

CRISTIANO MILAGRES DE SOUZA

**ESTUDO DO EFEITO DAS VARIAÇÕES AMBIENTAIS SOBRE O CIMENTO
PORTLAND COM ADIÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção

Orientador: Prof. FATHI AREF IBRAHIM DARWISH – Ph.D.

Co-Orientadora: Prof^ª. MARIA TERESA GOMES BARBOSA – D.Sc.

NITERÓI

2007

CRISTIANO MILAGRES DE SOUZA

**ESTUDO DO EFEITO DAS VARIAÇÕES AMBIENTAIS SOBRE O CIMENTO
PORTLAND COM ADIÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia da Construção

Aprovada em Março de 2007

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish – Ph.D – Orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof^a. Maria Teresa Gomes Barbosa – D.Sc. – Co-orientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Robson Luiz Gaiofatto – D.Sc.
PUC - Universidade Católica de Petrópolis

NITERÓI
2007

Mais do que discutir resultados, foi necessário aprender. Um trabalho como esse, só se consegue realizar com o apoio de várias pessoas. Hoje, estou feliz por poder concluir mais uma etapa na minha formação profissional, mas triste por não poder compartilhá-la com todos aqueles que mereciam.

Dedico este trabalho:

Aos amigos Luiz Fernando Ribeiro e José Maria Ribeiro Alvim da Ribeiro Alvim Engenharia Ltda., que sempre me apoiaram e me valorizaram.

A minha namorada Lidiane, pelo amor, apoio, incentivo, paciência e confiança.

A Tita, minha mãe, que sempre confiou em meu potencial e principalmente ao meu pai, Joaquim, que nos deixou antes da conclusão deste trabalho, que foi um dos maiores responsáveis por ter me tornado um engenheiro e que me ajudou a desenvolver aquelas que acho ser minhas maiores virtudes: persistência e força de vontade.

Muito obrigado!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade.

Ao Professor Fathi Aref Ibrahim Darwish e a Professora Maria Teresa Gomes Barbosa pela orientação, atenção e precioso aprendizado.

Ao Professor Robson Luiz Gaiofatto por ter aceitado o convite de fazer parte de minha banca examinadora.

A Holcim do Brasil S.A. na pessoa do Sr. Flávio Renato Pereira Capuruço pela atenção e fornecimento do material de estudo desta dissertação.

Aos laboratoristas de materiais de construção da Universidade Federal de Juiz de Fora, Máximo Pífano, Vinícius e à bolsista de Iniciação Científica Danieli, por toda ajuda e apoio durante a moldagem e execução dos ensaios nos corpos-de-prova.

Aos professores e amigos, Sérgio Kitamura e Cláudia Coura, pela ajuda irrestrita, conselhos e incentivo.

Aos amigos de caminhada, Philipe, Márcio e Roberta, pelo companherismo e incentivo.

A todos os professores e amigos que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste sonho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	4
SUMÁRIO.....	5
LISTA DE ABREVIATURAS.....	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Importância da pesquisa.....	14
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Método de desenvolvimento da pesquisa.....	16
1.4 Estrutura da pesquisa.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Cimento Portland: Obtenção e principais adições.....	18
2.1.1 Cimento Portland com adição de escória de alto forno.....	23
2.1.2 Cimento Portland com adição de pòzolana.....	25
2.2 Outros constituintes.....	27
2.2.1 Agregados.....	27
2.2.2 Aditivos.....	28
2.3 Propriedades e estrutura interna.....	29
2.3.1 Vazios.....	29
2.3.2 Tipos de água presente na pasta de cimento.....	30
2.3.3 Mecanismos associados à perda ou ganho de água.....	30
2.3.3.1 Mecanismo de depressão capilar (ou tensão capilar).....	30
2.3.3.2 Mecanismo de variação capilar da pressão de separação.....	32
2.3.4 Processo de hidratação da pasta de cimento.....	32

2.3.5	Retração: Tipos e mecanismo.....	33
2.3.6	Zona de transição.....	36
2.4	Cura do concreto.....	37
2.5	Efeitos da variação da temperatura e da umidade na resistência.....	39
2.5.1	Efeitos da baixa temperatura sobre o concreto endurecido.....	39
2.5.2	Efeitos da alta temperatura sobre o concreto endurecido.....	40
2.5.3	Efeitos da umidade sobre o concreto.....	42
3	METODOLOGIA E MATERIAIS EMPREGADOS.....	43
3.1	Materiais.....	43
3.1.1	Cimento Portland.....	44
3.1.2	Agregados.....	47
3.1.3	Aditivo químico.....	47
3.2	Cura do concreto.....	47
3.3	Dosagem experimental.....	47
3.4	Ensaio realizados.....	49
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
4.1	Resultados obtidos para argamassas produzidas com CP II E 32.....	54
4.1.1	Resistência à compressão axial.....	54
4.2	Resultados obtidos para argamassas produzidas com CP III 40 RS.....	56
4.2.1	Resistência à compressão axial.....	56
4.3	Resultados obtidos para argamassas produzidas com CP V ARI PLUS.....	58
4.3.1	Resistência à compressão axial.....	58
4.4	Resultados obtidos para argamassas produzidas com DURACEM AD 300.....	60
4.4.1	Resistência à compressão axial.....	60
4.5	Resultados obtidos para argamassas produzidas com SILIMAX.....	62
4.5.1	Resistência à compressão axial.....	62
4.6	Apresentação comparativa dos resultados.....	64
4.7	Resultados da variação dimensional.....	68
4.8	Análise geral dos resultados.....	71
5	CONCLUSÕES.....	72
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	73
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
	ANEXO A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	77

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	Corpo-de-prova
CPII E – 32	Cimento Portland composto com escória de alto forno e resistência à compressão mínima aos 28 dias de idade de 32 MPa.
CPIII 40 RS	Cimento Portland de alto forno resistente a sulfatos com resistência mínima aos 28 dias de idade de 40 MPa.
CPV ARI PLUS	Cimento Portland de alta resistência inicial
DURACEM AD 300	Cimento especial de pega acelerada e adições minerais de alta pozolanicidade e elevada finura.
SILIMAX	Cimento especial de baixo calor de hidratação, baixo potencial de retração, altas resistências iniciais e alta resistência à sulfatos (ARS).
CV	Coeficiente de variação
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
Aft	Etringita (Sulfoaluminato de cálcio)
Afm	Monossulfato hidratado
a/c	Relação água/cimento
c/s	Relação concreto/sólido
d _{máx}	Diâmetro máximo característico do agregado

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Tensões geradas no menisco.....	31
Figura 2.2 – Fases da hidratação.....	33
Figura 4.1 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 0% (Resultado experimental x equação 4.1).....	55
Figura 4.2 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ umidade relativa do ar (Resultado experimental x equação 4.1).....	55
Figura 4.3 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 100% (Resultado experimental x equação 4.1).....	56
Figura 4.4 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 0% (Resultado experimental x equação 4.2).....	57
Figura 4.5 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ umidade relativa do ar (Resultado experimental x equação 4.2).....	57
Figura 4.6 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 100% (Resultado experimental x equação 4.2).....	58
Figura 4.7 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 0% (Resultado experimental x equação 4.3).....	59
Figura 4.8 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ umidade relativa do ar (Resultado experimental x equação 4.3).....	59
Figura 4.9 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 100% (Resultado experimental x equação 4.3).....	60
Figura 4.10 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 0% (Resultado experimental x equação 4.4).....	61
Figura 4.11 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ umidade relativa do ar (Resultado experimental x equação 4.4).....	61
Figura 4.12 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) p/ teor de umidade igual a 100% (Resultado experimental x equação 4.4).....	62

Figura 4.13 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ teor de umidade igual a 0% (Resultado experimental x equação 4.5).....	63
Figura 4.14 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ umidade relativa do ar (Resultado experimental x equação 4.5).....	63
Figura 4.15 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ teor de umidade igual a 100% (Resultado experimental x equação 4.5).....	64
Figura 4.16 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ teor de umidade igual a 0% e 3 dias de idade (Resultados experimentais x equações).....	65
.....	65
Figura 4.17 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ umidade relativa do ar e 3 dias de idade (Resultados experimentais x equações).....	65
Figura 4.18 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ teor de umidade igual a 100% e 3 dias de idade (Resultados experimentais x equações)...	66
.....	66
Figura 4.19 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ teor de umidade igual a 0% e 7 dias de idade (Resultados experimentais x equações).....	66
.....	66
Figura 4.20 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ umidade relativa do ar e 7 dias de idade (Resultados experimentais x equações).....	67
Figura 4.21 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura ($^{\circ}$ C) p/ teor de umidade igual a 100% e 3 dias de idade (Resultados experimentais x equações)...	67
.....	67

Lista de tabelas

TABELA 2.1 – Composição típica de óxidos de cimentos Portland sem adição.....	19
TABELA 2.2 – Composição potencial do cimento Portland sem adição.....	20
TABELA 2.3 – Características dos principais componentes do cimento Portland.....	20
TABELA 2.4 – Limites para teor de escória de alto forno em diferentes tipos de cimento Portland.....	25
TABELA 2.5 – Limites para os principais componentes do cimento Portland.....	27
TABELA 2.6 – Influência de alguns fatores na retração por secagem.....	36
TABELA 2.7 – Tempo mínimo de cura.....	38
TABELA 2.8 – Fatores de correção de tempo de cura.....	39
TABELA 3.1 – Caracterização do cimento CP III 40 RS.....	44
TABELA 3.2 – Caracterização do cimento CP II E 32.....	45
TABELA 3.3 – Caracterização do cimento CP V ARI PLUS.....	45
TABELA 3.4 – Caracterização do cimento DURACEM AD 300.....	46
TABELA 3.5 – Caracterização do cimento SILIMAX.....	46
TABELA 3.6 – Composição da mistura da argamassa utilizada.....	48
TABELA 3.7 – Programa experimental.....	48
TABELA 4.1 – Média dos resultados dos ensaios.....	54
TABELA 4.2 – Variação do volume do CP (em %) após a exposição em 0% de umidade e a temperaturas pré-definidas.....	68
TABELA 4.3 – Variação do volume do CP (em %) após a exposição em umidade relativa do ar e a temperaturas pré-definidas.....	69

TABELA 4.4 – Variação do volume do CP (em %) após a exposição em 100% de umidade e a temperaturas pré-definidas.....	70
--	----

RESUMO

A durabilidade do concreto é dependente de fatores que vão desde a sua produção (tipos de cimento, de agregados, adensamento, tipo de cura, etc.) até a influência do meio ao qual o material está exposto.

Quando a argamassa e/ou concreto estão curados, isto é, quando o seu endurecimento chegou a um estado avançado, é um material resistente, dentro de certos limites das condições higrotérmicas. Entretanto, nem por isso deixam de ser um material sensível a esses efeitos nos primeiros tempos e especialmente quando está na fase de cura, na qual o frio, o calor, o vento e a baixa umidade do ar podem produzir sobre ele efeitos patológicos consideráveis.

Objetivando estudar a influência da temperatura e da umidade no comportamento das argamassas, já endurecidas, elaborou-se um extenso programa experimental que consistiu na moldagem de corpos-de-prova confeccionados com argamassas no traço 1: 3: 0,48, (cimento: areia: água) empregando-se os cimentos tipo CII – E 32, CIII – 40 RS, CPV ARI PLUS, DURACEM E SILIMAX, que foram submetidos após 03 e 07 dias de cura (efetuada em câmara úmida segundo a normalização brasileira) em temperaturas iguais a 0^o, AMBIENTE e 100^o C e umidades iguais a 0% AMBIENTE e 100%.

Palavras-chave: avaliação, argamassas, condições climáticas.

ABSTRACT

The durability of concrete depends of factors that change with its production. There is the influence of cement type, aggregates, casting, curing procedures, and the influence of the aggressive environment in which the material is exposed.

When the mortar is cured, that is, its hardening arrived to an advanced state, it is a strong material, inside of certain limits of the climatic conditions. However, nor for that they stop being a sensitive material the those effects in the first times in the which the cold, the heat, the wind and the low humidity of the air can produce on considerable effects.

Intend to study the influence of the temperature and of the humidity in the behavior of the mortars, already hardened, an extensive experimental program was elaborated that it consisted of the specimen test made with mortars being used the cements five different type of cement (CPII-E 32, CPIII – 40 RS, CPV ARI PLUS, DURACEM, SILIMAX) that were submitted after 03 and 07 days of age in temperatures same to 0⁰, environmental and 100⁰ C and humidities same to 0% environmental and 100%.

Keywords: behavior, Portland Cement, climatic conditions.

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O concreto em sua fase inicial é suscetível a variações de temperatura e umidade relativa do ar. Dependendo da amplitude e do grau de exposição à condições extremas, pode sofrer a curto prazo, efeitos nocivos à sua durabilidade, como por exemplo: variações dimensionais excessivas causadas por retrações ou dilatações.

O emprego de um mesmo tipo de cimento em regiões quentes e úmidas, pode gerar resultados diferentes daqueles encontrados quando o mesmo tipo de cimento é usado em regiões de temperatura muito baixa e pouca umidade. Dentro deste contexto, o estudo do meio ambiente ao qual se destina o uso do material, deve ser considerado quando se deseja uma maior precisão na análise da resistência final e demais características.

Devido à extensão territorial do país, observamos variações climáticas consideráveis, mesmo dentro de um mesmo estado. Tais variações são muitas vezes realçadas por diferenças geográficas como o relevo, a vegetação e a altitude. O estado de Minas Gerais, por exemplo, é o estado mais elevado do país, com mais de 50% de suas terras acima dos 600 m de altitude. Devido às suas características geográficas, encontramos o clima denominado Tropical nas regiões mais baixas (Zona da Mata, depressão do São Francisco e planalto cristalino - porção noroeste) com temperatura média anual variando entre 22°C a 23°C,

chuvas predominantes no verão e invernos secos. Nas regiões mais elevadas (serras da Canastra, Espinhaço, Mantiqueira e sul do Estado), encontramos o clima denominado como Tropical de Altitude, com temperaturas oscilando entre 17°C a 20°C e chuvas ultrapassando facilmente os 1.300 mm anuais.

Além disso, é bom salientar que existem casos extremos, nos quais o concreto pode sofrer variações ainda maiores, como por exemplo: a base de um alto-forno. Mesmo que a estrutura já tenha atingido os valores mínimos necessários para resistência, estará exposta a variações altíssimas de temperatura, as quais levarão o material a sofrer neste caso, efeitos que provavelmente comprometerão consideravelmente sua vida útil.

Problemas originados com o calor, por exemplo, tendem a agravar-se com o emprego de cimentos com alto grau de moagem, que devido à sua finura, possuem elevado calor de hidratação e velocidade de hidratação. Então, não só as condições de exposição devem ser observadas. Cada tipo de cimento pode se comportar de maneira diferente quando submetido a variações neste sentido, isto é, um cimento com grande concentração de finos submetido a altas temperaturas e pouca umidade sofrerá provavelmente danos maiores que, por exemplo, um cimento com um percentual de escória superior à 40%. A fim de observar essa característica, foram utilizados tipos variados de cimento na confecção das argamassas, alguns tradicionais de mercado e outros, lançamentos com características diferenciadas.

Em outro exemplo, podemos citar as câmaras refrigeradas para conservação de alimentos. Os danos causados ao concreto, quando exposto a baixas temperaturas, estão relacionados, entre outros fatores, ao fato do mesmo ser um material poroso, capaz de reter água em seus capilares, bem como água adsorvida em seus produtos originários da hidratação do cimento Portland. Esta água, em condições normais de temperatura e pressão, permanece nas cavidades ou são adsorvidas a produtos, em repouso. Entretanto quando submetidas, como no caso em estudo, a uma queda de temperatura, podem alterar seu estado físico e sua intensidade de energia livre.

As estruturas de concreto no processo de conservação de alimentos podem chegar, em alguns casos, a temperaturas extremamente baixas, inferiores a - 40 °C.

1.2 OBJETIVOS

Através da revisão do conhecimento sobre o comportamento dos materiais empregados na pasta de cimento, principalmente dos componentes do cimento, desde sua microestrutura até sua manifestação macroscópica, este trabalho buscou avaliar o comportamento de argamassas confeccionadas com diferentes tipos de cimento expostas a variações de temperatura e/ou umidade, especialmente no período de cura. Essas avaliações basearam-se em analisar a resistência à compressão e a variação dimensional de corpos-de-prova confeccionados com diferentes tipos de cimento (CPII-E 32, CPIII-40 RS, CP V ARI PLUS, DURACEM e SILIMAX) fabricados pela empresa Holcim.

Os objetivos desse trabalho são:

- 1) Avaliar qualitativamente as características de cada tipo de cimento e recomendar o melhor emprego para cada uma das amostras analisadas;
- 2) Avaliar quantitativamente, obtendo equações que expressem a resistência à compressão das argamassas em função da idade, da temperatura e da umidade, para cada tipo de cimento estudado.

1.3 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Primeiramente, a pesquisa baseou-se numa revisão literária acerca do assunto proposto, através principalmente de livros e publicações nacionais e internacionais.

Uma vez tendo identificado as possíveis variáveis da pesquisa e tendo como base os estudos realizados anteriormente, traçou-se então, um programa experimental, no qual definiu-se quais temperaturas e umidades seriam simuladas em laboratório e em quais idades seriam efetuados os rompimentos dos corpos-de-prova.

Na etapa do programa experimental buscou-se testar os corpos-de-prova nas condições de exposição, objetivando analisar o comportamento dos materiais empregados, em especial dos cimentos, para posteriormente, formular expressões que indiquem a resistência da argamassa para cada tipo de cimento, tendo-se como variáveis a temperatura, a umidade e a idade do corpo-de-prova.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho foi dividido em 5 capítulos:

- Capítulo 1: Apresenta em seu conteúdo a justificativa para a pesquisa, com os objetivos principais, o método de obtenção das informações e da realização da pesquisa e a estrutura do trabalho;
- Capítulo 2: Efetuou-se uma revisão bibliográfica empregando-se livros e trabalhos científicos que possuem em seu conteúdo alguns conceitos referentes aos assuntos abordados, importantes para o embasamento da pesquisa;
- Capítulo 3: Neste capítulo são apresentados os métodos, ensaios e o programa experimental completo utilizado na pesquisa. Especifica-se também os materiais, suas análises individuais e as proporções de utilização;
- Capítulo 4: São apresentados os resultados encontrados com suas análises. Neste capítulo são discutidos alguns resultados e apresentadas as equações que expressam a resistência das argamassas para cada tipo de cimento estudado;
- Capítulo 5: São realizadas neste capítulo as conclusões do trabalho, inclusive com sugestões para futuros trabalhos que venham complementar ou atestar as conclusões obtidas neste estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CIMENTO PORTLAND: OBTENÇÃO E PRINCIPAIS ADIÇÕES

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, fabricado a partir de uma mistura de materiais calcários e argilosos, levados a um forno e posteriormente são finamente moídos. A sua caracterização final depende não só das matérias-primas, mas também, das adições efetuadas após à calcinação, e suas quantidades, além da finura atingida na moagem.

A etapa de calcinação é quando se leva ao forno o calcário, principal matéria-prima do cimento Portland, a uma temperatura entre 850°C e 950°C. Ocorre então, nessas condições, a liberação de CO₂ para o ambiente. A partir desta temperatura, até o máximo de 1450°C, o óxido de cálcio, CaO, começa a associar-se com os demais óxidos, provenientes de adições como argila ou minério de ferro. A etapa de calcinação é seguida por um resfriamento brusco, até cerca de 150°C, formando o clínquer em forma de pelotas. O resfriamento brusco contribui para que os cristais dos compostos na clinquerização permaneçam de forma desordenada e, portanto, altamente reativos com a água (GLASSER, 1993).

Após o resfriamento, cerca de 5% em massa de gipsita (Ca₂SO₄.2H₂O), reguladora do tempo de pega do cimento, é acrescentada e os materiais são moídos conjuntamente. TAYLOR (1990) apresenta a seguinte composição em óxidos como típica para os cimentos comuns (Tabela 2.1).

