece na matriz cimentícia devido à auto-secagem que ocorre durante as reações de hidratação.

Na prática, a retração das peças de concreto raramente é livre. As restrições induzem às tensões de tração no material e, dependendo da intensidade dessas tensões e do módulo de elasticidade em tração do concreto, podem ocorrer as fissurações.

As fissurações causadas pela retração comprometem além da integridade estrutural do material a durabilidade das peças, aumentando a possibilidade de ocorrência da corrosão da armadura e deterioração da pasta cimentícia.



Figura 1 – Fissuras devido à retração do concreto (AGUIAR, 2006)

O estudo das propriedades reológicas do concreto e dos seus mecanismos de ação, são essencialmente importantes na durabilidade e qualidade do concreto.

A construção civil traz um crescimento econômico para o Brasil e para o mundo, mas também é responsável pelo impacto ambiental que ocorre atualmente no planeta, uma vez que utiliza grandes volumes de recursos naturais como matéria prima.

Visto isso, a substituição parcial do cimento pelas adições minerais também é tida como um estudo de grande importância, pelo fato de estar contribuindo com a minimização do impacto ambiental causado pelas indústrias cimenteiras.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

A revisão bibliográfica está dividida em três partes. A primeira aborda temas, como o concreto e seus constituintes.

A segunda parte aborda a retração do concreto, bem como a retração autógena, foco principal desta dissertação.

A terceira parte relata os ensaios que os concretos dosados com diferentes adições foram submetidos como fontes de comparações.

### **2.1. Concreto**

#### **2.1.1. Histórico e Definições**

“Concreto; Mistura de um aglutinante com água e um agregado formado de areia e pedra, de sorte que venha a tornar-se massa compacta e que endureça com o tempo” (FERREIRA, 1985).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o concreto é um material composto, constituído de um meio aglomerante, dentro do qual estão mergulhados os agregados. Esse meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento hidráulico e água.

O concreto é um material conhecido desde os primórdios. O homem, de acordo com sua necessidade, começou a descobrir e pesquisar diferentes materiais, em busca de sua sobrevivência para seu abrigo e conforto.

Isaia (2005) propõe que a cal era um material já conhecido, possivelmente entre 9.000 e 7.000 a.C. Era usada como material para revestimento de paredes e pisos e, quando misturada com pedra, formava os pisos de concreto.



Pisos constituídos de um material semelhante ao concreto atual foram descobertos em escavações feitas na cidade de Jericó, sudoeste da Galiléia. Baseando-se em fatos como esse, admite-se que o concreto feito com pozolanas e cal foram invenções gregas ou romanas (MALINOWSKI e GARFINKEL, 1991 apud ISAIA, 2005).

Sabe-se que os gregos possuíam excelente conhecimento empírico sobre a tecnologia do concreto. Como um grande exemplo de construção tem-se o Partenon, feito com arquitetura de linhas nobres e proporções harmoniosas no século 5 a.C. Essas construções eram feitas normalmente, de um sistema estrutural constituído por meio de cargas simplesmente apoiadas de colunas e vigas realizadas com pedras de cantaria, cortadas e conformadas de modo refinado e preciso, geralmente de mármore branco. Onde não existiam jazidas de mármore, utilizava-se da terra vulcânica juntamente com a cal para confeccionar argamassa pozolânica (ISAIA, 2005).

Os romanos, por sua vez, se diferenciavam dos gregos pela criação de espaços amplos com abóbadas e cúpulas de grandes dimensões, que nunca tinham sido criadas. O “concreto romano” (*opus cementicium* ou *concretus*) foi um material artificial que proporcionou um avanço técnico inexistente pra época e revolucionou o curso da arquitetura ocidental (YEGUL, 2005 apud ISAIA, 2005).

### **2.1.2. Tipos de Concretos**

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o concreto é classificado em três categorias baseado em sua massa específica. São elas:

- a. Concreto de peso normal ou concreto corrente:  $2.400 \text{ kg/m}^3$
- b. Concreto leve:  $1.800 \text{ kg/m}^3$
- c. Concreto pesado:  $3.200 \text{ kg/m}^3$

A classificação do concreto quanto a sua resistência é:

- a. Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa
- b. Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 a 40 MPa
- c. Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

### **2.1.2.1. Concretos de Alto Desempenho**

Com o aumento da resistência característica das estruturas, em patamares cada vez mais elevados deu início ao advento do concreto de alto desempenho.

Segundo Almeida (2005) concreto de alto desempenho (CAD) foi o nome adotado para designar um novo tipo de concreto, sendo este mais resistente, mais durável e mais trabalhável. Apesar do material “concreto de alto desempenho” ser bastante semelhante ao “concreto convencional”, existem algumas diferenças de comportamento.

A cura com água nos primeiros estágios é de extrema importância em concretos de alto desempenho, de maneira a evitar o rápido desenvolvimento da retração autógena, devido ao fenômeno da auto-dessecação e controlar a estabilidade dimensional do concreto. A diferença entre secagem e auto-dessecação é que quando o concreto seca, a água evapora para a atmosfera. No entanto, quando o concreto se auto-desseca, a água permanece dentro do concreto (somente migra para os poros muito finos criados pela contração volumétrica da pasta de cimento) (AİTCIN, 1997).

O CAD é um tipo de concreto que apresenta algumas vantagens, como uma baixa permeabilidade, uma boa resistência mecânica, um alto módulo de elasticidade, uma deformação mais rápida por fluência e alta durabilidade.

Para Isaia (2005) o desenvolvimento do CAD se deveu ao aprimoramento da indústria de aditivos superplastificantes, ao se fabricar produtos eficientes na redução do teor total de água do concreto, possibilitando também uma redução no fator água/materiais cimentícios, com alta trabalhabilidade.

A utilização das adições minerais como substituição em parte da massa de cimento possibilitou a dosagem de concretos com altos teores de materiais cimentícios, mas com menor quantidade de cimento Portland, reduzindo assim o efeito da retração e de fissurações no concreto ainda jovem, tornando assim o CAD um concreto com vista à durabilidade.

A escolha do cimento para a confecção dos CAD é de suma importância, uma vez que este influencia tanto a resistência da pasta quanto a intensidade da aderência agregado-pasta.

Em algumas pesquisas é estabelecido que em termos de composição química o cimento deve possuir baixo teor de  $C_3A$  e altos teores de  $C_2S$  e  $C_3S$ .

O consumo de cimento observado em dosagens para a confecção de concretos de alto desempenho está na faixa compreendida entre 400 e 600  $kg/m^3$ , podendo inclusive atingir valores superiores a esses.

Altas resistências podem ser obtidas com substituição de parte do cimento por adições minerais ou pelo menos aumento da eficiência do cimento no concreto por aditivos químicos.

O aumento da resistência à compressão pode ser explicado pelas propriedades reológicas do concreto. O comportamento reológico é controlado pela hidratação da fase intersticial na presença de íons de enxofre e de cálcio. A presença de água disponível no começo da hidratação é crítica e esse é o ponto chave para se obter um concreto de alto desempenho econômico.

Para Almeida (2005), na ausência de outros parâmetros, entende-se que um dos critérios passíveis de adoção, atualmente, no Brasil, para a definição de concretos de alto desempenho em termos de resistência à compressão, pode ser a classe superior à C50. A NBR 8953 (ABNT, 1992) identifica o número após a letra C como a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) expressa em MPa.

Segundo Ribeiro et al., (2000), o concreto de alto desempenho devido à sua excelente durabilidade e compacidade, resiste bem a ambientes agressivos e apresenta elevado

padrão de impermeabilidade, possui também alta plasticidade, o que agiliza a execução da concretagem.

A durabilidade do concreto de alto desempenho é governada pelas qualidades intrínsecas do material e pelo rigor do ambiente ao qual o mesmo está exposto, mas é também afetada pelo cuidado que tenha sido tomado durante o lançamento e cura desse concreto. Assim, toda a preparação e execução do CAD devem ser rigorosamente controladas, levando-se em consideração as propriedades de seus constituintes e do meio em que ele será exposto, a fim de se garantir assim uma maior durabilidade da estrutura.

### **2.1.3. Constituintes do Concreto**

O concreto é constituído essencialmente de cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, água, podendo conter aditivo e adições.

#### **2.1.3.1. Cimento Portland**

Bauer (1994) define o cimento Portland como o produto obtido pela pulverização do clínquer, produto esse resultante de uma mistura heterogênea de vários minerais produzidos em reações a altas temperaturas.

Kihara e Centurione (2005) definem o clínquer Portland, principal constituinte do cimento Portland como um material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos.

Curiosamente, sabe-se que é possível traçar uma analogia do clínquer com as caixas pretas utilizadas na aviação.

Cimentos são substâncias ligantes e o cimento Portland, dentre esses ligantes, é o aglomerante hidráulico que mais é utilizado na construção civil. Ao entrar em contato com a água o cimento Portland sofre transformações químico-mineralógicas, que contribuem para agregar e consolidar os agregados, o que resultará em um compósito

largamente conhecido: o concreto de cimento Portland (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Na tabela 1 a seguir estão os principais constituintes do cimento Portland:

Tabela 1 - Principais compostos de cimento Portland (NEVILLE, 1982)

Composto	Constituição	Símbolo
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Após a invenção do cimento Portland, outros materiais começaram a ser estudados para serem utilizados em conjunto, constituindo assim os cimentos com adições.

Tabela 2 - Principais tipos de cimento Portland comercializados no Brasil (KIHARA e CENTURIONE, 2005)

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes
Comum	CPI	25, 32, 40
Comum com Adição	CPI-S	25, 32, 40
Composto com Escória	CPII-E	25, 32, 40
Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40
Composto com Fíler	CPII-F	25, 32, 40
Alto Forno	CPIII	25, 32, 40
Pozolânico	CPIV	25, 32
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40

### 2.1.3.2. A água e a hidratação do cimento

Segundo Kihara e Centurione (2005) o processo de hidratação do cimento pode ser entendido como a estabilização pela água dos minerais do clínquer, metaestáveis a temperatura ambiente.

Uma mistura de vários compostos constitui o cimento Portland, assim o processo de hidratação consiste na reação dos compostos anidros com água. Contudo, esses compostos não se hidratam a uma mesma velocidade. A hidratação do cimento pára assim que não houver mais fase anidra de cimento (misturas com elevada relação a/c e bem curadas), ou quando a água não puder mais chegar às fases não hidratadas, ou ainda quando não existir mais água disponível (relação a/c muito baixa) (AÏTCIN, 2000 apud KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Para Neville (1982) é na pasta de água e cimento que ocorrem as reações que transformam o cimento Portland em agente ligante.

Os principais produtos hidratados podem ser classificados em silicatos de cálcio hidratados e aluminatos tricálcicos hidratados. Sendo que, para Mehta e Monteiro (1994), os aluminatos se hidratam mais rapidamente que os silicatos.

As águas da pasta endurecida podem ser classificadas segundo Mehta e Monteiro (1994) de quatro formas: água capilar, água adsorvida, água interlamelar (água de gel) e água quimicamente combinada (água de cristalização).

A água capilar pode ser dividida em duas categorias: a água livre, presente em vazios grandes (diâmetros maiores que 50 nm), cuja remoção não causa retração e a água retida por tensão capilar em capilares pequenos, cuja remoção pode causar retração.

A água adsorvida é a água que está próxima à superfície do sólido e a perda dessa água é a principal responsável pela retração da pasta na secagem.

A água interlamelar é a água associada à estrutura do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e é perdida somente por secagem forte.

A água quimicamente combinada ou de cristalização é a parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados de cimento. Essa água não é perdida por secagem, apenas por aquecimento a partir da decomposição dos hidratos.

### 2.1.3.3. Agregados para concreto

O agregado é um material granular que é usado com um meio cimentante, para formar um concreto ou uma argamassa de cimento hidráulico. O agregado pode ser graúdo, com partículas maiores que 4,8 mm ou miúdo, com partículas menores que 4,8 mm, porém maiores que 75 nm (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com Neto (2005), os agregados podem ser classificados quanto a sua origem em quatro categorias: naturais, britados, artificiais e reciclados.

Para Ribeiro et al., (2000), os agregados podem ser classificados segundo a sua obtenção de acordo com a tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Classificação dos agregados segundo sua obtenção (RIBEIRO, 2000)

Classificação	Obtenção	Exemplos
Naturais	Rochas fragmentadas pela ação do vento, chuvas, variações de temperatura, etc. e encontradas na natureza sob a forma de agregado.	Areias, pedregulhos
Artificiais	Materiais que foram fragmentados ou triturados com auxílio de britadores ou outro meio artificial.	Areias artificiais e britas de granito, gnaiss, calcário, etc.

Os agregados afetam a retração por secagem do concreto, pois a presença deles no concreto promove restrições à deformação. O teor e o módulo de deformação do agregado são os principais fatores que influenciam a retração (HELENE e ANDRADE, 2007).

#### 2.1.3.4. Adições minerais

As adições minerais são utilizadas como um meio de substituição parcial do clínquer ou cimento, que não só reduz o impacto ambiental como também o volume de extração de matérias-primas por parte da indústria da construção civil. Elas são, normalmente, resíduos provenientes de outras indústrias, os quais geralmente seriam descartados em locais impróprios e em grande quantidade.

Essa incorporação de adições minerais na produção de cimentos ou concretos pode também reduzir o consumo de energia e a poluição gerada. A incorporação de escórias e pozolanas reduzem substancialmente a emissão de CO<sub>2</sub> na produção de cimento, uma vez que se sabe que para cada tonelada de clínquer produzido, é lançada uma tonelada de gás carbônico no ambiente (DAL MOLIN, 2005).

Essas adições promovem também a redução na porosidade capilar do concreto, além de diminuir o calor de hidratação e, conseqüentemente, as fissuras de origem térmica.

As adições minerais podem ser classificadas em três grupos: material pozolânico, material cimentante e fíler.

Alguns exemplos dessas adições são citados a seguir:

- a. Material cimentante: escória granulada de alto-forno
- b. Material cimentante e pozolânico: cinza volante com alto teor de cálcio (CaO  $\geq$  10%)
- c. Material superpozolânico: sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz (predominantemente amorfa)
- d. Material pozolânico comum: cinza volante com baixo teor de cálcio (CaO < 10%), argilas calcinadas, cinzas vulcânicas
- e. Material pozolânico pouco reativo: escórias de alto-forno resfriadas lentamente, cinza de casca de arroz (predominantemente cristalina)



f. Fíler: calcário, pó de quartzo, pó de pedra.

O material pozolânico é definido pela ASTM C 618 (1978) e pela NBR 12653 (ABNT, 1992) como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes.

As adições podem produzir efeitos químicos ou físicos na microestrutura do concreto e muitas das suas propriedades podem ser influenciadas benéficamente. Sua eficiência depende da quantidade utilizada, das condições de cura, de sua composição química, mineralógica e granulométrica (DAL MOLIN, 2005).

Segundo Malhotra e Mehta (1996) a utilização de adições minerais ao concreto traz alguns benefícios à engenharia, ao meio ambiente e à economia.

Os benefícios à engenharia estão ligados, por exemplo, à trabalhabilidade do concreto, que pode aumentar devido à incorporação das adições, outras influências também são observadas no que se refere à resistência do concreto, impermeabilidade e durabilidade frente ao ataque de agentes agressivos.

Os benefícios econômicos se referem ao fato do cimento Portland ser o componente mais caro da mistura para se obter o concreto. Há um alto consumo energético para a fabricação do mesmo, o que causa um aumento no custo do cimento.

Em relação aos benefícios ao meio ambiente, eles se referem às grandes quantidades de CO<sub>2</sub> que são lançadas na atmosfera na fabricação do cimento. A diminuição da quantidade de cimento diminui a quantidade de CO<sub>2</sub> liberado, minimizando assim os impactos ambientais.

Malhotra e Mehta (1996) acreditam que em um futuro próximo a não utilização de materiais pozolânicos em concretos será uma exceção.

A adição ao concreto de pozolanas mais ativas, tais como sílica ativa e metacaulim, utilizadas nesse trabalho, segundo as literaturas, causa um aumento notável na resistência à compressão se comparado a um concreto sem adições.

Em relação à retração, segundo Coutinho (1994), a substituição do cimento por pozolana faz aumentar a retração nas primeiras idades, embora, a longo prazo, só com porcentagens superiores a 20% são observadas maiores extensões.

Para Coutinho, a retração parece não ser afetada quando introduzida ao cimento a escória granulada de alto-forno, embora no caso de a relação a/c (água/cimento) ser baixa ou a cura inicial ser de curta duração, pode ser observado um pequeno aumento da retração. Coutinho expõe que a sílica ativa também não altera a retração, se a relação a/c for conservada.

Segundo Mehta (1987) é observada uma redução significativa na permeabilidade da água em concretos contendo 20 a 30% de pozolanas, bem como o calor de hidratação. A resistência à compressão em concretos contendo pozolanas, como já dito anteriormente, também sofre um aumento se comparado a concretos “comuns”. Aos 7 dias a resistência à compressão de concretos sem a utilização de pozolanas ainda é superior, pois a reação de hidratação das pozolanas ainda não foi suficiente para afetar a resistência. Contudo, aos 28 dias, pastas de cimento contendo 10% de pozolanas já apresentam resistências superiores.

A retração por secagem em estruturas de concreto com a utilização de cimentos com substituições parciais por pozolanas, de acordo com Mehta (1987) é geralmente superior, pois a retração por secagem de uma pasta de cimento hidratada está relacionada ao C-S-H, que é superior no caso de pastas de cimento com pozolanas.

Na tabela 4 são apresentadas algumas das características físicas e químicas de algumas adições comparadas ao cimento Portland.

Tabela 4 - Características químicas e físicas do cimento, metacaulim e sílica ativa (BARATA e DAL MOLIN, 2002)

Características	Determinações	Cimento	Metacaulinita	Sílica Ativa
Análise química (%)	Óxido de silício (total)	19,82	50,38	96,00
	Óxido de alumínio	4,54	43,29	0,06
	Óxido de ferro	2,64	1,94	0,04
	Óxido de cálcio	59,80	0,05	0,17
	Óxido de magnésio	3,28	0,10	< 0,10
	Óxido de titânio	-	1,94	0,01
	Óxido de sódio	-	0,03	0,51
	Óxido de potássio	-	0,01	0,49
	Óxido de enxofre	2,42	-	-
	Óxido de fósforo	-	0,19	-
	Óxido de cálcio livre	1,19	-	-
	C (total)	-	-	0,63
	Perda ao fogo	4,52	1,70	1,80
	Óxido de silício (livre)	-	0,20	-
Composição Bogue (%)	C <sub>3</sub> S	57,30	-	-
	C <sub>2</sub> S	9,64	-	-
	C <sub>3</sub> A	7,56	-	-
	C <sub>4</sub> AF	8,03	-	-
Características Físicas	Diâmetro médio (µm)	-	1,5	0,16
	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,16	2,57	2,22
	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	316	14,15	16,20

#### **2.1.3.4.1. Metacaulim**

O metacaulim de alta reatividade, doravante também mencionado de 'metacaulim' é uma pozolana artificial produzida pela queima de uma argila caulinítica selecionada de uma faixa de temperatura específica (entre 650 e 800°C). O processo de produção é extremamente controlado obtendo assim um produto de alta pureza e reatividade.

O metacaulim é constituído basicamente por sílica e alumina no estado amorfo, que reagem com o hidróxido de cálcio (CH) produzido pela hidratação do cimento Portland, para formar um hidrosilicato de cálcio (C-S-H) e um hidroaluminossilicato de cálcio (GLEISE et al., 2006 apud JIAN-TONG et al.,2002).

É de conhecimento geral que a incorporação do metacaulim em pastas de cimento Portland proporciona a formação de uma estrutura de poros de tamanhos menores, o que é importante para o aumento da resistência à compressão e da durabilidade.

Em relatório para a Metacaulim do Brasil, Helene, et al., (2003), definem o metacaulim como “um produto constituído principalmente por compostos à base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa (vítrea), proporcionando alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto, que é recomendado para uso indiscriminado em concretos de cimento Portland.” Suas características físicas e químicas melhoram as propriedades mecânicas dos concretos de cimento Portland.

Sendo um silicato de alumínio, o metacaulim é ainda recomendado em diversas aplicações na indústria de refratários, cerâmica, siderúrgica, química e outras.

Para uso em concretos e produtos à base de cimento Portland, o metacaulim precisa ter certas características físicas e químicas que o diferem de outros tipos de metacaulim utilizados em outras aplicações tais como na indústria de materiais refratários e químicos. É necessário que o metacaulim possua reatividade química suficiente com o hidróxido de cálcio livre presente na pasta de cimento e finura suficiente para proporcionar redução da porosidade da pasta e conseqüentemente aumento de durabilidade através da melhoria de diversos parâmetros do concreto.

