



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA
SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL.

APLICAÇÃO DO CONCEITO DE MATURIDADE EM CONCRETO COM ADIÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ.

Eng. Carlos Adriano Rufino da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Mônica P. Barbosa.

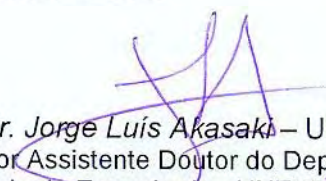
Ilha Solteira
Agosto de 2004.

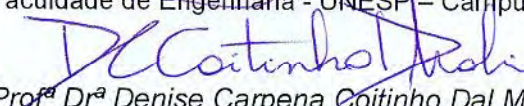
Aplicação do Conceito de Maturidade em Concreto com Adição de Cinza de Casca de Arroz

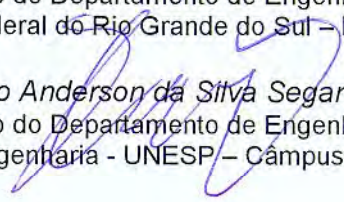
Carlos Adriano Rufino da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DO
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki – UNESP/Ilha Solteira
Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira


Prof.ª Dr.ª Denise Carpena Coitinho Dal Molin – UFRGS – Porto Alegre/RS
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre/RS


Prof. Dr. Antonio Anderson da Silva Segantini – UNESP/Ilha Solteira
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira

Ilha Solteira/SP, setembro de 2004.

APLICAÇÃO DO CONCEITO DA MATURIDADE EM CONCRETO COM CINZA DE CASCA DE ARROZ.

ii

Carlos Adriano Rufino da Silva
Agosto/2004.

Orientador: Jorge Luís Akasaki.
Co-Orientadora: Mônica Pinto Barbosa.

Resumo.

A cura térmica é um processo utilizado para acelerar as reações de hidratação do cimento Portland com objetivo de se obter ganhos de resistência mecânica nas primeiras idades, uma vez que a temperatura atua na velocidade dessas reações.

Para uma melhor avaliação da influência que a temperatura exerce no desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto, utiliza-se o Conceito da Maturidade. O Método da Maturidade estima o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto relacionando-as com o histórico de temperatura ao longo do processo de cura.

Este trabalho apresenta resultados experimentais de determinação da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade do concreto, fabricado com adição de cinza de casca de arroz (CCA), produzida com a queima não controlada da casca, e incorporada à mistura em dosagens de 5% e 10%, em substituição ao cimento em massa. O processo de cura térmica a vapor foi desenvolvido em ciclos de 6 horas, a uma temperatura constante de 80°C.

Os resultados mostram um significativo ganho de resistência das amostras com a adição de CCA. Na avaliação pelo Método da Maturidade, foi possível verificar a influência da CCA nos índices de maturidade estudados, bem como na determinação das energias de ativação.

Palavras-chave: cinza de casca de arroz, cura térmica, maturidade.

APPLICATION OF MATURITY CONCEPT IN CONCRETE WITH RHA ADDITION.

Carlos Adriano Rufino da Silva
August/2004.

Advisors: Jorge Luís Akasaki.
Mônica Pinto Barbosa.

Abstract.

Steam curing is used to accelerate cement hydration reactions with the purpose to enhance mechanical strength of concrete at early ages, since hydration reactions are temperature dependent.

In order to evaluate the influence of temperature on the development of mechanical properties of concrete, the maturity concept is used. This method estimates the development of these properties according to the temperature history of concrete along the curing process.

This work is based on an experimental study of 80°C steam-cured concrete made with 5% and 10% of rice husk ash (RHA) addition in which the development of some mechanical properties was investigated. The rice husk ash used was obtained from uncontrolled combustion of rice husk. The mechanical properties investigated were the compressive strength, the tensile strength, and the modulus of elasticity.

The results show a significant profit of resistance of the samples with the addition of CCA. In the evaluation for the Maturity Method, were possible to verify the influence of the CCA in the studied indices of maturity, as well as in the determination of the activation energies.

Keywords: maturity, rice husk ash, steam curing.

ÍNDICE DO TEXTO.

Lista de figuras.....	viii
Lista de tabelas.....	xi
Lista de símbolos e siglas.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – GENERALIDADES.....	1
1.2 – OBJETIVOS.....	3
1.3 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. AS ADIÇÕES MINERAIS AO CONCRETO.....	5
2.1 – DEFINIÇÃO.....	5
2.2 – HISTÓRICO.....	6
2.3 - A CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) COMO ADIÇÃO MINERAL.....	7
2.3.1 – Considerações iniciais.....	7
2.3.2 – Características da CCA.....	10
2.3.2.1 – Composição química.....	10
2.3.2.2 – Características físicas.....	12
2.3.3 - A influência da adição de CCA no concreto.....	15
2.3.3.1 - Teores de dosagem.....	15
2.3.3.2 - Resistência à compressão.....	16
2.3.3.3 - Efeitos sobre outras propriedades do concreto.....	18
2.3.3.4 - O uso de aditivos superplastificantes.....	19
2.3.3.5 - Efeitos combinados.....	21
3. A CURA DO CONCRETO.....	23
3.1 - PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	23

PORTLAND.....	
3.1.1 - A hidratação dos Aluminatos.....	25
3.1.2 - Hidratação dos Silicatos.....	26
3.2 - PRODUTOS FORMADOS NA HIDRATAÇÃO DOS CIMENTOS.....	26
3.3 - A PEGA E O ENDURECIMENTO DA PASTA.....	27
3.4 - EFEITOS DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO NA HIDRATAÇÃO.....	28
3.5 - O EFEITO DA CURA TÉRMICA SOBRE A HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	29
3.6 - OUTROS EFEITOS DA CURA TÉRMICA.....	31
3.7 - EFEITOS DA ADIÇÃO DE CCA.....	34
4. O CONCEITO DA MATURIDADE.....	36
4.1 - O MÉTODO DA MATURIDADE.....	37
4.2 - ENERGIA DE ATIVAÇÃO.....	40
4.3 - A EQUAÇÃO DE ARRHENIUS.....	42
4.4 - ENERGIA DE ATIVAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	43
4.5 - AS FUNÇÕES DE MATURIDADE.....	45
4.6 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FUNÇÕES DE MATURIDADE.....	47
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	49
5.1 – MATERIAIS UTILIZADOS.....	51
5.1.1 – Cimento.....	51
5.1.2 – Agregado miúdo.....	51
5.1.3 – Agregado graúdo.....	51

5.1.4 – Superplastificante.....	51
5.1.5 – Cinza de casca de arroz.....	52
5.2 – ESTUDO DA PORCENTAGEM ÓTIMA DE ADIÇÃO DE CCA NA ARGAMASSA.	55
5.3 – ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE CCA.	56
5.4 – A CURA TÉRMICA DO CONCRETO.....	57
5.6 – A APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE.....	61
5.7 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EA.....	61
5.7.1 - Traço da argamassa.....	61
5.7.2 - Moldagem e cura.....	62
5.7.3 - Ensaio de resistência.....	63
6. RESULTADOS.....	65
6.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	65
6.1.1. Agregado miúdo.....	65
6.1.2. Agregado graúdo.....	66
6.1.3. Cimento.....	67
6.1.4. Cinza de casca de arroz.....	68
6.2. ENSAIOS COM A ARGAMASSA.....	73
6.3. ENSAIOS COM O CONCRETO.....	75
6.3.1. Cura em câmara úmida.....	75
6.4 CURA TÉRMICA.....	78
6.5 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO.....	79
6.5.1 Tabelas de resultados.....	79
6.5.2 Cálculo da energia aparente de ativação (Ea).....	83
6.6 - CÁLCULO DA MATURIDADE.....	87

7. CONCLUSÕES.....	97
7.1 – SOBRE A CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	97
7.2 – SOBRE A ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO.....	97
7.3 – SOBRE O MÉTODO DA MATURIDADE.....	98
7.4 – PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	99
7.4.1 – Sobre a cinza de casca de arroz.....	99
7.4.2 – Sobre a cura térmica.....	100
7.4.2 – Sobre o Método da Maturidade.....	100
8. BIBLIOGRAFIA.....	101
9. ANEXO.....	114

LISTA DE FIGURAS.

Capítulo 2.

Figura 2.1 – Depósito a céu aberto ao longo de estrada vicinal (SANTOS,1997)..... 09

Capítulo 3.

Figura 3.1 – Reações químicas na pasta de cimento ao longo do tempo (PINTO,1997) 24

Capítulo 4.

Figura 4.1 – Perfil de energia das reações (BROWN, 1991)..... 41

Capítulo 5.

Figura 5.1 - Forno utilizado para a queima da casca de arroz..... 51

Figura 5.2 – Moinho de Bolas..... 52

Figura 5.3 – Aspecto da cinza após a moagem..... 53

Figura 5.4 – Adensamento dos corpos-de-prova..... 55

Figura 5.5 - Vedação dos corpos-de-prova..... 56

Figura 5.6 - Equipamento de cura térmica..... 56

Figura 5.7 – Disposição dos CPs no forno de cura..... 57

Figura 5.8 – Multímetros na lateral do equipamento..... 57

Figura 5.9 - Ensaio de compressão simples..... 58

Figura 5.10 - Preparo de CP para ensaio de compressão diametral..... 58

Figura 5.11 - Câmara a vapor..... 60

Figura 5.12 - Banho térmico..... 61

Figura 5.13 - Amostras no banho térmico e câmara úmida, respectivamente..... 61

Capítulo 6.