TABELA 2.1 - Composição típica em óxidos de cimentos Portland sem adição (TAYLOR, 1990)

Óxido	Fórmula	Abreviação	Massa cimento (%)
Óxido de cálcio	CaO	C	67
Sílica	SiO ₂	S	22
Alumínio	Al ₂ O ₃	A	5
Ferro	Fe ₂ O ₃	F	3
Magnésio, álcalis, sulfatos e outros componentes	MgO, Na ₂ O, K ₂ O, SO ₃		Menores quantidades

As abreviações apresentadas na Tabela 2.1 são de uso consagrado e têm a finalidade de simplificar a representação dos compostos formados na clínquerização, que não são mais que associações destes óxidos. A porcentagem final de cada composto no cimento costuma variar bastante em função da matéria-prima e do processo de clínquerização. Pode-se estimá-la pela fórmula de BOGUE (MEHTA e MONTEIRO, 1994) desde que conhecida a composição do cimento em óxidos.

LEA (1970) apresenta intervalos típicos para a composição potencial de um cimento Portland sem adições (Tabela 2.2):

Cada um destes compostos vai contribuir de maneira diferente para as propriedades finais do cimento, de acordo com as características apresentadas na Tabela 2.3. Elementos presentes em menor porcentagem (0,5 – 1,5), como o magnésio e a cal livre também podem ter uma influência significativa sobre as propriedades do cimento, pois podem causar um aumento de volumes e fissuras.

TABELA 2.2 - Composição potencial do cimento Portland estimada pela fórmula de BOGUE (LEA, 1970)

Composto	Composição em óxidos	Abreviação	Massa cimento (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	50 – 70
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 – 30
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	5 – 10
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 - 15

TABELA 2.3. Características dos principais componentes do cimento Portland (Fonte: TAYLOR, 1990).

Componente	Resistência mecânica	Calor de hidratação	Velocidade de hidratação
C_3S	Alta inicial	Médio	Média
C_2S	Alta final	Pequeno	Lenta
C_3A	Nenhuma	Grande	Rápida
C_4AF	Nenhuma	Pequeno	Rápida

É também muito comum a fabricação de cimentos utilizando-se adições minerais, formando os cimentos Portland compostos. As adições mais utilizadas pela indústria são o filler calcário, a sílica ativa, a escória granulada de alto-forno e os materiais pozzolânicos. As adições, dependendo de sua reatividade, podem substituir até cerca de 70% do clínquer, como é o caso do cimento Portland de alto-forno.

Ao reagirem com a água, os óxidos do cimento Portland podem formar vários compostos. Os silicatos de cálcio reagem formando hidróxido de cálcio (Portlandita) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), enquanto os aluminatos e ferroaluminatos reagem, juntamente com a adição de sulfato de cálcio, para formar os sulfoaluminatos, em reações que são exotérmicas.

No primeiro estágio da hidratação, até 3 horas, forma-se uma camada gelatinosa ao redor do grão de cimento e os sulfatos e aluminatos começam rapidamente a se dissolver, produzindo grande calor de hidratação. Fora desta camada gelatinosa, pequenos cristais de etringita ($C_6AS_3H_{32}$) começam a surgir depois de 10 minutos de hidratação, sendo responsáveis pelo fenômeno da pega e o desenvolvimento da resistência inicial (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Depois de 3 horas, o C-S-H, silicato de cálcio hidratado, já pode ser observado.

O fim do período é marcado pelo rápido crescimento de cristais de C-S-H e de $Ca(OH)_2$ (Portlandita) derivados do C_3S e do C_2S . A camada de C-S-H formada em torno do grão desprende-se e afasta-se, permitindo que a água atinja a região anidra do grão, ou seja, num novo processo de dissolução-precipitação. Inicia-se um novo pico de calor de hidratação e o entrelaçamento de C-S-H entre os grãos causa endurecimento da pasta e sua pega, depois de 3 ou 4 horas. Então, cristais de CH e novos de etringita são formados. No fim deste período, que dura até cerca de 24 horas, 30% da hidratação já se passou.

No entanto, por mais eficiente que seja o processo de hidratação, restará sempre uma parte de grãos de cimento que permanecerão anidros, pois os grãos maiores têm apenas sua superfície externa hidratada. Em idades mais avançadas, ocorre uma hidratação localizada destes grãos resultando em um produto denso, de morfologia semelhante à do grão original (METHA e MONTEIRO, 1994).

A maior parte da pasta de cimento hidratado, segundo METHA e MONTEIRO (1994), cerca de 50 a 60% dos sólidos, é constituída por silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um gel de pouca cristalinidade. Sua composição é incerta e possivelmente variável, com uma relação C/S entre 1,7 a 2. Sua morfologia é variável, podendo ser fibras nas primeiras idades ou estruturas mais

compactas, reticuladas, em idades mais avançadas. Sua elevada área específica o proporciona um grande poder de adesão aos demais constituintes do concreto e por isso pode ser dizer que é o grande responsável pela resistência mecânica da pasta.

O hidróxido de cálcio, ou portlandita, Ca(OH)_2 , é o segundo composto mais comum na pasta de cimento hidratado, ocupando aproximadamente 20% do volume de sólidos. Tem uma estrutura cristalina bem definida por grandes cristais hexagonais, o que lhe confere baixa área específica e, conseqüentemente, baixa resistência mecânica. É solúvel em água e é responsável pela alcalinidade da argamassa ou do concreto. Pode ser citado pela abreviação CH (MINDESS e YOUNG, 1981).

Cerca de 15 a 20% dos sólidos na pasta de cimento são sulfoaluminatos de cálcio, de composição e morfologia variáveis, dependendo do tipo de cimento e da etapa da hidratação em que se formaram. Nos primeiros estágios de hidratação é comum a formação de trissulfoaluminato hidratado ou etringita, $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$, em forma de cristais prismáticos aciculares, comumente representada por Aft. A etringita pode transforma-se em monossulfato hidratado, Afm, em placas hexagonais, vulnerável ao ataque de sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A reação de hidratação do C_3S resulta na formação de 61% de $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ e 39% de Ca(OH)_2 e a do C_2S em 82% de $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ e 18% de Ca(OH)_2 . O C_3S precisa de 24% de água para hidratar e o C_2S de somente 21%. As reações aproximadas são descritas por NEVILLE (1988):



Como o principal responsável pela resistência inicial da pasta endurecida é o C-S-H e uma maior a quantidade de Ca(OH)_2 diminui a resistência ao ataque de

ácidos e sulfatos, então, um cimento com um percentual maior de C_3S resulta em um produto com menor resistência ao ataque químico e menor resistência. Porém, o silicato tricálcico hidrata mais rapidamente e, portanto, desenvolve a resistência mais rápido nas primeiras idades.

A velocidade de hidratação e, conseqüentemente, o ganho de resistência mecânica, são altamente influenciados também pela finura do cimento. No entanto, se for exageradamente moído, suas propriedades podem ser prejudicadas por uma pré-hidratação sob umidade ambiente ou então por geração excessiva de calor de hidratação nas primeiras horas após a mistura da água de amassamento, além da diminuição do tempo de trabalhabilidade devido à aceleração da pega (GAMBHIR, 1986).

2.1.1 Cimento Portland com adição de escória de alto forno

Inicialmente, em uma das primeiras etapas da produção do aço, quando ocorre a elevação da temperatura no alto-forno e a fusão dos minérios, as impurezas que se encontravam impregnadas, por serem menos densas, permanecem flutuando à superfície. Desta forma, ocorre uma separação bem distinta das fases, podendo então, serem separados os minérios fundidos, que serão conduzidos para a transformação em aço, e as impurezas, que serão resfriadas formando a “escória de alto-forno”.

Se resfriadas bruscamente assim que saírem do forno, a escória se solidificará formando partículas vítreas, granuladas ou pelotizadas, com grande potencial reativo. A reatividade da escória depende de algumas características, tais como: finura, em geral, a escória é utilizada com uma finura entre $250 \text{ m}^2/\text{kg}$ e $700 \text{ m}^2/\text{kg}$ (TALLING; BRANDSTETR, 1989); composição química, constituída em sua maioria, de SiO_2 , CaO , MgO e Al_2O_3 e uma relação CaO/SiO_2 na faixa de 1,14 a 1,33 (CINCOTTO *et al.* 1992; SONG; JENNINGS, 1999); e teor de fase vítrea, em média, 95% (CINCOTTO *et al.* 1992).

Se forem finamente moídas, o material resultante desenvolverá propriedades auto-cimentantes, com hidratação bastante lenta e, a quantidade de

produtos formada será insuficiente para que o material possa ser utilizado para fins estruturais, sendo então necessário um ativador para que as reações de hidratação ocorram em tempo adequado. Como ativador químico, pode-se utilizar o silicato de sódio, o sulfato de cálcio, o hidróxido de cálcio e o cimento Portland. O aumento da finura e temperaturas elevadas de cura também podem agir como ativadores da reação, apesar da “ativação térmica” ser somente uma aceleração da cinética da reação de hidratação (CAMARINI, 1995).

A perda de reatividade da escória é um grande problema para as indústrias de cimento do Brasil. O armazenamento por longos períodos pode afetar o comportamento da escória, através da perda de reatividade (PECCHIO; BATTAGIN, 1999). Esta influência é mais sentida nos casos em que a escória é usada como adição ao cimento Portland.

A escória pode ser usada em conjunto com o cimento Portland de três maneiras: como matéria prima ainda na calcinação; como adição seca após a moagem do clínquer e como adição seca ou líquida, já na dosagem do concreto. No Brasil, o comum é adicioná-la à matéria-prima do cimento, moída a uma finura equivalente à deste, em teores variáveis. A ABNT (1991a; 1991b; 1991c) regula os teores de escória no cimento Portland como descrito na Tabela 2.4.

Para o cimento Portland de alto-forno, a hidratação inicial é mais lenta que a dos cimentos convencionais. Inicialmente a água reage com a escória liberando Ca^{+2} , mas logo depois, os grãos são envolvidos por uma membrana impermeável de hidróxido de alumínio, interrompendo a reação. Só depois dos componentes do cimento Portland hidratarem-se é que, devido ao aumento do pH, ocorre a dissolução dessa membrana e conseqüentemente, há o prosseguimento da reação do grão de escória com a água. A escória retarda a hidratação do C_3S nos estágios iniciais, porém, acelera no final, tanto mais quanto maior o teor de escória no cimento (NEVILLE, 1997).

TABELA 2.4 - Limites para teor de escória de alto forno em diferentes tipos de cimento Portland (ABNT, 1991a; 1991b; 1991c).

	Cimento Portland Comum	Cimento Portland Composto	Cimento Portland de Alto-forno
Sigla	CP I-S	CP II-E	CPIII
Classes de resistência (MPa)	25, 32 e 40	25, 32 e 40	25, 32 e 40
Clínquer + sulfato de cálcio (%)	99 – 95	94 – 56	65 – 25
Escória granulada (%)	1 – 5*	6 – 34	35 – 70
Material pozolânico (%)	1 – 5*	-	-
Material carbonático (%)	1 – 5*	0 – 10	0 – 5
Norma regulamentadora	NBR 5732	NBR 11578	NBR 5735

* Apenas um tipo de adição no mesmo cimento

Há somente um pico de calor para o cimento sem escória, enquanto há dois picos não acentuados para os demais. O primeiro, refere-se à reação dos compostos do cimento, já o segundo corresponde à hidratação dos compostos da escória (CAMARINI, 1995).

2.1.2 Cimento Portland com adição de pozolana

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais que contém sílica, composto por partículas esféricas extremamente pequenas, aproximadamente 100 vezes menores que as partículas de cimento, com aspecto vítreo, e muito reativas. São materiais silicosos ou silico-aluminosos que têm pouca qualidade cimentante intrínseca, mas finamente pulverizadas e na presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura normal, formando produtos com capacidade

cimentante. Os materiais pozolânicos mais comuns são: a pozolana original (pumicita), as calcedônias e as opalas, terras diatomáceas calcinadas, argilas calcinadas e as cinzas volantes. As cinzas volantes são precipitadas eletrostaticamente dos fumos de exaustão das centrais termelétricas a carvão e são as pozolanas artificiais mais comuns. As cinzas volantes quando adicionadas ao cimento podem alterar a cor do concreto. A adição de cinzas volantes ao cimento tipo Portland é feita em proporção que pode variar de 15% a 40%.

A qualidade da sílica depende de alguns fatores como, o processo de obtenção, o que varia substancialmente com o tipo de liga produzida. Por exemplo, os ferros-silícios utilizados nas siderurgias podem apresentar um teor de sílica de 50%, 75% e 90% em sílica na forma não cristalina. Contudo, com apenas 48% de sílica na liga o material pode ser chamado de metal silício. Quanto maior o teor de sílica na liga, maior o teor de sílica (SiO_2) na sílica resultante. Outro fator importante na produção da sílica ativa, que pode influenciar em sua qualidade é o tipo forno utilizado. Dependendo do tipo de forno, pode-se produzir uma sílica com melhor qualidade. A utilização de um forno com um sistema de recuperação de calor eficiente, uma maior quantidade de carvão é queimada, com isso a sílica ativa resultante fica quase isenta de carvão, o que faz baixar o teor de carbono, melhorando sua qualidade. Caso o forno não dispuser de uma completa recuperação de calor, deixará parte do carvão impregnado na sílica ativa, comprometendo sua qualidade.

A principal vantagem na adição de pozolanas ao cimento comum reside na sua hidratação lenta e, portanto, com baixo desprendimento de calor, fator importante nas obras de concreto massa. A reação pozolânica deixa menos hidróxido de cálcio para ser lixiviado, reduzindo também, a permeabilidade do concreto. Essa característica é verificada devido a um efeito químico relacionado à formação dos cristais de portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, definida por MEHTA e MONTEIRO (1994) como reação pozolânica. A Tabela 2.5 ilustra a formação de silicato de cálcio hidratado.

TABELA 2.5 – Formação de Silicato de Cálcio Hidratado

Formação de Silicato de Cálcio Hidratado – C-S-H	
Cimento Portland	Cimento Pozolânico (Sílica)
Reação rápida	Reação lenta
$C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH$	$Sílica + CH + H \rightarrow C-S-H$

MEHTA e MONTEIRO (1994) enumeram três aspectos importantes que derivam da reação pozolânica, a saber: primeiro, a taxa de liberação de calor e de desenvolvimento de resistência serão relativamente lentas, pois a reação pozolânica é lenta; segundo, a reação consome hidróxido de cálcio ao invés de produzi-lo, representando uma importante contribuição para a durabilidade da pasta endurecida aos sulfatos e outros agentes agressivos. Como a reação pozolânica deixa menos hidróxido de cálcio para ser lixiviado, reduzindo também a permeabilidade do concreto; e, finalmente, os estudos sobre a distribuição do tamanho dos poros em cimentos com escória de alto forno finamente moída adicionada entre 25 a 70%, e cimentos com pôzolana, entre 15 a 40%, mostram que o produto final da hidratação consegue um preenchimento significativo dos poros capilares, melhorando a resistência e reduzindo também a permeabilidade.

Com a substituição de parte do cimento por pozolana, os concretos passam a ter menores resistências iniciais, só desaparecendo essa desvantagem após cerca de 3 meses, a partir de onde suas resistências são cerca de 10 a 15% superiores aos dos concretos comuns.

2.2 OUTROS CONSTITUÍNTES

2.2.1 Agregados

A influência dos agregados nos concretos e nas argamassas começa no momento da mistura, quando sua granulometria, sua forma e sua textura definirão

a compacidade e o consumo de água para uma dada trabalhabilidade. Com o início e o desenvolvimento da hidratação, a porosidade, a permeabilidade, a resistência à tração, a estrutura cristalina, o coeficiente de expansibilidade térmica, a dureza e a composição química, mostram-se também muito importantes como fatores determinantes para a durabilidade (SCRIVENER, 1989).

A presença de alguns elementos como: o chumbo e o zinco, podem causar problemas relacionados à pega; os sulfetos de ferro podem causar reações expansivas, assim como a reação álcali-agregado. Há possibilidade do surgimento de reações benéficas, como por exemplo no caso de agregados calcários, resultando no aumento da aderência entre as fases, pasta-agregado (PAULON, 1995).

A maioria das características dos agregados é função das propriedades da formação mineralógica, do processo de obtenção e das condições de exposição do material. Os agregados miúdos são geralmente extraídos dos leitos dos rios, em solos de alteração ou podem ser produzidos artificialmente. Os agregados graúdos são geralmente obtidos por britagem, sendo raramente encontrados de maneira natural.

2.2.2 Aditivos

Segundo a ABNT, através da NBR 11768:1192, os aditivos para concreto e argamassas de cimento Portland são produtos que adicionados em pequenas quantidades, são capazes de melhorar algumas de suas propriedades ou, adequá-las a determinadas condições de trabalho.

Dentre as propriedades alcançadas pelos aditivos estão: a melhoria da plasticidade do concreto ou da argamassa sem aumentar o teor de água na mistura, reduzir a exsudação e a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades e retardar a taxa de liberação de calor de hidratação.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) os aditivos podem ser divididos em duas classes, de acordo com sua ação sobre a hidratação do cimento Portland, a

saber: alguns aditivos contêm substâncias que agem imediatamente quando em contato com o cimento e a água no início da mistura, modificando a tensão superficial da água e adsorvendo-se na superfície de cimento, são os tensoativos. Outros, porém, contêm substâncias que se dissociam em seus íons constituintes e afetam as reações entre o cimento e a água, por algum tempo, são os chamados modificadores de pega.

Os tensoativos em sua essência, são moléculas orgânicas de cadeia longa, com uma extremidade hidrófila (que atrai água) e uma hidrófoba (que repele a água). A extremidade hidrófila contém grupos polares que agem como um redutor de água. Já a parte hidrófoba, atua como um incorporador de ar (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.3 PROPRIIDADES E ESTRUTURA INTERNA

2.3.1 Vazios

A resistência mecânica da pasta é fortemente relacionada com sua porosidade, já que somente os elementos sólidos são responsáveis por resistir aos esforços.

Os poros na estrutura do cimento hidratado são basicamente classificados em poros de gel e poros capilares (METHA e MONTEIRO, 1994); os primeiros são poros da estrutura interna do C-S-H e têm diâmetros menores que 2nm (microporos), não influenciando na resistência da pasta. Entretanto, os poros capilares, que são os poros formados pelos vazios intergranulares, com diâmetros compreendidos na faixa dos mesoporos ($2 < \varnothing < 50\text{nm}$) e dos macroporos ($\varnothing > 50\text{nm}$), são espaços não preenchidos pelos componentes da hidratação do cimento, podendo influenciar na resistência.

Os poros de ar incorporado possuem forma esférica e dimensões superiores aos vazios capilares. Devido a sua grande dimensão, podem influenciar negativamente a resistência e aumentar a permeabilidade. São provocados geralmente pelo adensamento equivocado, ou seja, por uma má vibração da pasta ou então, incorporados intencionalmente.

2.3.2 Tipos de águas presentes na pasta de cimento

A matriz cimentícia é composta principalmente de C-S-H e vazios, que podem estar saturados, secos ou parcialmente preenchidos por água. A movimentação da água faz com que se tenha uma deformação da estrutura do cimento hidratado, a qual irá depender da forma com que a água está ligada e do tipo de poro que ela está contida.