Esta reação química com o hidróxido de cálcio, a partir de determinado nível de ocorrência, e associada ao efeito de micro-preenchimento de poros das misturas que o utilizam, explica a expressão 'Alta Reatividade' que acompanha o seu nome (ROCHA, 2005).

Segundo Souza (2002) a resistência à compressão de um concreto utilizando metacaulim evolui até idades mais avançadas. Quando comparado a um concreto com sílica ativa, o mesmo alcança aos 28 dias a resistência que concretos com adição de sílica ativa podem alcançar aos 14 dias.

De acordo com Rocha (2005) a substituição parcial do cimento Portland por metacaulim proporciona um aumento na resistência à abrasão devido principalmente à diminuição da porosidade e do índice de vazios do concreto. Em relação ao módulo de elasticidade do concreto o aumento com a utilização do metacaulim pode chegar a até 15%, o que não acontece na mesma proporção em relação à resistência à compressão, que em alguns casos pode ter um aumento de até 50%. O metacaulim pode ser usado também na mistura para reduzir a penetração de íons cloreto, em alguns casos a valores até 5 vezes menores do que se comparado a um concreto sem adições. A retração por secagem de pastas de cimento com a utilização do metacaulim é menor se comparada às pastas com 100% cimento.

#### **2.1.3.4.2. Escória granulada de alto-forno**

A escória de alto-forno é um produto não metálico consistindo essencialmente de silicatos e aluminos silicatos de cálcio e outras bases. A escória granulada é o produto vítreo ou não cristalino formado quando a escória de alto-forno fundida é rapidamente resfriada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Comparada às pozolanas, a escória de alto-forno finamente moída é auto-cimentante, ou seja, não necessita de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes como o C-S-H. No entanto, quando a escória de alto-forno hidrata-se por si só, a quantidade de produtos cimentantes formados e as taxas de formação são insuficientes para a aplicação do material com fins estruturais. Assim com a combinação com o cimento

Portland, a hidratação da escória é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita.

Dal Molin (2005) define a escória granulada de alto-forno como o resíduo não metálico proveniente da produção do ferro-gusa.

Como as pozolanas, as escórias são utilizadas na fabricação de alguns cimentos, mas também têm sido utilizadas como adições ou substituição parcial ao cimento na fabricação de concretos. Seu uso é justificado em obras onde a redução do calor de hidratação é essencial, como barragens, e em ambientes com presença de cloretos, para reduzir a sua penetração e aumentar a durabilidade quanto à corrosão das armaduras.

O resultado da resistência à compressão de concretos utilizando a escória em substituição parcial ao cimento depende de alguns fatores, tais como o tipo da escória, sua finura, a proporção de escória utilizada, o tipo de cimento, a relação água/aglomerante, dentre outros. Geralmente, de 1 a 5 dias a resistência de concretos com escória é inferior em relação aos concretos convencionais. Entre 7 e 28 dias as resistências se aproximam e acima desse período a resistência em concretos com escória tende a ser maior (MALHOTRA, 1987).

Alguns estudos informam que ao acrescentar certas proporções de sílica ativa em concretos utilizando escória, a resistência à compressão em idades jovens tende a aumentar.

Segundo Malhotra (1987), o módulo de elasticidade de concretos contendo escória em idades jovens e com grandes percentuais de escória é inferior em relação aos concretos convencionais. A retração por secagem em concretos com escória tende a ser maior em relação aos concretos convencionais.

### **2.1.3.4.3. Sílica Ativa**

A sílica ativa é um subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e silício metálico, que são produzidos em grandes fornos elétricos de fusão, que operam a temperaturas acima de 2000°C (DAL MOLIN, 2005). Ela produz efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto, a reação envolvendo sílica ativa é rápida, ao contrário das pozolanas naturais, cinzas volantes e escórias.

A cor das partículas de sílica ativa pode variar de cinza claro a escuro dependendo do excesso de carbono residual proveniente do carvão combustível ou da madeira usada na carga do forno. O conteúdo de ferro, em menor grau também pode afetar a cor a sílica ativa (MALHOTRA, et al., 1992 apud DAL MOLIN, 2005).

Para Dal Molin (2005) a extrema finura da sílica ativa (superfície específica da ordem de 20.000 m<sup>2</sup>/kg) faz com que seja necessário aumentar a quantidade água para produzir concretos utilizando a sílica ativa. Esse problema do aumento de consumo de água pode ser resolvido com a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes.

A sílica ativa já no período inicial da hidratação (1 a 3 dias), já é capaz de contribuir para a resistência do concreto, mas sua contribuição mais significativa ocorre até os 28 dias. Após esse período, a contribuição é relativamente pequena.

Em relação à propriedade do concreto em absorver água, estudos mostram que quando utilizada a sílica ativa, principalmente quando utilizado o CPV-ARI, como no caso desse trabalho, a redução da absorção é bastante clara.

A presença da sílica ativa sem a adição de um aditivo plastificante ou superplastificante ao concreto faz aumentar a quantidade de água para manter a trabalhabilidade (COUTINHO, 1994).

Segundo Sellevold e Nilsen (1987) pastas de cimento contendo sílica ativa apresentam retrações do concreto mais altas que em pastas com 100% de cimento Portland, bem como uma maior resistência à abrasão, uma redução da permeabilidade da água, melhorando assim a durabilidade do concreto e também protegendo o concreto contra corrosão, dificultando a penetração de agentes agressivos no concreto.

A retração autógena em concretos utilizando sílica ativa tende a ser maior se comparada a concretos convencionais. Assim como o módulo de elasticidade dinâmico também tende a ser maior quando a sílica ativa é utilizada (ALDRED., et al. ACI 234R, 2006).

A figura a seguir mostra a influência da sílica ativa na resistência à compressão dos concretos com porcentagens de sílica 15 e 30% comparadas a um concreto sem a utilização da mesma.

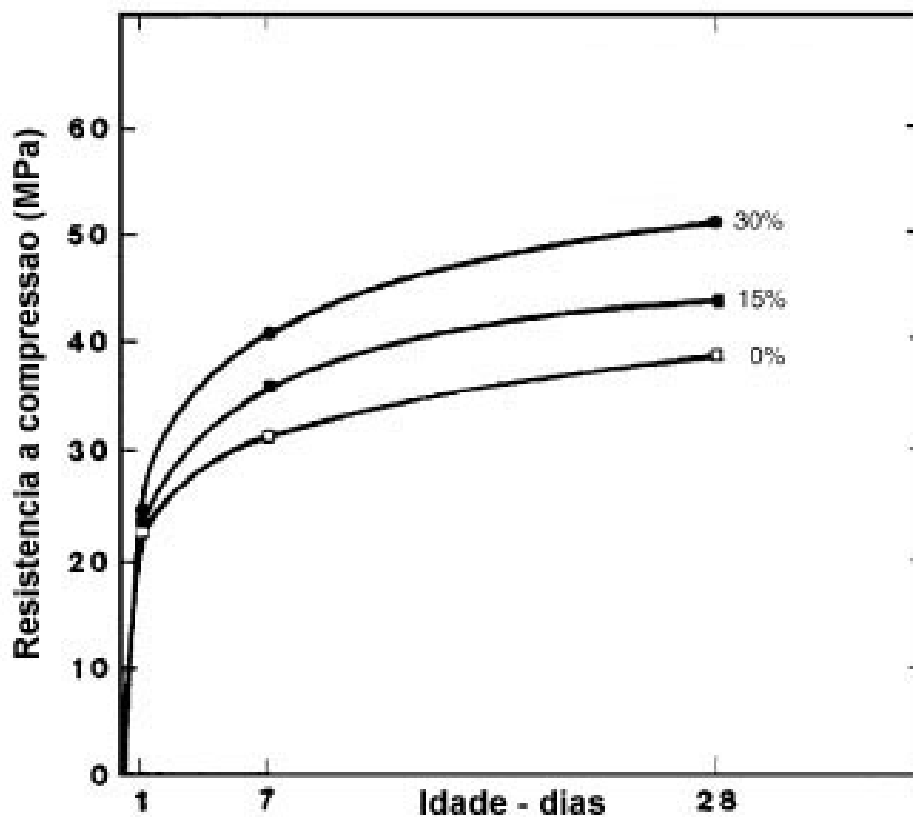


Figura 2 – Influência da sílica ativa na resistência à compressão. (Adaptado de ALDRED et al., ACI 234R, 2006)



### **2.1.3.5. Aditivos**

Os aditivos são definidos como “materiais adicionados ao concreto durante o processo de mistura em uma quantidade não superior aos 5% sobre a massa do cimento contido no concreto, para modificar as propriedades da mistura no estado fresco e/ou no estado endurecido” (EN 934, 2001 apud MARTIN, 2005).

Segundo Martin (2005), a ABNT (EB 1763, 1992) define aditivos como “produtos que se adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”.

Existe uma grande diversidade de aditivos, que variam amplamente quanto à composição química, desempenhando cada um, até mais de uma função, o que torna difícil classificá-los de acordo com suas funções.

Martin (2005) cita alguns efeitos benéficos dos aditivos sobre o concreto: reduzir a água, acelerar ou retardar a pega, incorporar ar, acelerar o endurecimento, inibir a corrosão, inibir a reação álcali-agregado, dentre outros.

Uma importante observação sobre os aditivos, ainda segundo Martin (2005) é que eles não podem ser a solução para transformar uma má formação de concreto em uma formação correta.

Segundo Helene e Andrade (2007), a dificuldade de se obter concretos plásticos com a redução da relação água/cimento, limitou, por vários anos, a utilização de concretos de maior resistência e maior durabilidade. Esta limitação começou a mudar a partir da década de 50 com o surgimento dos aditivos superplastificantes, que já estão em sua 3ª geração, introduzidos em meados da década de 90. Eles são empregados, principalmente, em concretos de alta resistência e/ou concretos auto-compactáveis.

Esses aditivos superplastificantes vieram também possibilitar o pleno emprego de pozolanas de alta reatividade, para a produção de concretos de alto desempenho, tendo como objetivo a durabilidade desses concretos. Pozolanas tais como o

metacaulim e a sílica ativa, têm como objetivo melhorar o desempenho mecânico e reduzir a porosidade das pastas, em igualdade de relação água/cimento.

O uso dessa nova geração de aditivos acarreta uma mudança na reologia da pasta, tornando-a mais fluida, possibilitando a redução do volume da pasta no concreto, mantendo o mesmo abatimento.

Segundo Neville (1982) os superplastificantes não alteram, significativamente, a pega do concreto, exceto quando utilizados com cimentos de teor muito baixo de  $C_3A$ , podendo haver um retardamento excessivo.

Esse tipo de aditivo também não afeta, ou pouco interfere, na retração, fluência, módulo de deformação, resistência ao congelamento e degelo ou na durabilidade do concreto com exposição aos sulfatos (NEVILLE, 1982).

Por efeito da repulsão eletrostática, de acordo com seus fabricantes, o aditivo superplastificante dispersa as partículas de cimento, fazendo com que se necessite menos água para se atingir uma dada trabalhabilidade.

O superplastificante à base de policarboxilato, como o que foi utilizado nesse trabalho atua de forma mais completa nas partículas do cimento, resultando numa redução de água muito superior aos superplastificantes normais (acima de 40%).

As propriedades e benefícios desse tipo de aditivo são:

No estado fresco:

- a. Alta taxa de redução de água (40% aproximadamente);
- b. Melhoria da aderência e textura da superfície do concreto;
- c. Produção de concretos coesivos, porém trabalháveis;
- d. Redução da exsudação.

No estado endurecido:

- a. Alta resistência à compressão axial inicial e final;
- b. Alta resistência à tração na flexão inicial e final;
- c. Aumento do módulo de elasticidade;
- d. Redução de permeabilidade.

Os aditivos plastificantes e os superplastificantes podem interferir também na retração do concreto se forem usados para aumentar a trabalhabilidade ou para obter elevadas resistências. No primeiro caso, observa-se um aumento na retração, enquanto no segundo, uma diminuição. Os aceleradores de pega fazem aumentar a retração inicial. Os retardadores de pega parecem ter um comportamento semelhante aos aceleradores, porém menos acentuado (COUTINHO,1994).

## 2.2. Retração

A retração, segundo Coutinho (1994) é conhecida e verificada desde o conhecimento dos ligantes hidráulicos. Nos séculos 19 e 20 pouco se estudou sobre esse fenômeno, provavelmente porque os inconvenientes eram poucos, ou até mesmo desprezíveis, em virtude das baixas resistências que os ligantes possuíam.

A primeira teoria proposta para justificar a retração ocorreu em 1926-29, por Freyssinet, baseado em considerações rigorosamente científicas.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o concreto está sujeito tanto a condições de secagem ambiental como a carregamentos constantes. Estas condições se refletem em variações dimensionais, que estão ligadas à remoção da água adsorvida da pasta de cimento.

Essa água, já explicada anteriormente, é aquela fisicamente aderida ao C-S-H (silicato de cálcio hidratado).

Hasparyk et al., (2005) definem a retração como o “fenômeno associado a deformações em pastas de cimento, argamassas e concreto, sem que haja qualquer tipo de carregamento”. Sabe-se que sua principal causa é a perda de água da pasta de cimento.

Segundo Helene e Andrade (2007), no concreto fresco, a perda de água ocorre por exsudação, evaporação, percolação por juntas dos moldes, absorção de água pelos agregados, absorção de água pelas fôrmas ou por alguma superfície de contato com a peça concretada, que originam a chamada retração plástica.

No concreto endurecido, a perda de água ocorre quando este é exposto em ambiente com umidade relativa inferior a 100%, ocorrendo então a chamada retração hidráulica ou por secagem. A perda de água capilar ou livre é considerada a principal causa da retração por secagem.

O fenômeno da retração pode ser dividido em duas categorias: a retração no concreto fresco e a retração no concreto endurecido. Alguns tipos de retração são: retração

plástica, retração autógena, retração por secagem ou hidráulica, retração térmica e retração por carbonatação.

Todos os tipos serão citados e explicados, contudo será dada uma maior ênfase ao fenômeno da retração autógena, foco principal desta dissertação.

## **2.2.1. Retração no concreto fresco**

A retração que ocorre no estado fresco do concreto pode se subdividir em duas: assentamento plástico e retração plástica.

### **2.2.1.1. Assentamento plástico**

Coutinho (1994) explica que o assentamento plástico é comandado por dois fenômenos: o de movimentação de partículas sólidas pra baixo (sedimentação pela gravidade) e o fenômeno da exsudação, a movimentação para cima do ar aprisionado e da água.

Para Hasparyk et al., (2005), durante esse processo de movimentação das partículas sólidas, as fissuras podem ocorrer caso haja um obstáculo (armadura ou agregados maiores) que impeça a movimentação homogênea deste assentamento.

As fissuras que decorrem do assentamento plástico costumam aparecer nos primeiros instantes após o lançamento. A principal causa dessa patologia está na dosagem inadequada das partículas finas no concreto.

Cimentos com grandes porcentagens de  $C_3A$  e álcalis tendem a reduzir a exsudação.

### **2.2.1.2. Retração plástica**

Segundo Hasparyk et al., (2005), a retração plástica que ocorre no concreto no estado fresco, acontece antes do fim da pega, através da evaporação da água da superfície exposta do concreto, ou seja, é a retração que ocorre quando o concreto perde água ainda no estado plástico, resultando em fissuração superficial facilmente observável.

As condições ambientais, tais como altas temperaturas, efeitos solares, velocidade do vento e baixa umidade relativa do ar influenciam no aparecimento de fissuras por retração plástica, que podem ser facilmente eliminadas com medidas preventivas que inibam a migração da água para a superfície da estrutura (formas ou atmosfera) quando o concreto ainda estiver fresco.

Esse tipo de retração é comum em lajes, pois são peças em que ocorre uma secagem rápida e a evaporação de água excede a taxa disponível de água de exsudação (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Neville (1997) apud Cruz Filho (2007) expõe que a relação entre exsudação e a retração plástica não é muito evidente. O retardamento da pega favorece uma maior exsudação e leva a uma maior retração plástica. Por outro lado, uma maior capacidade de exsudação impede uma secagem da superfície do concreto, reduzindo a fissuração por retração plástica.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) a retração plástica e a fissuração ocorrem quando a taxa de evaporação da água do concreto fresco é maior do que a exsudação. Existem maneiras de prevenção para esse tipo de retração que estão listadas a seguir:

- a. Umedecer a sub-base (lastro) e as formas;
- b. Umedecer os agregados quando secos;
- c. Construir quebra-vento temporário para reduzir a velocidade dos ventos sobre a superfície do concreto;
- d. Manter baixa a temperatura do concreto fresco pelo resfriamento dos agregados e da água de amassamento;
- e. Reduzir o tempo entre o lançamento e início da cura pela eliminação de atrasos durante a concretagem;
- f. Minimizar a evaporação, proteger o concreto logo após o acabamento pelo uso de sacos de aniagem saturados, efetuar aspersão de água ou cura química.

Para Mehta e Monteiro (1994) as fissuras por retração plástica podem ser sanadas pela revibração do concreto quando ele ainda se encontra em estado plástico. A revibração também influencia a resistência do concreto, tornando-a maior, alivia as tensões de retração plástica ao redor das partículas de agregado graúdo e melhora a aderência entre o concreto e a armadura.

## **2.2.2. Retração no concreto endurecido**

As retrações que ocorrem no estado endurecido do concreto são: retração autógena, retração por secagem ou hidráulica, retração térmica e retração por carbonatação.

### **2.2.2.1. Retração autógena**

#### **2.2.2.1.1. Conceitos e definições**

A retração autógena do concreto surgiu no início do século XX, mas apenas na década de 90 é que se tornou importante devido a ser a principal causa das fissuras em concretos de alto desempenho (CAD). Ela pode ser definida como a redução macroscópica dos materiais cimentícios após o início da pega, em condições de “isolamento” específicas, sem que ocorra mudança de volume devido à perda ou ao ingresso de substâncias, variação da temperatura ou aplicações de forças externas (HASPARYK et al., 2005).

A retração autógena ocorre devido ao fenômeno da auto-secagem, que corresponde a uma redução da água livre nos poros do material cimentício.

Esse tipo de retração é também conhecido como retração por hidratação e retração química, sendo o processo também chamado de auto-secagem ou auto-dessecamento.

Segundo Coutinho (1994) a retração autógena é o nome que se dá para a variação de volume do concreto conservado sem trocas de umidade com o ambiente externo, à temperatura constante e reina praticamente no interior de grandes massas ou até em peças com seções superiores a 30 ou 40 cm. A secagem do concreto é afetada apenas

numa profundidade de poucos decímetros ao fim de alguns anos. No interior tudo se passa como se não houvesse trocas de umidade.

Segundo Neville (1997) apud Cruz Filho (2007) a retração autógena, na prática só ocorre no interior da massa de concreto e é menor do que a que ocorre em uma pasta de cimento pura. Isso acontece porque no concreto, a contração é restringida pelo esqueleto rígido da pasta de cimento já hidratada e também pelas partículas de agregado.

Apesar da retração autógena ser tridimensional, ela é comumente expressa em forma de deformação linear, podendo assim ser calculada em conjunto com a retração hidráulica. Ela também tende a aumentar com temperaturas mais altas e teores de cimento maiores.

De acordo com Laplante (1993) apud Balthar (2004) a retração autógena pode ser dividida em três fases: retração inicial ou primeira retração, período de expansão e segunda retração ou retração final.

- a. Primeira retração: ocorre de duas a três horas após a mistura e está relacionada ao início das reações de hidratação.
- b. Período de expansão: ocorre entre quatro a dez horas após a mistura e pode ser prolongada até vinte horas. Este período de expansão ocorre devido à precipitação de grandes cristais de etringita durante a pega.
- c. Segunda retração: tem início no pós-pega e termina com a finalização da hidratação do cimento.

Sendo assim, conclui-se que a evolução da retração autógena em relação ao tempo está relacionada com a cinética de hidratação do cimento.

Jensen et al., (2004) mostram que a retração autógena em concretos de alta resistência se desenvolve rapidamente durante as primeiras 24 horas e é gerada através de mecanismos físicos e químicos que determinam o comportamento macroscópico das estruturas de concreto.



Alguns estudos indicam que valores típicos para a retração autógena variam de 40 a  $100 \times 10^{-6}$  metros.