Figura 6.1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	64
Figura 6.2 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	65
Figura 6.3 – Evolução da temperatura de queima da casca de arroz.....	67
Figura 6.4 – Distribuição granulométrica da CCA moída em 30 minutos.....	68
Figura 6.5 – Ensaio de difração de raio X	70
Figura 6.6 – Relação entre resistência à compressão e tempo de moagem.....	72
Figura 6.7 – Relação entre dosagem de CCA e resistência à compressão.....	73
Figura 6.8 – Relação dosagem de CCA por ganho de resistência.....	74
Figura 6.9 – Relação dosagem de CCA e compressão diametral.....	75
Figura 6.10 – Relação entre dosagem de CCA e módulo de elasticidade.	75
Figura 6.11 – Gráfico utilizado para o cálculo de S_u	82
Figura 6.12 – Gráfico utilizado para determinação de k	82
Figura 6.13 – Gráfico para determinação de T_0	82
Figura 6.14 – Gráfico para determinação de Q	83
Figura 6.15 – Gráfico comparativo dos valores de E_a	83
Figura 6.16 – Relação entre Resistência à Compressão e Fator de Maturidade.....	86
Figura 6.17 – Relação entre Resistência à Compressão e Idade Equivalente 80°	86
Figura 6.18 – Relação entre Resistência à Tração e Fator de Maturidade.....	87
Figura 6.19 – Relação entre Resistência à Tração e idade Equivalente a 80°C	87
Figura 6.20 – Relação entre Módulo de Elasticidade e Fator de Maturidade.....	88
Figura 6.21 – Relação entre Módulo de Elasticidade e Idade Equivalente a 80°C	89
Figura 6.22 – Relação idade real x idade equivalente (CC).	89
Figura 6.23 – Relação idade real x idade equivalente (5C).	90
Figura 6.24 – Relação idade real x idade equivalente (5C).	90

Figura 6.25 – Comparação entre Idade Equivalente a 80°C e a 23°C(trazo C).....	91
Figura 6.26 – Comparação entre Idade Equivalente a 80°C e 23°C (trazo 5C).....	91
Figura 6.27 – Comparação entre Idade Equivalente a 80°C e 23°C (trazo 10C).....	92

LISTA DE TABELAS.

Capítulo 2.

Tabela 2.1– Porcentagem de SiO ₂ na CCA segundo diversos autores	11
---	----

Capítulo 5.

Tabela 5.1 – Composição da argamassa.....	54
Tabela 5.2 - Composição do concreto.....	54
Tabela 5.3 - Traços da argamassa.....	60

Capítulo 6.

Tabela 6.1 – Características físicas do agregado miúdo.....	63
Tabela 6.2- Características físicas do agregado graúdo.....	64
Tabela 6.3 – Características físicas e químicas do cimento CP V ARI Plus.....	66
Tabela 6.4 – Temperatura de queima da casca de arroz.....	67
Tabela 6.5 - Características físicas da CCA.....	68
Tabela 6.6 – Características físicas e químicas da CCA moída em 30 minutos.....	69
Tabela 6.7 – Características do traço de controle.....	71
Tabela 6.8 – Resistências à compressão.....	71
Tabela 6.9 - Resistência à compressão da argamassa.....	72
Tabela 6.10 - Resistência à compressão do concreto.....	73
Tabela 6.11 - Valores de Resistência à Compressão.....	76
Tabela 6.12 - Valores de Resistência à Tração.....	76
Tabela 6.13 - Valores de Módulo de Elasticidade.....	76

Tabela 6.14 - Resultados para o traço de controle com temperatura de cura de 10°C...	78
Tabela 6.15 - Resultados para o traço de controle com temperatura de cura de 30°C...	78
Tabela 6.16 - Resultados para o traço de controle com temperatura de cura de 60°C...	78
Tabela 6.17 - Resultados para o traço com 5% de CCA com temperatura de cura 10°C	79
Tabela 6.18 - Resultados para o traço com 5% de CCA com temperatura de cura 30°C	79
Tabela 6.19 - Resultados para o traço com 5% de CCA com temperatura de cura 60°C	79
Tabela 6.20 - Resultados para o traço com 10% de CCA e temperatura de cura 10°C..	79
Tabela 6.21 - Resultados para o traço com 10% de CCA e temperatura de cura 30°C..	80
Tabela 6.22 - Resultados para o traço com 10% de CCA e temperatura de cura 60°C..	80
Tabela 6.23 - Cálculo de E_a para o traço de controle.....	81
Tabela 6.24 - Cálculo de E_a para o traço com 5% de CCA.....	81
Tabela 6.25 - Cálculo de E_a para o traço com 10% de CCA.....	81
Tabela 6.26 – Índices para o traço de controle (C).....	84
Tabela 6.27 – Índices para o traço com 5% de CCA (5C).....	85
Tabela 6.28 – Índices para o traço com 10% de CCA (10C).....	85

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM – American Society for Testing Materials.

CAD – concreto de alto desempenho.

CCA – cinza de casca de arroz.

CP – corpo-de-prova.

CV – coeficiente de variação.

DP – desvio-padrão.

E – energia de ativação.

E_a – energia aparente de ativação

E_c – módulo de elasticidade do concreto.

f_c – resistência à compressão do concreto.

f_t – resistência à tração do concreto.

FM – fator de maturidade.

Id.Eq. – idade equivalente.

M – média dos resultados.

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação.

T₀ – temperatura de base.

T_r - temperatura de referência.

T – temperatura absoluta (K).

K – Kelvin.

Δt – intervalo de tempo.

1. INTRODUÇÃO.

1.1. GENERALIDADES.

O concreto armado é utilizado em grande escala na construção civil brasileira, representando um elevado consumo de cimento, seu principal constituinte. Mistura de concreto, já utilizada a quase dois séculos, teve como principal alvo de estudos as suas características mecânicas, seguido pelas preocupações em se manter a durabilidade das estruturas.

O desenvolvimento de concretos de maior resistência, permitindo construções mais arrojadas em termos estruturais, elevou a necessidade de maiores estudos não só do comportamento mecânico das peças, mas em especial das características dos materiais constituintes do concreto, além, é claro, da introdução de novos materiais e técnicas construtivas.

Ao longo de décadas, o concreto foi aprimorado com a introdução de aditivos, na forma de plastificantes, retardores de pega, entre outros, além das adições pozolânicas e/ou cimentantes constituídas de materiais sólidos muito finos, que compõe a mistura através da substituição do cimento ou somando-se a este na composição do aglomerante.

As principais vantagens dessas adições são os ganhos de resistência mesmo quando se diminui a quantidade de cimento na mistura, e na microestrutura contribuindo para o desenvolvimento de uma matriz mais definida e

uma estrutura geral menos porosa, o que permite maior resistência ao ataque de agentes agressivos, melhorando sua condição de durabilidade aliada a uma maior resistência mecânica.

Entre as adições mais estudadas na composição do concreto, estão a sílica ativa, as cinzas volantes, cinza de casca de arroz, microfiller, entre outros.

Conjuntamente com os estudos sobre os materiais, as técnicas de preparo e cura do concreto tiveram grande avanço com a introdução de novas exigências do mercado de construção civil, na qual podemos citar a indústria de pré-moldados, grande utilizadora da cura térmica.

O uso da técnica de cura térmica a vapor deve ser avaliado de forma a garantir que os efeitos deste tipo de cura sobre o concreto resultem num material confiável. De modo geral, a cura térmica age sobre as condições de hidratação do cimento, acelerando esse processo, permitindo maior rotatividade das formas. Para auxiliar nesse processo de aumentar a velocidade das reações, são utilizados normalmente cimentos que proporcionam maiores resistências iniciais, denominados ARI – Alta Resistência Inicial e aditivos aceleradores.

Segundo SALVADOR FILHO (2001), deve-se considerar o perigo da evaporação de parte da água necessária à hidratação do cimento, que pode provocar a microfissuração da pasta. Este fato, quando não devidamente equacionado, pode tornar o processo ineficaz e não contribuir para a redução do tempo de cura, além de comprometer as propriedades do concreto.

No desenvolvimento das técnicas de cura, outro avanço pode ser considerado a partir dos estudos relacionados aos efeitos combinados da temperatura e do tempo de cura sobre a resistência à compressão do concreto. Desenvolvido a partir da década de 50, o Método da Maturidade tem grande utilização, em especial nos Estados Unidos, onde é aplicado como método de ensaio não destrutivo na avaliação do tempo necessário para desforma, aplicação de cargas de protensão ou de construção, entre outras atividades. Porém, de acordo com PINTO (2000), quaisquer outras propriedades do concreto que estejam relacionadas à evolução do grau de hidratação do cimento podem ser

modeladas e equacionadas a partir do histórico de temperatura de cura e das funções de maturidade.

1.2 – OBJETIVOS.

Os objetivos a serem atingidos nessa pesquisa passam por duas etapas principais:

- (1) estudar a utilização de uma cinza de casca de arroz residual, obtida através de uma queima não controlada da casca, em forno experimental aberto, em um concreto convencional. O estudo passa pela caracterização desse material e determinações quanto a sua melhor granulometria e dosagens de incorporação à argamassa e ao concreto.

- (2) fazer uma avaliação real da influência da temperatura de cura nas mesmas propriedades citadas no item anterior, fazendo-se a utilização do Conceito ou Método da Maturidade, seguindo o procedimento da ASTM C 1074 (1998), determinando experimentalmente os parâmetros necessários para a aplicação do método – entre os quais a Energia Aparente de Ativação - utilizados nos cálculos dos Índices de Maturidade, expressos através de curvas que relacionam esses índices com os valores dos ensaios de resistência obtidos num ciclo de 6 horas de cura térmica a 80°C.

1.3 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.

A dissertação foi desenvolvida em etapas, apresentadas de forma a garantir a compreensão dos assuntos e conceitos abordados, distribuídas em 7 capítulos, descritos a seguir.