A variação no volume do concreto ou argamassa, segundo NEVILLE (1997), causada pela retração por secagem, não equivale ao mesmo volume de água perdido, mas sim, pela perda de diferentes tipos de água: **(1) água livre**, aquela presente nos poros e capilares. Sua perda provoca proporcionalmente uma retração muito pequena. **(2) água adsorvida**, que é aquela que está próxima à superfície do sólido, sofrendo forças de atração, as moléculas de água estão fisicamente adsorvidas na superfície dos sólidos na pasta. Ela pode ser perdida facilmente a uma umidade relativa igual ou abaixo de 30%, sendo sua perda a principal responsável pela retração da pasta na secagem. **(3) água de gel**, ou interlamelar, é associada à estrutura de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) por pontes de hidrogênio e só é perdida por uma queda brusca de umidade, abaixo de 11%. Caso isto ocorra, há uma retração considerável do C-S-H. Por último, **(4) água quimicamente combinada**, que é parte da estrutura de vários compostos hidratados do cimento. É somente liberada quando estes produtos são decompostos pelo aquecimento do sistema (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.3.3 Mecanismos associados à perda ou ganho de água

2.3.3.1 Mecanismo de depressão capilar (ou tensão capilar)

Segundo POWERS (1968), *apud* MELO NETO (2002), a água condensada no interior dos poros capilares, principalmente nos mesoporos, está sujeita a uma pressão de confinamento. O mecanismo que explica a deformação ocorrida no interior da pasta quando da perda de água, para o ambiente ou por hidratação, é a depressão ou tensão capilar.

A pressão do líquido que se encontra no interior dos capilares é denominada pressão capilar. A tensão superficial e o raio de curvatura da superfície formada pelo líquido (menisco), são parâmetros para o cálculo da tensão capilar (figura 2.1).

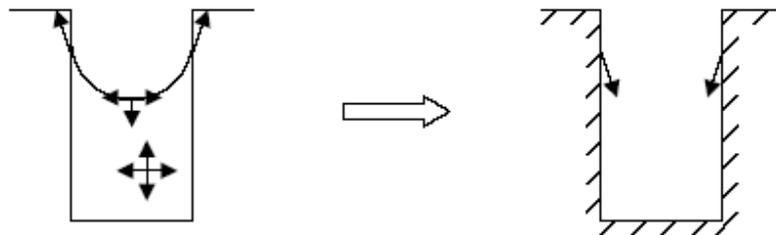


Figura 2.1 – Tensões geradas no menisco. (RUIZ, 2003)

A pressão capilar exerce uma força de atração entre as paredes do capilar ou entre duas partículas de sólido separadas por um líquido que preenche o capilar. Quando se tem um ambiente cuja umidade relativa é 100%, a pressão capilar é equilibrada pela pressão de vapor. Se tivermos um ambiente com umidade abaixo de 100%, ocorre o desequilíbrio entre as pressões causando a evaporação parcial do líquido que forma o menisco, diminuindo seu raio (Equação 2.1). Com isso há um aumento da pressão capilar e, conseqüentemente, da força de atração entre as partículas, levando à retração do material.

$$P_c = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.1)$$

Onde:

P_c = pressão capilar;

σ = tensão superficial;

R_1 e R_2 = São raios de curvatura do menisco nas direções ortogonais.

Há um limite onde a resistência à tração da água é excedida, não sendo mais possível existir o menisco. YOUNG (1988) sugere que a pressão capilar só é significativa em poros com diâmetros abaixo de 35 nm, sendo alcançados valores máximos com 2,5 nm e em umidade relativa entre 40% e 50%.

2.3.3.2 Mecanismo de variação da pressão de separação

Com a secagem do material, ocorre a formação de meniscos em capilares, no entanto, admite-se que neste mesmo poro existem superfícies sólidas muito mais próximas do que o admitido pela teoria da depressão capilar. Neste caso uma tensão normal resulta das camadas de água adsorvida sobre as duas superfícies formadas pelo estreitamento do poro, impedindo que haja maior aproximação entre as superfícies. Essa pressão é designada pressão de separação.

Em virtude do estabelecimento do equilíbrio com a umidade relativa, a medida há sua diminuição, a água sai do capilar fazendo com que a espessura do filme de água adsorvida também diminua, levando a uma diminuição da pressão de separação e, conseqüentemente, à retração do material.

2.3.4 Processo de hidratação da pasta de cimento

O processo de hidratação do cimento consiste em uma série de etapas. Durante as primeiras horas, o cimento encontra-se em suspensão na água de amassamento. Posteriormente com a evolução das reações de hidratação, a pasta torna-se um gel, formado principalmente por cristais de C-S-H. O resultado final da hidratação é um gel com uma grande quantidade de poros, como já mostrado.

Segundo RUIZ (2003) o grau de hidratação e o módulo de rigidez se encontram intimamente ligados. A Figura 2.1 traz um esquema dos fenômenos e das fases de hidratação; destacando-se:

1. Fase Plástica: Período em que as reações de hidratação estão começando. A rigidez e o incremento de temperatura são insignificantes.

2. Início de Pega: Esta etapa se caracteriza pelo início das reações de hidratação das partículas de cimento.

3. Fase de endurecimento: Aumenta o número de contatos entre as partículas, sua intensidade e o módulo de rigidez.

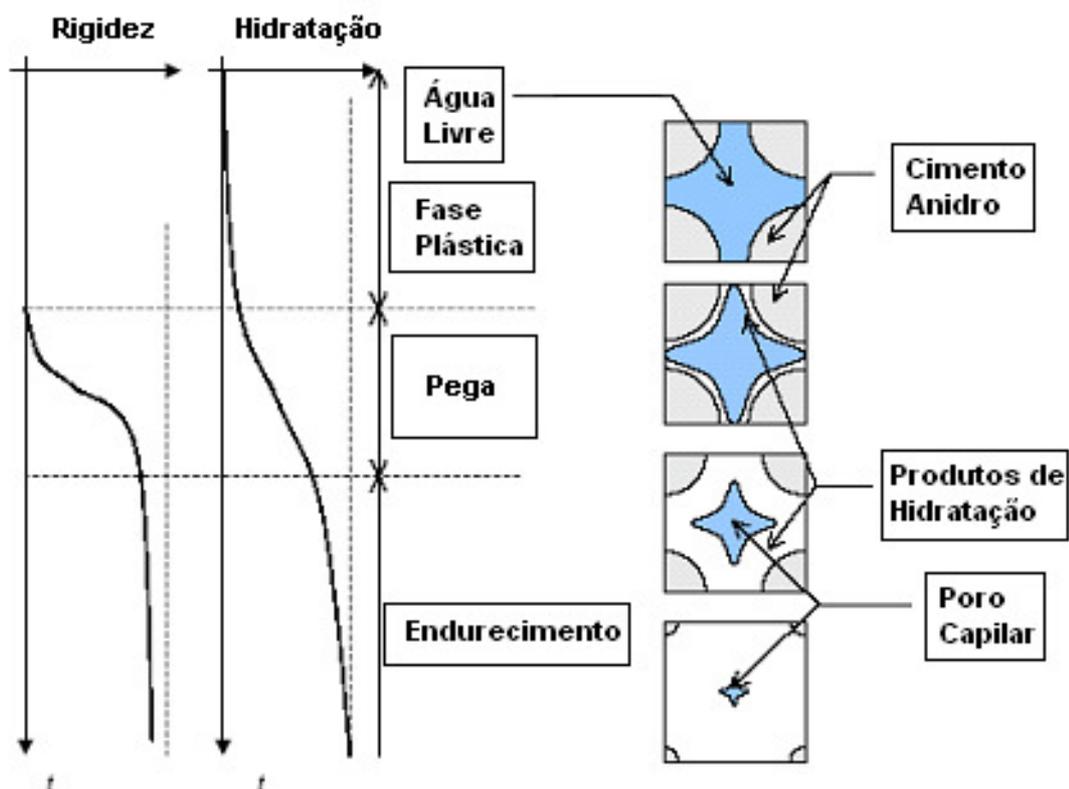


Figura 2.2 – Fases da hidratação. (RUIZ, 2003)

2.3.5 Retração: tipos e mecanismos

Em função dos diferentes mecanismos atuantes no fenômeno da retração, existem dificuldades em seu entendimento e nos fatores que a influenciam. Com base em mecanismos associados à perda de água, pode-se constatar que no decorrer da secagem do material ocorre: a perda de água capilar contida nos poros de maior diâmetro (macroporos), porém sem atingir valores expressivos de

tensão capilar, ou seja, não implicando em variação de volume; o início da formação de meniscos na faixa dos mesoporos e do conseqüente aumento da tensão capilar. Ao mesmo tempo, a difusão da água contida nos poros com diâmetro menor, porém conectados, também provoca uma variação da pressão de separação; e, finalmente, em ambientes com umidade relativa baixa, os diâmetros dos poros pequenos, (40% de umidade relativa e 2,5 nm), atingem um estágio onde não é possível existir o menisco. A partir desse momento, a variação dimensional se dá em função da variação de tensão superficial da água adsorvida na superfície sólida e da variação da pressão de desligamento da água interlamelar do C-S-H.

Em geral, vários mecanismos podem atuar gerando variação volumétrica, porém, pode-se simplificá-los para exemplificar a deformação do cimento hidratado; conforme ilustrado na equação (2.2).

$$\epsilon = \epsilon_{rs} + \epsilon_f + \epsilon_{ra} + \epsilon_{\Delta t} + \epsilon_c \quad (2.2)$$

Onde:

ϵ = deformação total;

ϵ_{rs} = deformação resultante da retração por secagem;

ϵ_f = deformação resultante da fluência;

ϵ_{ra} = deformação resultante da retração autógena;

$\epsilon_{\Delta t}$ = deformação resultante da variação de temperatura;

ϵ_c = deformação resultante da carbonatação.

As retrações em materiais cimentícios podem ser classificadas nos seguintes tipos:

a) Retração plástica: ocorre antes do fim da pega, ainda no estado fresco através da evaporação inicial rápida da água de amassamento, pela superfície exposta da mistura, resultando em fissuras superficiais.

b) Retração por secagem: acontece depois do fim da pega e ocorre em decorrência da evaporação da água de poro da mistura. Em ambientes com umidade abaixo de 100%, há retração da pasta de cimento em função da perda de água (POWERS, 1968, *apud* MELO NETO, 2002).

c) Retração química: diminuição dimensional em razão do volume dos compostos hidratados ser menor que o volume dos compostos anidros.

d) Retração autógena: define-se como variação de volume sob temperatura constante. Ocorre sem perda da umidade da mistura para o meio externo, causada pela diminuição da umidade relativa no interior da mistura devido a evolução da hidratação do cimento (POWERS, 1968, *apud* MELO NETO, 2002).

e) Retração ou contração térmica: A reação entre o cimento e a água é exotérmica, gerando calor, liberado para o ambiente, sendo parte desse calor liberado nas idades iniciais, quando a mistura cimentícia está suscetível a deformações. Em grandes volumes parte desse calor é acumulada gerando expansão térmica. Quando as reações diminuem, a temperatura diminui, tendo-se retração térmica ou contração térmica.

A retração por secagem e a retração autógena são causadas principalmente pelo mecanismo de tensão capilar. A causa da retração por secagem é a perda de água para o ambiente e a retração autógena para as reações de hidratação.

Parte da retração pode ser considerada reversível, retornando a valores próximos das dimensões originais (METHA e MONTEIRO, 1994). Geralmente esta recuperação ocorre através do “molhamento” da peça. Porém a maior parte da retração não é mais recuperada, sendo denominada de retração irreversível, provavelmente, por mudanças na estrutura do C-S-H durante o período da secagem (METHA e MONTEIRO, 1994).

A retração por secagem é uma componente importante da retração, sobretudo nas primeiras idades. Segundo RUIZ (2003), os principais parâmetros que influenciam este tipo de retração são: a umidade relativa; a idade e o tipo de cura; a forma do elemento; a relação água/cimento; a resistência do elemento; a temperatura ambiente.

A influência dos diferentes parâmetros é complexa devido a alguns fatores antagônicos, tendo todos muita importância nesta definição. Em geral, pode-se resumir na Tabela 2.6 a influência de cada variável (RUIZ, 2003).

TABELA 2.6 – Influência de alguns fatores na retração por secagem

Variável	Efeito sobre a retração ao aumentar a variável
Umidade	Diminui
Idade	Diminui
Forma	Diminui
a/c	Aumenta
Resistência	Diminui
Temperatura	Aumenta

2.3.6 Zona de transição

Zona de transição é o nome que se dá à interface entre a pasta de cimento e o agregado, principalmente o gráudo. MINDESS (1989) a caracteriza como sendo uma camada mais porosa que as demais, formada principalmente por grandes cristais de hidróxido de cálcio. A medida que se afasta do agregado, percebe-se o preenchimento dos vazios por C-S-H, até que se atinja a morfologia da matriz da pasta. Suas características dependerão do tipo de agregado, da relação a/c e do efeito dos aditivos e das adições.

Até a aproximadamente 1µm a partir do agregado, pode-se encontrar em alguns casos um filme duplo de grandes cristais de portlandita orientados

perpendicularmente à superfície do agregado. Tais fatos, orientação e dimensão dos cristais, fazem da zona de transição uma região crítica para a propagação de fissuras internas no concreto endurecido. Uma vez iniciada a fissura, essa poderá se propagar até outra zona de transição e se tornarem uma malha de microfissuras e capilares que constituirão um caminho para a entrada e deslocamento interno de agentes agressores.

Algumas medidas podem ser tomadas visando evitar o tamanho e as orientações preferenciais dos cristais, empregando-se adições minerais que reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos mais resistentes, ou com a diminuição da relação a/c. A espessura da camada aumenta com a idade, no caso da pasta pura, e diminui no caso do uso de materiais pozolânicos, indicando a reação com o Ca(OH)_2 (PAULON, 1995).

2.4 CURA DO CONCRETO

Para o prosseguimento das reações de hidratação, é necessário que a umidade relativa dos poros do concreto permaneça igual ou superior a 8%. Isso raramente é conseguido em um ambiente natural, devido à incidência de ventos, de variações de temperatura, de diferenças entre temperaturas do ar e do concreto, entre outros fatores, tornando-se praticamente indispensável, procedimentos artificiais de cura (NEVILLE, 1997).

Entende-se por cura o conjunto de procedimentos tomados para evitar a perda precoce da umidade e para controlar temperatura do concreto, durante um período suficiente para que este alcance certo nível de hidratação.

No caso de uma secagem precoce, não apenas a água de amassamento em excesso irá evaporar, mas também uma parte da água de hidratação. Com isso, não somente ocorrerão perdas de resistência à compressão, como também retração plástica excessiva, redução de resistência à abrasão e aumento da permeabilidade da camada mais superficial, que sofrerá os maiores danos pela falta de umidade.

A região mais interna do concreto em elementos estruturais, não costuma ser atingida pelos efeitos da cura. A secagem se faz de fora para dentro, atingindo níveis mais significativos em uma faixa entre 30 e 50 mm a partir da superfície, usualmente o cobrimento das armaduras (NEVILLE, 1997).

O período adequado de cura não é facilmente determinado, já que cada estrutura é sujeita a diferentes regimes de secagem e têm diferentes requisitos de durabilidade. Estudos, bem como a norma brasileira (NBR 5738/2003), apontam um período mínimo de 7 a 10 dias.

Assumindo que a determinação do período adequado de cura depende da reatividade do cimento, da relação a/c, da geometria da peça e dos fatores ambientais, LEVY e HELENE (1996) sugerem os tempos de cura apresentados na tabela 2.7, que devem ser multiplicados pelos fatores de correção n1, n2 e n3 constantes na tabela 2.8, função das características individuais do elemento estrutural.

TABELA 2.7 - Tempo mínimo de cura em função do tipo de cimento e da relação a/c (LEVY e HELENE, 1996).

Cimento	Relação a/c			
	0,35	0,55	0,65	0,7
CPI E II 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CPIV POZ 32	2 dias	3 dias	7 dias	10 dias
CPIII AF 32	2 dias	5 dias	7 dias	10 dias
CPI e CPII 40	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias
CPV ARI	2 dias	3 dias	5 dias	5 dias

TABELA 2.8 - Fatores de correção dos tempos de cura em função da geometria da peça e das condições ambientais (LEVY e HELENE, 1996).

Condições atmosféricas	T < 15°C		16°C < T < 39°C	
	UR < 70%	UR ≥ 70%	UR < 70%	UR ≥ 70%
n1	1,10	1,05	1,05	1,00
R=(área exposta)/(Volume da peça)	R ≤ 0,20	0,20 < R < 0,40	0,20 < R < 0,40	R ≥ 0,70
	(espessa)	(pouco espessa)	(delgada)	(muito delgada)
n2	1,00	1,05	1,10	1,20
Agressividade do ambiente*	Nula	Fraca	Média	Forte
n3	1,00	1,05	1,10	1,15

* A agressividade do meio ambiente é definida pela norma Cetesb L 1007 (N.A.).

2.5 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E DA UMIDADE NA RESISTÊNCIA

A ação da variação climática na resistência de concretos e argamassas foi bastante estudada por CÁNOVAS (1988), que relatou alguns dos efeitos mais conhecidos causados pela variação da umidade e da temperatura.

2.5.1 Efeitos da baixa temperatura sobre o concreto endurecido

Segundo CÁNOVAS (1998), o concreto já endurecido não sofre tanto com as baixas temperaturas como um concreto fresco. A grande inércia térmica do concreto exige para que haja uma penetração significativa do frio em seu interior, que se exponha o material a um tempo prolongado nestas condições. Se a temperatura a que o concreto está exposto for diminuída bruscamente de 10°C a 0°C, precisaria-se de 1 hora para que uma camada a 1 cm da superfície chegasse a 1°C de temperatura.

Quanto mais compacto e resistente um concreto, menores são os efeitos da baixa temperatura sobre ele. A compactidade e a resistência estão intimamente relacionados à sua porosidade. Se um concreto for submetido a uma situação de geada, os vazios capilares podem se encher de água podendo congelar em seu interior. Tal circunstância poderá ser prejudicial, uma vez que a água ao se congelar aumenta seu volume em até 9%, podendo gerar tensões internas não previstas à estrutura.

O coeficiente de dilatação térmica do concreto é 1.10^{-5} , ou seja, 10 micra por metro °C (Equação 2.3).

$$\epsilon_{cs} = \frac{L_t - L_0}{L_0} = \alpha L_0 (t_1 - t_0) \quad (2.3)$$

Onde:

ϵ_{cs} = retração térmica;

L_t = comprimento final;

L_0 = comprimento inicial;

$(t_1 - t_0)$ = tempo de exposição;

α = coeficiente de dilatação térmica.

2.5.2 Efeitos da alta temperatura sobre o concreto endurecido

Da mesma forma que ocorre com as baixas temperaturas, devido à sua grande inércia térmica, o concreto endurecido sofre pouco com o aumento da temperatura, desde que esse aumento fique em níveis ambientais normais, principalmente se a peça tiver grandes dimensões. Em alguns casos, o efeito da

exposição a elevadas temperaturas poderá ser benéfico, desde que para isso, também haja uma elevada umidade relativa.

Quando comparado a outros materiais, como o aço, é consensual que o concreto possui uma elevada resistência ao fogo. Embora haja uma diminuição da resistência, o concreto resiste, por um tempo considerável, a esse tipo de exposição, sem chegar ao colapso.

A pasta de cimento Portland hidratada é basicamente formada de silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio hidratado. Quando exposto a altas temperaturas, a temperatura do concreto não se elevará até que toda água evaporável tenha sido removida, sendo necessário um considerável calor de vaporização para a conversão de água em vapor (METHA e MONTEIRO, 1994). As águas livres capilares começam a evaporar após a temperatura de 100°C, retardando o aquecimento do concreto. A evaporação total da água capilar ocorre entre 200°C e 300°C.

O gel de C-S-H sofre um processo de desidratação durante o aquecimento, que se inicia à 100°C e se intensifica aos 300°C, terminando próximo aos 400°C. Neste período, ocorre uma redução progressiva da água de gel, com a formação de silicatos anidros. Isto resulta em um considerável decréscimo na resistência e causa o aparecimento de fissuras superficiais (CÁNOVAS, 1998).