### **2.2.2.1.2. Causas**

Aïtcin (1999) apud Hasparyk et al., (2005) afirma que as causas da retração autógena são as mesmas da retração por secagem, contudo com algumas diferenças significativas: “a retração autógena se desenvolve sem qualquer perda de massa, diferentemente da retração por secagem; a retração autógena se desenvolve de forma isotrópica dentro do concreto, enquanto a retração por secagem se processa da superfície para o núcleo do elemento; a retração autógena não desenvolve qualquer gradiente de umidade”.

Para Coutinho (1994) a retração autógena é causada pela passagem da água livre do interior das pastas de cimento, argamassas e concretos, devido à hidratação contínua do cimento, e que se verifica na ausência de trocas de umidade com o exterior.

De acordo com Aïtcin (1997), nos concretos de alto desempenho a relação água/aglomerante é bem pequena, em torno de 0,30. Uma pequena quantidade de cimento e água é utilizada na mistura, de modo que a rede de poros é essencialmente composta de capilares finos. Quando a auto-dessecação começa a acontecer, com o início da hidratação, os meniscos rapidamente se desenvolvem em pequenos capilares se não for acrescentada água externa. Como muitos grãos de cimento começam a hidratar-se simultaneamente no concreto de alto desempenho, a secagem de capilares muito finos pode gerar tensões muito altas que encolhem a pasta de cimento hidratada. Para esse encolhimento inicial dá-se o nome de retração autógena.

O fenômeno da retração autógena pode ser explicado ao se notar que o endurecimento progressivo do concreto se faz com a hidratação contínua dos componentes do cimento. Portanto é possível a expansão inicial ou permanente, quando há água em excesso, pois tudo se passa como se o concreto fosse conservado dentro da água, assim o cimento hidratado expande-se.

À medida que o tempo passa a água livre no interior dos poros do concreto vai diminuindo, decorrente da sua combinação com o cimento, até que os poros e

capilares começam a não estar saturados e o concreto fica conservado num meio com umidade relativa inferior a 100% (COUTINHO, 1994).

### **2.2.2.1.3. Fatores influentes**

Fatores que influenciam a retração autógena, segundo Persson (1998); Tazawa (1999) apud Hasparyk et al., (2005): a relação água/cimento ( $a/c$ ), a composição do cimento, o teor de sílica ativa, o volume do agregado e a temperatura de exposição.

- a. Relação água/(cimento + sílica ativa) e o teor de sílica ativa: a redução dessa relação gera um expressivo aumento na retração. Brooks et al., (1999) apud Hasparyk et al., (2005) explicam esse fato pelo aumento da tensão capilar da água dos poros. Contudo, Hasparyk et al., (2005) afirmam que essa explicação não é satisfatória e, os mesmos autores que a citaram propõem que: “a principal causa da retração autógena é a grande diferença de concentração iônica entre a água dos poros e a água adsorvida na frente de hidratação. A água se move pelo efeito de sucção devido a essa diferença de concentração e produz um aumento na tensão capilar, que provoca então a retração autógena”.
- b. Tipo de cimento: cimentos Portland comuns têm uma maior retração autógena do que um cimento Portland de médio calor de hidratação e um cimento rico em  $C_2S$ . A retração autógena também é maior em cimentos com adições de sílica ativa e escória, e menor naqueles com cinza volante, quando comparados com concretos sem adições (HASPARYK et al., 2005).

### **2.2.2.1.4. Previsão e medidas**

Medição da retração autógena: segundo Hasparyk et al., (2005), não existe no meio científico um consenso sobre padrões de ensaio, o que torna o processo de comparação de resultados e conclusões entre pesquisadores muito difícil. Contudo, de forma genérica, a retração autógena pode ser medida através de corpos de prova selados, dos quais a água é impedida de sair por meio da aplicação de tratamento na superfície dos corpos de prova.

Modelos de previsão: alguns modelos já foram propostos podendo-se destacar o de Tazawa (1999). Contudo, são modelos limitados, por não levarem em consideração as várias situações e condições da mistura do concreto (HASPARYK et al., 2005).

As medidas que podem ser tomadas para combater a retração autógena têm como propósito a redução das tensões causadas pelos meniscos criados pela auto-secagem. Um dos métodos consiste em hidratar a pasta com água externa, o outro em reduzir diretamente as tensões causadas pelos meniscos através de aditivos químicos misturados na pasta (JENSEN et al., 2004).

#### **2.2.2.1.5. Conseqüências e soluções**

Conseqüências da retração autógena em concretos de alto desempenho: segundo Hasparyk et al., (2005), o fenômeno provoca elevada fissuração, a perda de protensão, afeta a durabilidade do concreto e pode gerar problemas de ordem estética.

Possíveis soluções para o problema da fissuração nas primeiras idades devido à retração autógena: tentar diminuir as forças de tração no menisco criado pela auto-dessecação num sistema fechado. Isso, através da incorporação de aditivos químicos e a provisão de água externa para a hidratação da pasta (HASPARYK et al., 2005).

Soluções para combater a retração autógena estão sendo propostas, como por exemplo, a incorporação de agregados leves saturados, criando uma “cura interna”. Esses agregados irão atuar como reservatórios de água que liberam água quando a umidade relativa do concreto cai. Tudo isso para tentar impedir a auto-dessecação da pasta, que é a maior causa da retração autógena do concreto (TAKADA et al., 1999 apud HASPARYK et al., 2005).

Nesse trabalho fez-se o uso de adições minerais como substituição de parte do cimento para assim analisar a retração autógena. Essa substituição pode conduzir a muitos efeitos na retração autógena, dentre eles, segundo Gleise (2006):

- a. Diluição. Sabendo-se que menos cimento implica em menos cimento hidratado, a diluição deve conduzir a uma diminuição da retração autógena, pelo menos a curto prazo.

- b. Nucleação Heterogênea, processo físico que leva a ativação química da hidratação do cimento. Para certa idade a nucleação envolve mais cimento hidratado e, conseqüentemente, leva a uma maior retração.
- c. Reatividade dos aditivos minerais: leva a produção dos hidratos que são responsáveis por vários fenômenos que podem ter efeitos opostos: auto-secagem, levando um aumento da retração autógena, principalmente em pastas com sílica ativa; aumento da rigidez da pasta, que pode diminuir sua deformabilidade e a própria reação pozolânica, que produz os hidratos, pode afetar as mudanças de volume. Contudo, na literatura não existe um consenso sobre essas mudanças de volume (encolhimento ou inchamento).

#### **2.2.2.1.6. Influência das adições e temperatura na retração autógena**

As figuras a seguir mostram a variação da retração autógena influenciada pela temperatura e o uso de adições minerais.

Em concretos feitos sem adições minerais a retração autógena é maior a temperaturas mais baixas. Quando a escória de alto-forno é adicionada a retração autógena se desenvolve mais rapidamente em idades mais jovens e é maior a temperaturas mais altas. Ao adicionar a sílica ativa, a evolução da retração autógena se assemelha ao concreto feito sem adição mineral, contudo, ela é maior a temperaturas mais altas.

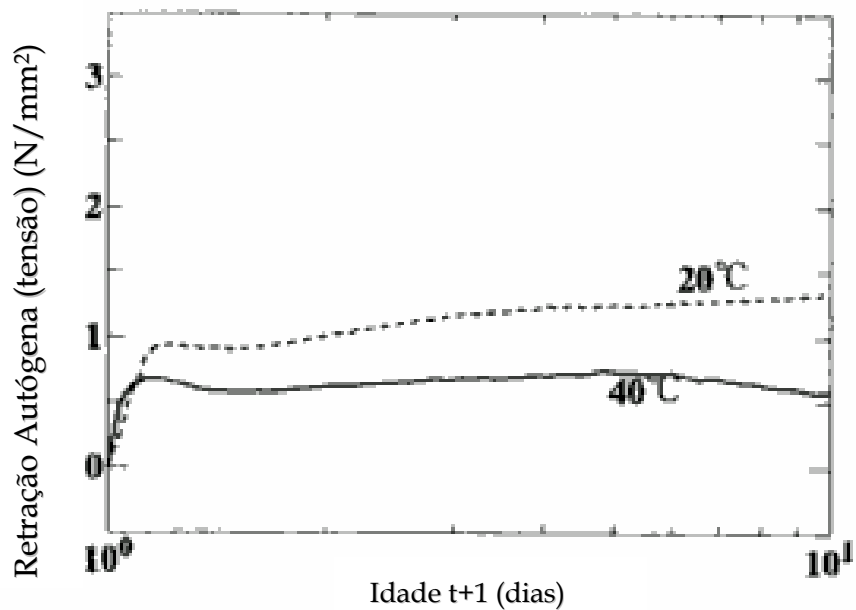


Figura 3 – Concreto feito com cimento Portland sem adição mineral (TAZAWA e KYŌKAI, 1999)

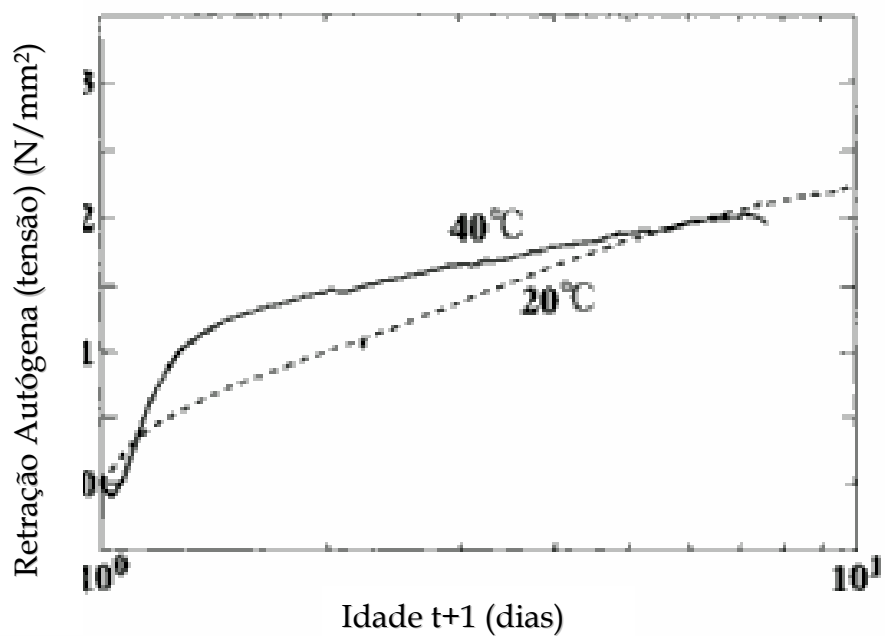


Figura 4 – Concreto feito com cimento Portland e escória de alto-forno (TAZAWA e KYŌKAI, 1999)

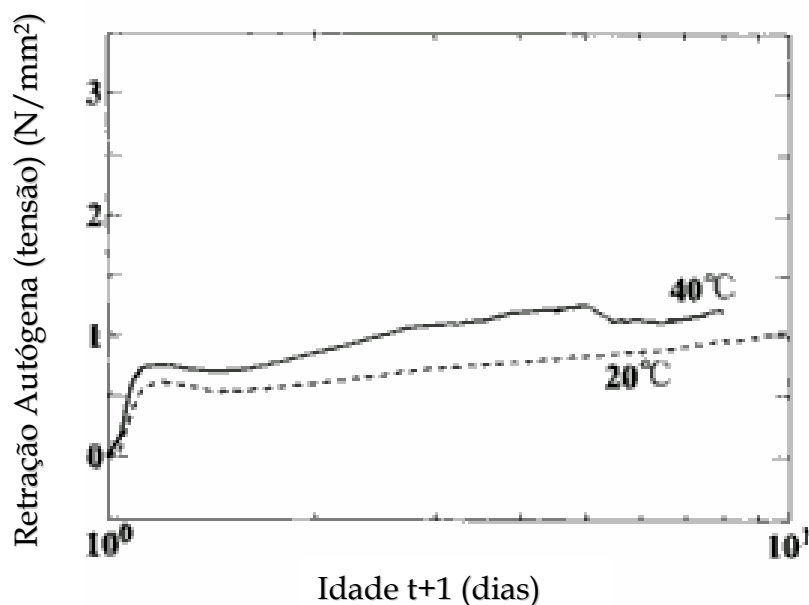


Figura 5 – Concreto feito com cimento Portland e sílica ativa (TAZAWA e KYŌKAI, 1999)

#### 2.2.2.2. Retração por secagem ou hidráulica

Balthar (2004) define a retração por secagem como um fenômeno inevitável em estruturas de concreto armado em ambientes cuja umidade está abaixo da condição de saturação, pois o fenômeno decorre devido à perda de água das estruturas de concreto para o ambiente.

De acordo com Coutinho (1994) as causas desse tipo de retração são devidas às movimentações da água que podem sair por evaporação ou entrar por capilaridade, permeabilidade ou ainda por condensação capilar.

Segundo Aïtcin (1997) a retração por secagem se inicia na superfície do concreto e progride com certa rapidez através do concreto, dependendo da umidade relativa do ar e do tamanho dos capilares. Em concretos comuns a secagem é rápida, pois a rede de capilares é bem ligada e contém capilares grossos. Ao contrário do que acontece em concretos de alto desempenho, cuja secagem é lenta, pois os capilares são muito finos e se desligam rapidamente.

Uma grande diferença entre a retração por secagem e a retração autógena é que a retração por secagem acontece da superfície para dentro e a retração autógena é isotrópica, suas propriedades existem independente da direção considerada. Esse tipo de retração acontece depois do fim da pega do cimento e ocorre devido à redução de volume causada pela evaporação da água dos poros do concreto.

Para Mehta e Monteiro (1994) a retração por secagem pode ser reversível. Alguns testes foram realizados e constatou-se que após 50 dias de secagem, o concreto ao ser submetido à molhagem, apresentou uma redução da retração em torno de 50%. Para Mehta a porção da retração irreversível é, provavelmente, resultado da formação de ligações químicas dentro da estrutura do C-S-H.

A maioria das fissuras causadas pela retração por secagem ocorre porque as peças estruturais estão restringidas durante condições de baixa umidade relativa do ar ao longo do tempo, sendo assim ela não fica livre para mover-se e descarregar as tensões. Além da aparência desagradável as fissuras causam um aumento na permeabilidade do concreto, reduzindo a durabilidade das estruturas. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

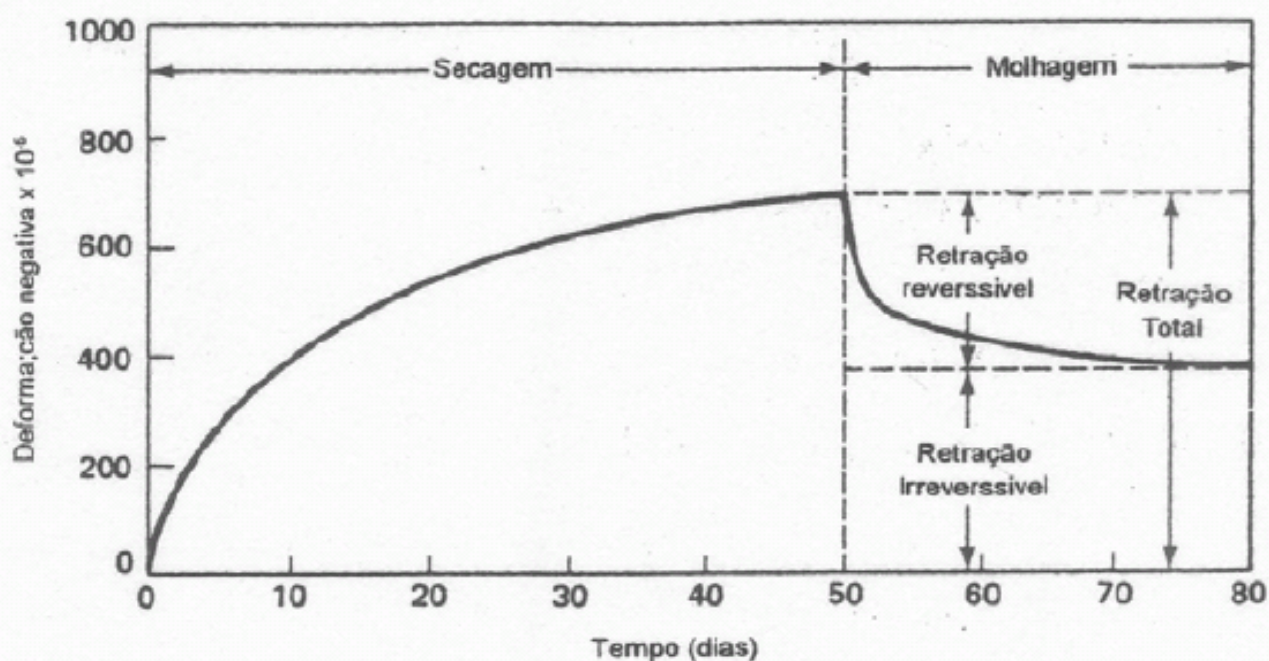


Figura 6 – Características da retração hidráulica ou por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

### 2.2.2.2.1. Fatores intervenientes

Muitos são os fatores que podem intervir na retração por secagem: a umidade relativa do ar, o teor de cimento e o fator água/cimento, o tipo de agregado utilizado, a geometria da peça de concreto, dentre outros.

#### a. Umidade relativa do ar

Segundo Neville (1997) apud Cruz Filho (2007) quanto maior a umidade relativa do ar, menor será a retração hidráulica. O concreto contrai-se quando executado em condições atmosféricas não saturadas e sofre expansão a uma umidade relativa de 100%.

O concreto perde umidade lentamente, mas absorve rapidamente a umidade do ambiente.

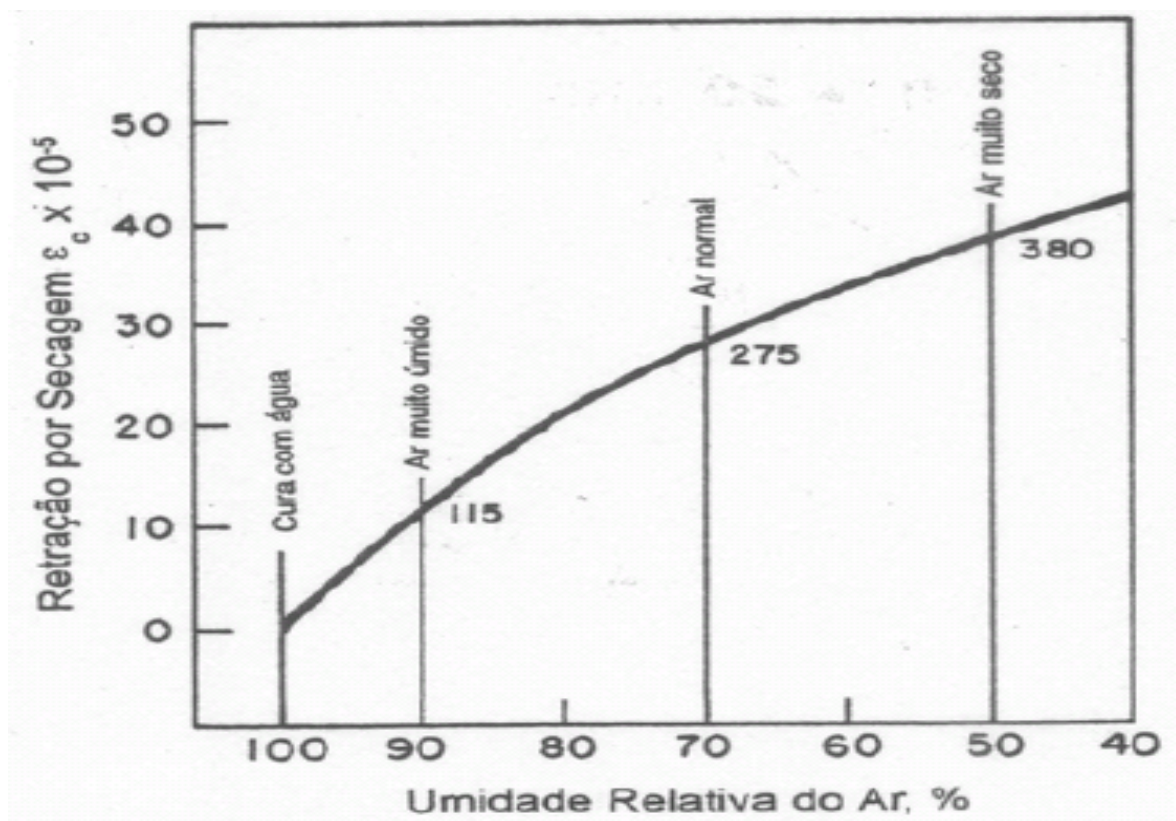


Figura 7 – Umidade relativa do ar como fator influente na retração por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994)



b. Tipo de agregado

Segundo Han e Walraven (1996) apud Tia et al., (2005) apud Cruz Filho (2007), os agregados afetam a retração do concreto através da demanda de água, da sua dureza, da concentração volumétrica e da interação entre pasta e agregado.