Capítulo 1: Introdução.

Capítulo 2: As adições minerais ao concreto, em destaque a cinza de casca de arroz utilizada nesta pesquisa.

Capítulo 3: A cura térmica, apresentando de forma sucinta a descrição do processo e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas do concreto.

Capítulo 4: O Método da Maturidade, relacionando os estudos mais abrangentes desta técnica, utilizada aqui em conjunto com a cura térmica na avaliação das propriedades estudadas.

Capítulo 5: Programa experimental, que discorre sobre a organização dos ensaios realizados e seus detalhes mais significativos.

Capítulo 6: Resultados, apresentados segundo o programa experimental desenvolvidos e discutidos conforme as técnicas adotadas.

Capítulo 7: Conclusões, apresentações das considerações finais dos resultados obtidos e propostas para o prosseguimento das pesquisas.

2. AS ADIÇÕES MINERAIS AO CONCRETO.

2.1 – DEFINIÇÃO.

Segundo a ASTM C 618 (2003) e a NBR 12653 (1992) definem pozolanas como um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícea mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

Ainda de acordo com SILVEIRA (1996) adições minerais são materiais com propriedades pozolânicas e/ou cimentíceas, adicionados ao concreto, antes ou durante a mistura, em quantidades que variam geralmente entre 5 e 100% do peso do cimento. O seu emprego pode ser feito de duas formas distintas:

- (1) como substituição de parte do cimento, visando a redução de custo e;
- (2) como adição em percentuais variáveis em relação à massa de cimento, o que na atualidade consiste na forma mais empregada, geralmente com o uso concomitante de aditivos superplastificantes.

Esses materiais, genericamente denominados pozolanas, podem ser originários tanto de materiais naturais (tufo vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas), como de subprodutos e resíduos agrícolas e industriais (cinza volante, sílica ativa, escória granulada de alto-forno, cinza da casca de arroz).

A denominação materiais naturais refere-se a todos os materiais pozolânicos derivados de rochas ou minerais vulcânicos (com exceção das terras

diatomáceas) que passam por processos de britagem, moagem e classificação, e que, geralmente, são ativados termicamente, pois apresentam impurezas (argilo-minerais) que diminuem a sua atividade pozolânica.

O termo subprodutos industriais refere-se àqueles materiais que são secundários nas indústrias produtoras e que podem ou não sofrer algum tipo de processamento. Segundo CINCOTTO (1988), citado por SILVEIRA (1996), existe uma distinção entre os termos resíduo e subproduto. A denominação resíduo é circunstancial, referindo-se a um material acumulado, sem destinação; a partir do momento que apresente uma aplicação qualificada, passa a ser um subproduto.

2.2 – HISTÓRICO.

O uso de pozolanas como composto cimentício é antigo. O termo pozolana era popularmente conhecido nos vilarejos próximos ao Monte Vesúvio na Itália para designar os tufos vulcânicos utilizados nas construções do Império Romano.

Com a descoberta de novos materiais que ao reagir com a cal apresentava propriedades cimentíceas, o termo pozolana passou a ser utilizado de forma mais abrangente. Atualmente não só materiais naturais possuem essa designação. A definição de pozolana inclui subprodutos e resíduos industriais, como a cinza volante, a escória de alto forno, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz.

A partir da década de 50, com o surgimento de novos materiais, uma fonte alternativa e até principal de adições para o concreto pôde ser explorada. Atualmente, contudo, o interesse nestes materiais é voltado principalmente para a sua utilização em concretos de alto desempenho, com ênfase no aproveitamento de resíduos e subprodutos industriais, como a cinza volante, a sílica ativa, a escória granulada de alto-forno e a cinza da casca de arroz, cuja produção mundial vem aumentando a cada ano (SILVEIRA, 1996).

A utilização da cinza da casca de arroz até a década de 70 estava restrita à fabricação de blocos. A partir de um trabalho realizado por MEHTA e PITT (1976), citado por SILVEIRA (1996), para produzir cinza altamente pozolânica, com incineração da casca através de parâmetros controlados de tempo e temperatura

de queima, iniciaram-se os primeiros testes relativos à utilização do material como adição para concretos e argamassas.

2.3 - A CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) COMO ADIÇÃO MINERAL.

2.3.1 – Considerações iniciais.

A casca de arroz é um resíduo resultante do beneficiamento do arroz. A própria indústria de beneficiamento utiliza a casca, que tem alto poder calorífico, nos processos de secagem e parbolização dos grãos. Como resultado desse processo, uma elevada quantidade de cinza é produzida e comumente descartada de forma inadequada, gerando uma grande preocupação quanto aos problemas ambientais que surgem diante do fato de se tratar de um resíduo poluidor e causador de doenças.

A casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas. Acredita-se que a sílica da casca de arroz exista na forma opalina (a opala é uma fase hidroamorfa da sílica). Aparentemente, a sílica é transportada a partir do solo pela planta como ácido monossilícico, o qual concentra-se na casca e no caule da planta por evaporação da água e, finalmente, se polimeriza para formar a membrana sílico celulósica (HOUSTON,1972). A composição química média em base anidra da casca de arroz corresponde a aproximadamente 50 % de celulose, 30 % de lignina e 20% de sílica. A celulose e a lignina podem ser removidas por combustão controlada, deixando para trás a sílica numa forma vítrea e microporosa, de altíssima superfície específica (MEHTA & PITT, 1977).

Segundo DAFICO e PRUDÊNCIO (2002) a cinza de casca de arroz contém carbono e, por essa razão, tende a ser preta. Entretanto, a cinza de casca de arroz (CCA) pode ser também cinza, púrpura ou branca, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima.

De acordo com HOUSTON (1972), a análise química de várias amostras de CCA, provenientes de várias regiões do mundo, mostram que o conteúdo de sílica varia de 90 a 95%. Os álcalis, K_2O e Na_2O , ocorrem como a principal impureza. O conteúdo de K_2O pode variar entre 1 e 5%, dependendo do tipo e quantidade de fertilizante utilizado na plantação. Pequenas quantidades (menos que 1%) de outras impurezas, tais como CaO , MgO e P_2O_5 , também são encontradas. HOUSTON (1972) descreve um grande número de possíveis formas de utilização na agricultura ou na indústria para a cinza de casca de arroz. A utilização como pozolana é só uma das muitas possibilidades. BEAGLE & BEAGLE, citados por HOUSTON (1972), afirmam que cinzas contendo pouco ou nenhum carbono residual possuem muitos usos potenciais adicionais. Os últimos listam mais de 30 outras possíveis formas de utilização para a CCA com baixo teor de carbono que vão desde o uso para correção do solo até o uso como abrasivo na fabricação de pasta de dente.

Estudos experimentais, realizados na Universidade da Califórnia (MEHTA, 1992) com o objetivo de obter condições ótimas de queima para produção de cinzas com reatividade pozolânica, indicam que, quando a temperatura de queima situa-se na faixa de 500 a 700 °C, ou se o tempo de combustão é menor que 1 minuto em temperaturas entre 700 e 800 °C, a sílica residual é mantida como fase amorfa.

A produção mundial de arroz está estimada em 500 milhões de toneladas, sendo o Brasil um dos dez maiores produtores. Segundo o IBGE (2003), a estimativa de produção de arroz no país, em 2003, é de pouco mais de 10 milhões de toneladas, sendo grande parte produzida nos estados da região Sul. Considerando-se que 20% do grão é casca e que 20% da casca após combustão é convertida em cinza, chega-se a um total 400 mil toneladas de cinza.

O aproveitamento da casca como combustível já é uma prática comum, porém o resíduo cinza de casca de arroz, ainda é depositado a céu aberto, demonstrando uma prática que não satisfaz as crescentes preocupações ambientalistas atuais, como mostra a figura 2.1.



Figura 2.1 – Depósito a céu aberto ao longo de estrada vicinal (SANTOS, 1997).

Na maior parte dos países produtores de arroz, diversos estudos são realizados no sentido de aumentar as possibilidades de utilização da CCA, em especial na composição do concreto.

No Brasil, vários pesquisadores demonstraram interesse no estudo das propriedades de concretos e argamassas com adição de CCA, destacando-se entre eles ALVES e GOULART (1981), CINCOTTO (1988), GUEDERT (1989), FARIAS (1990) e ISAIA (1995), citados por SILVEIRA (1996), além de DAFICO e PRUDÊNCIO (2002), LIBÓRIO et al. (2001), POUHEY e DAL MOLIN (2001), RÊGO et al. (2002), GAVA et al. (1999), entre outros.

METHA (1992) comenta que a CCA é uma pozolana extremamente atrativa para ser utilizada na confecção de concretos, especialmente quando obtida pela combustão controlada da casca, tendo como característica uma alta atividade pozolânica.

Entre as características do concreto beneficiado com adição de CCA estão as relacionadas com a resistência mecânica e a durabilidade. Tanto o efeito químico das atividades pozolânicas como os efeitos físicos, relacionados com o tamanho das partículas, favorecem a permeabilidade, o grau de hidratação,

resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque a sulfatos (SILVEIRA, 1996).

De acordo com DAFICO e PRUDÊNCIO (2002), como material adicionado conjuntamente ao cimento Portland, muitas propriedades únicas apresentadas pela cinza de casca de arroz têm sido reportadas por diversos pesquisadores. Com o concreto fresco, adições de misturas pozolânicas, tais como a CCA, têm a capacidade de reduzir a segregação e a exsudação.

Exceto a cinza de casca de arroz, nenhum outro material pozolânico, incluindo-se a sílica ativa, tem a habilidade de contribuir para o aumento na resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias. Isto abre as portas para o uso de misturas de cinza volante e outras pozolanas normais com a CCA, com a última agindo como acelerador de resistência (MEHTA, 1992).