As partículas anidras da pasta não são afetadas pela variação da temperatura. No entanto, a maneira como elas estão ligadas ao restante da pasta pode ser alterada, visto que a zona de transição entre os agregados e a pasta consiste em uma região mais fraca, que desidrata com maior facilidade e, conseqüentemente, é mais suscetível à fissuração.

A quantidade de portlandita decresce até 100°C, devido à desidratação. Acima de 530°C, ela se decompõe rapidamente, transformando-se em óxido de cálcio (CaO). Durante o processo de resfriamento, este óxido pode se re-hidratar, formando novamente a portlandita, o que resulta em expansões que acabam contribuindo para o aparecimento de fissuras no concreto. A portlandita assim

formada apresenta um arranjo cristalino menos estável e sofre decomposição a temperaturas mais baixas que a original (ALONSO *et al*,2003).

2.5.3 Efeitos da umidade sobre o concreto

Diferentemente do que ocorre quando se analisam os efeitos da alta e da baixa temperatura sobre o concreto e/ou argamassa, segundo CÁNOVAS (1998), para que o concreto sofra efeitos patológicos, é preciso uma baixa umidade relativa do ar, aliada a altas temperaturas. Ao contrário, uma elevada umidade ambiente traz benefícios ao concreto nas primeiras idades.

CAPITULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos que foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa experimental.

3.1 – MATERIAIS

Para a pesquisa experimental foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland de Alto Forno – **CP III 40 RS Forte**;
- Cimento Portland Composto – **CP II E 32**;
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – **CP IV ARI PLUS**;
- Cimento especial com pega acelerada e adições minerais de alta pozolanicidade e elevada finura – **DURACEM AD 300**;
- Cimento especial de baixo calor de hidratação, baixo potencial de retração, altas resistências iniciais e alta resistência a sulfatos (ARS) -**Silimax**;
- Agregado miúdo: areia natural de rio;
- Água: potável, fornecida pela Companhia Municipal de água e Esgoto de Juiz de Fora – CESAMA;
- Aditivo plastificante.

Todos os materiais foram previamente escolhidos, adquiridos e então armazenados adequadamente visando manter suas propriedades e utilizar sempre os mesmos materiais. Assim, evitou-se problemas que pudessem ser decorridos de variações de lotes. Na primeira etapa do estudo experimental fez-se a caracterização prévia dos materiais segundo as normas brasileiras. Encontra-se no anexo A, a caracterização detalhada dos materiais descritos.

3.1.1 – Cimento Portland

Conforme mencionado, foram utilizados na pesquisa: cimento Portland de alto forno - CP III 40 RS Forte, da marca comercial BARROSO; cimento Portland composto - CP II E 32, da marca comercial BARROSO; cimento Portland de alta resistência inicial – CP V ARI PLUS, da marca comercial CIMINAS; Cimento especial de pega acelerada e adições de alta pozolanicidade e elevada finura – DURACEM AD 300; e o Cimento especial de alta resistência a sulfatos (ARS) – SILIMAX, todos fabricados pelo grupo Holcim. A caracterização química, física e mecânica fornecida pelo fabricante é apresentada segundo as Tabelas 3.1 a 3.5.

TABELA 3.1 - Características do cimento CP III 40 RS FORTE, BARROSO.

<i>Composição Química</i>		<i>Características Físicas</i>	<i>Blaine NBR 7224</i>
Determinação	Teor(%)	Resistência à compressão (NBR 7215/96)	cm²/g
			4473
SiO ₂	27,17	1 dia – 9,5 MPa	Início de Pega (NBR 11581/91)
Al ₂ O ₃	8,68		
Fe ₂ O ₃	1,92	3 dia – 27,4 MPa	255 minutos
CaO	52,97		
MgO	4,3	7 dia – 36,2 MPa	Fim de Pega (NBR 11581/91)
SO ₃	2,26		
K ₂ O	0,49	28 dia – 48,0 MPa	320 minutos
PF(1000°C)	2,38		

TABELA 3.2 - Características do cimento CP II E 32, BARROSO.

<i>Composição Química</i>		<i>Características Físicas</i>	<i>Blaine NBR 7224</i>
Determinação	Teor(%)	Resistência à compressão (NBR 7215/96)	cm²/g
			4323
SiO ₂	24,04	1 dia – 8,8 MPa	Início de Pega (NBR 11581/91) 235 minutos
Al ₂ O ₃	7,17		
Fe ₂ O ₃	2,3	3 dia – 22,1 MPa	
CaO	57,45	7 dia – 28,1 MPa	Fim de Pega (NBR 11581/91) 305 minutos
MgO	3,44		
SO ₃	1,69		
K ₂ O	0,57	28 dia – 38,5 MPa	
PF(1000°C)	5,27		

TABELA 3.3 - Características do cimento CP V ARI PLUS, BARROSO.

<i>Composição Química</i>		<i>Características Físicas</i>	<i>Blaine NBR 7224</i>
Determinação	Teor(%)	Resistência à compressão (NBR 7215/96)	cm²/g
			4663
SiO ₂	19,36	1 dia – 30,7 MPa	Início de Pega (NBR 11581/91) 141 minutos
Al ₂ O ₃	4,87		
Fe ₂ O ₃	3,26	3 dia – 44,8 MPa	
CaO	63,85	7 dia – 49 MPa	Fim de Pega (NBR 11581/91) 188 minutos
MgO	0,78		
SO ₃	2,75		
K ₂ O	0,76	28 dia – 55,7 MPa	
PF(1000°C)	2,52		

TABELA 3.4 - Características do cimento DURACEM AD 300, BARROSO.

<i>Composição Química</i>		<i>Características Físicas</i>	<i>Blaine NBR 7224</i> cm²/g 8230
Determinação	Teor(%)	Resistência à compressão (NBR 7215/96)	
SiO ₂	26,71	1 dia – 23,1 MPa	Início de Pega (NBR 11581/91) 168 minutos
Al ₂ O ₃	8,80		
Fe ₂ O ₃	2,23	3 dia – 40,1 MPa	
CaO	51,70	7 dia – 50,3 MPa	Fim de Pega (NBR 11581/91) 238 minutos
MgO	3,79		
SO ₃	3,53		
K ₂ O	0,58	28 dia – 61,4 MPa	
PF(1000°C)	1,65		

TABELA 3.5 - Características do cimento SILIMAX, BARROSO.

<i>Composição Química</i>		<i>Características Físicas</i>	<i>Blaine NBR 7224</i> cm²/g 4618
Determinação	Teor(%)	Resistência à compressão (NBR 7215/96)	
SiO ₂	*	1 dia – 17,3 MPa	Início de Pega (NBR 11581/91) 208 minutos
Al ₂ O ₃	*		
Fe ₂ O ₃	*	3 dia – 29,7 MPa	
CaO	*	7 dia – 41,0 MPa	Fim de Pega (NBR 11581/91) 255 minutos
MgO	*		
SO ₃	2,86		
K ₂ O	*	28 dia – 49,7 MPa	
PF(1000°C)	1,56		

* Valores não fornecidos pelo fabricante.

3.1.2 – Agregados

O agregado miúdo empregado foi areia natural de rio, adquirida em Juiz de Fora, de procedência do Areal Rio Negro de Levy Gasparian – RJ. A caracterização do material foi realizada segundo a normalização brasileira (NBR 7211/2005), com sua distribuição granulométrica atendendo aos limites para a zona utilizável. Salienta-se que o mesmo possui $d_{máx}$ característico igual a 2,4 mm. A composição granulométrica e a curva representativa da granulometria do agregado, assim como as características físicas do material, estão apresentadas no anexo A.

3.1.3 – Aditivo químico

O aditivo químico utilizado foi o Sikament 322N da Sika S/A, classificado no Brasil pela NBR 11768/1992 como plastificante. Segundo as informações fornecidas pelo fabricante, as características do produto são as seguintes: Produto líquido, de cor marrom, à base de melamina, isento de cloretos. Os ensaios de caracterização do produto são regidos pela norma NBR 10908/1990. A quantidade recomendada pelo fabricante para o uso do aditivo é de 0,20% a 0,50% em relação à massa do cimento. No estudo foi utilizado 0,30%.

3.2 – CURA DO CONCRETO

As amostras de argamassa foram submetidas à cura normal (NBR 5738/2003), ficando nas fôrmas por 24 horas, cobertas por placas de vidro até serem desmoldadas. Após a desmoldagem, as amostras foram imersas em água, onde permaneceram até a data do ensaio.

3.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL

A dosagem utilizada nessa pesquisa adotou uma proporção em massa de 1:3 (areia e cimento) com fator água cimento de 0,48 e 0,30% de aditivo plastificante (Tabela 3.6).

Os materiais foram pesados e misturados mecanicamente até atingirem a homogeneização desejada. Para cada um dos cinco tipos de cimento, moldaram-se corpos-de-prova para 27 combinações diferentes de temperatura e/ou umidade, ou seja, expondo-os a três valores de temperatura diferentes (0°C, temperatura ambiente e 100°C), combinadas entre si a três níveis de umidade (0%, umidade relativa do ar e 100%), realizando os ensaios em duas idades dentro do período convencional de cura (3 e 7 dias). Sendo assim foram moldados 270 corpos-de-prova (Tabela 3.7).

TABELA 3.6 - Composição da mistura da argamassa utilizada.

Traço	Relação a/c	Aditivo plastificante (% massa do cimento)
1:3	0,48	0,30

TABELA 3.7 – Programa Experimental

Tipo de cimento	Temperatura (°C)	Umidade (%)
CP II E 32	0	0
		URAR
		100
	Ambiente	0
		URAR
		100
	100	0
		URAR
		100
CP III 40 RS	0	0
		URAR
		100
	Ambiente	0
		URAR
		100
	100	0
		URAR
		100

TABELA 3.7 – Programa Experimental (Cont.)

Tipo de cimento	Temperatura (°C)	Umidade (%)
CP VARI PLUS	0	0
		URAR
		100
	Ambiente	0
		URAR
		100
	100	0
		URAR
		100
DURACEM AD 300	0	0
		URAR
		100
	Ambiente	0
		URAR
		100
	100	0
		URAR
		100
SILIMAX	0	0
		URAR
		100
	Ambiente	0
		URAR
		100
	100	0
		URAR
		100

* URAR: Umidade relativa do ar (70%); Temperatura Ambiente: 20°C.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS

Empregando-se corpos-de-prova cilíndricos 5 x 10 (cm) e aferindo as dimensões, antes e após a exposição do CP às condições propostas, pretendeu-se avaliar algumas propriedades da argamassa estudada e do tipo de cimento. A

propriedade mecânica avaliada foi a resistência à compressão axial, segundo procedimentos da NBR 5739/1994.

Conforme mencionado, após terem permanecido 24h na fôrma, os CP's foram desmoldados e levados à câmara úmida, onde permaneceram submersos até o dia do ensaio. Logo que retirados do tanque, os CP's tiveram suas dimensões avaliadas, permanecendo, logo após, durante um período mínimo de 8h nas condições pré-estabelecidas. Finalizada essa etapa, eles eram novamente medidos e imediatamente efetuou-se o ensaio de resistência à compressão.

3.4.1 Sequência para realização dos ensaios

Assim, para simular as condições de exposição nas quais se pretendia verificar o comportamento dos cimentos, foram seguidas as seguintes etapas:

- *0% de umidade e 0°C de temperatura:* No dia anterior ao ensaio, os CP's foram retirados do tanque, tiveram suas dimensões avaliadas, sendo encaminhados logo após a estufa, aquecida à 100°C. Após 16 horas, foram retirados da estufa, embalados em invólucro plástico ermeticamente fechado e imediatamente levados à geladeira, onde permaneceram por 8 horas. Logo depois, verificou-se as dimensões e efetuou-se o ensaio de resistência à compressão.
- *umidade relativa do ar e 0°C de temperatura:* No dia anterior ao ensaio, os CP's foram retirados do tanque e deixados expostos ao ambiente. Após 16 horas, foram medidos, embalados em invólucro plástico, ermeticamente fechado e imediatamente levados à geladeira, onde permaneceram por 8 horas. Logo depois, verificou-se as dimensões e efetuou-se o ensaio de resistência à compressão.
- *100% de umidade e 0°C de temperatura:* No dia do ensaio, os CP's foram retirados do tanque pela manhã, medidos e levados a geladeira submersos em um recipiente com água, onde permaneceram por 8 horas. Logo depois, verificou-se as dimensões e efetuou-se o ensaio de resistência à compressão.

- *0% de umidade e temperatura ambiente:* No dia anterior ao ensaio, os CP's foram retirados do tanque e encaminhados a estufa, aquecida à 100°C. Após 16 horas, foram retirados da estufa, medidos, embalados em invólucro plástico ermeticamente fechado e deixados 8 horas expostos ao ambiente, verificou-se as dimensões e efetuou-se o ensaio de resistência à compressão.
- *umidade relativa do ar e temperatura ambiente:* Foram retirados do tanque no dia anterior e deixados expostos ao ambiente por 16 horas. Após terem suas dimensões avaliadas, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão.
- *100% de umidade e temperatura ambiente:* Após serem retirados do tanque, foram medidos e ensaiados.
- *0% de umidade e 100°C de temperatura:* No dia anterior ao ensaio, os CP's foram retirados do tanque, medidos e encaminhados à estufa, aquecida à 100°C. Após 16 horas, foram retirados da estufa, verificou-se as dimensões e efetuou-se o ensaio de resistência à compressão.
- *Umidade relativa do ar e 100°C de temperatura:* Foram retirados do tanque no dia anterior e deixados expostos ao ambiente. Após 16 horas, foram medidos, embalados e colocados na estufa. Decorridas 8 horas, verificou-se as dimensões e efetuou-se o ensaio de resistência à compressão..
- *100% de umidade e 100°C de temperatura:* No dia do ensaio, pela manhã, os CP's foram retirados do tanque e medidos. Logo após, colocados em um recipiente com água e encaminhados à estufa, a 100°C, onde permaneceram por 8 horas. Logo após, verificou-se as dimensões e efetuou-se o ensaio de resistência à compressão.

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa experimental, ou seja, a variação volumétrica e os resultados do ensaio de resistência à compressão axial.

Todos os resultados foram avaliados por análise estatística, e os valores máximos e mínimos foram obtidos de forma que os resultados se apresentassem em um intervalo de confiança de 95%.

É relevante comentar que as argamassas, por serem produzidas a partir de cimentos diferentes, apresentam comportamentos diferenciados em relação às suas propriedades mecânicas e na durabilidade. Então, não se fez uma análise comparativa e quantitativa direta entre um ou outro tipo de argamassa. Os resultados apresentados consideram o efeito dos procedimentos de exposição nas propriedades mecânicas e na durabilidade, analisadas individualmente para cada caso.

Então, baseado nos ensaios realizados, efetuou-se uma análise estatística buscando-se em primeiro lugar: garantir a confiabilidade da amostra através do coeficiente de variação ($CV \leq 25\%$); e em segundo lugar: formular equações através de regressão linear, utilizando-se o programa Excel, que pudessem fornecer a resistência estimada da argamassa relacionando sua idade e as condições de exposição (umidade e temperatura), para cada tipo de cimento estudado.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as médias dos resultados obtidos para cada cimento em estudo. Foram calculados os coeficientes de variação e o resultado de todas as séries ficou dentro da condição citada anteriormente, ou seja, com valores inferiores a 25%. Com isso, conclui-se que as amostras podem ser consideradas aceitáveis, sob o ponto de vista estatístico.

Quando há necessidade de se verificar a correlação de dados em estudo, deve-se fazer no mínimo três tipos de funções e observar a que apresenta um menor erro padrão; são elas: a linear, potencial e exponencial. Após ser realizada a análise, a função que apresentou o menor erro padrão para todos os tipos de cimento foi a exponencial composta, onde:

- f_c - resistência à compressão da argamassa (MPa);
- e - algarismo neperiano ($e = 2,71828$);
- I - idade do ensaio (dias);
- T - temperatura do corpo-de-prova ($^{\circ}\text{C}$);
- U - umidade do corpo-de-prova (%).

Então, buscando-se chegar a expressões que representem a resistência à compressão em função da idade do CP, da temperatura ambiente e da umidade relativa, foram formuladas as equações expostas a seguir (item 4.1 a 4.5).

TABELA 4.1 – Média aritmética dos resultados dos ensaios de resistência à compressão em MPa ($CV \leq 25\%$).

Tipos de cimento	Temperatura	Umidade = 0%		URAR		Umidade = 100%	
	(°C)	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
CP II E 32	0	13,15	27,56	10,17	20,07	7,05	17,67
	Ambiente	12,96	25,96	9,36	19,13	7,99	17,13
	100	13,56	20,44	11,13	20,54	14,68	18,10
CP III 40 RS	0	36,04	39,81	22,99	26,07	9,02	24,38
	Ambiente	32,45	39,05	16,28	27,82	10,77	23,47
	100	34,81	41,69	15,37	29,00	17,98	24,23
CP V ARI PLUS	0	20,80	30,32	19,76	23,05	17,12	19,30
	Ambiente	25,56	26,27	20,91	27,96	13,34	20,54
	100	28,28	29,52	19,66	29,00	13,99	20,65
DURACEM AD 300	0	11,54	15,85	13,70	25,31	6,93	16,00
	Ambiente	12,20	14,71	11,85	30,34	6,83	12,40
	100	15,95	33,50	9,67	21,75	4,35	10,39
SILIMAX	0	24,68	40,08	13,75	19,82	16,77	19,34
	Ambiente	25,11	34,05	21,48	24,59	14,23	19,10
	100	25,61	33,54	22,79	29,33	16,93	22,07

4.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CP II E 32

4.1.1 Resistência à compressão axial

Para argamassas produzidas com cimento CII E 32 Barroso (Holcim), foi desenvolvida a seguinte expressão para obtenção da resistência:

$$f_c = 7,334 e^{0,1591U} e^{0,00115T} e^{-0,0033U} \quad (\text{erro} = 1,167 \text{ MPa}) \quad (4.1)$$

Os gráficos compararam, para as idades estudadas (3 e 7 dias), os resultados conseguidos através dos ensaios em laboratório e a estimativa da resistência através da fórmula (4.1) apresentada.