Andrade (1997) apud Cruz Filho (2007) acredita que o módulo de elasticidade do agregado, para concretos em geral, está ligado à retração hidráulica. Quanto menor o módulo de elasticidade do agregado, maior será a retração do concreto.

Para Andrade o tipo do agregado também propicia mudanças na retração. Já a granulometria e o tamanho dos grãos não têm influência direta sobre os valores da retração, contudo, o uso de agregados maiores permite que se use uma mistura mais pobre e dessa forma resultando em uma menor retração.

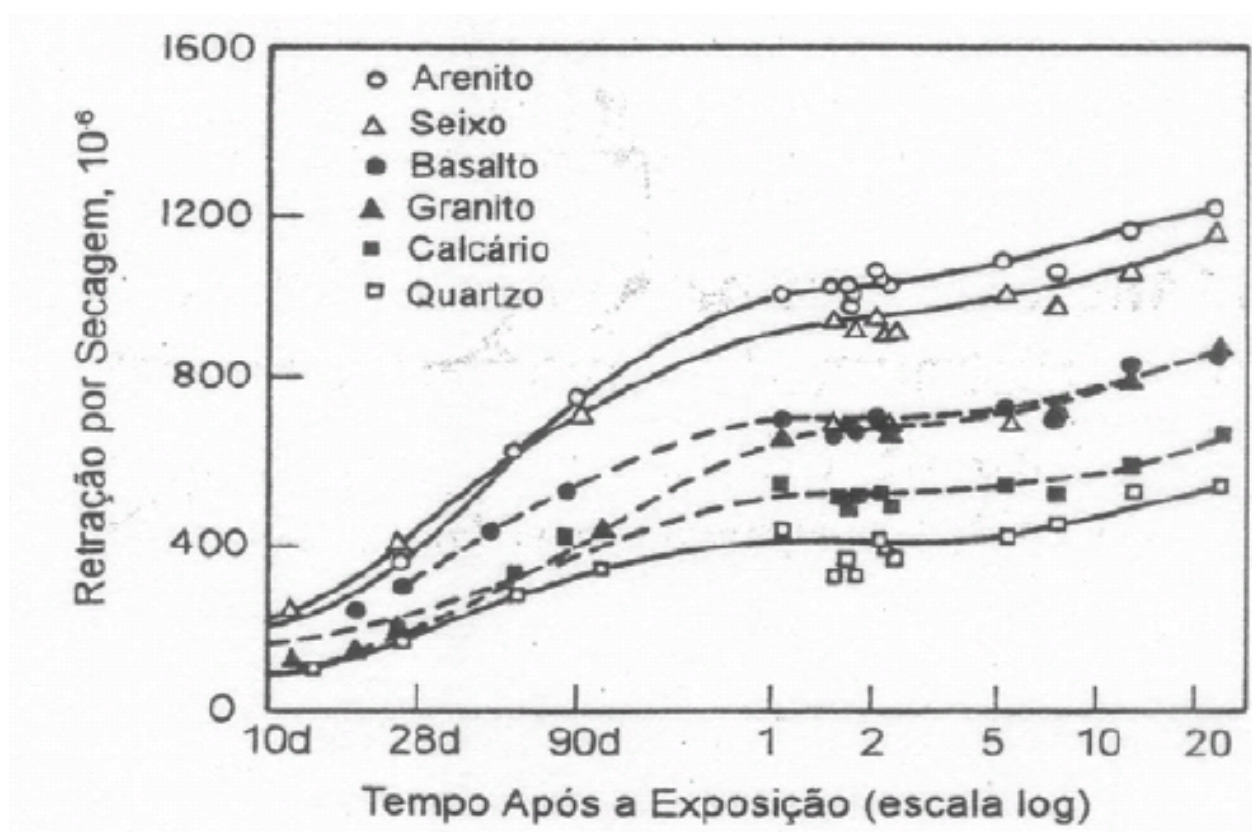


Figura 8 - Influência do tipo de agregado na retração por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

c. Consumo de cimento

De acordo com alguns estudos, quanto maior o consumo de cimento em uma mistura, maiores serão os valores da retração.

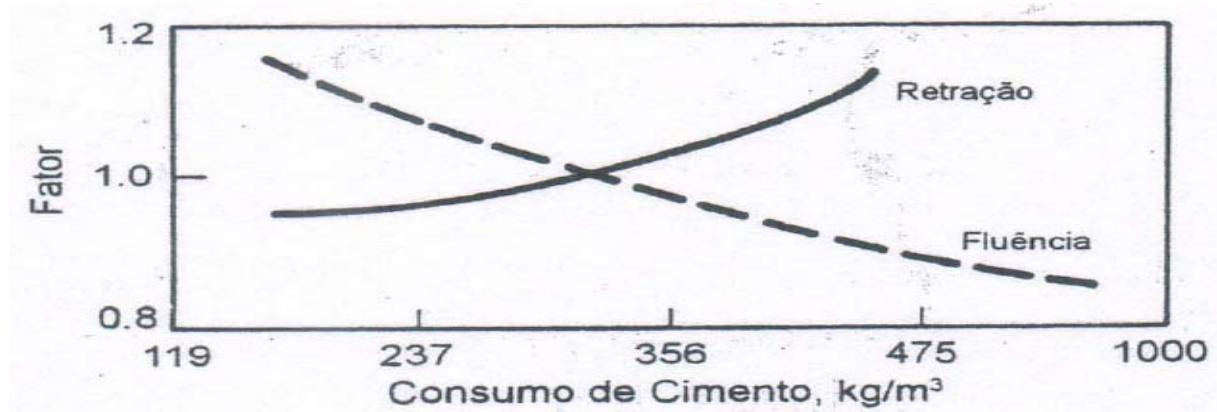


Figura 9 - Teor de cimento influenciando a retração (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

d. Geometria da peça

De acordo com Andrade (1997) apud Cruz Filho (2007) a retração diminui com o aumento das dimensões das peças. O tamanho e a forma da peça determinam a magnitude da retração.

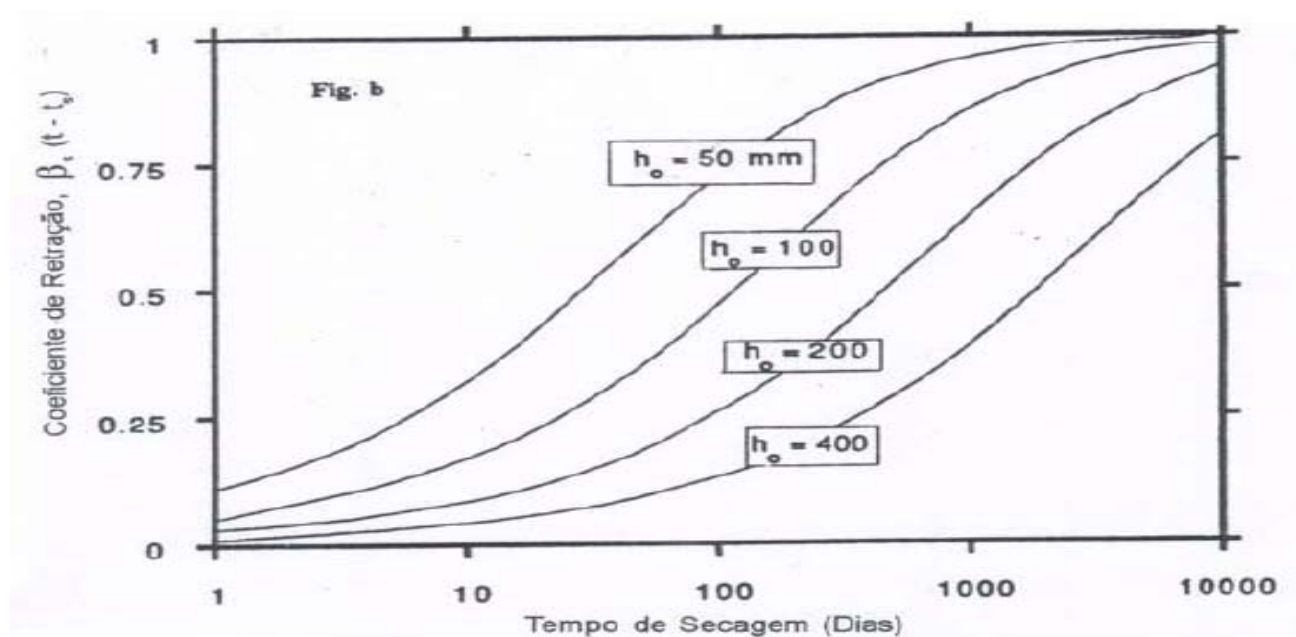


Figura 10 – Influência da geometria da peça na retração por secagem, onde  $h_0$  é a espessura fictícia. (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

### **2.2.2.3. Retração térmica**

É uma deformação devida à contração térmica que ocorre quando o concreto quente é resfriado à temperatura ambiente. Ocorre geralmente em elementos com grande volume de concreto. Ela tem origem após a ocorrência do pico de evolução da temperatura por acúmulo de calor de hidratação e ao sofrer aquecimento por uma fonte de calor externa (BALTHAR, 2004).

Esse tipo de retração se desenvolve após o concreto de alto desempenho sofrer a retração plástica e autógena, antes de ser submetido à retração por secagem.

Segundo o manual do DNER (1994) as fissuras causadas por retração térmica podem ter origem interna ou externa.

#### **2.2.2.3.1. Fissuras de origem interna**

As fissuras de origem interna estão associadas à liberação de calor das reações de hidratação do cimento que são exotérmicas. Essas fissuras ocorrem nas primeiras idades do concreto (entre 1 dia e três semanas após a concretagem), durante o processo de resfriamento do mesmo, que provoca a contração da peça, levando à fissuração.

Os fatores que influenciam esse fenômeno são: o alto calor de hidratação, o uso de formas muito isolantes e a concretagem por camadas de grande altura.

#### **2.2.2.3.2. Fissuras de origem externa**

A variação da temperatura ambiente provoca movimentação de contração e dilatação nas estruturas de concreto, que se impedidas, levam à fissuração.

#### **2.2.2.4. Retração por carbonatação**

Causada pela reação da pasta de cimento hidratada com o dióxido de carbono no ar na presença de umidade.

De acordo com Helene e Andrade (2007), a Portlandita,  $\text{Ca(OH)}_2$ , é o composto mais susceptível à carbonatação.

Segundo Neville (1982) a retração por carbonatação é causada pela dissolução de cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  que se encontram sob tensão de compressão resultante da retração hidráulica, e pela deposição do  $\text{CaCO}_3$  em espaços não sujeitos a tensão; a compressibilidade da pasta de cimento é assim, aumentada temporariamente.

A seqüência de secagem e carbonatação afetam significativamente o valor total da retração. Carbonatação e secagem simultâneas produzem retração menor do que quando a secagem é seguida pela carbonatação.

Quando o concreto é submetido a molhagens e secagens alternadas em atmosferas contendo  $\text{CO}_2$ , a retração por carbonatação, durante os ciclos de secagens torna-se mais evidentes. A retração total, em qualquer estágio, é maior do que quando a secagem é feita em atmosfera isenta de  $\text{CO}_2$ , de modo que a carbonatação aumenta o valor da retração irreversível, contribuindo assim para a fissuração superficial generalizada (mapeamento) do concreto exposto.

Para Coutinho (1994) as causas da retração por carbonatação estão relacionadas à combinação do bióxido de carbono da atmosfera com os componentes hidratados do cimento, especialmente do hidróxido de cálcio, que origina produtos sólidos com volume inferior à soma dos volumes do bióxido de carbono com os componentes hidratados.

## **2.3. Ensaio realizados em corpos-de-prova de concreto (avaliados no presente trabalho)**

### **2.3.1. Resistência à compressão do concreto**

Helene (2005) define a resistência mecânica do concreto como o parâmetro mais freqüentemente especificado nas dosagens, sendo a resistência à compressão a mais utilizada, tida como o parâmetro principal de dosagem e controle de qualidade dos concretos.

Neville (1982) considera a resistência como uma propriedade fundamental do concreto.

Mehta e Monteiro (1994) dizem que a resistência é a capacidade do material resistir à tensão sem ruptura. O concreto é o material mais adequado para resistir à carga de compressão.

A fratura do corpo-de-prova no ensaio de tração, normalmente significa ruptura. Entretanto, no de compressão o corpo-de-prova é considerado rompido mesmo sem fratura visível.

O comportamento tensão-deformação pode ser dividido em duas partes: a deformação elástica (reversível) e a deformação plástica (permanente).

A resistência característica à compressão é estipulada pelo engenheiro projetista/calculista, para se projetar estruturas de concreto armado. É definida como valor de referência e adotada como base de cálculo (HELENE e ANDRADE, 2007).

Quando a idade não for indicada, as resistências referem-se à idade de 28 dias.

### **2.3.2. Resistência à tração por compressão diametral**

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é feito com os mesmos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão axial. Submetendo-os à ação das forças de compressão linearmente distribuídas e diametralmente opostas, surgem tensões de tração perpendiculares ao plano de ação da força. A distribuição dessas tensões é praticamente uniforme na região central (JACINTHO e GIONGO, 2005).

### **2.3.3. Módulo de elasticidade dinâmico do concreto**

O módulo de elasticidade é a relação entre a tensão e a deformação reversível e é afetado pela natureza do composto, fração volumétrica e características de seus constituintes.

O conhecimento do módulo de elasticidade é de fundamental importância para a análise das deformações ocorridas em estruturas de concreto. Os elementos estruturais devem ser projetados para sofrer pequenas deformações, que não ultrapassem os valores de tensão-deformação correspondente à deformação elástica, embora o concreto não seja um material tipicamente elástico para qualquer estágio de carregamento a que esteja submetido.

O módulo dinâmico de deformação corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e é dado, aproximadamente, pelo módulo tangente inicial, que é o módulo da tangente para uma reta traçada desde a origem. Este módulo é geralmente 20, 30, 40 por cento maiores do que o módulo estático de deformação para concretos de alta, média e baixa resistências, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville (1982), a determinação do módulo dinâmico do concreto é através de uma vibração longitudinal na frequência natural.

Para Coutinho (1994) pode-se definir o módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade da propagação de ondas ultra-sonoras, ou da determinação da própria

freqüência de vibração de um corpo-de-prova de concreto com forma geométrica bem definida.

Durante a vibração do corpo-de-prova a tensão aplicada é desprezível, sendo assim o módulo de elasticidade dinâmico refere-se a um efeito puramente elástico, não sendo, portanto, afetado pela fluência. Por essa razão o módulo de elasticidade dinâmico é mais próximo do módulo de elasticidade tangente na origem num ensaio estático muito rápido, e assim maior do que o módulo secante.

A análise dinâmica pode ser um importante procedimento para a avaliação e a verificação da integridade e da segurança das estruturas de concreto, ou seja, uma maneira de identificar e localizar danos, além de detectar mudanças na sua deformabilidade.

O ensaio dinâmico fornece os valores de freqüência, cujas variações podem ser utilizadas para identificar a presença e a magnitude do dano e determinar a rigidez equivalente de peças já fissuradas.

As alterações nas condições da estrutura, ao longo da sua vida útil, podem ser analisadas por meio de monitoramento dinâmico realizado em determinados intervalos de tempo, de forma a atender os limites estabelecidos em normas, tanto para a capacidade última do elemento como para a garantia do comportamento adequado em serviço e da durabilidade da estrutura.

As medidas obtidas em ensaios dinâmicos podem indicar a evolução do processo de microfissuração do concreto, mesmo em estágios iniciais do carregamento. Essa modificação na estrutura interna do material pode influenciar o valor da rigidez dos elementos da estrutura, aumentando sua deformabilidade (ALMEIDA et al., 2005).

Segundo Cánovas (1996) apud Rodrigues e Figueiredo (2005) com a determinação do módulo de elasticidade dinâmico é possível prever a resistência à compressão de uma estrutura de concreto, assim que estabelecida uma correlação baseada nos materiais utilizados na dosagem, o tipo de agregado, a condição de cura, dentre outros fatores.

### **2.3.4. Absorção**

O concreto é um material poroso, cujos vazios presentes são de origens diversas. Esses vazios são geralmente interligados, o que torna o concreto permeável a líquidos e gases (BAUER, 1994).

A absorção é o processo físico que o concreto possui em reter a água nos poros e capilares (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A absorção avaliada nesse trabalho foi através da absorção por imersão e da absorção por capilaridade.

### **2.3.5. Abrasão**

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o termo abrasão geralmente se refere ao atrito seco. A pasta de cimento endurecida não possui alta resistência ao atrito e a vida útil do concreto pode ser seriamente reduzida sob condição de ciclos repetidos de atrito. Quando existem condições severas de abrasão, recomenda-se que, além do uso de agregados de alta dureza, o concreto deve ser dosado para desenvolver resistência à compressão aos 28 dias de no mínimo 41 MPa e curado adequadamente antes da exposição ao ambiente agressivo.

A resistência à abrasão é uma característica importante nas superfícies sujeitas a movimentação de cargas. A destruição da estrutura do material acontece pelo rompimento dos grãos do agregado ou pelo seu arrancamento. Sendo assim, o uso de agregados mais duros e de maior tamanho dos seus grãos diminui o desgaste. A qualidade da pasta de cimento, bem como um acabamento superficial mais adequado, minimizando as asperezas, também contribuem para a diminuição dos desgastes. Pisos, pavimentos, túneis e vertedouros são exemplos de estruturas onde o concreto deve resistir a forças destrutivas de abrasão (BAUER, 1994).



### **2.3.6. Ultra-sonografia**

A ultra-sonografia é um ensaio não destrutivo que pode ser realizado em estruturas de concreto para determinação da sua resistência, sem que haja rompimento da mesma.

A facilidade na execução, baixo custo e confiabilidade de resultados faz com o que o ensaio de ultra-som seja um dos ensaios não destrutivos mais utilizados.

Este ensaio determina a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultra-sônicos através das amostras de concreto, tendo como principal objetivo verificar a compacidade do material.

Os aparelhos denominados de ultra-sons emitem ondas de pequenos comprimentos e freqüências correspondentes, superiores a 20Hz, acima do limiar da audição humana, eles convertem a energia elétrica em energia vibratória mecânica (BAUER, 1994).

O ensaio consiste, basicamente, em gerar um pulso ultra-sônico a partir de um excitador (cristal que produzirá vibrações na sua freqüência fundamental) localizado na base do transdutor. Estas vibrações serão transmitidas ao material como energia mecânica ou ondas de tensão.

A onda irá percorrer o corpo-de-prova e será captada por um receptor que irá transformar a energia mecânica novamente em sinal elétrico. O dado obtido do aparelho de ultra-som é o tempo que a onda levou para percorrer o corpo-de-prova. Como as dimensões do corpo-de-prova são conhecidas, calcula-se a velocidade da onda pela divisão do comprimento do mesmo pelo tempo.

Diversos fatores influenciam a velocidade de propagação da onda de ultra-som no concreto. Dentre eles o tipo, tamanho, origem e quantidade dos agregados graúdos, a relação água/cimento, a presença de aditivos, a qualidade do adensamento do concreto, as condições de cura e a presença de armadura no caminho de propagação.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

---

O presente trabalho consistiu em dosar, moldar e submeter corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos a testes mecânicos, avaliando comparativamente os resultados de acordo com a dosagem elaborada para diferentes adições.

Nesse capítulo estão descritos os materiais e os métodos utilizados.

A primeira parte aborda os materiais utilizados para a confecção dos corpos-de-prova de concreto e em seguida é apresentada metodologia de trabalho.

#### 3.1. Materiais

O aglomerante utilizado para se produzir o concreto desse trabalho é o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI).

Segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991), o cimento CP V - ARI é definido como o “aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos, no teor especificado”. Ver tabela 5 com esses teores.

Tabela 5 - Teores dos componentes do cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733, 1991)

Sigla	Componentes (% em massa)	
	Clínquer + sulfatos de cálcio	Material Carbonático
CP V – ARI	100 – 95	0 – 5

O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V - ARI) deve atender às seguintes características da tabela 6, de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991):

Tabela 6 - Exigências físicas e mecânicas (NBR 5733, 1991)

Características e propriedades		Unidade	Limites
Finura	Resíduo na peneira 75 $\mu\text{m}$	%	- 6,0
	Área Específica	$\text{m}^2/\text{kg}$	- 300
Tempo de início de pega		H	- 1,0
Expansibilidade a quente		mm	- 5,0
Resistência à compressão	1 dia de idade	MPa	- 14,0
	3 dias de idade	MPa	- 24,0
	7 dias de idade	MPa	- 34,0

O agregado graúdo utilizado nos ensaios é a pedra britada de rocha calcárea (Brita 1).