2.3.2 – Características da CCA.

2.3.2.1 – Composição química.

A casca do arroz é composta por aproximadamente 20% de sílica e é dependente do tipo de arroz plantado, além do solo e dos fertilizantes utilizados no cultivo.

Após a queima da casca, o material resultante possui entre 74 a 97% de sílica, independente do tipo de queima a que foi submetida, segundo diversos autores (tabela 2.1).

Tabela 2.1– Porcentagem de SiO₂ na CCA segundo diversos autores.

Autor (ano)	% SiO ₂
Ikpong, A. A. (1993)	82,13
Metha e Folliard (1995)	90,00
Isaia, G. C. (1997)	78,60
Bui e Stroeven (1997)	97,00
Gava et al. (1999)	74,42
Payá et al. (1999)	85,70
Anwar et. al (2000)	93,25
Payá et al. (2000)	89,39
Sensale e Dal Molin (2001)	87,20
Moraes et al. (2001)	86,50
Rêgo et al. (2002)	81,48

A influência do tipo de queima está mais relacionada à morfologia da sílica presente na cinza. A temperatura atingida durante a combustão é fator determinante para o aparecimento da sílica em estado amorfo (mais reativa) ou em estado cristalino.

De acordo com SILVEIRA e DAL MOLIN (1995), entre 400 e 500°C, a sílica contida na cinza é ativa apresentando-se numa fase amorfa. Acima de 600°C, em alguns casos, detecta-se a formação de quartzo. Com o aumento da temperatura ocorre o surgimento de formações cristalinas, como cristobalita e em temperaturas mais elevadas, a tridimita. Acima de 800°C se produz sílica essencialmente cristalina (não reativa).

Segundo DELLA et al. (2001), quando a temperatura de queima da CCA é baixa ou quando o tempo de exposição da mesma a altas temperaturas é pequeno, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa. Ou seja, quanto menos tempo a cinza ficar exposta a uma elevada temperatura, menos cristalização ocorre.

Outro aspecto relacionado à queima foi estudado por SUGITA et al. (1992), que diz que se a casca sofrer um processo controlado de elevação da temperatura antes de se iniciar a combustão, ela pode permanecer por um período longo durante a combustão com temperaturas acima de 1000° C sem ocorrer nenhuma cristalização.

Diversos autores, entre eles METHA e PITT (1976) citado por SILVEIRA (1996), PAYÁ et al.(2000), entre outros, afirmam que quando a combustão ocorre com temperatura entre 450 e 500° C, a sílica é ativa numa fase amorfa. Com o aumento da temperatura para próximo de 600° C, algumas fases cristalinas podem ser detectadas e de forma crescente quando a temperatura se eleva para acima de 800° C.

Resultados obtidos por NIMITYONGSKUL (1981), citado por SANTOS (1997), relacionando a temperatura de queima com a resistência à compressão de argamassas, mostram que a reatividade da cinza foi consideravelmente influenciada tendo sido obtidas cinzas de boa qualidade (melhores resistências das argamassas) para temperaturas entre 300 e 800°C. A temperatura em que a sílica resultante passou para a fase cristalina ocorreu entre 800°C e 1000°C. O autor também concluiu que cinzas obtidas a partir de queima a céu aberto, sem controle de temperatura e tempo de exposição, também apresentaram sílica reativa.

2.3.2.2 – Características físicas.

De acordo com os vários autores pesquisados, existem outros fatores que influenciam na qualidade da cinza obtida como a superfície específica e o conteúdo de carbono, os quais também dependem das condições de queima da casca.

O aumento da temperatura de queima diminui a quantidade de carbono presente na sílica, resultando numa diferença de coloração da CCA. Quanto menos carbono, mais clara é a cinza, variando desde uma cor cinza escuro até branco rosado.

Um dos aspectos mais importantes referentes à pozolanicidade da CCA diz respeito à superfície específica e ao diâmetro médio das partículas.

A cinza quando queimada a altas temperaturas possui área superficial menor. A tendência ao decréscimo da área superficial com o aumento da temperatura está relacionada com o fato das partículas sofrerem fusão e agregarem-se umas às outras (DELLA, 2001).

Desta forma, para uma melhor condição de pozolanicidade da CCA queimada sem controle de temperatura, é necessário que a mesma passe por um processo de moagem para reduzi-la a um material mais fino.

Sem essa redução, as partículas possuem baixa densidade e mantêm a sua estrutura celular original, não sendo própria para uso como adição devido a um aumento na absorção de água (PAYÁ et al., 2000). Os mesmos pesquisadores estudaram o efeito do tempo de moagem e observaram que após um certo tempo, mesmo com o aumento da superfície específica do material, a resistência à compressão de argamassas começa a diminuir, apresentando melhores resultados nas amostras de cinza com diâmetro médio das partículas em torno de 7 a 8 microns.

SANTOS e PRUDÊNCIO (1998) estudaram o efeito do tipo e do tempo de moagem na pozolanicidade da cinza e na resistência à compressão de argamassas. Os pesquisadores observaram que aumentando o tempo de moagem da cinza há uma melhora significativa nos resultados dos ensaios e que a resistência à compressão da argamassa é maior com um teor de substituição de 15%, em relação à massa de cimento.

GUEDERT (1989), citado por RÊGO et al. (2002), também avaliou o efeito do tempo de moagem sobre a cinza e destacou a relação entre o aumento da área superficial e da resistência à compressão. Em seu estudo, RÊGO et al. (2002) utilizaram uma cinza produzida sem controle de temperatura com diâmetro médio de 15,19 microns e alcançaram um índice de pozolanicidade da ordem de 85%, destacando que a finura pode ser tão importante para a reatividade da cinza quanto a sua amorficidade.

SENSALE (2000) mostrou em seu estudo que embora a cinza residual não seja a mais adequada para utilização como adição ao concreto, ela possui uma pequena quantidade de material amorfo reagindo, que associado à finura das partículas pode melhorar as propriedades do concreto. O autor conclui, ainda, que os resultados obtidos mostram a viabilidade do uso da cinza residual como material cimentício complementar, justificando a continuação e o aprofundamento dos estudos para um melhor aproveitamento deste resíduo.

Outros autores, como ANWAR et al. (2000) e DAFICO et al. (2000), também mostraram os benefícios da moagem da cinza residual sobre a resistência mecânica do concreto e também sobre a sua durabilidade, sempre associados a uma certa dosagem de adição ou substituição do cimento.

PAYÁ et al. (2000) também avaliaram o efeito da temperatura de cura sobre a pozolanicidade da cinza residual. Com um aumento de temperatura de cura de 20° C para 40° C, o efeito sobre a reação pozolânica da cinza é benéfico e que a 40° C a fixação da cal se torna bem maior já aos três dias de cura. Os autores destacam a combinação entre a dosagem da cinza, substituindo o cimento em 15% da massa, a finura das partículas e a temperatura de cura nas melhorias da qualidade da argamassa estudada.

Em um estudo comparativo dos métodos de avaliação de pozolanicidade de adições minerais, GAVA et al. (1999) criticam os limites de IAP impostos arbitrariamente sem relação direta com o desempenho da adição no concreto, sendo esses métodos baseados em ensaios físicos ou químicos, sem concordância entre os resultados de IAP e o desempenho dessas adições no concreto.

ISAIA (1995) citado por GAVA et al. (1999) estudou os efeitos das combinações isoladas e binárias de cinza volante e cinza de casca de arroz e observou que além das características físicas das pozolanas, os teores de adição influem de forma decisiva na sua pozolanicidade.

Ainda segundo GAVA et al. (1999), a utilização de um único teor de substituição de pozolana e a possibilidade de variação na relação água/aglomerante no ensaio de pozolanicidade atrapalham a classificação das

pozolanas. Nesse trabalho, os autores fixaram a relação água/aglomerante e variaram os teores de substituição de cimento por cinza, obtendo porcentagens de resistência em relação à argamassa de referência sempre superiores aos IAPs. Os autores sugerem que seria mais interessante avaliar as pozolanas com os materiais, tipos de cimentos que serão utilizados, teores adicionados ou substituídos, forma de cura direcionando os ensaios para a real finalidade do emprego das pozolanas.

ORDÓÑEZ et al. (2002) também estudaram as reações químicas ocorridas durante a hidratação da pasta de cimento com cinza de casca de arroz. Segundo os autores determinar a reatividade absoluta é difícil porque a cinza tende a se aglomerar e isso dificulta a sua dispersão na pasta, o que reduz aparentemente a sua pozolanicidade.

2.3.3 – A influência da adição de CCA no concreto.

2.3.3.1 - Teores de dosagem.

Conforme estudos comentados anteriormente, alguns pesquisadores notaram a influência da dosagem de adição ou substituição do cimento pela CCA e suas conseqüências nas propriedades de concretos comuns e de elevado desempenho.

Essas dosagens apresentam valores que variam de 5 a 50% da massa de cimento utilizado em concretos e argamassas. Os resultados obtidos sobre as propriedades do concreto são normalmente considerados satisfatórios, porém diversos fatores foram analisados pelos pesquisadores para determinar a melhor dosagem.

Em relação à resistência à compressão, os estudos são mais comuns uma vez que estes são normalmente utilizados para definir a qualidade do concreto. Outros aspectos como o efeito da adição da CCA no concreto sobre a carbonatação, a permeabilidade, absorção de água, hidratação da pasta e

resistência a ataques químicos também foram estudados por diversos pesquisadores.

2.3.3.2 - Resistência à compressão.