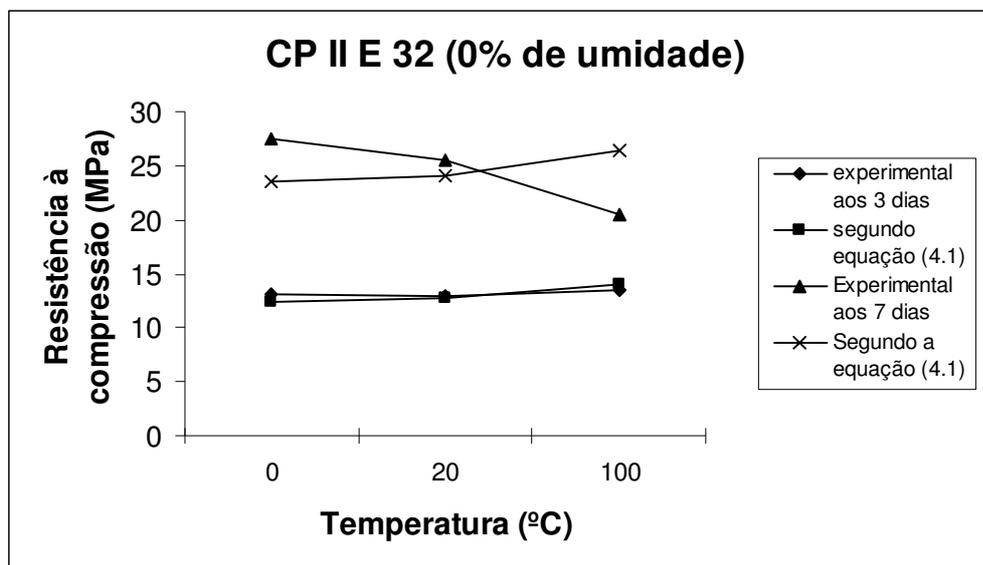


Figura 4.1. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 0% (resultado experimental x equação 4.1)

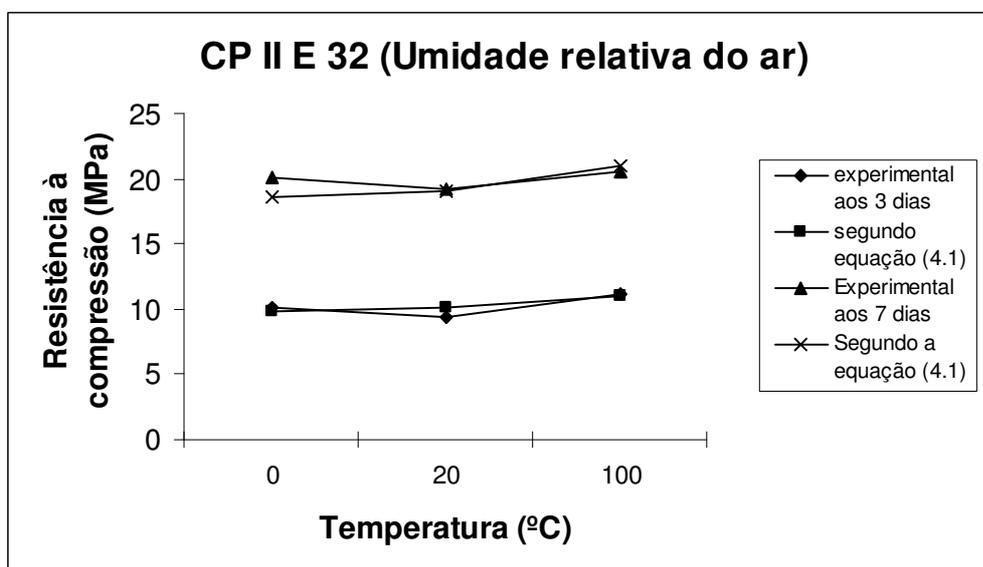


Figura 4.2. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para umidade relativa do ar (resultado experimental x equação 4.1)

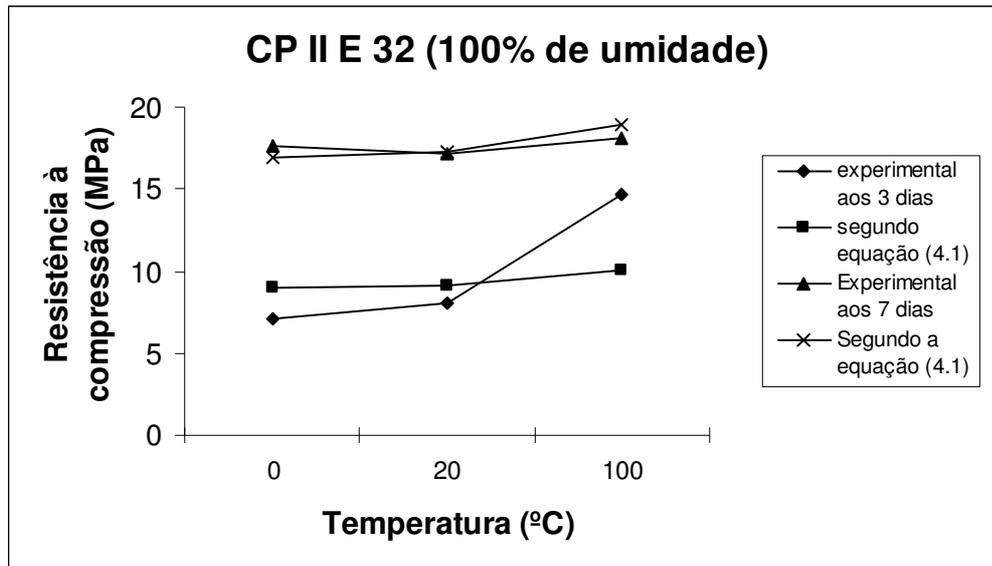


Figura 4.3. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 100% (resultado experimental x equação 4.1)

4.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CP III 40 RS

4.2.1 Resistência à compressão axial

Para argamassas produzidas com cimento CPIII 40 RS Forte Barroso (Holcim), foi desenvolvida a seguinte expressão para obtenção da resistência:

$$f_c = 20,581 e^{0,1112I} e^{0,0012T} e^{-0,0077U} \quad (\text{erro} = 1,228 \text{ MPa}) \quad (4.2)$$

Os gráficos compararam, para as idades estudadas (3 e 7 dias), os resultados conseguidos através dos ensaios em laboratório e a estimativa da resistência através da fórmula (4.2) apresentada.

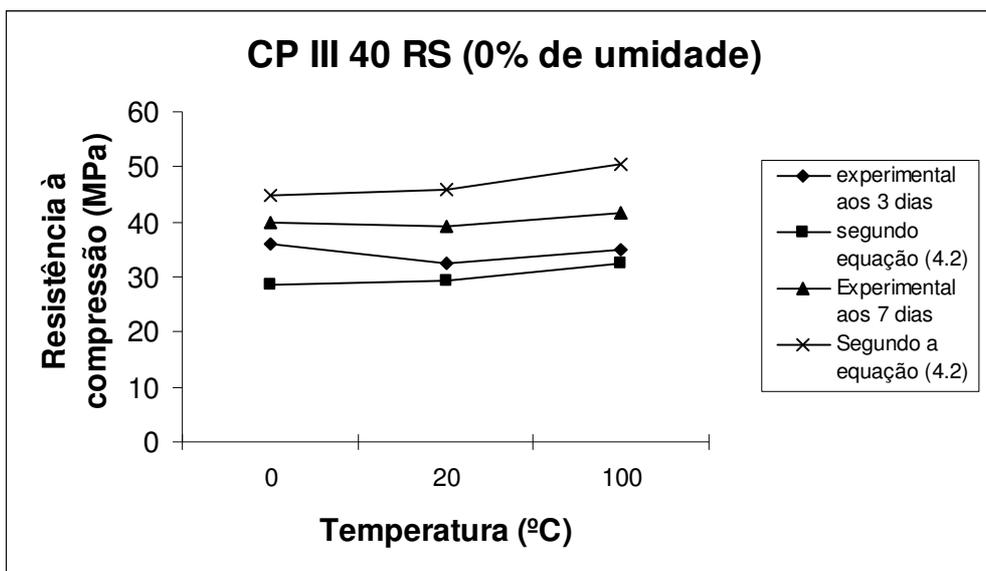


Figura 4.4. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 0% (resultado experimental x equação 4.2)

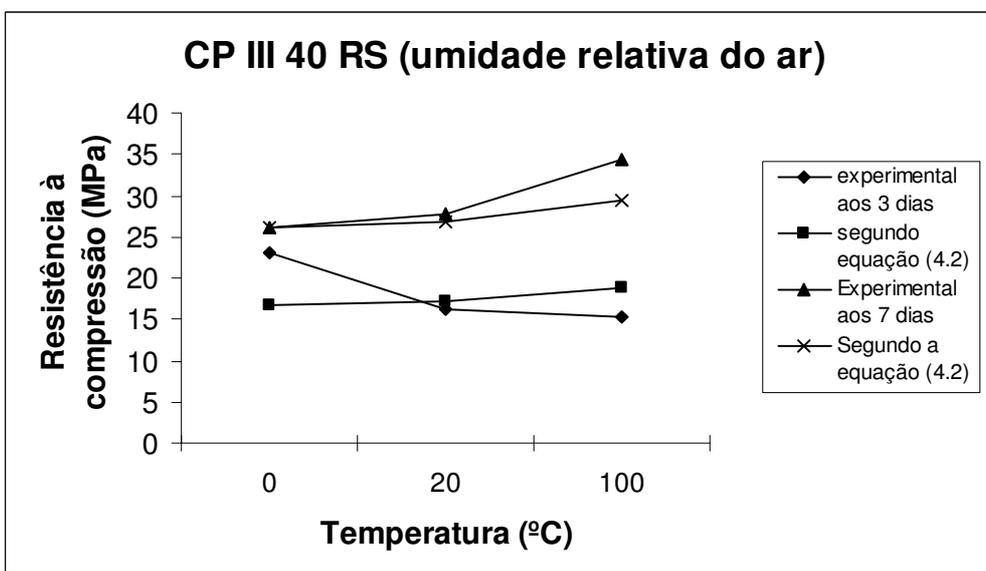


Figura 4.5. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para umidade relativa do ar (resultado experimental x equação 4.2)

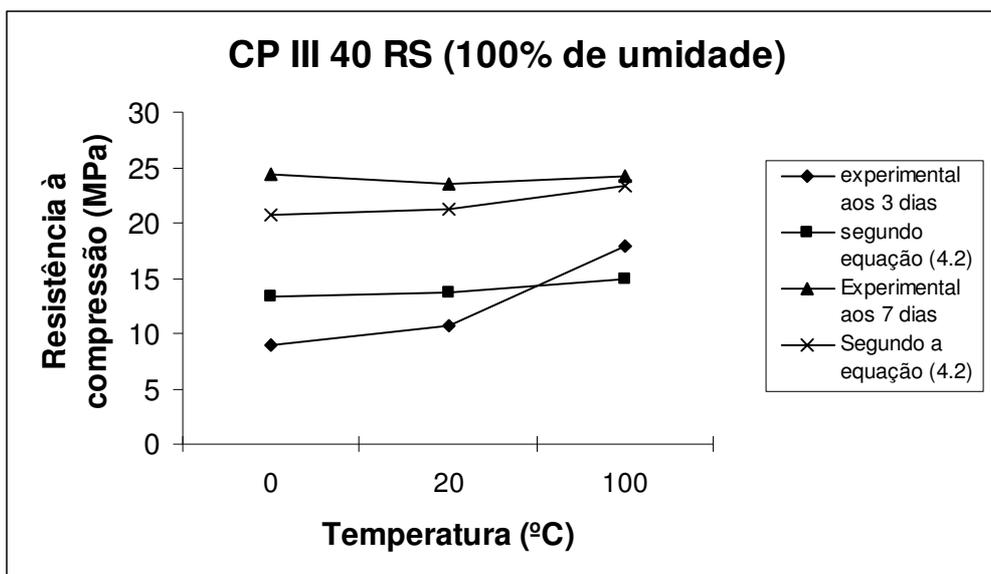


Figura 4.6. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 100% (resultado experimental x equação 4.2)

4.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CP V ARI PLUS

4.3.1 Resistência à compressão axial

Para argamassas produzidas com cimento CP V ARI PLUS Ciminias (Holcim), foi desenvolvida a seguinte expressão para obtenção da resistência:

$$f_c = 17,39 e^{0,0867T} e^{0,00005T} e^{-0,0027U} \quad (\text{erro} = 1,287 \text{ MPa}) \quad (4.3)$$

Os gráficos compararam, para as idades estudadas (3 e 7 dias), os resultados conseguidos através dos ensaios em laboratório e a estimativa da resistência através da fórmula (4.3) apresentada.

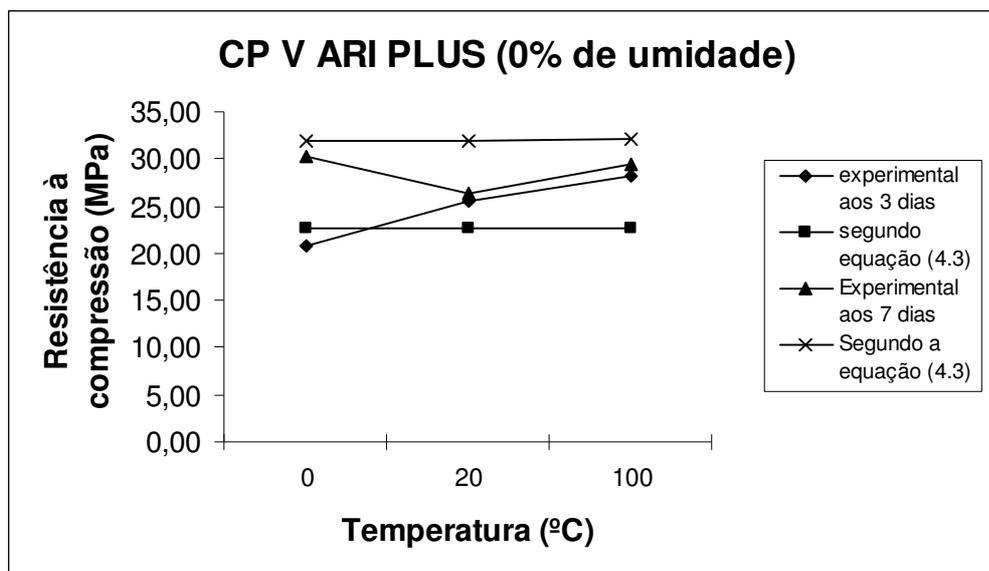


Figura 4.7. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 0% (resultado experimental x equação 4.3)

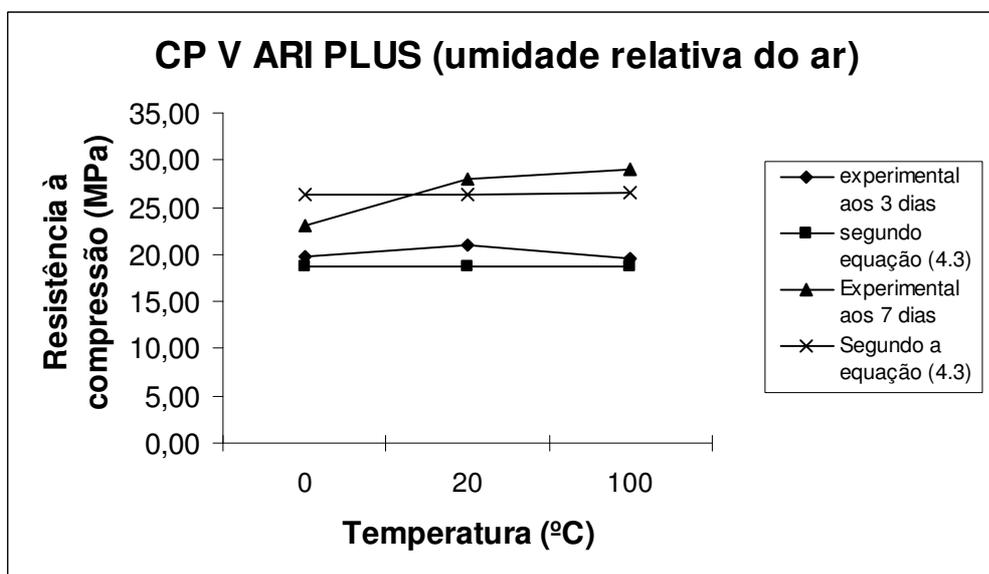


Figura 4.8. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para umidade relativa do ar (resultado experimental x equação 4.3)

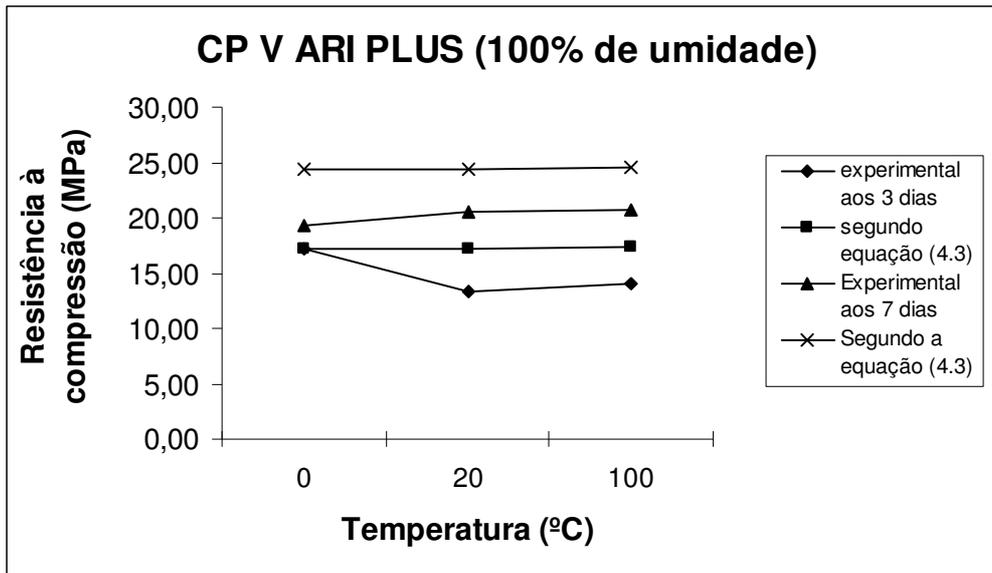


Figura 4.9. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 100% (resultado experimental x equação 4.3)

4.4 RESULTADOS OBTIDOS PARA ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM DURACEM AD 300

4.4.1 Resistência à compressão axial

Para argamassas produzidas com cimento DURACEM AD 300 (Holcim), foi desenvolvida a seguinte expressão para obtenção da resistência:

$$f_c = 7,9318 e^{0,1643T} e^{-0,00043T} e^{-0,0027U} \quad (\text{erro} = 1,446 \text{ MPa}) \quad (4.4)$$

Os gráficos compararam, para as idades estudadas (3 e 7 dias), os resultados conseguidos através dos ensaios em laboratório e a estimativa da resistência através da fórmula (4.4) apresentada.