O agregado miúdo utilizado nos ensaios é a areia quartzosa natural.

O aditivo utilizado nesse trabalho foi um superplastificante de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, o policarboxílico, isento de cloretos e desenvolvido para concreto em geral, especialmente para indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requer maior durabilidade e desempenho.

As adições utilizadas foram: metacaulim, escória granulada de alto-forno de dois tipos e sílica ativa.

A escória de alto-forno do tipo 1 é uma escória ácida, proveniente de Sete Lagoas, em Minas Gerais. Algumas de suas características são:

- Blaine: 390 m<sup>2</sup>/mg

- Módulo CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,02

A escória de alto-forno do tipo 2 é uma escória básica, proveniente da empresa Belgo Mineira, em Minas Gerais, cujas características são:

- Blaine: 420 m<sup>2</sup>/mg

- Módulo CaO/SiO<sub>2</sub> = 1,31

## **3.2. Métodos**

### **3.2.1. Execução do ensaio**

Primeiramente, os traços utilizados na fabricação do concreto estudado foram definidos baseados nos Parâmetros de Dosagem de Concretos propostos pela Associação Brasileira de Cimento Portland no ET-67 (ABCP, 1995).

Misturas binárias e ternárias envolvendo o cimento CP V – ARI, a sílica ativa, as escórias granuladas de alto-forno e o metacaulim foram realizadas nesse trabalho.

A mistura de referência analisada foi realizada apenas com o cimento CP V como aglomerante.

A tabela 7 apresenta as porcentagens analisadas nos traços dosados em relação ao concreto referência (Traço 1) com 100% de cimento, baseando-se assim nessa porcentagem as demais adições.

Ambos os traços foram dosados com a mesma quantidade de brita e areia, conforme apresentado na tabela a seguir.

Tabela 7 - Traços dosados

	Traço 1 Referência C1	Traço 2 C2	Traço 3 C3	Traço 4 C4	Traço 5 C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto-Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto-Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

A trabalhabilidade ou consistência do concreto foi avaliada pelo abatimento do tronco de cone (slump test) e foi fixada neste estudo em  $100 \pm 10\text{mm}$ .



Figura 11 – Slump Test feito no laboratório de concreto da UFMG

A seqüência de mistura na betoneira do concreto estudado foi a seguinte:

- a. Coloca-se na betoneira o agregado graúdo e 20% da água;
- b. Coloca-se o agregado miúdo, o cimento ou cimento e as adições;
- c. Acrescenta-se o restante da água juntamente com o aditivo;
- d. Mistura-se por 10 minutos, avaliando minuto a minuto visualmente a uniformidade do concreto;



Figura 12 – Concreto sendo misturado na betoneira – Laboratório de Concreto da UFMG

Mede-se então a trabalhabilidade do concreto através do ensaio do tronco de cone, moldam-se a forma prismática 10x10x40cm da retração autógena e os corpos-de-prova em formas cilíndricas 10x20cm para a execução dos demais testes mecânicos.



Figura 13 – Forma para avaliação da retração autógena já com o isolamento em suas faces

### **3.2.1.1. Avaliação da retração autógena**

O molde para avaliação da retração autógena consiste em um aparato prismático de ferro em 4 (quatro) chapas e pequenos buracos nas 2 (duas) chapas das extremidades com diâmetros de 3 a 5 mm no centro de cada extremidade, para que os pinos de contato possam passar e serem fixados.

Os pinos de contato são utilizados como instrumento auxiliar na medição da retração onde os relógios comparadores estarão em contato para efetuar essa medição.

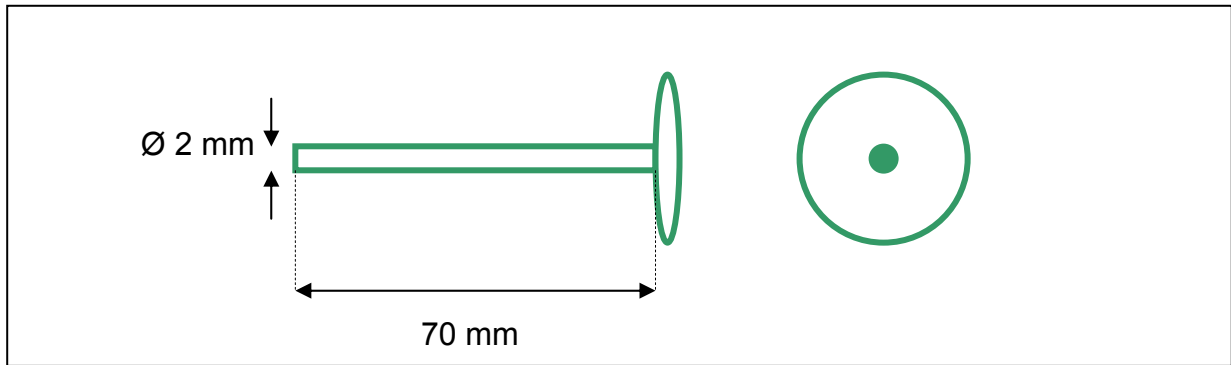


Figura 14 – Detalhe de um pino de contato

O procedimento para avaliação da retração autógena foi baseado no estudo de Tazawa (1999) e consiste em:

A forma é limpa adequadamente e isolada em suas extremidades com chapas finas de poliestireno, para evitar o contato do concreto com o aparato de ferro.

Os pinos de contato devem ser colocados observando a distância de  $30 \pm 5$  mm para dentro da forma.

O concreto é lançado cuidadosamente e vibrado em uma mesa vibratória.

Após uma hora da vibração e lançamento do concreto na forma da retração são colocados os relógios comparadores e assim liberados os pinos de contato para que o concreto possa se retrair e as medições possam ser realizadas.



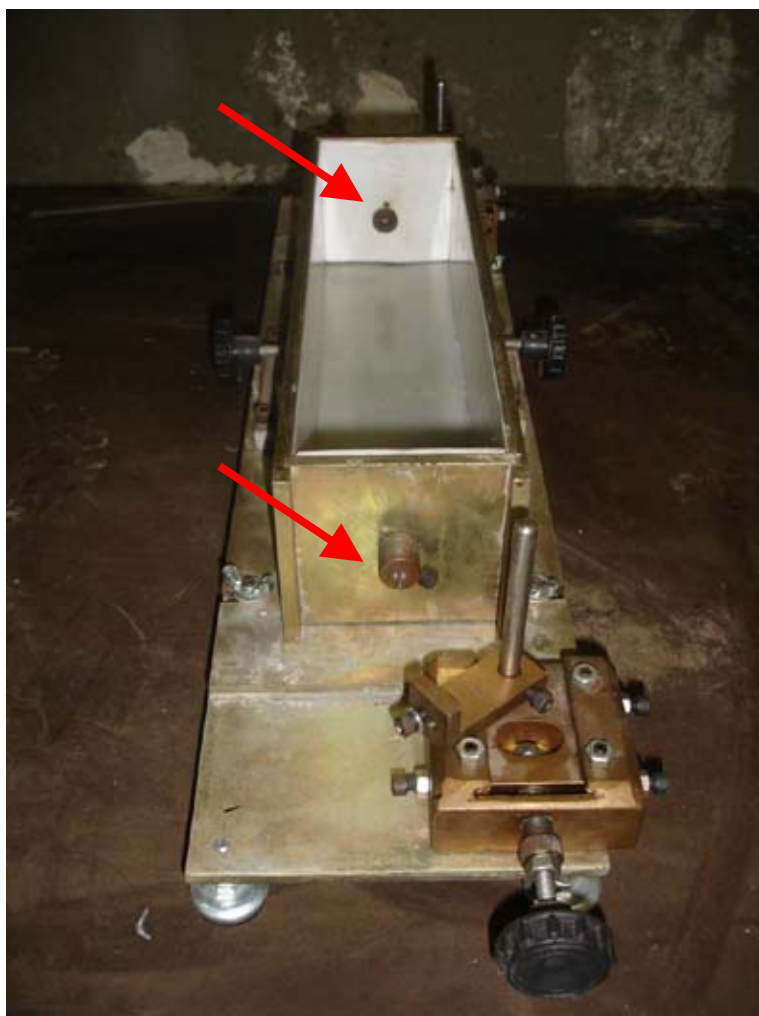


Figura 15 – Pinos de contato

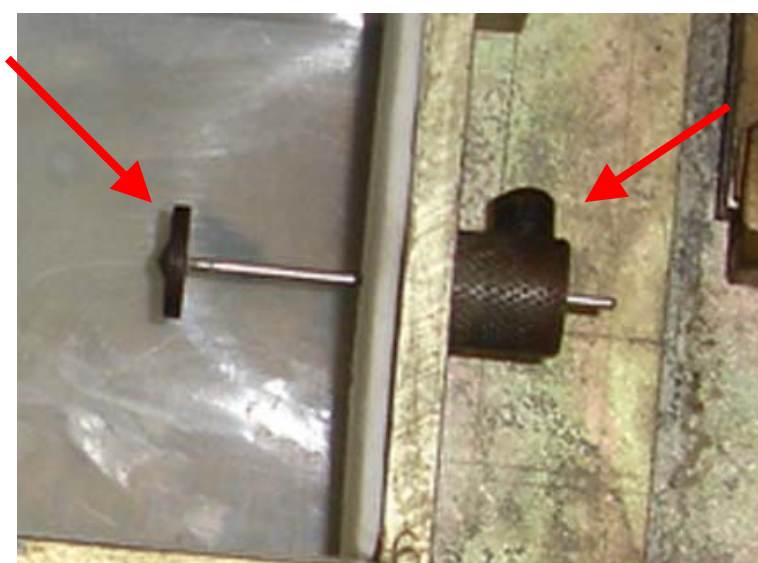


Figura 16 – Detalhe do pino de contato que será liberado após o início de pega para que o concreto retraia

Após a concretagem é feito o isolamento superior com a lâmina de poliestireno e coloca-se um pano úmido sobre ela para minimizar a perda de água para o ambiente.

As leituras da retração autógena são feitas nas primeiras 24 (vinte e quatro) e 48 (quarenta e oito) horas após a colocação dos relógios comparadores. A temperatura deve ser mantida entre  $20 \pm 2$  °C



Figura 17 – Fixação do relógio comparador na extremidade do pino de contato

## 3.2.2. Testes Mecânicos

### 3.2.2.1. Resistência do concreto

A avaliação da resistência à compressão dos concretos estudados foi feita para os 5 (cinco) traços dosados e moldados em formas para corpos-de-prova cilíndricos 10x20 cm, que foram rompidos aos 3, 7, 28 e 90 dias.

Os corpos-de-prova para resistência à tração por compressão diametral foram rompidos aos 28 dias para cada traço dosado.

A máquina utilizada foi uma prensa hidráulica informatizada com capacidade máxima de 2.000 KN e controle manual de velocidade de aplicação de carga com o curso útil do pistão de 25 mm.



Figura 18 – Prensa hidráulica utilizada no rompimento dos corpos-de-prova cilíndricos

### 3.2.2.2. Módulo de elasticidade dinâmico

Os ensaios do módulo de elasticidade dinâmico foram realizados com os mesmos corpos-de-prova utilizados no ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias.

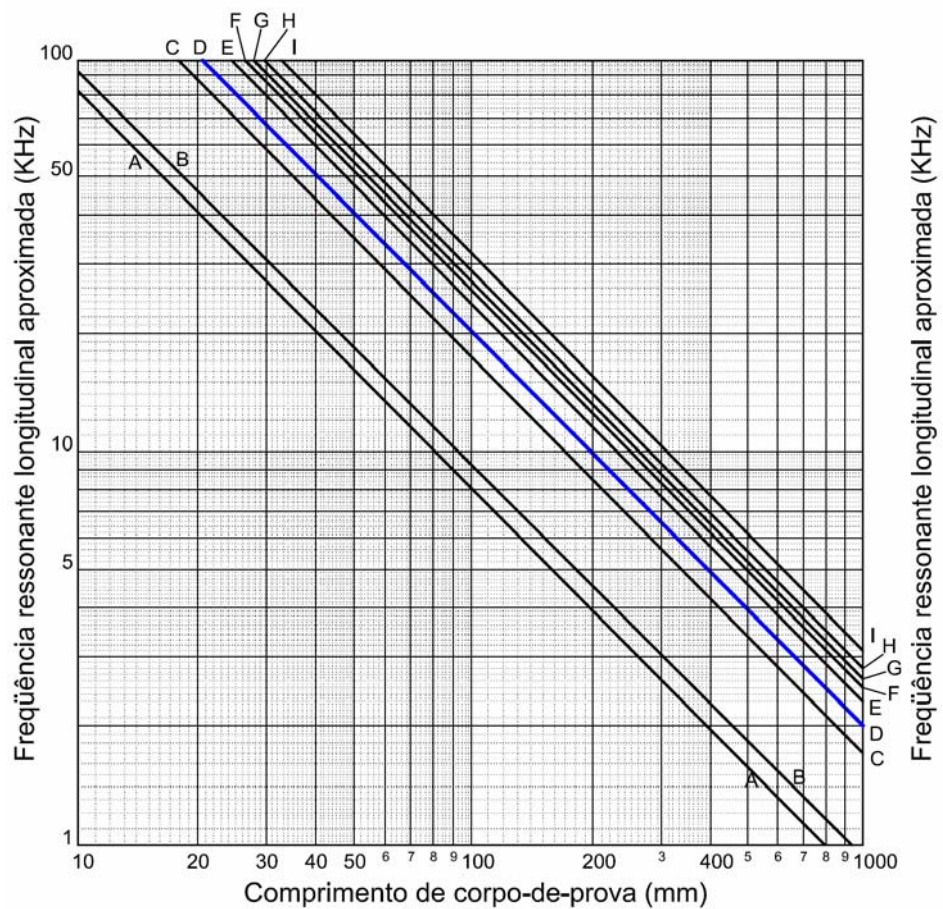
O equipamento utilizado no ensaio foi o Erudite MKII, que realiza um sistema de teste de freqüência ressonante, no modo longitudinal.



Figura 19 – Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico do corpo-de-prova de concreto

Para a determinação do campo de freqüência a ser utilizado foi adotado como valor de 10KHz de freqüência ressonante longitudinal aproximada para corpos-de-prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura conforme apresenta a figura 20.





A = Acetal

B = Acrílico

C = Latão

D = Ouro e Concreto

E = Cristal de chumbo, Ferro fundido e Tungstênio

F = Aço

G = Ligas de alumínio

H = Vidro

I = Carboneto de tungstênio

Figura 20 - Frequência ressonante longitudinal aproximada (BEZERRA, 2007).

Com base na frequência ressonante longitudinal aproximada, foram definidos valores de frequências para os extremos do campo de variação da frequência, frequência de início ( $F_s$ ) e frequência de término ( $F_e$ ). Com a determinação da frequência de vibração natural do material e com auxílio da equação 1 a seguir pode-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico.

$$E_D = 4n^2l^2\rho \times 10^{-12} \quad (1)$$

Onde,

$l$  = comprimento do corpo-de-prova em mm;

$n$  = frequência do modo fundamental da vibração longitudinal em Hz;

$\rho$  = densidade em Kg/m<sup>3</sup>.

### **3.2.2.3. Absorção por capilaridade e absorção por imersão**

Os corpos-de-prova foram imersos parcialmente aos 28 dias em um recipiente com lâmina de água de aproximadamente 10 mm, para verificação da permeabilidade de água por capilaridade nos poros do concreto como mostra a figura 21.

As pesagens das amostras foram realizadas após a colocação das mesmas na lâmina de água em 1, 2 e 3 horas. Após esse período as amostras foram colocadas na estufa e deixadas por 24 horas. Ao retirar as amostras da estufa elas são recolocadas na lâmina de água, fazendo-se as pesagens novamente em 1, 2 e 3 horas. Deixam-se então os corpos-de-prova na lâmina de água por mais 96 horas fazendo-se a pesagem após esse período.

Também aos 28 dias foi realizado o ensaio de absorção por imersão dos corpos-de-prova, que consiste em manter os mesmos por 6 horas em estufa para depois desse período realizar a pesagem das amostras e mantê-las imersas totalmente em um tanque de água, fazendo-se a pesagem final das amostras 24 horas após a imersão.



Figura 21 – Absorção por capilaridade. Corpo-de-prova em lâmina de água

#### **3.2.2.4. Abrasão**

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado nas amostras aos 28 dias. Foram cortadas amostras das partes superiores e intermediárias dos corpos-de-prova para serem submetidas ao atrito seco do teste de resistência à abrasão, conforme apresentado na figura 22.



Figura 22 – Ensaio de abrasão

### 3.2.2.5. Ultra-sonografia

O ensaio de ultra-sonografia, já explicado anteriormente foi realizado nos corpos-de-prova prismáticos moldados para a avaliação da retração autógena aos 28 dias.



Figura 23 – Prisma de concreto sendo submetido ao ensaio de ultra-sonografia



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Avaliação da retração autógena

A avaliação da retração autógena feita nas formas prismáticas e medidas por dois relógios comparadores chegou aos resultados que podem ser visualizados na figura a seguir:

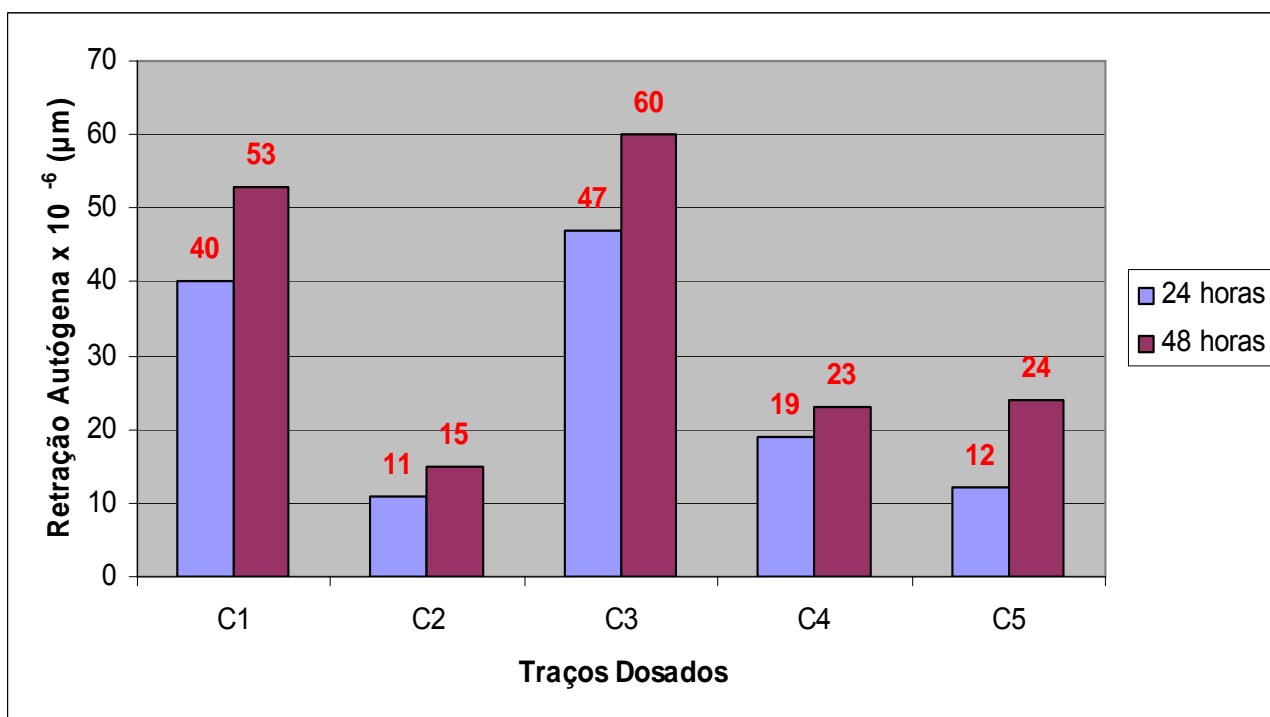


Figura 24 – Retração autógena dos 5 traços dosados

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

A partir da figura 24 é possível observar que:

- a. As medidas das retrações autógenas de C1 (concreto com 100% de cimento) e C3 (concreto com 91% de cimento e 9% de sílica) apresentaram comportamentos semelhantes, tendo como maior valor entre as misturas realizadas o concreto C3. Esse é um resultado esperado, uma vez que, segundo alguns estudos, a sílica ativa provoca um aumento na retração do concreto.
- b. As misturas ternárias entre o cimento, a sílica ativa e as escórias de alto-forno dos tipos 1 e 2 nos concretos C4 e C5 diminuíram as medidas da retração autógena se comparada ao concreto C3, apenas com a adição da sílica ativa. Conclui-se assim que a escória em conjunto com uma outra adição é benéfica no que diz respeito à retração.
- c. O melhor comportamento em relação à retração autógena se deu com a mistura ternária do concreto C2, que apresenta 40% de cimento, 10% de metacaulim e 50% da escória de alto-forno do tipo 1, o que também era esperado segundo as literaturas, que estabelecem que o metacaulim possa diminuir a retração autógena em concretos com idades jovens.