RÊGO et al. (2002) utilizaram em seu estudo cinza residual em teores de substituição de 5, 10 e 20%. Sobre a resistência à compressão do concreto eles observaram um melhor desempenho para o teor de 5% até os 28 dias. Com idade mais avançada, de 63 dias, os teores de 10 e 20% também apresentaram valores de resistência superiores aos de 28 dias de forma significativa, comprovando a necessidade de um maior tempo para o desenvolvimento das reações pozolânicas.

NASCIMENTO et al. (2002) também comentam em seu estudo que apesar das substituições de 5 e 10% do cimento apresentarem resistência à compressão maiores que o do concreto de referência, houve maior perda de massa no concreto com adição de CCA, aumentando conforme aumenta o teor de cinza na mistura. Os autores comentam que as reações pozolânicas ocorrem geralmente em idades superiores a 28 dias e que a menor quantidade de cimento hidratado não foi compensada pelo efeito microfíler+pozolânico das partículas finas da cinza.

Ainda com relação à perda de massa, METHA e FOLLIARD (2001), constataram que ao expor corpos-de-prova de concreto com adição de CCA ao ataque de ácido clorídrico por diversas semanas, estes apresentaram perda de massa significativamente inferior ao concreto de referência, não atingindo o limite de 25% de perda de massa em 28 semanas. Já o concreto de referência atingiu esse limite em 11 semanas e chegou a quase 70% de perda de massa a 28 semanas. Os autores também mostram em seu estudo a menor expansão da argamassa com adição de CCA. Comparada à argamassa sem adição, a redução foi de 82% na 16^ª semana.

SENSALE e DAL MOLIN (2001) compararam o efeito da adição de CCA no concreto analisando dois tipos de cinza. Uma cinza amorfa proveniente dos Estados Unidos e uma outra cinza residual proveniente do Uruguai, em teores de

substituição de 10 e 20%. Os autores chegaram a resultados diferentes para cada tipo de cinza com mesmo teor de substituição. Para cinza americana (amorfa) o melhor desempenho foi com 20% de substituição do cimento, enquanto que para a cinza residual o aumento de 10 para 20% diminui os valores de resistência. Porém, os resultados de ambas as dosagens de cinza residual mostraram um bom desempenho quando comparados ao concreto de referência.

MORAES et al. (2001) compararam o efeito das adições de CCA e cinza volante no concreto em dosagens de 12,5, 25 e 50% de substituição do cimento, além de combinações das duas pozolanas em duas proporções: 12,5 CCA + 12,5 CV e 25 CCA + 25 CV. Entre os resultados obtidos, os melhores são relacionados à dosagem de CCA em 25%, superiores aos da cinza volante na mesma dosagem e também para a combinação de 12,5% de cada pozolana, em todas as idades. Segundo os autores, o bom desempenho das misturas com relação ao traço de referência justifica maiores estudos de dosagem sobre as combinações de pozolanas.

ISAIA (1996) também estudou o efeito de combinações de CCA e cinza volante no concreto, em substituições de até 50%. Os resultados sobre a resistência à compressão também mostraram excelente desempenho da CCA combinada com a cinza volante ou isoladamente em até 30% de teor de substituição. Segundo o autor, outros aspectos relacionados à durabilidade do concreto também se mostraram beneficiados com a combinação das pozolanas.

BUI e STROEVEN (1997) estudaram os resultados de resistência à compressão de concretos com CCA, em três dosagens: 9, 14 e 17%. Os resultados se mostraram melhores que os traços de referência, sendo a dosagem maior (17%) a mais significativa, especialmente para o traço com menor relação água/aglomerante e maior quantidade de superplastificante.

Já ARBOLAEZ (2000) produziu um forno para queima da casca de arroz com controle de temperatura. Sua cinza foi obtida em combustão com temperatura entre 500 e 700° C e utilizada em dosagens de substituição de 10, 15, 20 e 30%. O autor conseguiu melhores resultados com a sua dosagem máxima de substituição, com percentual de 52% de ganho de resistência comparado ao traço

de referência, aos 28 dias. Com 20% de CCA o percentual de ganho de resistência sobre o traço de referência foi de 21% aos 28 dias com redução para 9% aos 56 dias.

2.3.3.3 - Efeitos sobre outras propriedades do concreto.

HASPARYK et al. (2001) estudaram os efeitos dos teores de CCA no concreto sobre a reação álcali-agregado. Os resultados obtidos nesse trabalho mostram que para um teor acima de 8% de substituição do cimento, a CCA é capaz de reduzir as expansões abaixo do limite prescrito pela norma aos 16 dias, tanto no caso do agregado basáltico como no quartzito. O comportamento da CCA foi comparado ao da sílica ativa, com resultados satisfatórios.

ZHANG et al. (1996) estudaram o efeito da adição da CCA na pasta de cimento e no concreto sobre a resistência à compressão e zona de transição pasta-agregado. Os resultados obtidos mostram que na pasta a adição de CCA não se traduz em aumento de resistência comparados ao traço de controle. O inverso ocorre no concreto, devido à incorporação da CCA levar a uma redução na porosidade e na formação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na zona interfacial, diminuindo a espessura da mesma. Segundo os autores, a presença da CCA na pasta de cimento diminui a quantidade de partículas de cimento hidratado, possivelmente por causa da aceleração da sua hidratação.

SINGH et al. (1995) também constataram a aceleração da hidratação da pasta de cimento com CCA, devido à redução dos poros com a reação pozolânica e a atuação da CCA como fíler. Porém, os autores estudaram apenas uma dosagem de CCA.

Diversos outros autores, como VENQUIARUTO et al. (2001), VAGHETTI e ISAIA (1999), GASTALDINI et al. (2001), entre outros, estudaram o comportamento do concreto com adição de CCA sobre a carbonatação.

VENQUIARUTO et al. (2001) obtiveram em ensaios de carbonatação acelerado, resultados não satisfatórios para o emprego da CCA em concretos com relação à carbonatação. Os autores comentam que a adição de CCA aumentou a

profundidade de carbonatação em todas as idades pesquisadas e que o aumento do teor de adição de 25 para 50% é mais prejudicial sob este aspecto. Segundo os autores, o concreto sem adição mineral possui uma reserva alcalina maior na estrutura da pasta, com as reações de hidratação produzindo maior quantidade de CH. Outro ponto destacado pelos autores é que misturas com CCA mais fina produzem uma profundidade de carbonatação maior, devido ao fato de que as partículas mais finas são mais reativas e combinam-se mais rapidamente com o hidróxido de cálcio disponível, reduzindo a reserva alcalina da pasta.

Resultados semelhantes foram obtidos por VAGHETTI e ISAIA (1999). Os autores compararam ainda a atuação da CCA com a cinza volante isoladamente e também de forma combinada, constatando o melhor desempenho da primeira sobre a segunda pozolana, embora os resultados de carbonatação em ambos os casos tenham sido insatisfatórios com relação ao traço de controle em todas as dosagens estudadas.

2.3.3.4 - O uso de aditivos superplastificantes.

O uso desses aditivos tem como objetivo reduzir a quantidade de água necessária para se obter uma determinada trabalhabilidade, ou da mesma forma para uma quantidade de água determinada, permitir uma melhora na trabalhabilidade (RONCERO e GETTU, 2000). A aplicação do superplastificante permite então a redução da relação a/c, tendo como consequência ganhos cada vez maiores de resistência e durabilidade, sobretudo no emprego de concretos de elevado desempenho.

Uma elevada trabalhabilidade obtida também favorece a utilização do concreto em zonas pouco acessíveis ou com grande densidade de armadura, além de facilitar o bombeamento (RONCERO e GETTU, 2000).

De acordo com CASSA et al. (1999), o cimento Portland, quando misturado com água, apresenta forte tendência de floculação. Esta tendência se deve principalmente às interações das partículas de cimento através das forças de atração de Van der Waals (forças de atração eletrostáticas) e interações entre

estas partículas e as moléculas de água. A floculação do cimento, por sua vez, prejudica a dispersão das suas partículas.

Ainda segundo CASSA et al. (1999), a adsorção pelas partículas de cimento de uma molécula de superplastificante (moléculas longas que envolvem as partículas de cimento) geram cargas negativas, criando forças repulsivas que se sobrepõem às forças de atração. Esse mecanismo deflocula as partículas de cimento no meio aquoso, evitando a sua reaglomeração.

Em resumo, a ação do superplastificante retarda a hidratação do cimento, permitindo que a água permaneça durante mais tempo na mistura, favorecendo assim a sua trabalhabilidade.

Existem diversos tipos de superplastificantes no que diz respeito a sua composição química, sendo mais comuns os compostos sulfonados naftaleno-formaldeído e os sulfonados de melamina-formaldeído, e mais recentemente a terceira geração de superplastificantes, os chamados policarboxílicos.

A adição de CCA em argamassas e concretos aumenta a demanda por água de amassamento na mistura, principalmente devido ao aumento da proporção de finos. Alguns autores também citam o consumo maior de água da mistura ocasionada pela maior e mais rápida hidratação da pasta com a presença de pozolanas.

Para melhorar a trabalhabilidade, reduzir o consumo de água e consequentemente melhorar as propriedades do concreto com adição de CCA, é muito comum o uso de aditivos superplastificantes.

No caso de argamassas e concretos com adição de CCA, o uso de superplastificante é justificado apenas com relação à trabalhabilidade nos diversos estudos aqui apresentados, não sendo diretamente relacionados os efeitos da sua dosagem com as diversas características influentes nas propriedades do concreto com CCA ou outras pozolanas.

2.3.3.5 - Efeitos combinados.

A dosagem da CCA em argamassas e concretos é influenciada isoladamente por diversos fatores, mais de acordo com toda a bibliografia consultada, os efeitos combinados não permitem a conclusão final sobre a dosagem ideal para adição de cinza de casca de arroz residual.