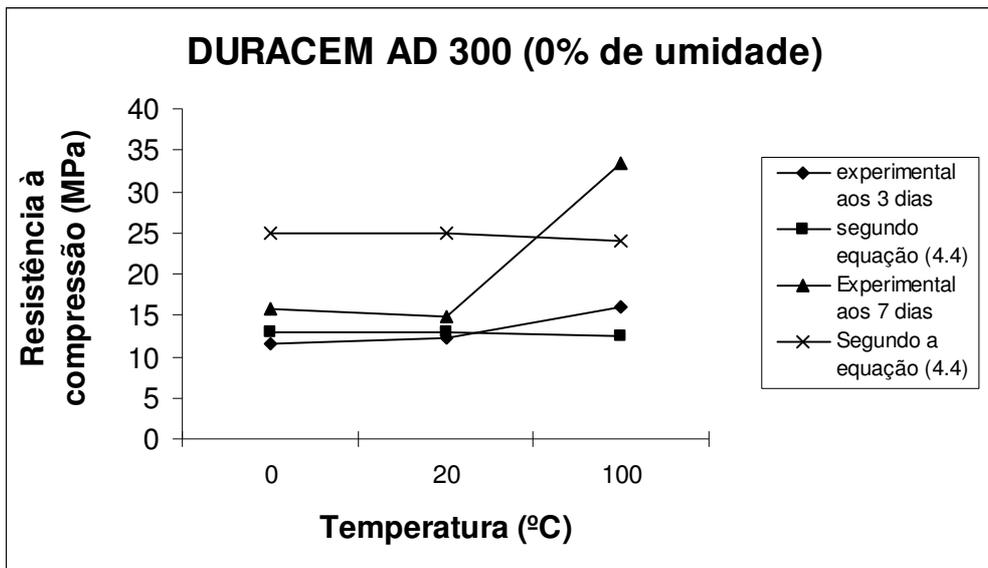


Figura 4.10. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 0% (resultado experimental x equação 4.4)

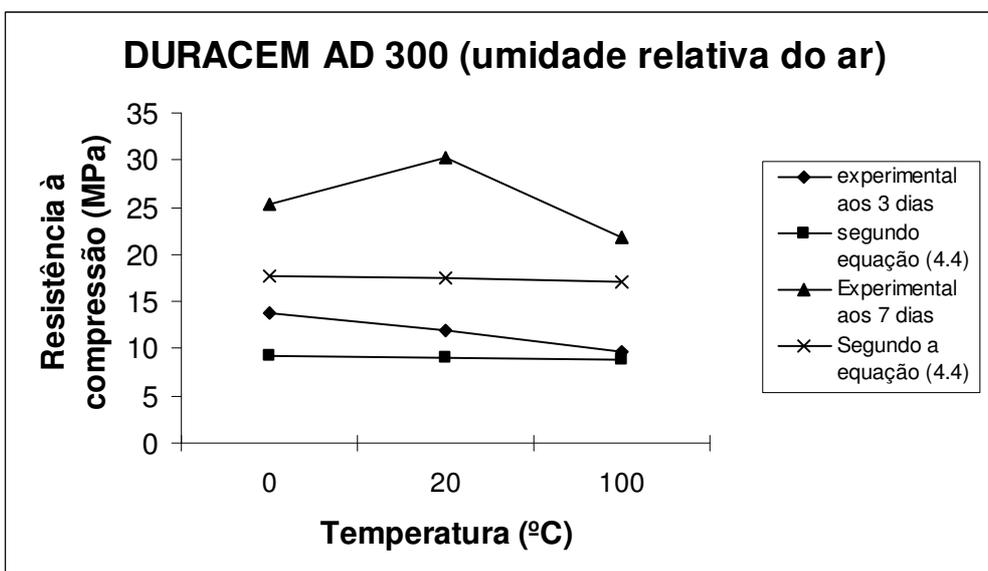


Figura 4.11. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para umidade relativa do ar (resultado experimental x equação 4.4)

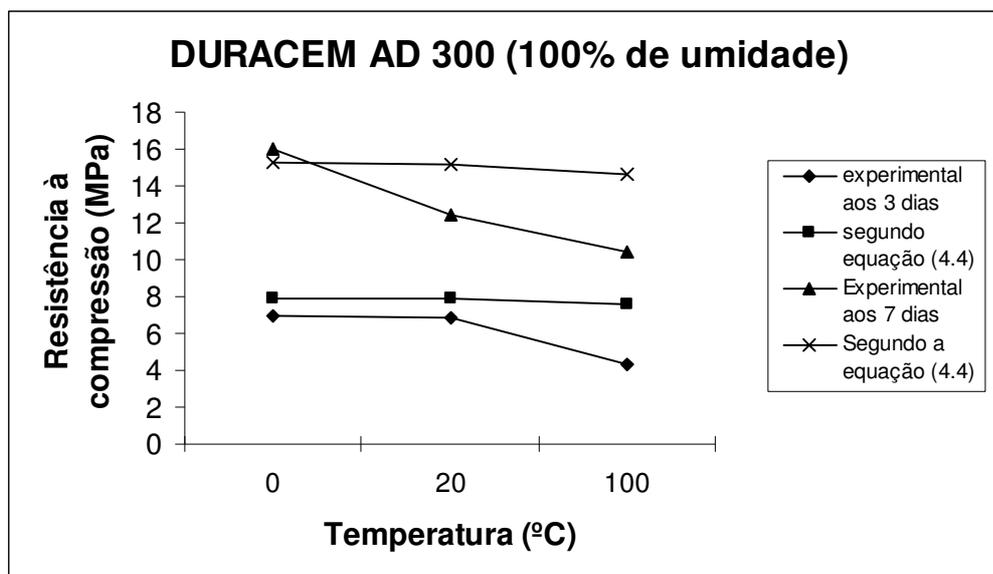


Figura 4.12. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 100% (resultado experimental x equação 4.4)

4.5 RESULTADOS OBTIDOS PARA ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM SILIMAX

4.5.1 Resistência à compressão axial

Para argamassas produzidas com cimento SILIMAX (Holcim), foi desenvolvida a seguinte expressão para obtenção da resistência:

$$f_c = 20,083 e^{0,0698T} e^{0,0014T} e^{-0,0051U} \quad (\text{erro} = 1,137 \text{ MPa}) \quad (4.5)$$

Os gráficos compararam, para as idades estudadas (3 e 7 dias), os resultados conseguidos através dos ensaios em laboratório e a estimativa da resistência através da fórmula (4.5) apresentada.

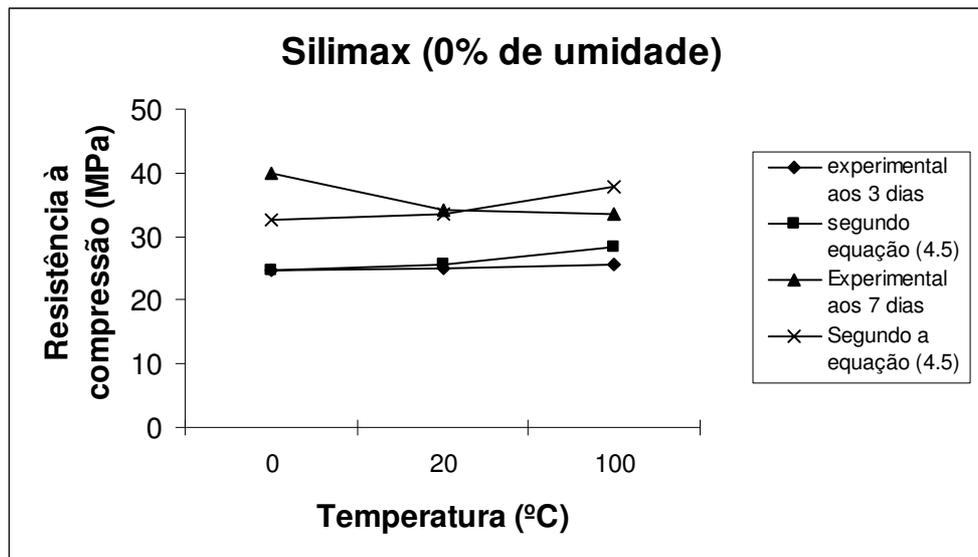


Figura 4.13. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 0% (resultado experimental x equação 4.5)

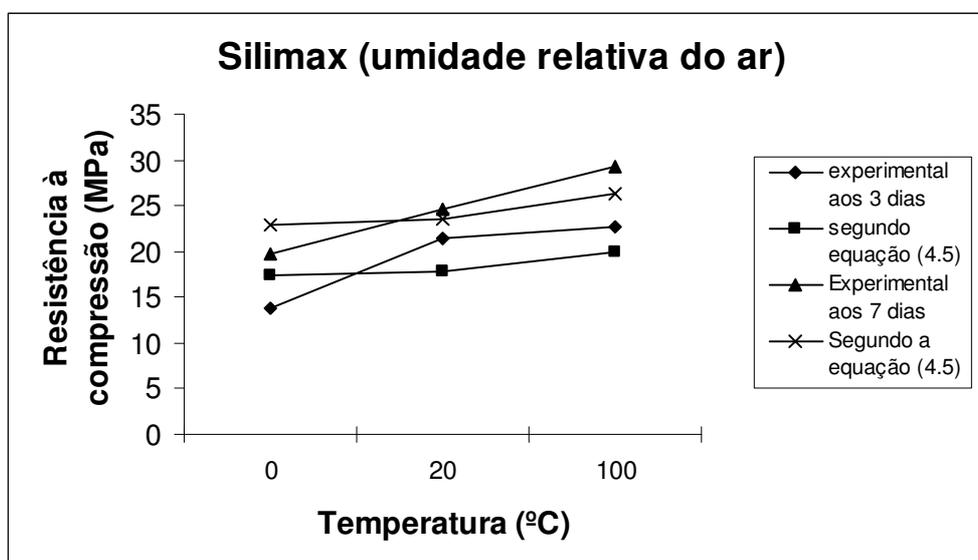


Figura 4.14. Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para umidade relativa do ar (resultado experimental x equação 4.5)

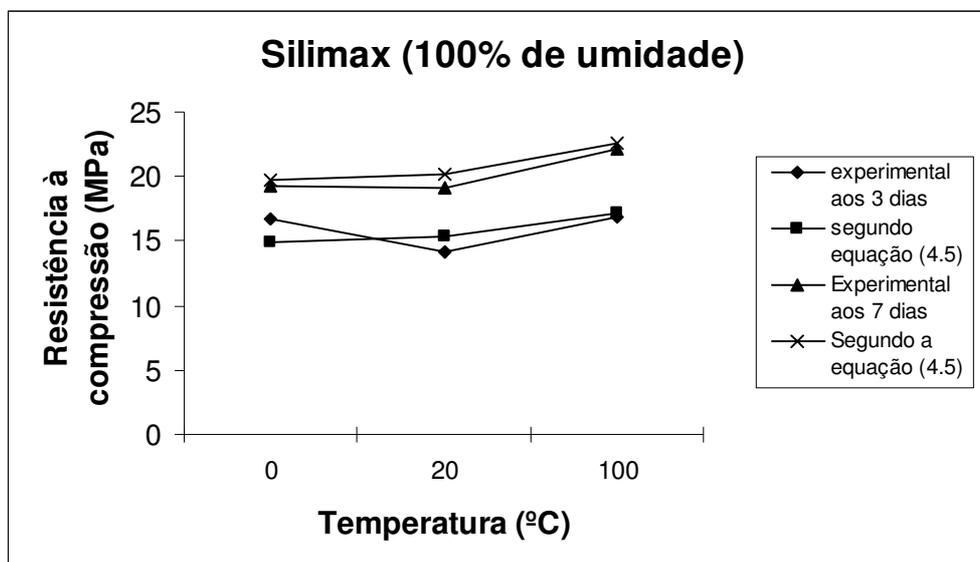


Figura 4.15 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 100% (resultado experimental x equação 4.5).

4.6 APRESENTAÇÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Utilizando-se os gráficos a seguir, englobando todos os tipos de cimento utilizados na pesquisa para cada umidade de exposição (0% de umidade, umidade relativa do ar e 100% de umidade) combinadas com as idades (3 e 7 dias de idade), buscou-se uma melhor visualização para análise dos resultados.

Seguiu-se a mesma concepção dos gráficos anteriores, onde os resultados das resistências conseguidas através dos ensaios em laboratório e a estimativa da resistência através das fórmulas propostas, foram novamente utilizadas.

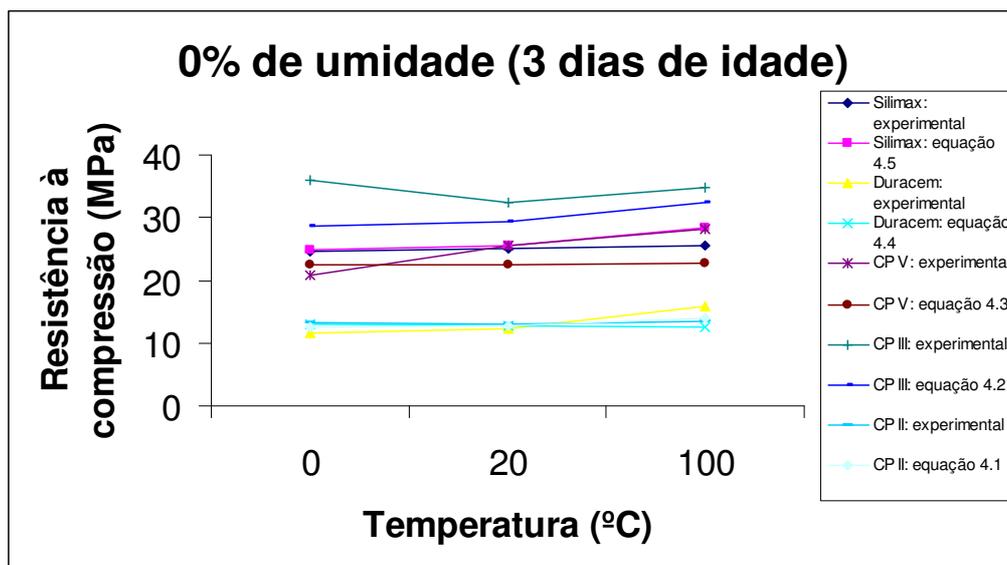


Figura 4.16 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 0% e 3 dias de idade (resultados experimentais x equações).

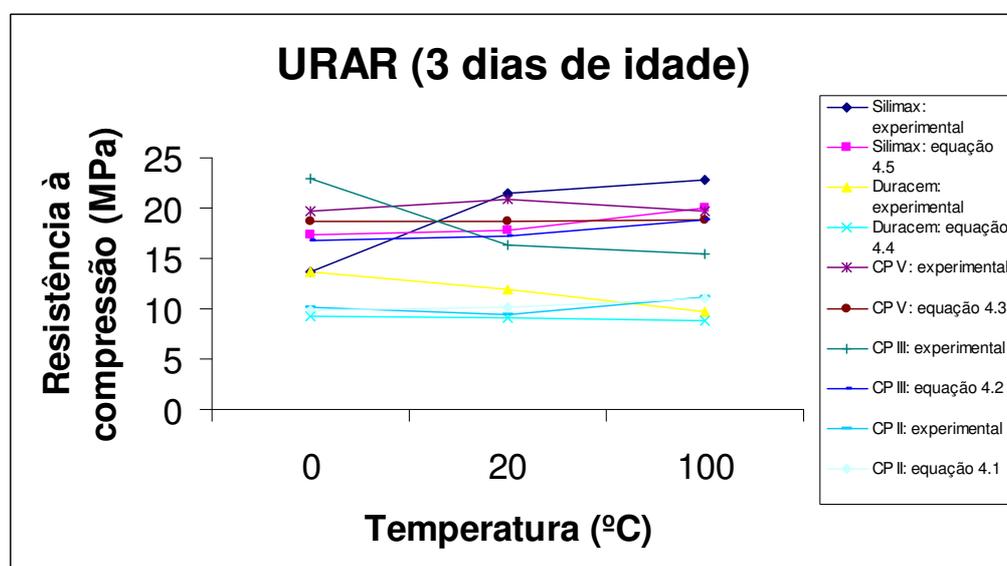


Figura 4.17 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para umidade relativa do ar e 3 dias de idade (resultados experimentais x equações).

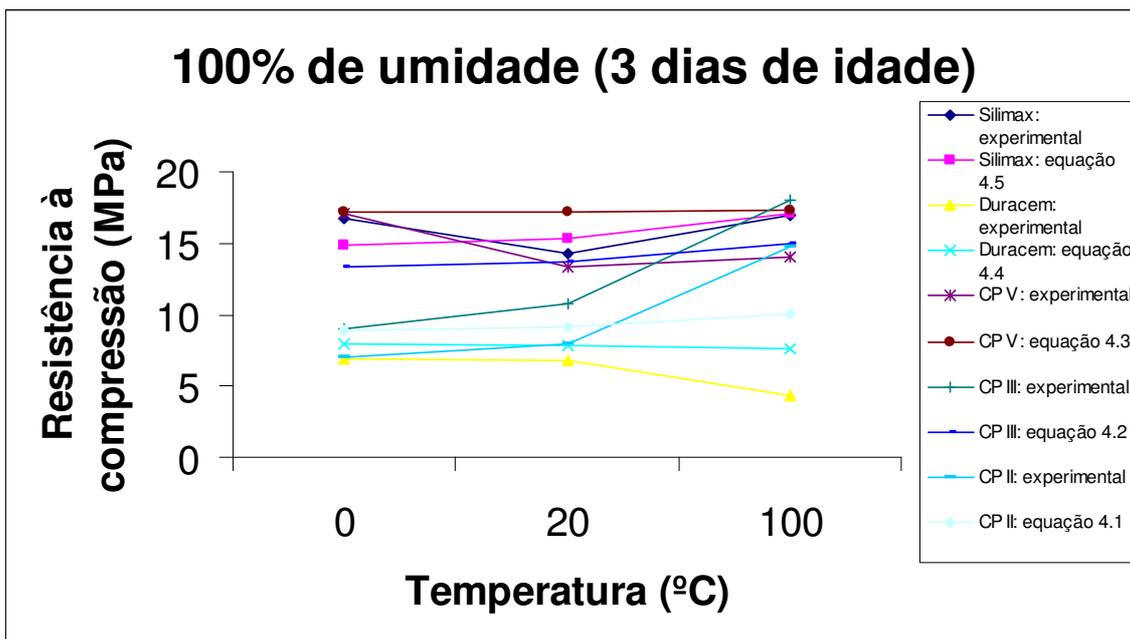


Figura 4.18 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 100% e 3 dias de idade (resultados experimentais x equações).

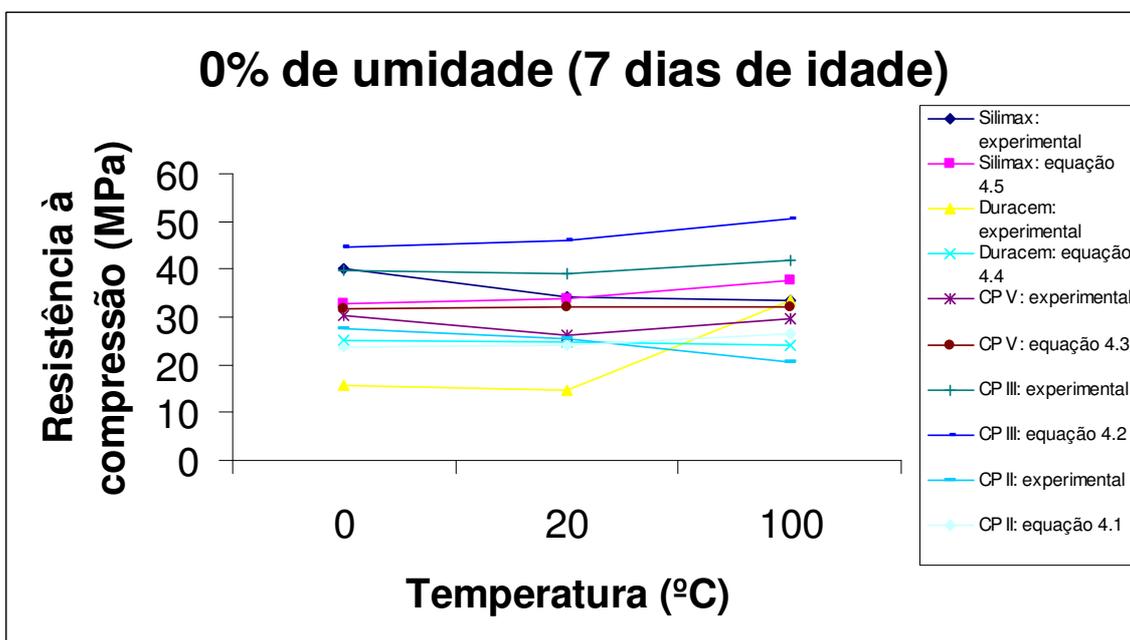


Figura 4.19 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 0% e 7 dias de idade (resultados experimentais x equações).

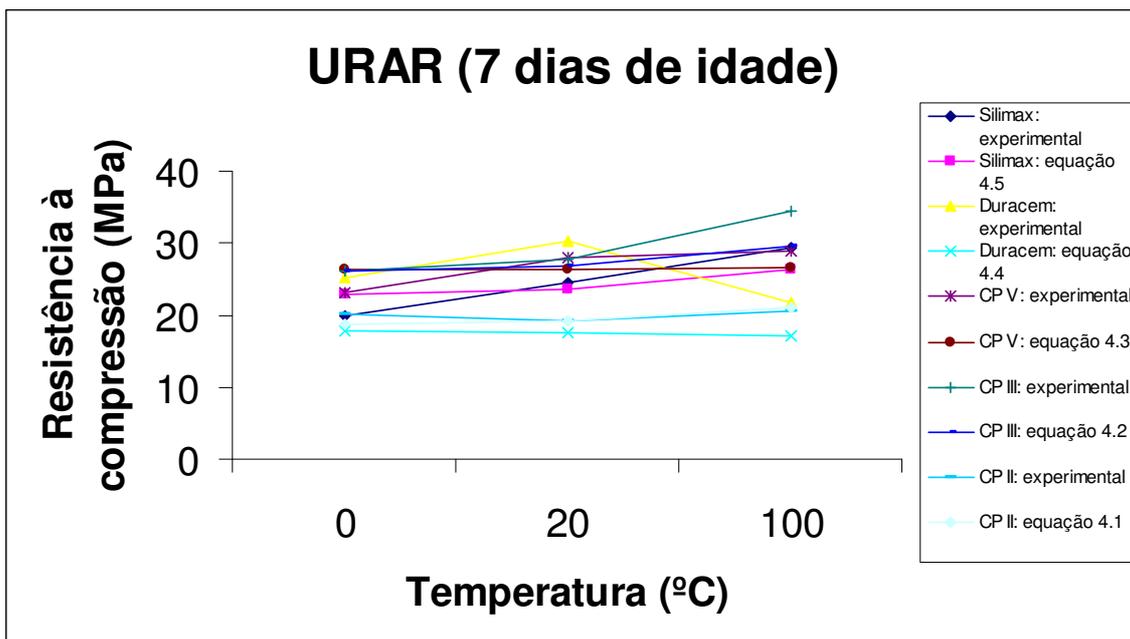


Figura 4.20 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para umidade relativa do ar e 7 dias de idade (resultados experimentais x equações).