## 4.2. Ensaio de resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em dois corpos-de-prova cilíndricos para cada traço executado nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias.



Figura 25 – Corpo-de-prova rompido

A figura a seguir mostra os resultados do traço do concreto referência, que possui 100% de cimento, sem nenhuma adição.

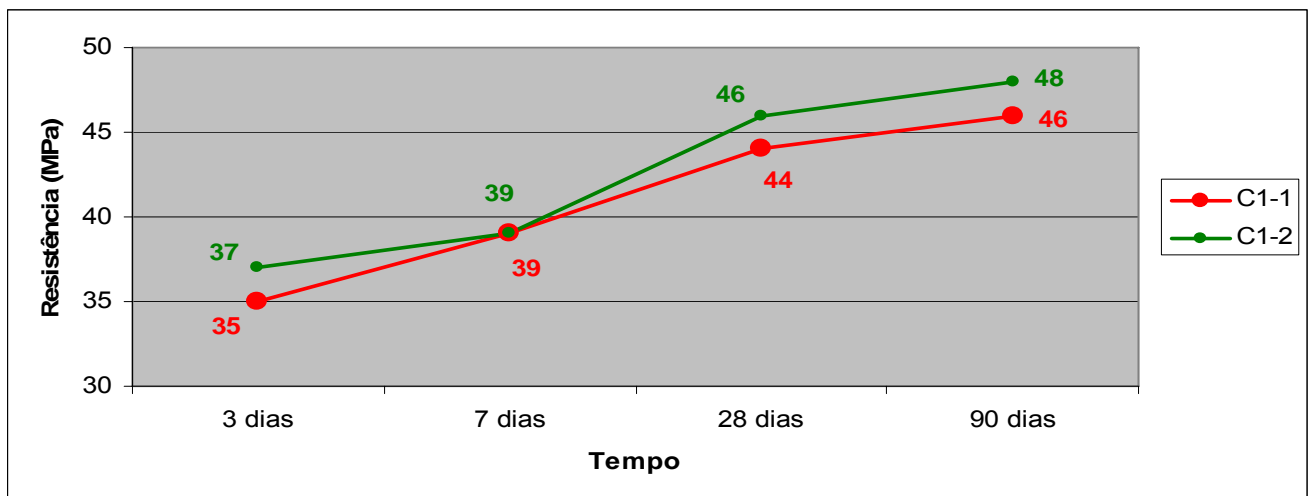


Figura 26 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do Concreto Referência – Traço 1 – C1:  
100% cimento

Os próximos resultados são dos traços dosados com as misturas binárias e ternárias das adições.

A figura 27 apresenta os resultados do traço 2 constituído de 40% de cimento, 10% de metacaulim e 50% de escória granulada de alto-forno do tipo 1.

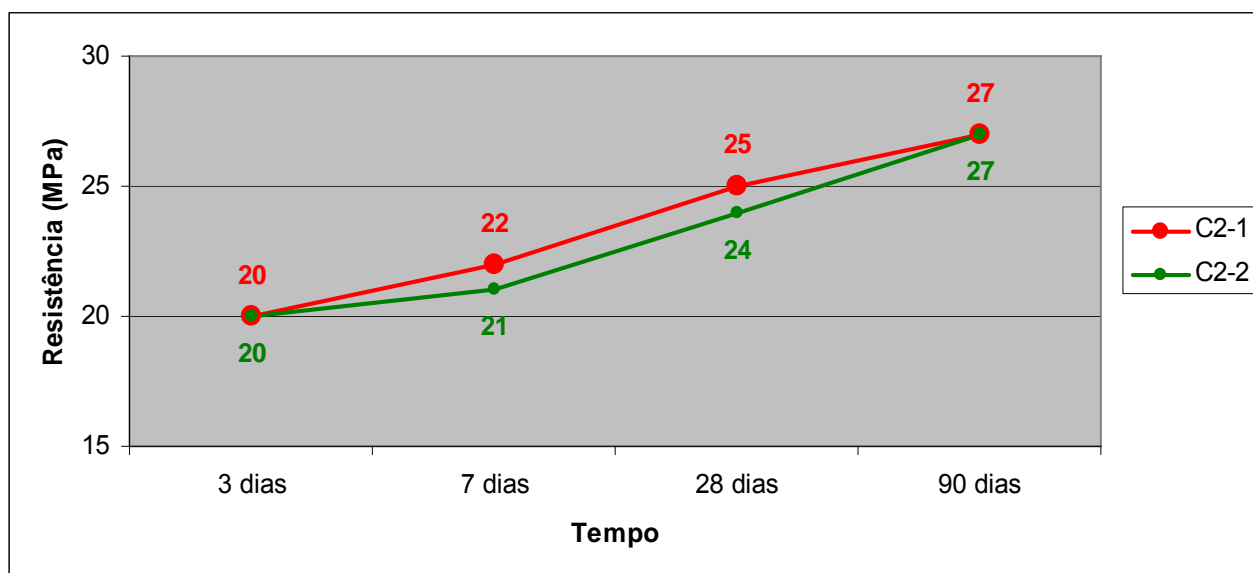


Figura 27 – Resultados do Traço 2 – C2: 40% de cimento, 10% de metacaulim, 50% escória do tipo 1.

A figura 28 apresenta os resultados do traço 3, constituído de 91% de cimento e 9% de sílica ativa.

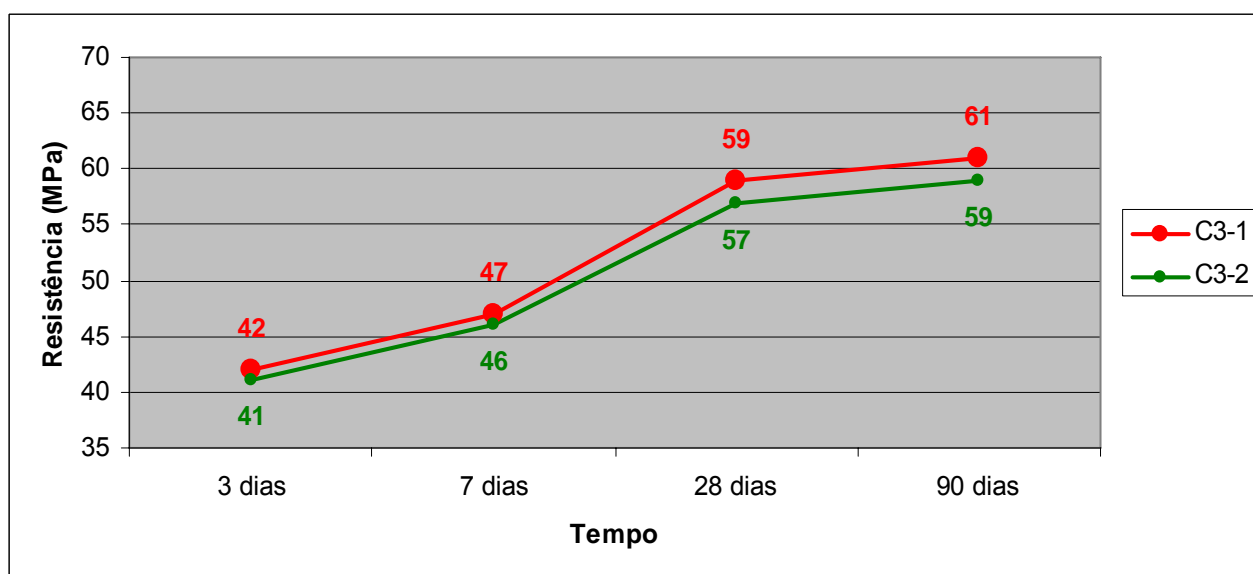


Figura 28 – Resultados do Traço 3 – C3: 91% de cimento, 9% de sílica ativa.

A seguir, na figura 29 são apresentados os resultados do traço 4, constituído de 61% de cimento e 9% de sílica ativa e 30% de escória de alto-forno do tipo 1.

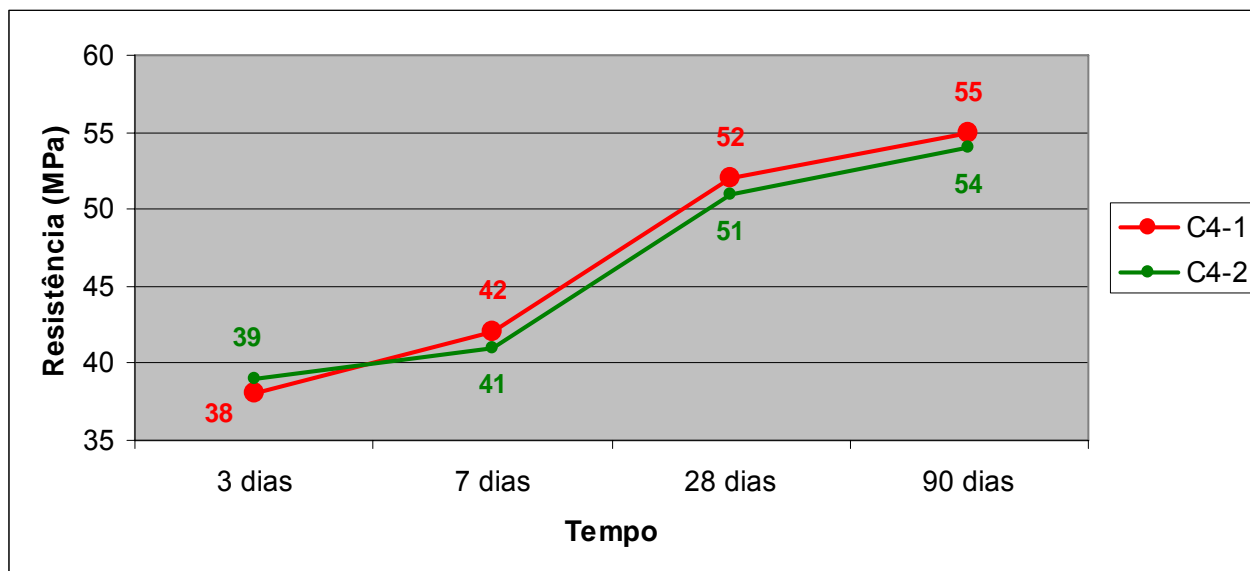


Figura 29 – Resultados do Traço 4 – C4: 61% de cimento, 9% de sílica ativa, 30% de escória do tipo 1.

Na figura 30 são apresentados os resultados do traço 5, constituído de 21% de cimento e 9% de sílica ativa e 70% de escória de alto-forno do tipo 2.

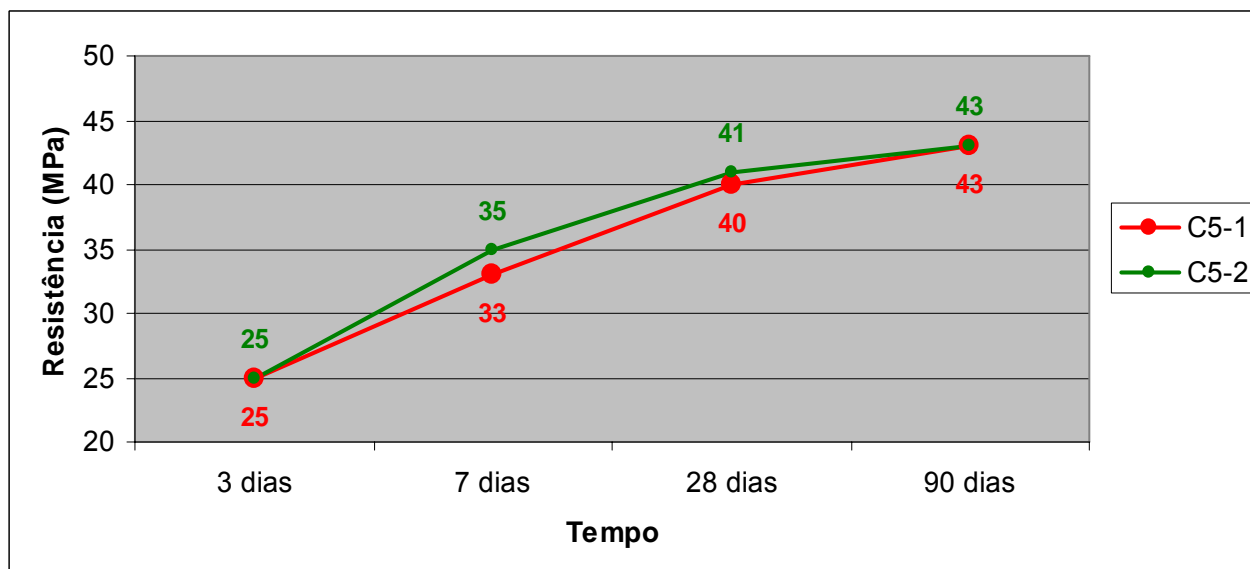


Figura 30 – Resultados do Traço 5 – C5: 21% de cimento, 9% de sílica ativa, 70% de escória do tipo 2.

Uma comparação da evolução das médias das resistências dos 5 (cinco) traços dosados é mostrada na figura 31 a seguir.

A tabela com a legenda dos traços também é apresentada para facilitar a identificação dos traços dosados com as diferentes adições.

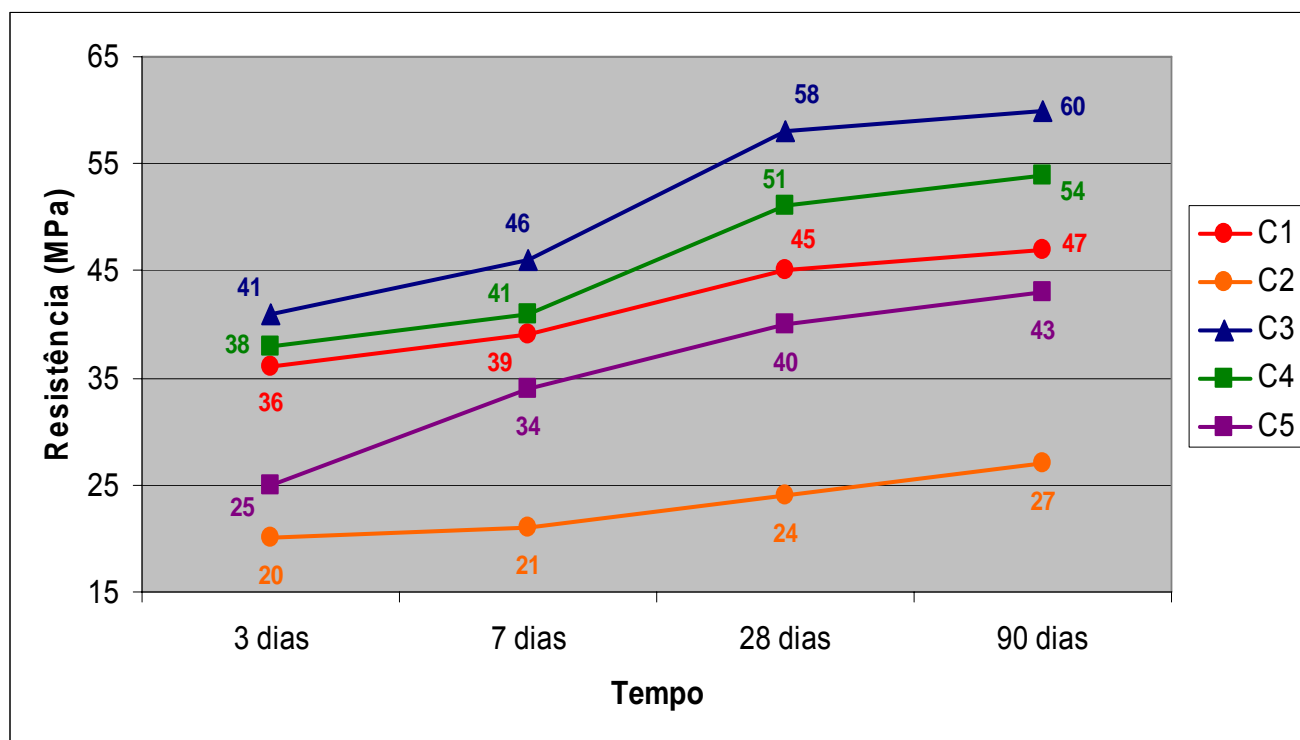


Figura 31 – Comparação das médias dos 5 traços

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

A seguir, na figura 32 são apresentados os resultados de resistência à compressão dos 5 traços dosados aos 28 dias.

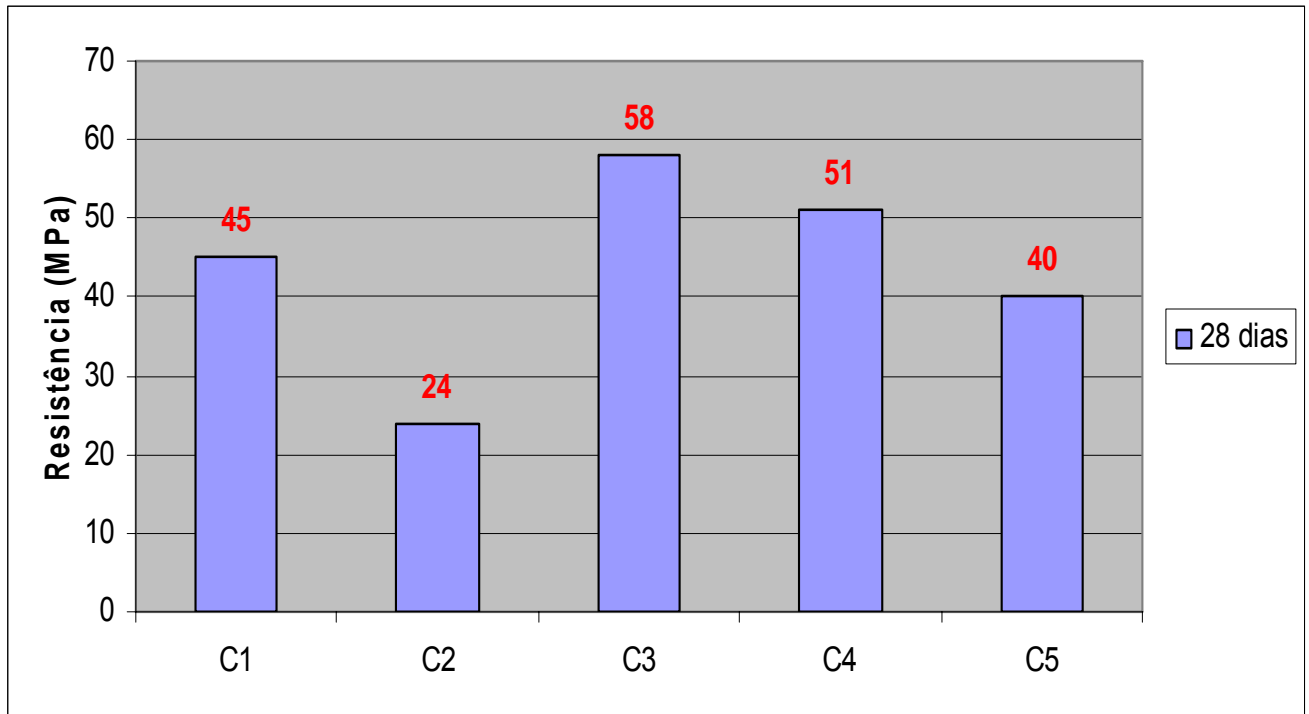


Figura 32 – Resistência à compressão aos 28 dias

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

Face aos resultados dos ensaios de resistência à compressão observa-se que:

- a. O pior comportamento frente à resistência à compressão foi da mistura ternária C2, que continha 10% de metacaulim, 40% de cimento e 50% de escória de alto-forno do tipo 1. Sabe-se que em uma mistura apenas com cimento e metacaulim a resistência à compressão tende a ser maior se comparada com concretos com 100% de cimento e sem metacaulim, pois o ele proporciona a formação de poros de tamanhos menores aumentando a resistência.
- b. O melhor comportamento para a resistência à compressão foi da mistura ternária C3 (91% de cimento e 9% de sílica) seguido da mistura binária C4 (61% de cimento, 9% de sílica e 30% de escória do tipo 1). Segundo alguns estudos, a sílica ativa tende a aumentar a resistência à compressão dos concretos, mas com o agravante de também aumentar a retração. Sendo assim, nesse caso a mistura C4 é a que apresenta o melhor comportamento entre as misturas com sílica por ter uma elevada resistência e uma baixa retração autógena.
- c. A mistura ternária do C5 (21 % de cimento, 9 % de sílica e 70% de escória do tipo 2) apesar dos valores de resistência à compressão terem sido inferiores ao concreto de referência (com 100% de cimento) apresentou um ótimo comportamento se considerada a pequena porcentagem de cimento utilizada.