Os efeitos relacionados à finura das partículas de cinza influenciam na sua dosagem, uma vez que o efeito microfíler pode ser alterado devido a uma maior reatividade das partículas mais finas. Uma maior quantidade de adição também pode levar a resultados de resistência à compressões diferentes para cinzas obtidas com diferentes tempos de moagem. Ou seja, para cada amostra de cinza, moídas a diferentes tempos, a dosagem de melhor desempenho quanto aos parâmetros de resistência podem variar de 5 a 30% de substituição segundo os autores pesquisados.

Segundo MORAES et al. (2001), o efeito pozolânico da adição mineral de CCA e cinza volante atuam conjuntamente com o efeito físico, sendo o primeiro mais atuante. Porém, em idades mais avançadas, a comparação entre os efeitos diminui e em concretos de maior resistência o efeito físico tem sua influência aumentada. Os autores comentam que a resistência mecânica do concreto sofre uma influência conjugada do efeito microfíler da pozolana presente e ação pozolânica mais intensa.

A morfologia da cinza é outro fator que interfere na dosagem da cinza no concreto. Como já comentado anteriormente, a cinza amorfa é mais reativa e proporciona a possibilidade de substituição do cimento em dosagens maiores que a cinza residual, mais cristalina e menos reativa. Nesse ponto, os diversos autores recomendam, então, a moagem da cinza residual para ativar suas propriedades pozolânicas associadas aos efeitos físicos proporcionados pela finura das partículas.

No que diz respeito à moagem da cinza residual, os diversos pesquisadores citados também atentam para o fato de que o tempo ideal de moagem, ou seja, a granulometria ideal da cinza também é variável. A temperatura de queima da

casca de arroz influencia no tempo de moagem para se atingir determinada faixa granulométrica, uma vez que o aumento da temperatura promove o agrupamento das partículas. Nesse caso, é necessário um tempo de moagem maior ou ainda o emprego de uma relação maior entre a massa de bolas do moinho e a quantidade de cinza a ser moída.

Segundo SANTOS (1997), as cinzas, em especial a cinza de casca de arroz, por sua composição, constituição e proporção em cimentos para argamassa e concreto, podem influenciar em tudo: no desenvolvimento da resistência, na exigência e retenção de água, na retração, na fissuração e fluência do concreto. Também influem na durabilidade de concretos e argamassas frente ao ataque de agentes químicos, particularmente sobre o aspecto de corrosão das armaduras. No estudo da reatividade do material deve-se considerar os fatores ligados à composição química, física e mineralógica. Com relação à CCA residual, é necessário uma atenção especial ao processo de queima, temperatura e tempo de exposição e grau de moagem.

Ainda de acordo com SANTOS (1997), a CCA poderia ser utilizada com grandes vantagens econômicas em fábricas de artefatos e pré-moldados de argamassa e concreto, em centrais de produção de concreto para fabricação de concretos especiais, como os de alto desempenho, com baixo calor de hidratação e resistente ao ataque de sulfatos.

3. A CURA DO CONCRETO.

A cura é a denominação dada aos procedimentos a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura e a saída e entrada de umidade para o concreto. Mais especificamente, o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais possível saturado, até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento até uma condição desejável (NEVILLE, 1997).

3.1. PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.

De acordo com CARVALHO (2002), a hidratação do cimento Portland pode ser analisada como a soma de todas as reações dos compostos individuais do cimento, sendo que estas reações ocorrem simultaneamente, proporcionando assim uma sobreposição e uma interação entre cada uma delas.

A evolução do processo de hidratação do cimento pode ser observado nas curvas de evolução de calor das pastas de cimento durante a pega e o período inicial de endurecimento, registrados por LERCH (1946), citado por BORGES (2002), como mostra a figura 3.1.

Três picos principais podem ser observados. O primeiro ocorre em um curto período de tempo, logo que a água é introduzida na mistura, e corresponde ao calor de dissolução de aluminatos e sulfatos. Esta evolução de calor inicial termina rapidamente, quando a solubilidade dos aluminatos é reduzida na presença de sulfatos em solução e uma alta taxa de calor é liberada.

A seguir ocorre um período de pouca atividade química, conhecido como período de dormência, onde o C_3S é dissolvido formando um dos produtos de

hidratação, o C-S-H. Durante esse período poucos produtos de hidratação são formados, permitindo a mistura, o lançamento e o adensamento, antes da ocorrência do endurecimento. A medida que a concentração dos compostos aumenta, inicia-se a formação da microestrutura com a formação dos hidratos marcando o fim do período de dormência.

Durante o segundo pico, observa-se a hidratação do C_3S e do C_3A . Nas proximidades desse ponto, a mistura começa a perder plasticidade até tornar-se não-trabalhável. No terceiro pico, ocorre a transformação da etringita não estável em monossulfato.

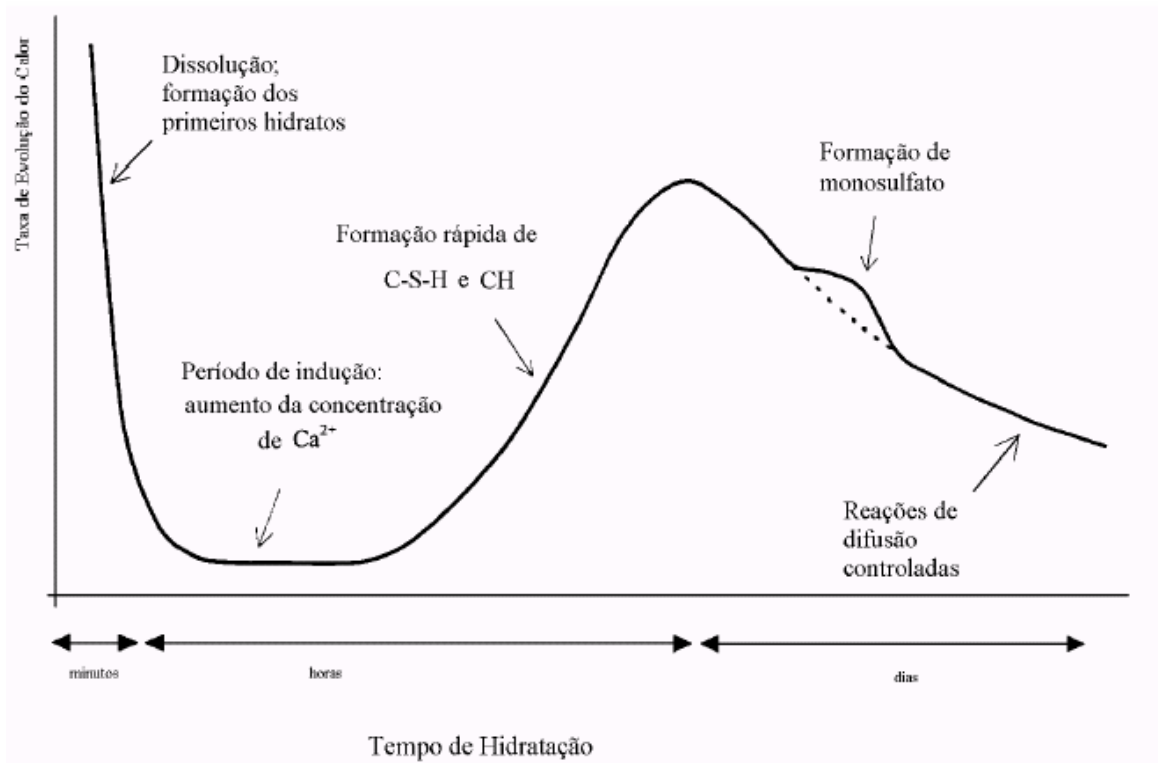


Figura 3.1– Reações químicas na pasta de cimento ao longo do tempo (PINTO, 1997)

A reação de hidratação é exotérmica, ou seja, libera calor. Cada componente do cimento gera diferentes taxas de evolução de calor. O calor total acumulado segue aproximadamente o processo global de hidratação, podendo ser influenciado por alguns fatores, especialmente pela finura e composição do

cimento. Em geral, para uma dada idade de hidratação, o calor total gerado é menor em cimentos de baixo calor de hidratação (CP III – F), e maiores em cimentos de alta resistência inicial (CP V – ARI). O calor gerado na completa hidratação de um cimento é aproximadamente uma função aditiva dos valores gerados na hidratação dos compostos individuais do cimento (CARVALHO, 2002).

As reações que tornam o cimento um agente com propriedades adesivas ocorrem na pasta de cimento e água, quando os silicatos e os aluminatos formam em contato com a água, produtos de hidratação, que no decorrer do tempo, originam uma massa firme e consistente: a pasta de cimento endurecida.

O cimento Portland é essencialmente composto por silicatos, aluminatos e impurezas. Os silicatos presentes no cimento Portland são: silicato dicálcico (C_2S) e o silicato tricálcico (C_3S) e os aluminatos tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). As impurezas presentes não são normalmente consideradas nas reações de hidratação e são basicamente constituídas de sulfatos, álcalis, cal livre, sílica não reativa, etc.

De acordo com METHA e MONTEIRO (1994), os silicatos compõem cerca de 75% do cimento Portland comum e tem importante papel na determinação das características de endurecimento – taxa de desenvolvimento da resistência. Já os aluminatos são conhecidos por se hidratarem muito mais rapidamente do que os silicatos.

3.1.1. A hidratação dos Aluminatos.

A reação do C_3A com a água é imediata e por isso há a necessidade de adição de sulfato para retardar a reação. A hidratação dos aluminatos na presença de sulfato resulta na formação da etringita ($C_6AS_3H_{32}$) e em monossulfatos hidratados.