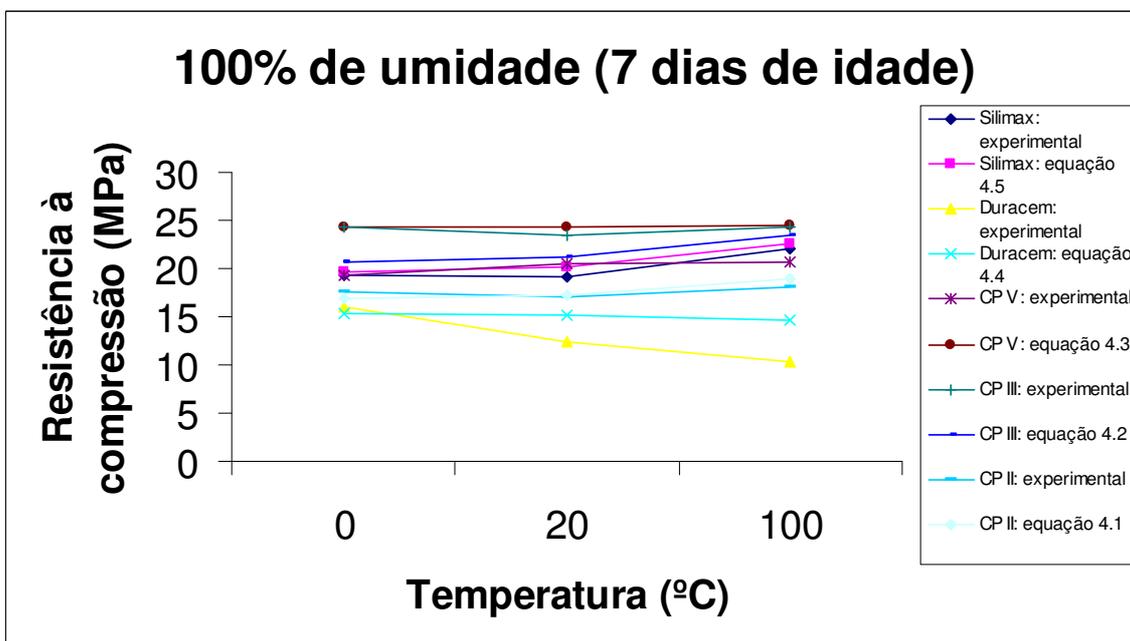


Figura 4.21 – Resistência à compressão (MPa) x Temperatura (°C) para teor de umidade igual a 100% e 7 dias de idade (resultados experimentais x equações).

4.7 RESULTADOS DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL

Observando-se as variações dimensionais através das aferições realizadas antes dos corpos-de-prova serem expostos às condições estipuladas e, logo que retirados, imediatamente antes dos ensaios, foram formuladas as Tabelas 4.2 a 4.4 com todos os resultados. Nos casos em a temperatura de exposição foi a ambiente, não se efetuou tal verificação.

TABELA 4.2 – Variação do volume do CP (em %) após exposição em 0% de umidade e a temperaturas pré-definidas.

Umidade (%)	Temperatura (°C)	Idade (dias)	CP II	CP III	CP V	DURACEM	SILIMAX
0	0	3	+0,38	+1,43	+0,06	+0,33	+0,02
0	0	3	-0,04	+0,61	-0,10	+0,09	+0,25
0	0	3	-0,10	-0,35	-0,21	-0,23	+0,66
0	100	3	+0,52	-0,52	+1,09	-0,22	-3,47
0	100	3	-0,57	+1,53	+1,06	-0,24	+0,68
0	100	3	-0,20	+1,30	+0,58	-0,10	+1,54
0	0	7	-0,28	-0,68	+0,10	-0,08	-1,74
0	0	7	+0,37	-1,74	+0,91	-4,67	-2,53
0	0	7	-0,94	-0,13	-0,42	+4,25	-1,29
0	100	7	+0,51	+0,35	-0,24	+5,72	-1,19
0	100	7	-0,52	+3,38	-0,92	-1,25	-0,33
0	100	7	-0,35	+3,86	-1,98	-5,74	-3,87

TABELA 4.3 – Variação do volume do CP (em %) após exposição em umidade relativa do ar e a temperaturas pré-definidas.

Umidade (%)	Temperatura (°C)	Idade (dias)	CP II	CP III	CP V	DURACEM	SILIMAX
URAR	0	3	-0,02	-2,57	-0,23	+2,12	+0,06
URAR	0	3	-0,14	+2,19	+0,24	+0,29	+0,20
URAR	0	3	+0,52	+0,92	+0,56	+2,09	+0,37
URAR	100	3	+0,76	+0,28	+0,09	-0,03	-0,04
URAR	100	3	+1,08	+0,79	-0,18	-2,09	0,00
URAR	100	3	-0,54	-0,46	-1,06	-0,94	+1,93
URAR	0	7	+1,22	+1,02	+0,34	+0,07	-0,27
URAR	0	7	-1,44	-0,12	-1,17	-0,16	+0,38
URAR	0	7	0,24	1,25	0,46	0,66	1,50
URAR	100	7	+0,60	+0,05	+0,09	-0,10	-1,57
URAR	100	7	+1,05	+0,45	-0,62	-1,07	+0,04
URAR	100	7	+0,15	+1,01	+0,04	-2,21	-1,55

TABELA 4.4 – Variação do volume do CP (em %) após exposição em 100% de umidade e a temperaturas pré-definidas.

Umidade (%)	Temperatura (°C)	Idade (dias)	CPII	CP III	CP V	DURACEM	SILIMAX
100	0	3	+0,90	+5,70	-0,28	+0,67	-1,79
100	0	3	+1,04	-1,97	+1,48	-0,17	+0,65
100	0	3	-0,47	0,00	+0,43	-2,15	+0,24
100	100	3	+0,27	-0,64	+0,90	+0,73	-1,00
100	100	3	+1,00	-0,90	+0,80	-0,22	+0,18
100	100	3	-0,23	-0,19	-0,34	+0,53	-1,57
100	0	7	+1,03	-0,22	-0,18	+0,42	-0,04
100	0	7	+0,89	+0,64	-1,67	-0,32	-1,99
100	0	7	+1,96	+0,32	-4,47	-1,02	-0,61
100	100	7	+1,60	+0,30	+1,34	-4,20	-0,84
100	100	7	-0,20	+0,44	+0,33	-1,61	-0,63
100	100	7	+0,53	+0,06	+0,94	+0,62	+0,91

Quando expostos à umidade relativa do ar (URAR), cimentos finos, sem adição de resíduos, possuem comportamento expansivo a baixas temperaturas. Porém, quando expostos a temperaturas elevadas, tiveram comportamento inverso, ou seja, de retração.

Aos níveis de exposição (temperatura e umidade) propostos na pesquisa, a variação volumétrica do SILIMAX, se manteve próxima dos demais tipos de cimento.

4.8 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Observando-se os resultados da tabela e dos gráficos apresentados, se pode constatar que, com relação às resistências, foram verificadas médias maiores quando os corpos-de-prova foram expostos a 0% de umidade. Por sua vez, foram obtidas as menores médias de resistência quando a exposição foi a 100% de umidade, realizando-se o ensaio com o CP ainda saturado. Salienta-se que os resultados se mantêm mesmo analisando-se individualmente cada tipo de cimento. Ou seja, se for pego um tipo de cimento por vez, continua-se encontrando as maiores médias de resistência para 0% de umidade e as menores para 100%, mesmo com a alteração da temperatura de exposição (0°C, ambiente e 100°C) e das idades (3 e 7 dias).

Contudo, quanto maior a temperatura de exposição dos corpos-de-prova, maiores as médias das resistências, não influenciando a umidade, o tipo de cimento e a idade do CP. A maior média de resistência foi verificada, aos 3 e aos 7 dias de idade, à temperatura de 100°C e 0% de umidade. A menor, por sua vez, se deu à temperatura ambiente e a 100% de umidade.

O desenvolvimento da resistência se deu mais lentamente, neste período, com as argamassas confeccionadas com CP II E 32 e mais rapidamente, aquelas produzidas com SILIMAX, CP V ARI PLUS e CP III 40 RS.

A pior performance individual foi a do DURACEM AD 300, quando ensaiado a 100% de umidade e a 100°C de temperatura e a melhor, a do CPIII 40 RS, quando exposto a 0% de umidade e 100°C de temperatura.

Quando os corpos-de-prova foram expostos às condições mais próximas de um ambiente semelhante ao de obras prediais convencionais, à umidade e temperatura ambiente, as argamassas que atingiram maiores resistências foram as produzidas com CP V ARI e SILIMAX, respectivamente. Tal característica não se manteve quando houve variação nas condições de exposição.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa investigou algumas características e propriedades de argamassas fabricadas com cimento Portland composto (CP II E 32), cimento Portland de Alto Forno (CP III 40 RS), cimento de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), cimento especial com pega acelerada e adições minerais de alta pozolanicidade e elevada finura (DURACEM AD 300) e cimento especial de baixo calor de hidratação, baixo potencial de retração, altas resistências iniciais e alta resistência a sulfatos – ARS (SILIMAX), quando estes foram submetidos à cura convencional e também expostos a ambientes com variações de temperatura e umidade imediatamente antes de serem ensaiados.

Determinou-se a influência das condições de temperatura e de umidade na resistência à compressão axial e na variação volumétrica, por meio de ensaios de compressão e aferições dimensionais.

Além de possibilitar a avaliação de qual é o tipo de cimento mais recomendado a um determinado tipo de aplicação ou, ao contrário, desaconselhá-lo, este trabalho reforçou também alguns conceitos e estudos já realizados.

A partir dos resultados obtidos, foi possível estabelecer uma orientação quanto ao desempenho destes cimentos. Da pesquisa experimental foi possível chegar as seguintes conclusões:

- 1 – Nas idades iniciais, os resultados mostram que o aumento de temperatura é benéfico para as argamassas produzidas com CP III 40 RS, que é

um cimento com elevado teor de escória. Neste caso, a temperatura age como um acelerador (ativador) das reações de hidratação.

2 – Para as argamassas feitas com CP V ARI, que possuem uma grande quantidade de clínquer, o aumento da temperatura não influenciou no aumento da resistência, pois as reações são ativadas pelo próprio calor de hidratação do clínquer.

3- Em aplicações com baixa umidade, o cimento CP III 40 RS obteve uma performance superior à dos demais, principalmente quando exposto a maiores temperaturas, devido à baixa quantidade de clínquer em sua composição.

Analisando-se todas essas conclusões, demonstra-se que as propriedades do material dependem também do ambiente ao qual ele está exposto, das condições de cura e o tipo de cimento, confirmando que apenas a resistência mecânica não pode ser tomada como parâmetro de durabilidade do concreto ou da argamassa.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1) Mantendo-se as condições do método de ensaio, verificar a reprodutividade e repetibilidade dos resultados face à expressão obtida para resistência à compressão com um maior número de corpos-de-prova, e para idades de 14 e 28 dias.

2) Mantendo-se as condições do método de ensaio, verificar a reprodutividade e repetibilidade dos resultados face à expressão obtida para resistência à compressão para diferentes tipos de agregados e diferentes dimensões de corpos-de-prova.

3) Mantendo-se as condições de exposição, variar os tipos de cura (cura ao ar e cura a térmica a vapor).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. *Cimento Portland Comum*, NBR 5732, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5733* – Cimento Portland de alta resistência inicial, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5735* – Cimento Portland de alto-forno, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5736* – Cimento Portland pozolânico, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5738* – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 5739* – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NBR 7211* – Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR 7215* – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR 7221* – Agregados – Ensaio de qualidade de agregado miúdo, Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 7225* – Materiais de pedra e agregados naturais, Rio de Janeiro, 1993.

_____. *NBR 7251* – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária, Rio de Janeiro, 1982.

_____. *NBR 11578* – Cimento Portland composto, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 11579* – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 11582* – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Lê Chatelier, Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 12696* – Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa, Rio de Janeiro, 1992.

_____. *NBR NM 30* – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água, Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 46* – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrômetro, por lavagem, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 49* – Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas, Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 52* – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 65* – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR NM 66* – Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR NM 248* – Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NM 31* – Agregados – Determinação do teor de partículas leves, Rio de Janeiro, 1994.

_____. *NM 44* – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis, Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NM 66* – Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais, Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NM 248* – Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

CAMARINI, G. Desempenho de misturas: cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica. 1995. 252 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CÁNOVAS, M.F. Patologia e terapia do concreto armado. 1. ed. São Paulo: PINI, 1988.

CINCOTTO, M. A., BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.

GAMBHIR, M. L. Concrete technology. New Delhi Tata McGraw-Hill, 1986.

GLASSER, F. P. Chemical, mineralogical and microstructural changes occurring in hydrated slag-cement blends. The American Ceramic Society, Inc., 1989.

LEA, F. M. The chemistry of cement and concrete. New York: Chemical Publishing Company, Inc., 1971.

LEVY, S.; HELENE, P. Cura. Como, quando e por quê. *Téchne*. n20, p. 18 – 21, Jan/Fev 1996.

MELO NETO, A. A. Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada. 2002. 161p. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. Concrete. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. (Tradução: Salvador Giammusso). 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

PAULON, V. A. A microestrutura do concreto convencional. *Concreto: Ensino, pesquisa e realizações*. 1. ed. São Paulo: Ed. G.C. Isaia, IBRACON, 2005, Cap. 19, p. 583-604.

RUIZ, M. F. Evaluación no lineal de los efectos estructurales producidos por las deformaciones deferidas del hormigón y el acero. 2003. 326p. Tesis (Doctoral) - Universidad Politécnica de Madrid.

SCRIVENER, K. L. The microstructure of concrete. The American Ceramic Society, Inc., 1989.

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. London: Academic, 1990.

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

ANÁLISE DA AREIA

<p>UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COLÉGIO TÉCNICO UNIVERSITÁRIO COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÕES CIVIS</p>	REF.: Teste laboratorial
	FL.: 01/01

ANÁLISE DE AGREGADO

DADOS DO CONTRATANTE

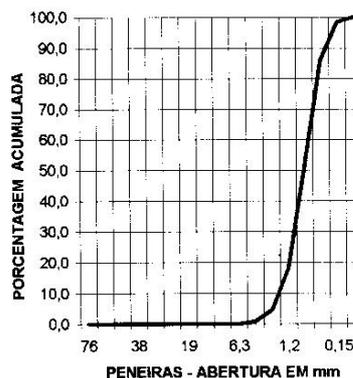
NOME: Cristiano Milagres
OBRA: Dissertação de Mestrado

DADOS DO MATERIAL

AMOSTRA: Areia natural
PROCEDÊNCIA: Leví Gasparian FORNECEDOR: Areal Rio Negro

GRANULOMETRIA - NBR 7217							
Peneiras		Peso retido (g)		% Retida			%
pol.	mm	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂	média	Acum.
3	76			0,00	0,00	0,00	0,00
2 1/2	64			0,00	0,00	0,00	0,00
2	50			0,00	0,00	0,00	0,00
1 1/2	38			0,00	0,00	0,00	0,00
2	32			0,00	0,00	0,00	0,00
1	25			0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19			0,00	0,00	0,00	0,00
1/2	12,5			0,00	0,00	0,00	0,00
3/8	9,5			0,00	0,00	0,00	0,00
1/4	6,3			0,00	0,00	0,00	0,00
nº 4	4,8	7,80	10,00	0,78	1,00	0,89	0,89
nº 8	2,4	36,30	37,30	3,63	3,73	3,68	4,57
nº 16	1,2	132,60	141,60	13,26	14,16	13,71	18,28
nº 30	0,6	229,10	436,50	22,91	43,65	33,28	51,56
nº 50	0,3	409,50	281,00	40,95	28,10	34,53	86,09
nº 100	0,15	162,40	83,60	16,24	8,36	12,30	98,39
Fundo	0,00	22,30	10,00	2,23	1,00	1,62	100,00
Totais		1000,00	1000,00	100,00	100,00	100,00	100,00

COMPARAÇÃO COM A NBR 7211



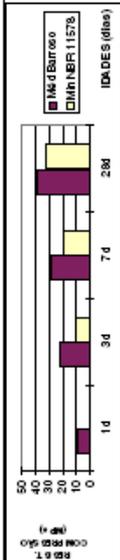
Classificação Granulométrica NBR 7211:	Zona Utilizável	OBSERVAÇÃO:
Massa Específica Real NBR 9776 (kg/dm ³):	2,55	
Massa Específica Aparente Seca NBR 7810 (kg/dm ³):	1,30	
Massa Específica Úmida (6%) NBR 7251 (kg/dm ³):	***	
Módulo de Finura NBR 7211:	2,60	
Torrões de Argila NBR 7218 (%):	ISENTO	
Material Pulverulento NBR 7219 (%):	0,79	
Impureza Orgânica NBR 7220 (p.p.m.):	<300	
Dimensão Máxima Característica NBR 7211 (mm):	2,40	
Coefficiente de vazios (%):	***	

RESPONSÁVEL:

DATA: 21/02/2006

ANÁLISE DOS CIMENTOS (CP II E 32)

Ref		Data		FISICOS										QUÍMICOS									
				# 200 NBR 11570 %	# 325 NBR 6002 %	Blaine NBR 7224 cm ² /g	A/C %	Tempo Pq (min) NBR 11581	Exp. O (mm) NBR 11582	Resistência Compressão (MPa)						CO ₂ NBR 11588 %	PF 300 °C IT 22 %	R. Inol. NBR 5744 %	S03 NBR 5746 %	SULFETO %			
				1 DA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	1 DA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	1 DA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	1 DA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	PF 300 °C IT 22 %	R. Inol. NBR 5744 %	S03 NBR 5746 %	SULFETO %
1	02.05.2006			8,3	4323	27,2	245	315	7,9	21,7	27,5	38,3	4,88					5,77	1,92	1,66	0,27		
2	04.05.2006			11,2	3861	27,4	240	295	8,1	22,5	28,9	38,2	4,90					5,36	1,65	1,65	0,26		
3	06.05.2006			12,0	3861	27,2	260	330	8,1	22,1	30,4	38,3	4,90					5,20	1,62	1,66	0,24		
4	09.05.2006			15,1		25,0	230	270	8,9	21,8	27,2	36,8						5,39	1,78	1,78	0,22		
5	11.05.2006			11,5	4121	26,0	180	235	10,1	23,2	28,3	37,6	4,49					5,16	1,68	1,68	0,25		
6	13.05.2006			10,6		26,2	185	250	9,6	22,1	28,7	37,3						4,86	1,25	1,59	0,25		
7	16.05.2006			13,5		26,2	205	275	9,7	24,3	28,7	38,9						5,78	1,77	1,77	0,24		
8	18.05.2006			16,5		25,8	250	310	7,7	21,3	28,3	39,9						5,45	1,75	1,75	0,23		
9	20.05.2006			18,0	4317	26,4	230	290	9,3	23,1	30,1	38,6	4,14					5,20	1,45	1,72	0,23		
10	23.05.2006			15,8		25,0	205	260	9,1	21,2	27,7	37,0						5,48	1,65	1,65	0,23		
11	25.05.2006			11,0	3846	26,2	190	250	9,6	22,7	27,6	38,8	4,11					5,11	1,41	1,85	0,26		
12	27.05.2006			10,8		26,8	280	380	7,7	22,1	28,1	38,9						4,73	1,95	1,95	0,28		
13	30.05.2006			11,2		26,8	260	345	8,4	21,6	27,0	38,1						5,05	1,91	1,91	0,26		
14																							
15																							
16																							
17																							
18																							
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							
24																							
25																							
26																							
27																							
28																							
29																							
30																							
31																							
32																							
MÉDIA				12,7	4114	26,3	228	292	8,8	22,3	28,4	38,3	4,50					5,27	1,53	1,73	0,25		
MÁXIMO				18,0	4323	27,4	260	330	10,1	24,3	30,4	40,0	4,00					5,78	1,92	1,95	0,28		
MÍNIMO				8,3	3846	25,0	180	225	7,7	21,2	27,0	35,8	4,11					4,73	1,25	1,59	0,22		
DESVIO				2,82	212,23	0,77	33,50	42,31	0,83	0,87	1,09	0,94	0,38					0,31	0,25	0,10	0,02		
%VARIAÇÃO				22,1	5,2	2,9	14,7	14,5	9,5	3,9	3,8	2,5	8,5					5,9	18,8	5,7	7,2		
Limite de Norma		12 (M)		200 (m)		60 (m)		5,0 (M)		100 (m)		5,0 (M)		30 (m)		65 (M)		4,0 (M)		6,5 (M)			
m = Mínimo		M = Máximo		Π = Instrução de Trabalho																			



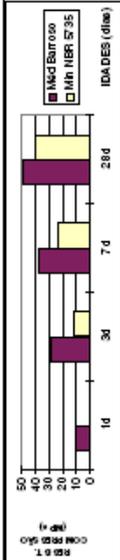
FAC. CI. UFMG

(CP II E 32) – CONT.