### 4.3. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

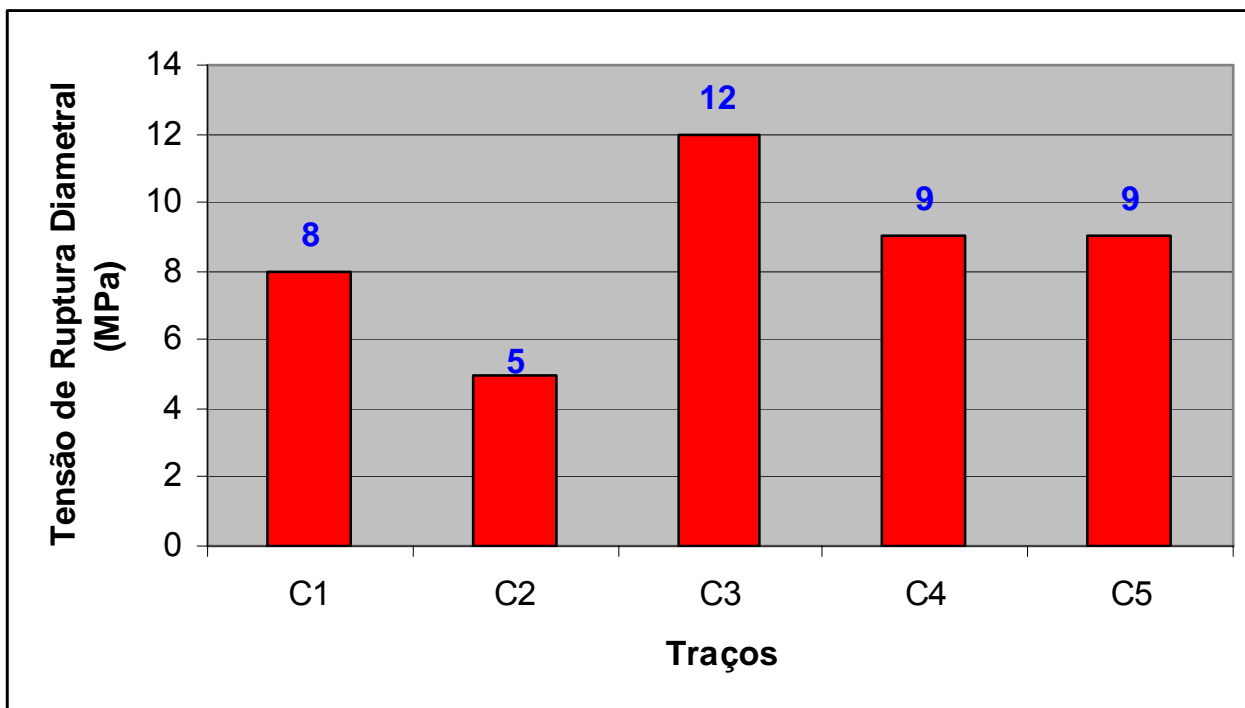


Figura 33 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

A maior resistência à tração por compressão diametral ocorreu no concreto C3 com misturas binárias de sílica e cimento. Seguido dos concretos C4 (61% de cimento, 9% de sílica e 30% de escória do tipo 1) e C5 (21% de cimento, 9% de sílica e 70% de escória do tipo 2), com comportamentos semelhantes e logo em seguida pelo C1 (referência). Já o pior comportamento frente à resistência à tração por compressão diametral foi da mistura ternária C2 de metacaulim, escória e cimento.

#### 4.4. Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias são apresentados a seguir:

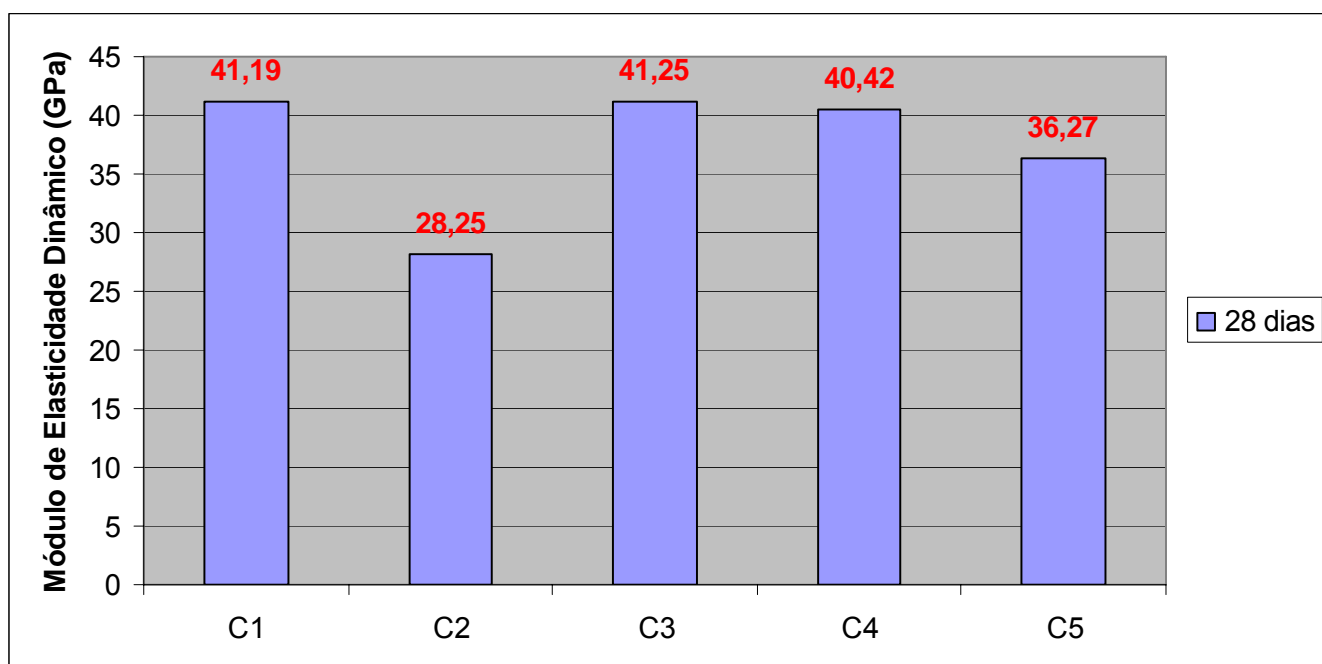


Figura 34 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

O comportamento do módulo de elasticidade dinâmico foi semelhante ao comportamento das misturas na resistência à compressão, tendo como maior módulo aos 28 dias a mistura C3 (91% de cimento e 9% de sílica ativa) e o menor módulo a mistura C2 (com 10% de metacaulim, 40% de cimento e 50% de escória de alto-forno do tipo 1).

A comparação entre o comportamento dos traços de concreto nos resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico e nos resultados do ensaio de resistência à compressão, ambos aos 28 dias, é mostrada na figura a seguir:

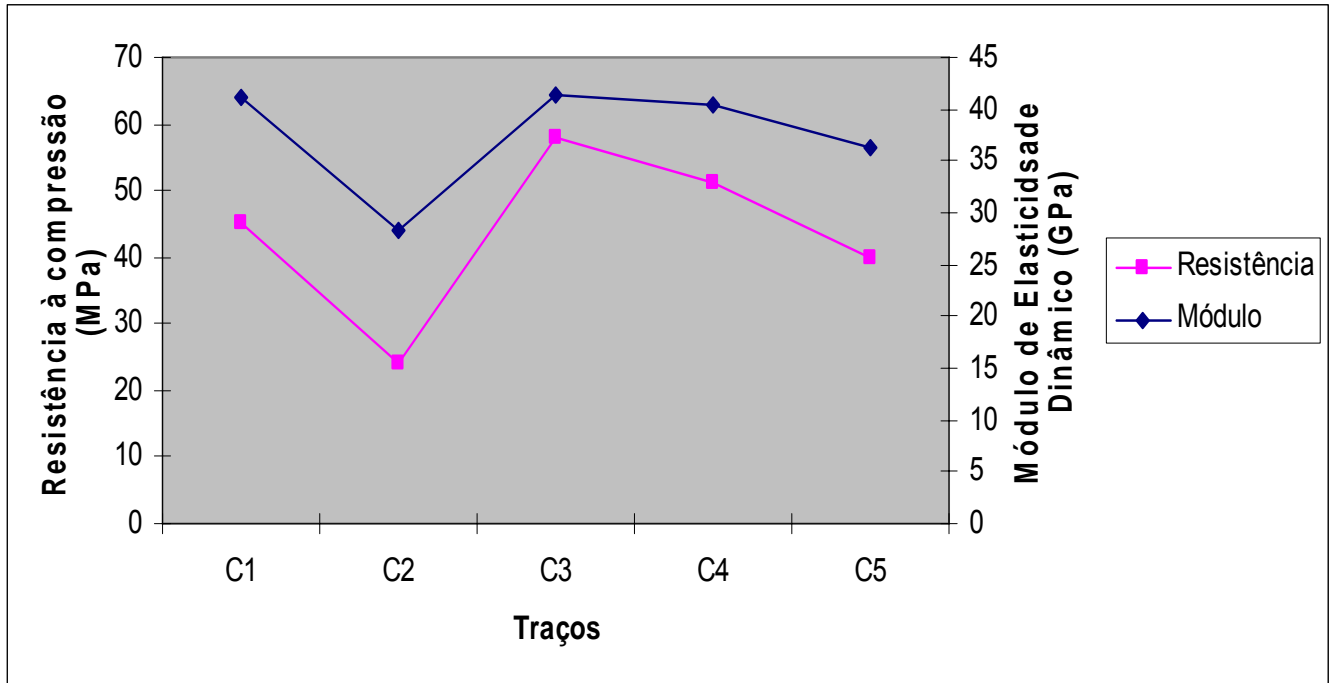


Figura 35 – Resistência à compressão x Módulo de elasticidade dinâmico - 28 dias

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

## 4.5. Ensaio de absorção

### 4.5.1. Absorção por capilaridade

#### 4.5.1.1. Antes da estufa

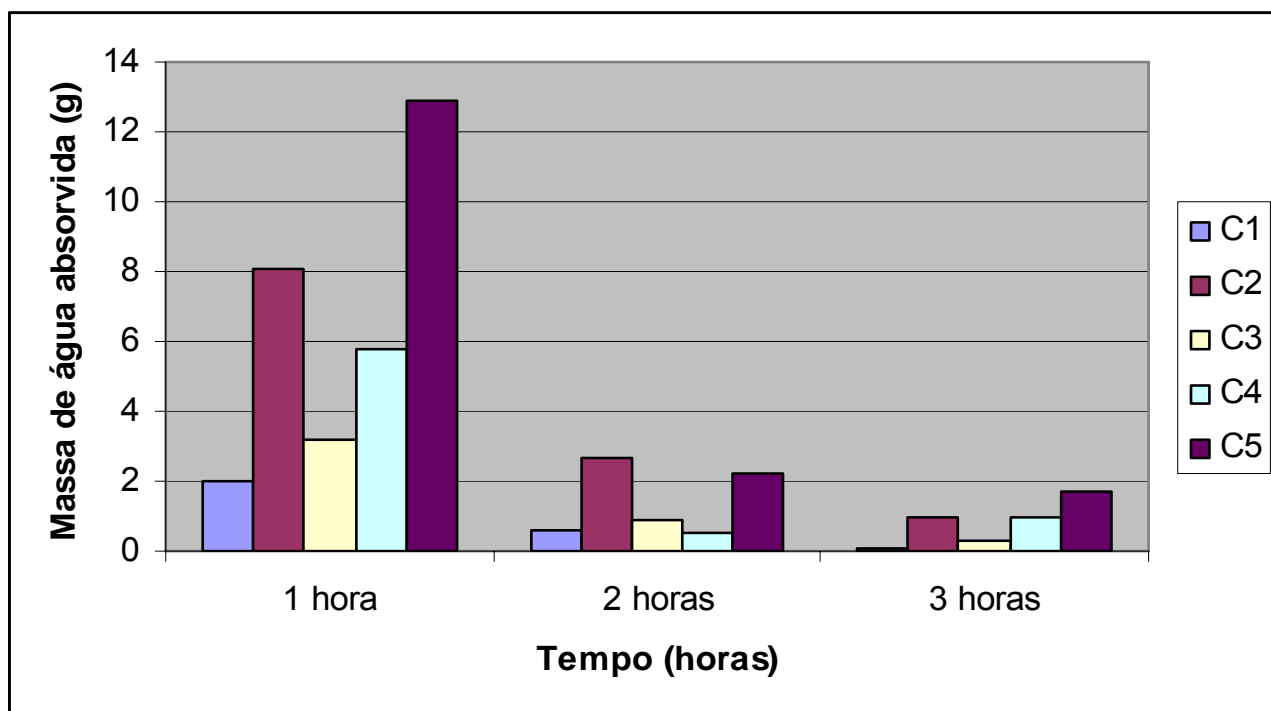


Figura 36 – Resultados da absorção por capilaridade dos corpos de prova antes de serem colocados na estufa

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

#### 4.5.1.2. Após a estufa

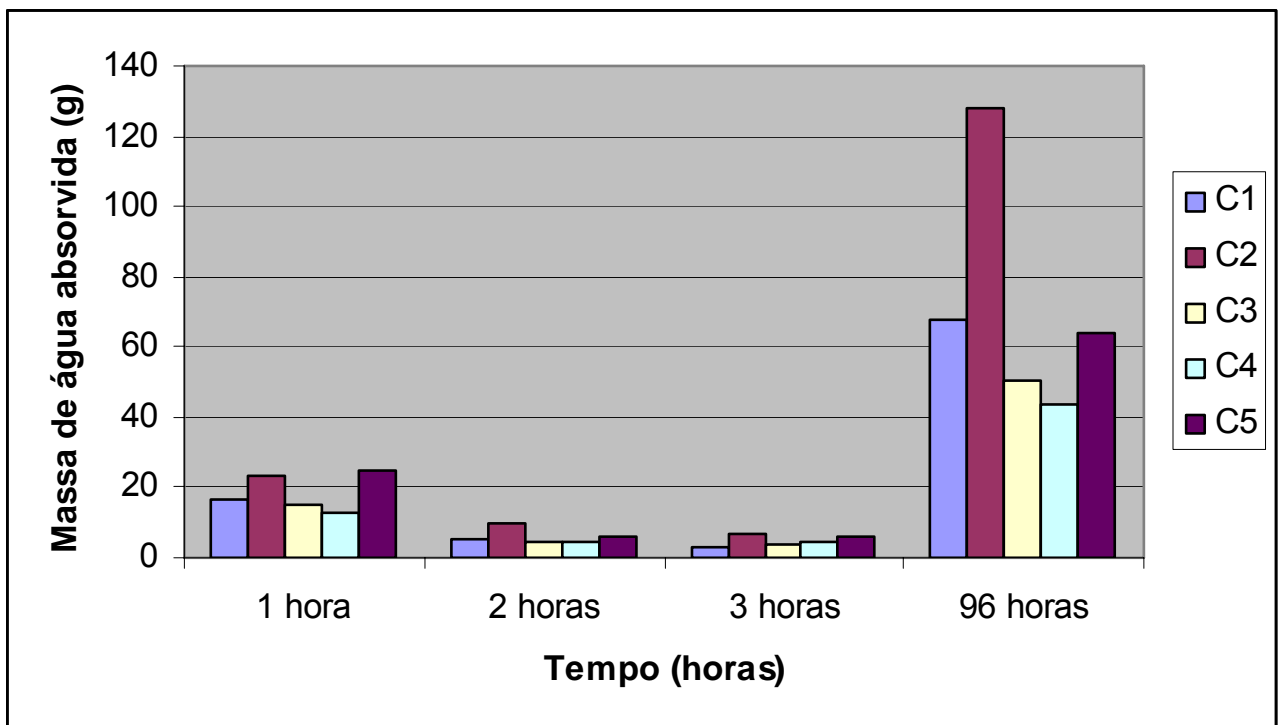


Figura 37 – Resultados da absorção por capilaridade dos corpos de prova após terem sido colocados na estufa

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

Face aos resultados observa-se que:

- a. Antes dos concretos serem colocados na estufa os que menos absorveram água nas 3 primeiras horas foram o C1 (referência) e o C3 (91% de cimento e 9% de sílica). De acordo com alguns estudos a sílica ativa ao ser adicionada promove uma menor absorção se comparada às outras adições, o que foi confirmado nesse trabalho.
- b. Os concretos que mais absorveram água por capilaridade antes de terem sido submetidos à estufa foram o C5 (21% de cimento, 9% de sílica e 70% de escória do tipo 2), seguido do C2 (10% de metacaulim, 40% de cimento e 50% de escória de alto-forno do tipo 1) e do C4 (61% de cimento, 9% de sílica e 30% de escória do tipo 1).
- c. Da mesma forma como na absorção por imersão, observa-se que quanto mais escória, mais o concreto absorve água por capilaridade.
- d. Após os concretos terem sido colocados na estufa os comportamentos foram semelhantes nas primeiras 3 horas.
- e. Depois de 96 horas, disparadamente, os concretos que mais absorveram água por capilaridade foram o C2 (10% de metacaulim, 40% de cimento e 50% de escória de alto-forno do tipo 1), seguidos do C1 (referência) e C5 (21% de cimento, 9% de sílica e 70% de escória do tipo 2), que tiveram comportamentos semelhantes.
- f. Os concretos que menos absorveram água por capilaridade após as 96 horas foram o C4 (61% de cimento, 9% de sílica e 30% de escória do tipo 1), seguido do C3 (91% de cimento e 9% de sílica).

## 4.5.2. Absorção por imersão

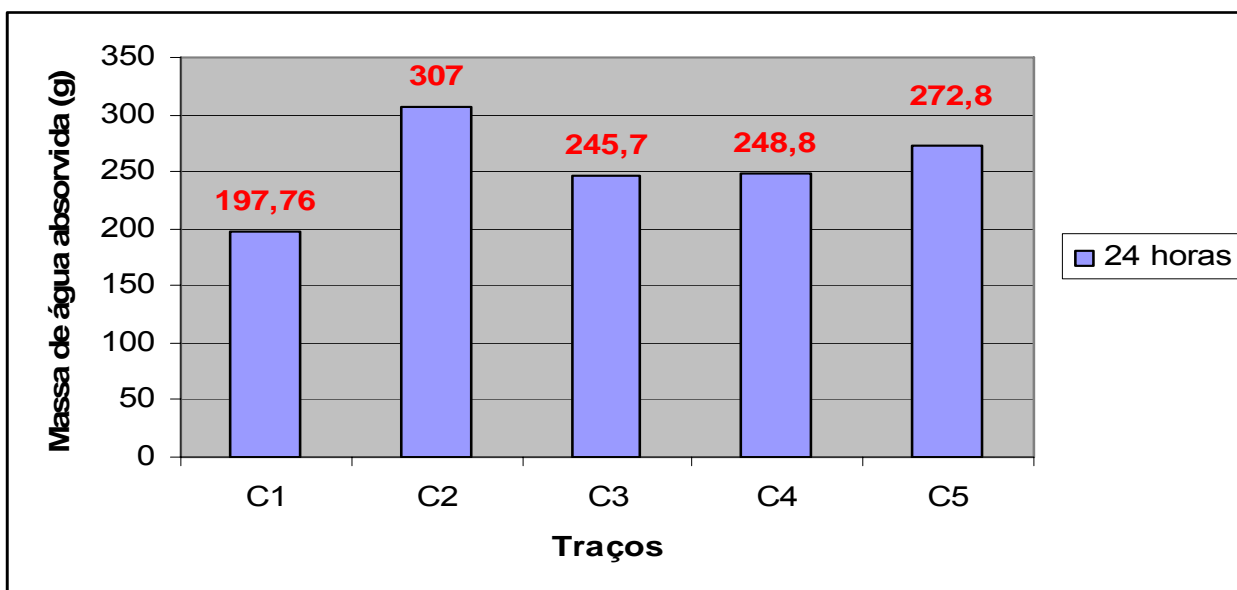


Figura 38 – Resultados dos corpos-de-prova imersos para avaliação da absorção

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

Face aos resultados pode-se observar:

- O concreto que menos absorveu água ao estar totalmente imerso foi o concreto referência C1 (100% de cimento). Já o que mais absorveu foi o C2, da mistura ternária entre metacaulim, cimento e escória, seguido do C5 (21% de cimento, 9% de sílica e 70% de escória do tipo 2). Já os concretos C3 e C4 tiveram comportamento semelhante.
- A conclusão que se pode chegar é que ao adicionar ambos os tipos de escórias nas misturas fazem com que a absorção por imersão seja maior.