A formação das agulhas de etringita começa minutos após o início da hidratação, sendo responsáveis pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial. Após alguns dias, dependendo da proporção alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode tornar-se instável e decompor-se para formar o

monossulfato hidratado, que é uma forma mais estável (METHA e MONTEIRO, 1994).

3.1.2. Hidratação dos Silicatos.

A hidratação dos silicatos ocorre algumas horas após o contato da água com a mistura. A hidratação do C_2S e C_3S origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H e hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, compostos estes que preenchem os espaços ocupados pela água e pelas partículas de cimento em dissolução (KAEFER, 2000).

3.2. PRODUTOS FORMADOS NA HIDRATAÇÃO DOS CIMENTOS.

A pasta de cimento endurecida é caracterizada pela presença de três elementos principais resultantes da hidratação do cimento:

- C-S-H : que correspondem, de acordo com METHA e MONTEIRO (1994), a cerca de 60% do volume de sólidos em uma pasta completamente hidratada. Esses compostos são responsáveis pela resistência a esforços mecânicos da pasta. Diante disso e considerando que uma maior quantidade de $Ca(OH)_2$ diminui a resistência do concreto ao ataque de ácidos e de sulfatos, verifica-se que um cimento com maior teor de C_3S resulta em um concreto mais suscetível ao ataque químico e com menor resistência mecânica.
- $Ca(OH)_2$: que ocupa, também segundo METHA e MONTEIRO (1994), entre 20% e 25% do volume de sólidos da pasta. O hidróxido de cálcio contribui muito pouco para a resistência da pasta de cimento endurecida e em virtude de sua baixa superfície específica, que lhe confere um baixo poder de adesão, é facilmente carregado pela água. Aparentemente o único aspecto positivo da presença do hidróxido de cálcio é a alcalinidade conferida ao meio,

responsável pela passivação das armaduras (DAL MOLIN, 1995) citada por KAEFER (2000).

- Sulfoaluminatos de cálcio: os principais compostos são a etringita e o monossulfato de cálcio, que ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada (METHA e MONTEIRO, 1994).

A evolução da hidratação do cimento pode ser determinada de vários modos: quantidade de Ca(OH)_2 na pasta; calor desenvolvido na hidratação; massa específica da pasta; quantidade de água quimicamente combinada; quantidade de cimento não hidratado; ou indiretamente, pela resistência da pasta hidratada.

3.3. A PEGA E O ENDURECIMENTO DA PASTA.

O período que reproduz o endurecimento da pasta de cimento é caracterizado por três fases distintas: a ante-pega, a pega e o pós-pega.

Na ante-pega, a mistura é constituída por um líquido visco-plástico (pasta de cimento) que evolui com o tempo. No início a pasta de cimento apresenta-se sob a forma de uma suspensão concentrada (água, cimento, aditivo, etc.), que pouco a pouco vai formando uma estrutura rígida (CARVALHO, 2002).

Durante a ante-pega, acontece o fenômeno denominado “retração Le Chatelier”, que se deve ao fato do volume de hidratos formados ser inferior á soma dos volumes iniciais de cimento anidro e de água. A contração se reduz à medida que começa a se formar o esqueleto rígido que se opõe a essa retração. Sua duração pode influenciar o processo de formação da estrutura rígida e comprometer a qualidade das propriedades mecânicas e de durabilidade.

A pega é o termo usado como referência ao enrijecimento da pasta de cimento, embora sejam manifestações diferentes do processo químico que envolve a hidratação, assim como o endurecimento. Segundo NEVILLE (1997), em termos gerais, a pega se refere à mudança do estado fluido para um estado rígido. Embora durante a pega a pasta adquira uma certa resistência, para efeitos

práticos, é importante distinguir pega de endurecimento. Este último se refere ao aumento de resistência de uma pasta de cimento depois da pega, ao longo do tempo. Durante esse processo, ocorre o preenchimento dos vazios na pasta com os produtos de hidratação, estabelecendo uma estrutura com menor porosidade, menor permeabilidade, e um aumento de resistência e melhoria no aspecto da durabilidade.

Segundo CARVALHO (2002), durante o período de pós-pega a evolução das propriedades mecânicas da mistura está intimamente ligada ao desenvolvimento da estrutura porosa da pasta de cimento endurecida, resultado do prosseguimento da hidratação do cimento ou dos aditivos minerais. Além da evolução das propriedades mecânicas, durante o período de pós-pega, se produzem outros fenômenos como a retração autógena (química) e a retração de secagem que dependerão também da estrutura do meio poroso.

3.4. FATORES QUE INFLUENCIAM NA HIDRATAÇÃO.

A hidratação da pasta de cimento é influenciada pelos parâmetros, descritos a seguir:

- Cimento: as diversas composições do cimento, mesmo em pequenas variações, são suficientes para modificar a velocidade de hidratação da pasta. Por exemplo, cimentos com alto teor de C_3S e C_3A terão alta resistência inicial, tendo início e fim de pega mais rápidos. Além disso, as taxas de evolução da resistência podem ser influenciadas pela relação água/cimento e pela finura do cimento. Um aumento na superfície específica irá acelerar as reações de hidratação, que são reações de superfície, com maior quantidade de partículas de cimento em contato com a água.
- Temperatura: a elevação da temperatura de cura da mistura proporcionará um aumento na velocidade das reações de hidratação, aumentando sua resistência inicial. Todavia se a temperatura inicial for muito alta a resistência a

longo prazo será prejudicada. Isso se deve ao fato de que uma hidratação muito acelerada aparentemente forma produtos com uma estrutura fisicamente mais pobre, provavelmente mais porosa, de modo que uma fração dos poros permanecerá sempre não preenchida (AÏTCIN, 1998). Mas, deve-se ressaltar que a temperatura dos materiais empregados na elaboração de uma mistura a base de cimento Portland também pode influenciar na velocidade de formação dos produtos de hidratação, e por conseqüência nas características finais, segundo CARVALHO (2002).

- Aditivos químicos: a influência dos aditivos químicos ocorre na mudança de algumas características, tais como o tempo de pega, trabalhabilidade, etc. A introdução de aditivos superplastificantes permite a redução significativa da quantidade de água de mistura, representando um possível retardamento do processo de hidratação nas primeiras idades e após este período, devido à dispersão das partículas de cimento, uma aceleração da taxa de hidratação, resultando numa melhor trabalhabilidade.
- Adições minerais: cinzas volantes, escória de alto forno, sílica ativa e cinza de casca de arroz são as adições mais comumente utilizadas em estudos da composição do concreto, proporcionando benefícios diretamente relacionados à melhora da resistência e da permeabilidade, por refinamento dos poros, e promovendo assim maior durabilidade.

3.5. O EFEITO DA CURA TÉRMICA SOBRE A HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.

Segundo AÏTCIN (2000), um meio simples de se observar a evolução da resistência do concreto é acompanhar a evolução da temperatura do concreto e vice-versa. O desenvolvimento de mais ou menos resistência no concreto está relacionado à liberação de mais ou menos calor, de acordo com as proporções respectivas da cada uma das fases do cimento, a quantidade de água usada, a

área específica do cimento, a temperatura inicial do concreto e a temperatura ambiente.

Segundo DE MELLO et al. (2000), a cura térmica é um processo otimizado de cura tendo como principal objetivo um maior ganho de resistência do concreto nas primeiras idades, proporcionando um manuseio mais rápido na desforma das peças moldadas.

O efeito da cura térmica acontece sobre a hidratação do cimento, que ocorre de maneira mais rápida. Uma temperatura mais alta durante e depois do contato inicial entre o cimento e a água reduz a extensão do período de latência de modo que a estrutura total da pasta de cimento hidratada se define mais cedo (NEVILLE, 1997).

A utilização da cura térmica requer cuidados quanto à temperatura. Temperaturas muito altas podem afetar a microestrutura do concreto, causando microfissuras em sua superfície (HASNI et al., 1991), citado por SALVADOR FILHO (2001). A explicação é que uma hidratação inicial mais rápida aparentemente promove a formação de produtos de hidratação com estrutura mais pobre, provavelmente mais porosa, sendo que boa parte destes poros permanecerá não preenchida, acarretando numa resistência menor quando comparada a uma pasta mais densa e menos porosa.

Segundo NEVILLE (1997), essa explicação sobre os efeitos adversos de temperaturas iniciais sobre a resistência a idades avançadas foi proposta por VERBECK e HELMUT (1968). Os autores sugerem que a hidratação rápida a temperaturas mais altas retarda a hidratação subsequente e produz uma distribuição não uniforme dos produtos da hidratação no interior da pasta. Dessa forma, não haveria tempo suficiente para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento. Essa proximidade de produtos hidratados com partículas em início de hidratação retarda o processo e resulta em menores resistências a longo prazo.

De acordo com GOTO e ROY (1981), a influência da temperatura nas primeiras idades, a partir de 24 horas, sobre a estrutura da pasta de cimento hidratada, em uma cura a 60°C, resulta em um volume de poros com diâmetros

maiores, comparados com os obtidos em uma cura a 27°C. A porosidade varia em sentido contrário, mas são os poros maiores que controlam a permeabilidade, importante no que diz respeito à durabilidade.

Para minimizar a perda de resistência a longo prazo, devem ser controlados os aspectos do ciclo de cura térmica: a espera para o início do aquecimento e a velocidade de elevação de temperatura. Também deve ser controlado o aumento subsequente da temperatura para impedir o surgimento de gradientes acentuados de temperatura no concreto. A velocidade de elevação de temperatura tem pequeno efeito sobre a resistência a longo prazo, mas a temperatura máxima é um fator a considerar: uma temperatura de 70°C a 80°C resulta em uma redução de cerca de 5% na resistência aos 28 dias (NEVILLE, 1997).