		RELATÓRIO SEMANAL DE ENSAIOS DE CIMENTO					OBS :
		FÁBRICA BARROSO - ENSACADEIRA FÁBRICA					
		PERÍODO		02.05.2006	20.05.2006		
				18.05.2006			
	MEDIA						
# 200 %	DP						
	n						
	MEDIA	12,3	13,4				
# 325 %	DP	2,61	3,33				
	n	8	5				
	MEDIA						
Blaine m2/kg	DP						
	n						
	MEDIA	224	235				
Início Pega min	DP	31	41				
	n	8	5				
	MEDIA						
Expan - mm	DP						
	n						
	MEDIA	8,8	8,8				
R 1 dia MPa	DP	0,92	0,77				
	n	8	5				
	MEDIA	22,4	22,1				
R 3 dias Mpa	DP	0,96	0,78				
	n	8	5				
	MEDIA	28,6	28,1				
R 7 dias MPa	DP	1,06	1,19				
	n	8	5				
	MEDIA	38,2	38,5				
R 28 dias MPa	DP	0,97	0,98				
	n	8	5				
	MEDIA	284	305				
Fim pega min	DP	33	56				
	n	8	5				
	P.F.	5,37	5,12				
	SiO2	24,04	23,98				
	R.I.	1,60	1,43				
	Al2O3	7,17	7,24				
	Fe2O3	2,30	2,45				
Análise Química	CaO	57,45	57,23				
	MgO	3,44	3,42				
	SO3	1,69	1,80				
	CO2	4,76	4,13				
	K2O	0,57	0,59				
	P.F. 500°C						
	C3A teórico	4,74	4,81				

(CP III 40 RS)

Ref		Data de		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO / CLASSE: CP III 40 RS Forte										PERÍODO : 09.05.2006 a 5/1/2007 EMISSÃO :		
				FÁBRICA BARROSO - ENSACADORA FÁBRICA												
Ref	Data de	# 325 NBR 11570 %	# 400 %	Blaine NBR 724 cm2/g	A/C NBR 1180 %	Tempo Pqgr (min)		Exp. Quente NBR 11582 mm	Resistência à Compressão (MPa)				QUÍMICOS			SULFETO NBR 5746 %
						Início	Fim		1 DA	3 DAS	7 DAS	28 DIAS	CO2 NBR 11583 %	PF 500 °C %	PF 1000 °C NBR 5743 %	
1	03.05.2006	2,9	5,6	29,6	29,6	255	320	9,5	27,4	36,2	48,0	2,09	2,54	0,43		
2	05.05.2006	3,5	7,5	29,3	29,3	255	305	12,0	27,9	37,2	50,7	2,35	2,39	0,43		
3	06.05.2006	2,7	6,8	29,3	29,3	250	315	10,3	28,1	35,4	48,4	2,27	2,30	0,43		
4	10.05.2006	4,1	7,5	29,3	29,3	250	305	10,1	28,5	35,8	48,5	2,47	2,20	0,42		
5	12.05.2006	3,3	7,5	29,3	29,3	200	290	11,4	26,6	37,6	48,4	2,27	2,15	0,42		
6	15.05.2006	2,5	5,6	29,8	29,8	210	295	12,4	28,6	38,2	48,9	2,47	2,30	0,38		
7	17.05.2006	5,2	7,3	28,1	28,1	255	320	11,2	27,8	36,0	51,7	2,36	2,06	0,41		
8	19.05.2006			29,2	29,2	240	305	9,6	27,2	37,4	49,3	2,72	2,15	0,42		
9	22.05.2006	3,3	7,0	29,3	29,3	225	315	11,3	28,4	38,5	50,6	2,45	2,32	0,43		
10	24.05.2006	2,1	5,8	29,4	29,4	200	290	11,4	28,6	37,8	50,2	2,33	2,21	0,42		
11	26.05.2006	2,5	3,6	29,6	29,6	200	300	11,9	30,0	37,0	50,6	2,34	2,23	0,43		
12	29.05.2006	2,1	5,6	29,6	29,6	240	305	12,7	28,6	37,5	49,4	2,49	2,40	0,43		
13	31.05.2006	2,9	7,0	29,6	29,6	200	270	12,3	28,0	36,7	48,6	2,30	2,25	0,40		
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
30																
31																
32																
MÉDIA		3,1	6,4	4527	29,4	295	302	11,2	28,4	37,1	49,6	2,38	2,27	0,42		
MÁXIMO			7,5	4668	29,8	255	320	12,7	30,0	39,5	51,7	2,72	2,34	0,43		
MÍNIMO			3,6	4454	29,1	200	270	9,5	26,6	35,4	48,0	2,09	2,06	0,38		
DESVIO		0,88	1,18	95,38	0,20	18,08	15,07	1,06	1,10	1,11	1,11	0,15	0,17	0,01		
%VARIAÇÃO		28,6	18,5	2,1	0,7	7,7	5,0	9,5	3,0	3,0	2,2	6,3	23,1	5,6		
Limite de Norma						60m	7200h					4,50h	1,50h	4,00h		
m = Mínimo								5,00h								
M = Máximo									120m	230m	400m					
IT = Instrução de Trabalho																

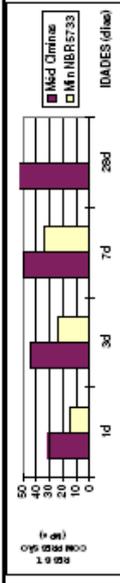


Eng. Flávio Renato Pereira Capuano
Assessor Técnico MG

(CP III 40 RS) – CONT.

		RELATÓRIO SEMANAL DE ENSAIOS DE CIMENTO				OBS :	
		FÁBRICA BARROSO - ENSACADEIRA FÁBRICA					
		TIPO / CLASSE: CP III 40 RS Forte					
		PERIODO	03.05.2006 19.05.2006	22.05.2006			
	MEDIA		3,5	2,6			
# 325 %	DP		0,94	0,52			
	n		7	5			
	MEDIA		6,8	5,8			
# 400 %	DP		0,88	1,39			
	n		7	5			
	MEDIA						
Blaine m ² /kg	DP						
	n						
	MEDIA		243	223			
Inicio Pega min	DP		16	15			
	n		8	5			
	MEDIA						
Expan - mm	DP						
	n						
	MEDIA		10,8	11,9			
R 1 dia MPa	DP		1,1	0,59			
	n		8	5			
	MEDIA		27,9	29,3			
R 3 dias Mpa	DP		0,90	0,77			
	n		8	5			
	MEDIA		36,7	37,7			
R 7 dias MPa	DP		1,00	1,09			
	n		8	5			
	MEDIA		49,4	49,9			
R 28 dias MPa	DP		1,25	0,87			
	n		8	5			
	MEDIA		306	296			
Fim pega min	DP		13,48	17,10			
	n		8	5			
	P.F.		2,38	2,38			
	SiO ₂		27,17	27,19			
	R.I.		0,64	0,82			
	Al ₂ O ₃		8,68	8,70			
	Fe ₂ O ₃		1,92	1,98			
Análise Quimica	CaO		52,97	52,89			
	MgO		4,30	4,27			
	SO ₃		2,26	2,28			
	CO ₂		1,21	0,74			
	K ₂ O		0,49	0,51			
	P.F. 500°C						
	C ₃ A teórico		3,53	3,52			

Ref		Data		FÍSICOS										QUÍMICOS					
				# 400	# 305	Blaine	A/C	Tempo	Emp. Ovale	Reducao a Compresso (MPa)			CO ₂	PF 500°C	RF 1000°C	Elascl	SO ₃		
		NBR 9202	NBR 7224	cm2/g	%	incio	Fin	NBR 11582	mm	1 DIA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	NBR 11683	IT 22	NBR 5743	NBR 5744	NBR 5746	
1	02.05.2006	4,3	4570	283	29,2	125	17,0	30,2	44,7	47,7	55,1	0,89	0,37	2,30	0,27	2,86			
2	07.05.2006	3,1	4691	292	29,8	115	17,0	30,7	44,0	49,0	56,7	1,25	0,70	2,63	0,29	2,80			
3	09.05.2006	3,0	4667	28,8	28,6	150	19,5	29,8	44,8	50,0	55,2	1,25	0,70	2,63	0,29	2,80			
4	14.05.2006	2,2	4610	28,7	28,6	155	19,5	32,1	45,8	49,9	55,9	1,25	0,70	2,63	0,29	2,80			
5	16.05.2006	2,9	4691	28,6	28,6	170	21,5	28,8	44,8	48,3	56,0	1,25	0,32	2,51	0,33	2,64			
6	21.05.2006	2,4	4691	28,7	28,4	130	18,0	31,2	45,1	49,1	56,3	1,20	0,83	2,63	0,42	2,70			
7	23.05.2006	3,4	4715	29,4	29,2	150	20,0	31,3	45,0	49,3	55,2	1,20	0,83	2,63	0,42	2,70			
8	28.05.2006	3,0	4667	28,5	29,2	130	18,0	30,7	44,2	47,3	55,3	1,20	0,83	2,63	0,42	2,70			
9	30.05.2006	2,8	4643	29,2	29,2	140	19,5	30,9	43,9	48,0	54,3	1,20	0,83	2,63	0,42	2,70			
10																			
11																			
12																			
13																			
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
MEDIA		3,01	4661	28,8	28,8	141	18,8	30,7	44,7	48,8	55,6	1,15	0,58	2,52	0,33	2,75			
MAXIMO		4,30	4715	29,4	29,4	170	21,5	32,1	45,8	50,0	56,7	1,25	0,93	2,63	0,42	2,86			
MINIMO		2,20	4570	28,3	28,3	115	17,0	29,8	43,9	47,3	54,3	0,89	0,32	2,30	0,27	2,64			
DESVIO		0,60	46	0,4	0,4	17	15	0,75	0,60	0,96	0,73	0,17	0,20	0,16	0,07	0,10			
% VARIAÇÃO		20	1	1	1	12	8	2	1	2	1	15,1	49,6	8,2	20,3	3,6			
Limite de Norma		±6	±3000	IT - Instrução de Trabalho	±5	±14	±24	±34	±45	±1,5	±4,5								



Handwritten signature

Eng. Flavio Renato Pereira Capurro
Assessor Técnico MG

REF. CP V ARI PLUS - 10/04/06

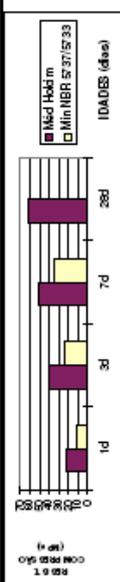
(CP V ARI PLUS) CONT.

		RELATÓRIO SEMANAL DE ENSAIOS DE CIMENTO FÁBRICA CIMINAS - ENSACADEIRA FÁBRICA TIPO / CLASSE : CP V ARI PLUS				
PERIODO		02.05.2006 28.05.2006	30.05.2006			OBS :
	MEDIA	3,0				
# 400 %	DP	0,64				
	n	8				
	MEDIA					
# 325 %	DP					
	n					
	MEDIA	4663				
Blaine m2/kg	DP	49				
	n	8				
	MEDIA	141				
Inicio Pega min	DP	18				
	n	8				
	MEDIA					
Expan - mm	DP					
	n					
	MEDIA	30,7				
R 1 dia MPa	DP	0,80				
	n	8				
	MEDIA	44,8				
R 3 dias Mpa	DP	0,55				
	n	8				
	MEDIA	49,0				
R 7 dias MPa	DP	0,97				
	n	8				
	MEDIA	55,7				
R 28 dias MPa	DP	0,60				
	n	8				
	MEDIA	188				
Fim pega min	DP	16				
	n	8				
	P.F.	2,52				
	SiO2	19,36				
	R.I.	0,33				
	Al2O3	4,87				
	Fe2O3	3,26				
Análise Quimica	CaO	63,85				
	MgO	0,78				
	SO3	2,75				
	CO2	1,15				
	K2O	0,76				
	P.F. 500°C	0,58				
	C3A teórico	6,88	7,60			



(DURACEM AD 300)

Ref		Físicos		Resistência à Compressão (MPa)		Químicos		Sulfeto						
		# 200 NBR 11570 %	# 400 NBR 7254 cm20 %	A/C %	Tempo Fegal (min) NBR 11581 Início Rm	Exp. Quente NBR 11582 mm	1 DIA 3 DIAS 7 DIAS 28 DIAS	CO2 NBR 11583 %	PF 500°C IT 22 %	PF 1000°C NBR 5743 %	El. Meq. NBR 5744 %	SO3 NBR 5746 %		
1	01.05.2006	0,2	1,2	38,6	180	24,5	24,6	41,9	53,1	63,6	1,44	2,65	3,60	0,34
2	26.05.2006	0,1	1,2	36,3	155	23,0	21,5	38,2	47,5	59,2	1,85	2,95	3,46	0,31
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														
31														
32														
MÉDIA		0,15	1,20	37,5	168	238	23,1	40,1	50,3	61,4	1,65	2,80	3,53	0,33
MÁXIMO		0,20	1,20	38,6	180	245	24,6	41,9	53,1	63,6	1,85	2,95	3,60	0,34
MÍNIMO		0,10	1,20	36,3	155	230	21,5	38,2	47,5	50,2	1,44	2,65	3,46	0,31
DESVIO		0,07	0,00	1,6	18	11	2,19	2,62	3,05	3,11	0,20	0,21	0,10	0,02
%VARIAÇÃO		47,1	0,0	4,3	10,6	4,5	9,5	6,5	7,9	5,1	17,6	7,6	2,8	6,5
Limite de Norma		≤6	≤3000	Π = Instrução de Trabalho	≥60	≥600	≥11	≥24	≥34	≥3	≤4,5	≤1,5	≤4,5	



Eng. Flávio Renato Pereira Capurro
Assessor Técnico M/G

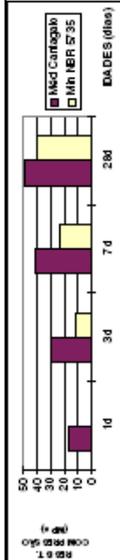
MOG-DURACEM_AD_300_20100328

(DURACEM AD 300) – CONT.

		RELATÓRIO SEMANAL DE ENSAIOS DE CIMENTO FÁBRICA BARROSO - ENSACADEIRA FÁBRICA TIPO / CLASSE : DURACEM AD 300				
	PERIODO	01.05.2006				OBS :
	MEDIA					
# 200 %	DP					
	n					
	MEDIA					
# 325 %	DP					
	n					
	MEDIA					
Blaine m2/kg	DP					
	n					
	MEDIA					
Inicio Pega min	DP					
	n					
	MEDIA					
Expan - mm	DP					
	n					
	MEDIA					
R 1 dia MPa	DP					
	n					
	MEDIA					
R 3 dias Mpa	DP					
	n					
	MEDIA					
R 7 dias MPa	DP					
	n					
	MEDIA					
R 28 dias MPa	DP					
	n					
	MEDIA					
Fim pega min	DP					
	n					
	P.F.	1,65				
	SiO2	26,71				
	R.I.	2,80				
	Al2O3	8,80				
	Fe2O3	2,23				
Análise Quimica	CaO	51,70				
	MgO	3,79				
	SO3	3,53				
	CO2					
	K2O	0,58				
	P.F. 500°C					
	C3A teórico	4,31				3,98

(SILIMAX)

Ord	Dia/Mês	# 225 NBR 11570		# 400		Blaine NBR 7234		A/C NBR 11580		Tempo Pega(min) NBR 11581		Exp. Ousina NBR 11582		Resistência Compressão (MPa)				QUÍMICOS			
		%	%	cm ² /g	%	1h	2h	mm	mm	1 DA	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	C02 NBR 11583	PF 500 °C NBR 5749	PF 1000 °C NBR 5749	R. Inicial NBR 5749	S03 NBR 5745	SULFETO NBR 5745		
1	05.04.2006			4575	32,2	210	250	167	28,7	41,0	48,7										
2	27.05.2006			4661	32,4	205	290	17,8													
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
MEDIA				4618	32,3	208	255	17,3	29,7	41,0	49,7										
MAXIMO				4661	32,4	210	260	17,8	29,7	41,0	49,7										
MINIMO				4575	32,2	205	250	16,7	29,7	41,0	49,7										
DESVIO				60,81	0,14	3,54	7,07	0,78													
%VARIAÇÃO				1,3	0,4	1,7	2,8	4,5													
Limite de Norma		m = Mínimo	M = Máximo	60(m) 7,20(M)		Instrução de Trabalho		5,0(M)	12(m)	28(m)	40(m)	5,0(M)	4,5(M)	1,5(M)	4,0(M)	1,0(M)					



Eng. Flávio Renato Pereira Capruço
Assessor Técnico MG

(SILIMAX) – CONT.

		RELATÓRIO SEMANAL DE ENSAIOS DE CIMENTO FÁBRICA CANTAGALO - ENSACADEIRA FÁBRICA TIPO / CLASSE : SILIMAX				
	PERIODO	05.04.2006				OBS :
	MEDIA					
# 325 %	DP					
	n					
	MEDIA					
# 400 %	DP					
	n					
	MEDIA					
Blaine m2/kg	DP					
	n					
	MEDIA					
Inicio Pega min	DP					
	n					
	MEDIA					
Expan - mm	DP					
	n					
	MEDIA					
R 1 dia MPa	DP					
	n					
	MEDIA					
R 3 dias Mpa	DP					
	n					
	MEDIA					
R 7 dias MPa	DP					
	n					
	MEDIA					
R 28 dias MPa	DP					
	n					
	MEDIA					
Fim pega min	DP					
	n					
	P.F.	1,56				
	SiO2					
	R.I.	0,92				
	Al2O3					
	Fe2O3					
Análise Química	CaO					
	MgO					
	SO3	2,86				
	CO2					
	K2O					
	P.F. 500°C	0,22				
	C3A teórico					
ACT0_SILIMAX_VENDAS.xls	5/jan/07	Eng. Flávio Renato Pereira Capuruço	Assessor Técnico MG			