## 4.6. Ensaio de Abrasão

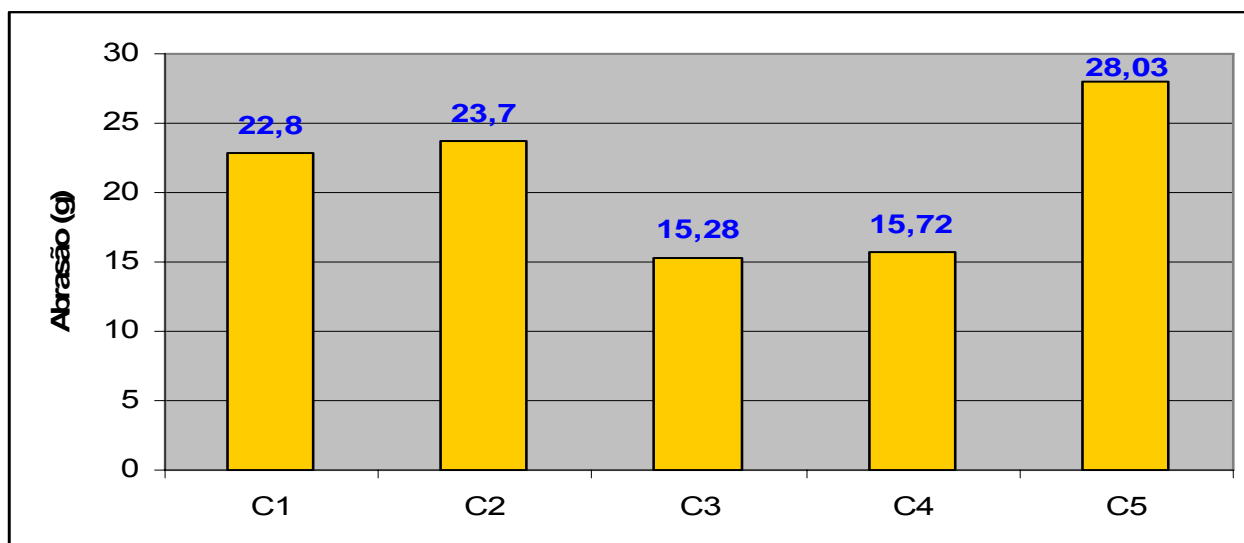


Figura 39 – Resultados do ensaio de abrasão

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

- A maior resistência à abrasão foi do concreto C5 (21 % de cimento, 9 % de sílica e 70% de escória do tipo 2) seguido do C2 (10% de metacaulim, 40% de cimento e 50% de escória de alto-forno do tipo 1) e do C1 (referência). De acordo com as literaturas o metacaulim tende a aumentar a abrasão quando comparado ao concreto referência, fato que foi observado nesse trabalho. Bem como, a utilização da escória do tipo 2 que fez a resistência à abrasão ser superior aos outros concretos.
- As menores resistências à abrasão foram as dos concretos C3 (91% de cimento e 9% de sílica) e C4 (61% de cimento, 9% de sílica e 30% de escória do tipo 1).



## 4.7. Ensaio de ultra-sonografia

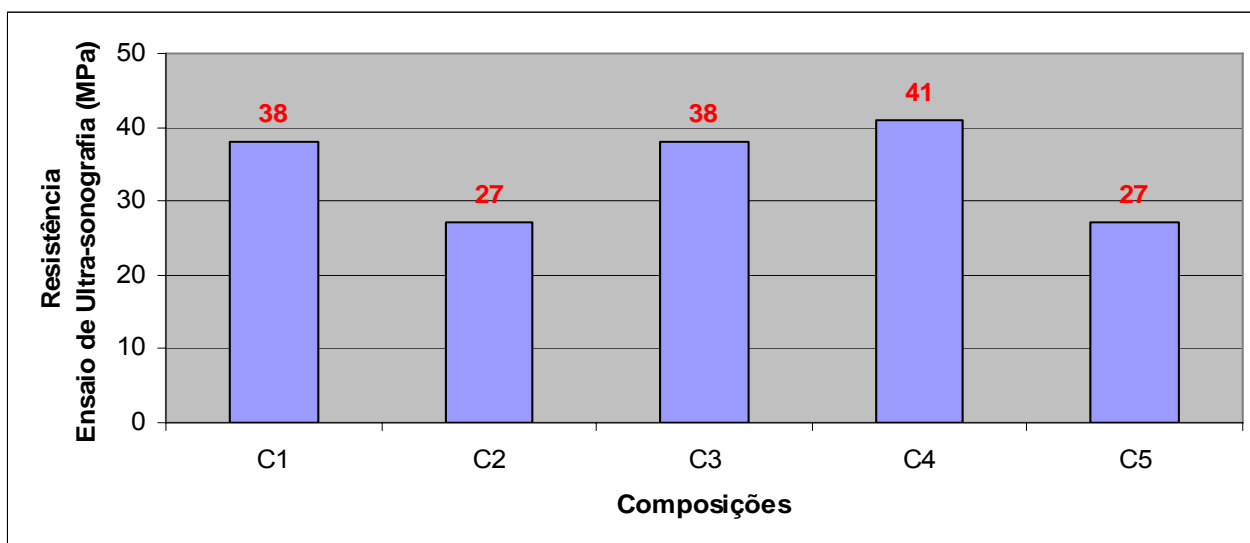


Figura 40 – Resultados do ensaio de ultra-sonografia

Insumos	C1	C2	C3	C4	C5
Cimento	100%	40%	91%	61%	21%
Metacaulim	0%	10%	0%	0%	0%
Sílica Ativa	0%	0%	9%	9%	9%
Escória de Alto Forno tipo 1	0%	50%	0%	30%	0%
Escória de Alto Forno tipo 2	0%	0%	0%	0%	70%
Brita nº1 (kg)	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Areia quartzosa natural (kg)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fator água/aglomerante	0,31	0,45	0,36	0,36	0,34

Face aos resultados da figura 40 foi possível correlacionar o tempo de propagação da onda ultrassônica, expresso em  $\mu\text{s}$  (microsegundos), e a retração expressa em  $\mu\text{m}$  (micrometro), cuja curva pode ser observada na figura 41.

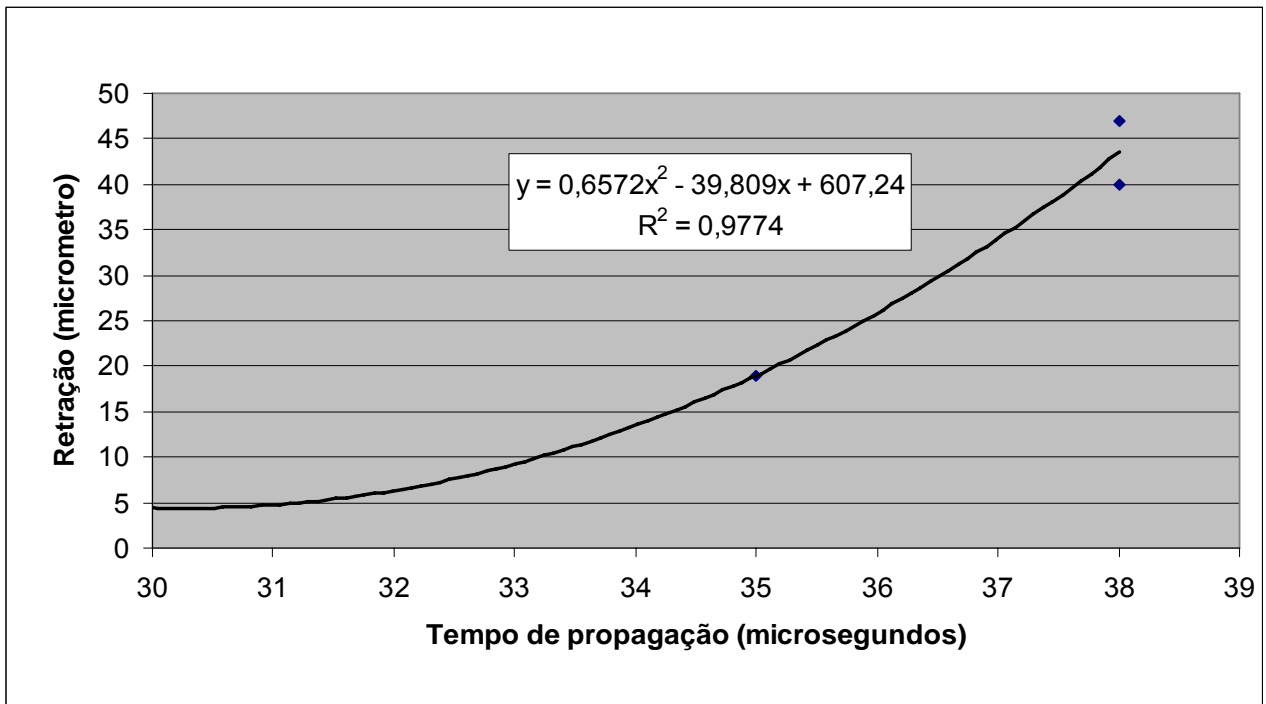


Figura 41 – Ultra-sonografia x Retração

Da figura 41 é possível verificar que existe uma proporcionalidade entre o tempo de propagação da onda ultrassônica e a retração registrada, fato considerado surpreendente e não referenciado na literatura, e que face ao pequeno número de amostras não é possível fazer uma análise estatística apurada da situação. Para complicar ainda mais uma eventual análise do comportamento observado, existem trabalhos citados na literatura mundial conclusivos e que apontam para a seguinte tendência:

- a. Quanto maior o tempo de propagação da onda menor será a resistência à compressão e menor a compacidade do concreto em questão;
- b. Quanto maior o tempo de propagação da onda indícios fortes da existência da presença de ninchos, vazios de concretagem ou trincas no concreto analisado.

Desta forma, infelizmente, a tentativa de se avaliar o comportamento da retração através do ensaio de ultra-sonografia, merecerá um trabalho de pesquisa específico neste sentido.

## 5. CONCLUSÕES

---

Após a realização do trabalho e face aos resultados obtidos concluiu-se de forma mais abrangente e geral que:

- a. O concreto com 10% de metacaulim, 40% de cimento e 50% de escória de alto-forno do tipo 1 (composição C2), apesar de ter dado a mais baixa retração autógena, foco principal desse trabalho, não se comportou bem no que diz respeito à resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico, pois os resultados foram inferiores aos demais concretos. Esse concreto também absorveu muita água, tanto por capilaridade, quanto por imersão.
- b. O concreto 91% de cimento e 9% de sílica (composição C3) teve as mais altas resistências à compressão e à tração por compressão diametral, o mais alto módulo de elasticidade dinâmico e apresentou um bom comportamento na propriedade de absorção de água. Contudo, a retração autógena desse concreto foi superior aos demais concretos e foi aquele que mais se assemelhou ao concreto referência contendo 100% de cimento CP V (composição C1).
- c. As composições contendo 61% de cimento, 9% de sílica e 30% de escória do tipo 1 (C4) e com 21% de cimento, 9% de sílica e 70% de escória do tipo 2 (C5) tiveram um bom comportamento em relação à retração autógena, com resultados semelhantes. As resistências à compressão e à abrasão e o módulo de elasticidade dinâmico do C4 são superiores ao C5. O C5 absorveu mais água que o C4, tanto por capilaridade, quanto por imersão e apesar das resistências terem sido inferiores ao C4 e ao C1 (concreto referência com 100% cimento), também apresentou um bom comportamento. É importante salientar também que o C5 apresenta uma porcentagem pequena de cimento, fato positivo, pois iria minimizar o impacto ambiental, na medida em que iria demandar menor volume de matéria prima (rocha calcária) para a sua produção.

Sendo assim a conclusão que se pode chegar é que a composição C5 (21% de cimento, 9% de sílica e 70% de escória do tipo 2) comparada aos outros concretos com adições minerais e ao concreto referência foi aquela que apresentou o melhor comportamento global, haja vista que propiciou pequena retração, boas resistências e um consumo de cimento inferior a todos os outros que continham grandes percentuais de adições (escórias e sílica ativa).

Certamente, estudos em um número maior de amostras devem ser realizados para convalidar e comprovar os resultados desta pesquisa, a partir do uso de composições que contenham outros tipos de adições, por se tratar de foco e meta preconizados pelas diretrizes de uma engenharia sustentável e afinada com os princípios da proteção ambiental.

## 6. PROPOSTA PARA NOVOS ESTUDOS

---

Sabendo-se que a retração autógena é um tema objeto de pouco estudo para os interventores ligados à indústria da construção civil, pesquisas sobre o tema devem ser realizadas a todo o momento, considerando situações e outras variáveis, tais como: utilizar novos agregados; novos cimentos; novos aditivos; variadas energias de compactação; variadas atmosferas de cura; etc. Sugere-se desta forma novos estudos complementares ao trabalho ora realizado, a saber:

- a. Experimentos envolvendo outros tipos de adições e novas misturas.
- b. Avaliar cada mistura separadamente e fazer uma combinação quaternária além de misturas binárias e ternárias
- c. Avaliar a influência do agregado na retração autógena, fazendo-se o concreto “convencional” e a pasta de cimento correspondente, bem como a utilização de agregados diferentes.
- d. Avaliar a influência de aditivos na retração autógena.
- e. Avaliar o comportamento da retração frente ao teste de ultra-sonografia em estudos mais específicos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AGUIAR, J.E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado em estruturas duráveis**. Belo Horizonte, 2006.

AÏTCIN, P.C. **A arte e a ciência do concreto de alto desempenho**. Roma, 1997.

AÏTCIN, P.C. **Demystifying Autogenous Shrinkage**. Concrete International, v.21, n.11, p. 54-59, nov. 1999.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução: Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.

ALDRED, J.M; et al. **Guide for the use of silica fume in concrete**. Reported by ACI – American Concrete Institute – Committee 234, 2006.

ALMEIDA, I.R. **Concretos de alto desempenho**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 1159-1193.

ALMEIDA, S.F. et al. **Determinação do módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios dinâmicos**. In Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 215** - Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 618** - Standard Specification for Coal fly ash and raw of Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, West Conshohocken, 1978.

ANDRADE, W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **ET 67**: Parâmetros de dosagem do concreto. São Paulo, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **EB 1763**: Aditivos para concreto de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro, 1992.

BALTHAR, V.K.C.B.L. **Retração Autógena e Evolução das Propriedades Mecânicas de Pastas Pozolânicas**. Rio de Janeiro, 2004.

BALTHAR, V.K.C.B.L; et al. **Retração Autógena de Pastas de Alto Desempenho**. In: IBRACON – Volume II – Construções em Concreto – Trabalho CBC 0215 – pg.II.1624-II.1638.

BARATA, M.S; DAL MOLIN, D.C.C. **Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa**. ANTAC, 2002.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1994. 435 p.

BEZERRA, A.C.S. **Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos: uma análise experimental e computacional**. Belo Horizonte, 2007.

BROOKS, J.J.; et al. **Factors affecting the autogenous shrinkage of silica fume high-strength concrete**. In: AUTOGENOUS SHRINKAGE OF CONCRETE – of

- THE INTERNATIONAL WORKSHOP, 1999 London. Proceedings. London, 1999. Edited by Ei-ichi Tazawa, E & FN Spon, p. 195-202.
- CÁNOVAS, M. F. **Hormigon**. Madrid: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, 1996.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Vol. 3. ed. LNEC. Lisboa: LNEC. 1994. cap. 11, p. 231-286.
- CRUZ FILHO, G.R.S. **Retração do concreto: avaliação do estado da arte**. Belo Horizonte, 2007.
- DAL MOLIN, D.C.C. **Adições Minerais para Concreto Estrutural**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 346-379.
- DNER. **Manual de inspeção de obras de arte especiais**. 1994. 49 p.
- EN 934-2. **Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling**. 2001.
- FERREIRA, Aurélio B. de Hollanda. **Mini Dicionário da Língua Portuguesa**. 1 ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1985. 506 p.
- GLEISE, P.J.P et al. **Efeitos do metacaulim na retração autógena de pastas de cimento**. In Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto, 2006.
- HAN, N.; WALRAVEN, J. C. **Creep and shrinkage of high-strength concrete at early and normal ages**. S.I.: Advances in Technology, 1996. p. 73-94.
- HASPARYK, N.P et al. **Deformações por Retração e Fluência**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 656-685.
- HELENE, P et al. **Estudo da Influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**, 2003.
- HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 439-471.



- HELENE, P; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland**. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. IBRACON. São Paulo, 2007. p.905-944.
- ISAIA, G. C. **O Concreto: da Era Clássica à contemporânea**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p.1-43.
- JACINTHO, A.E.P.G.A; GIONGO, J.S. Resistência Mecânica do Concreto. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p.605-632.
- JENSEN, O.M. et al. **Autogenous Deformation of Concrete**. Framington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2004. 202 p.
- JIAN-TONG, D.; ZONGJIN, L. **Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete**, ACI Mater. J. 99, 2002. 393-398
- KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322.
- LAPLANTE, P. **Propriétés mécaniques des bétons durcissants: analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances**. Ph.D. thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1993.
- MALHOTRA, V.M. **Properties of fresh and hardened concrete incorporating ground, granulated, blast-furnace slag**. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. Edited by V.M. Malhotra. Canadá, 1987.
- MALHOTRA, V.M et al. Role of silica fume in concrete: a review. In: Advances in concrete technology. Canada, 1992.
- MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. In: Advances in concrete technology. Volume 1, Canada, 1996.
- MALINOWSKI, R., GARFINKEL. **Prehistory of concrete**. Concrete International. Detroit, v 13, n. 3, p. 62-68, 1991.

- MARTIN, J.F.M. **Aditivos para Concreto**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 381-406.
- MEHTA, P.K. **Natural Pozzolans**. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. Edited by V.M. Malhotra. Canadá, 1987.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1.ed. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.
- NETO, C. S. **Agregados para concreto**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 324-343.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1982. 738 p.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- PAULON, V.A. **A Microestrutura do Concreto Convencional**. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. Sao Paulo: IBRACON, 2005. p. 584-604.
- PERSSON, B. **Experimental studies on shrinkage of high-performance concrete**. Cement and Concrete Research. n. 28. p. 1023-1036, 1998.
- RIBEIRO, C.C et al. **Materiais de Construção Civil**. Belo Horizonte, 2000. 96 p.
- ROCHA, G.G.N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Belo Horizonte, 2005
- RODRIGUES, G.S.S.; FIGUEIREDO, E.J.P. **Módulo de deformação do concreto**. In Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005.
- RODRIGUES, P.P.F. **Parâmetros da dosagem do concreto (ET-67)**. São Paulo: ABCP, 1995.
- SELLEVOLD, E.J; NILSEN, T. **Condensed Silica Fume in Concrete: a world review**. In: Supplementary Cementing Materials for Concrete. Edited by V.M. Malhotra. Canadá, 1987.

SOUZA, P.S.L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência.** Porto Alegre: UFRGS, 2002.

TAKADA, E. et al. **Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete.** In: TAZAWA, Ei-ichi (ed). Autogenous Shrinkage of Concrete. Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute. London: E & FN Spon, 1999a. p.229-238.

TAZAWA, E. **Technical Committee on Autogenous Shrinkage of Concrete – “Committee Report”.** In: TAZAWA, E. Autogenous Shrinkage of Concrete – Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute, Hiroshima, Jun. 1999.

TAZAWA, E.; KYŌKAI, N.K.K. **Autogenous Shrinkage of Concrete –** Proceedings of the International Workshop organized by Japan Concrete Institute, Hiroshima, Jun. 1999, 411p.

TIA et al. **Evaluation of Shrinkage Cracking Potential of Concrete Used in Bridge Decks in Florida.** Gainesville, FL. University of Florida. National Technical Information Service, 2005. 129 p.

YEGUL, F. **Roman Building Technology and Architecture.** Disponível em: <http://id-archserve.ucsb.edu/arhistory/152k/index.html>. Acesso em: junho 2005.