Em resumo, um ciclo de cura consiste de um período de espera, um período de elevação de temperatura, um período de cura propriamente dita, a uma temperatura máxima, e um período de resfriamento, possivelmente seguido de uma cura úmida.

Com o objetivo de analisar a redução na resistência final e os compostos hidratados, formados ao longo do tempo, após uma cura térmica, DE MELO et al. (2000) desenvolveram um estudo experimental considerando a influência das adições (escória de alto forno e sílica ativa) e da duração de ciclos térmicos entre 3 e 12 horas, em concretos de elevado desempenho. Baseados em análises através de observações feitas pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), o estudo mostra que a queda de resistência para a amostra submetida à cura térmica está relacionada a uma ruptura na interface pasta-agregado, levando em conta que a ruptura ocorre no próprio agregado para a amostra sob cura normal.

3.6. OUTROS EFEITOS DA CURA TÉRMICA.

CAMARINI (2001) também estudou o efeito da temperatura de cura sobre a absorção de água em concretos comuns. Sua conclusão foi de que o aumento da temperatura de cura de 20° C para 40° C provocou um aumento na porosidade da superfície dos corpos-de-prova e conseqüente aumento na absorção de água,

mesmo considerando que os concretos curados a 40° C tiveram resistência à compressão mais elevada. Segundo a autora, por esse motivo não é possível relacionar a resistência à compressão e a durabilidade.

Com relação à microestrutura do concreto, os estudos feitos por SILVA e VIEIRA (2001) mostraram que, aos 28 dias, existe uma maior influência da relação a/c do que da temperatura de cura. Comparando concretos curados em iguais condições, os autores constataram a presença de uma microestrutura mais porosa com o aumento do teor de água. O mesmo não ocorre ao três dias de idade, quando a temperatura de cura mais elevada provoca o surgimento de uma microestrutura mais densa e evoluída. Os resultados também destacam o aumento da resistência a 1 dia com o aumento da temperatura de cura, sendo mais significativo quando fizeram o uso de cimento ARI. Para este tipo de cimento, o estudo aponta para uma temperatura de cura ideal em 25° C, especialmente para os ensaios de resistência aos 28 dias.

No estudo de concretos curados a diversas temperaturas sem adição de CCA ou outra pozolana, alguns autores afirmam que a temperatura de cura é mais significativa sobre a resistência à compressão nas primeiras idades, diminuindo sua importância a partir dos 28 dias, quando a relação água/cimento é mais determinante (SILVA e VIEIRA, 2001).

Sob condições de cura em elevada temperatura, a fase C₃A do cimento Portland hidrata-se e promove a formação de monossulfatos. Ao longo do tempo, numa fase mais avançada, ocorre o surgimento da etringita, durante a subsequente cura em temperatura ambiente. Esta reação pode ser associada a uma expansão, mas somente em cimentos suficientemente ricos em C₃A e SO₃. A quantidade de etringita necessária para causar a expansão é bem menor quando se trata, por exemplo, de um cimento com excesso de SO₃ na sua composição, curados em temperatura ambiente (ODLER e CHEN, 1996).

A etringita é um constituinte normal e aparentemente inócuo do cimento Portland hidratado. De fato, a quantidade média de etringita presente nos cimentos Portland modernos pode ter sofrido um acréscimo nas décadas recentes devido a uma adição cada vez maior de sulfatos para controlar o tempo de pega e

a resistência nas primeiras idades dos concretos (GLASSER, 1996). O fato de que é comum associar a formação de etringita com a expansão não se trata de uma regra e sim de uma exceção. Não há dúvidas, de que em certas circunstâncias, ainda a serem melhor definidas, a formação de etringita pode ser expansiva.

Uma expansão não é algo comum, ou seja, não é constantemente observada em concretos submetidos à cura térmica. De fato, na maioria das aplicações de cura térmica não é observado um aumento do volume estável do concreto endurecido e uma possível expansão, associada a fissuras, deve ser melhor definida por estudos aprofundados na sua microestrutura (ODLER e CHEN, 1996).

Estudos mais recentes abordaram a expansão de argamassas e concretos submetidos à cura térmica, durante a subsequente cura convencional. Essa expansão é associada à formação secundária de etringita, que é encontrada preenchendo vazios e fissuras, particularmente circundando as partículas de agregado. Embora a interface pasta/agregado seja importante, devido à expansão ser afetada pela natureza do agregado, o fenômeno também foi observado nas amostras de pastas hidratadas (KELHAM, 1996).

Os dados publicados na literatura indicam uma temperatura crítica de 70°C, abaixo da qual não se observa nenhuma expansão. Porém, segundo ODLER e CHEN (1996), a quantidade de etringita encontrada em amostras de pastas hidratadas curadas em temperatura ambiente, a 50°C e a 90°C não são muito diferentes e que a melhor associação entre expansão e formação de fissuras ocorreu quando as amostras foram curadas a 90°C e cuja composição do cimento era rica em C₃A e SO₃. Os autores concluem então que, não só a quantidade, mas principalmente o mecanismo de formação da etringita é que seria mais essencial para expansão das pastas e concretos de cimento Portland.

Em outro estudo, KELHAM (1996) não encontrou expansões significativas em argamassas curadas em até 80°C, após cura térmica de 12 horas e subsequente cura em água a 20°C. As amostras curadas a 90°C apresentaram expansão de aproximadamente 1% entre 56 e 200 dias. Ainda segundo o autor, o fator predominante na ocorrência de expansão é a temperatura de cura, segundo

o qual a temperatura mais segura seria de 70°C, mas o tempo de cura deve ser melhor definido em estudos futuros. Para os regimes de cura estudados pelo autor, a expansão aumenta influenciada também pela composição e finura do cimento.

É comum nos estudos relatados mais recentemente, que a elevada temperatura de cura não promove o aparecimento de formações de etringita e possivelmente de expansões associadas a ela. Esse fenômeno ocorre somente após um longo período de cura em temperaturas ambientes, além das demais influências de composições químicas do tipo de cimento e das adições empregadas, como escórias de alto forno, cinzas volantes e outras pozolanas.

3.7. EFEITOS DA ADIÇÃO DE CCA NA CURA.

Com relação ao estudo do concreto com adição de CCA e os efeitos das condições de cura, alguns estudos foram encontrados. Segundo os diversos autores, é possível que as condições de cura de concretos e argamassas tenham efeitos diversos sobre a dosagem de adição ou substituição do cimento pela CCA, uma vez que a quantidade de cinza estudada pelos autores pesquisados foi sempre fixada em um único percentual, deixando margem a estudos futuros com relação à variação da dosagem.

Segundo ORDÓÑEZ et al. (2002), a espessura da zona de reação pozolânica da pasta contendo CCA diminui quando se aumenta a temperatura de cura de 25° C para 40° C. Isso é atribuído à diminuição do Ca dissolvido com o aumento dessa temperatura de cura assim como a rápida diminuição da porosidade/permeabilidade da pasta.

PAYÁ et al. (2000) estudaram o efeito da temperatura de cura sobre a resistência à compressão de argamassas com CCA, concluindo que o aumento da temperatura de cura de 20° C para 40° C é benéfico às reações pozolânicas da CCA residual e que este fator é mais relevante quando combinado à uma finura adequada da cinza.

METHA e MONTEIRO (1994) observaram que a presença de pozolanas reativas, como a cinza de casca de arroz, mesmo em menores proporções, são capazes de consumir quase completamente o Ca(OH)_2 presente na pasta de cimento, melhorando a resistência do concreto ao ataque de ácidos e sulfatos.

Assim como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz também modifica a microestrutura da zona de transição com o agregado pela redução do teor de Ca(OH)_2 , combinado com a sílica, formando C-S-H e resultando em uma interface mais uniforme e menos porosa. Estudos feitos por NIELSEN et al. (1993), citados por SILVEIRA (1996), em pastas de cimento com substituição de 20% de cinza de casca de arroz, mostraram uma diminuição da concentração de Ca(OH)_2 , na zona de transição. Os autores atribuem tal fato à rápida reação da sílica amorfa contida na CCA com o hidróxido de cálcio, de maneira similar à sílica ativa.

Sendo o hidróxido de cálcio vulnerável ao ataque de sulfatos, uma vez que sua reação promove a expansão e a deterioração da pasta, a presença da cinza de casca de arroz na mistura, além de proporcionar um refinamento dos poros, diminuindo a permeabilidade, é capaz de alterar a velocidade das reações de hidratação e permitir resultados mais satisfatórios com relação à durabilidade do concreto.

As condições de cura, em especial a cura térmica, que também promove a aceleração das reações de hidratação, como já foi dito, tem efeito negativo sobre a resistência a longo prazo do concreto, comprometendo sua durabilidade. Porém, a presença da CCA, nessas condições, pode representar uma melhora nas condições de durabilidade, principalmente pela manutenção de seu efeito físico (microfiller), uma vez que a influência da temperatura de cura nas propriedades pozolânicas da cinza de casca de arroz merece maiores estudos.

4. O CONCEITO DA MATURIDADE.

O fato de que a resistência do concreto aumenta com o progresso da hidratação do cimento, combinado com o fato de que a velocidade de hidratação aumenta com o aumento da temperatura, conduz à proposição de que a resistência pode ser expressa como uma função da combinação tempo-temperatura. Como a resistência do concreto depende tanto da idade como da temperatura, pode-se dizer que a resistência é uma função de Σ (intervalo de tempo x temperatura), e este somatório é denominado maturidade, (NEVILLE, 1997).

KLIEGER (1958) demonstrou que as temperaturas iniciais também tem influência sobre uma relação precisa de maturidade, incluindo a sua forma. Em particular, os efeitos de um período de exposição a temperaturas mais altas não são iguais se isso ocorre imediatamente após a moldagem, ou mais tarde ao longo da vida do concreto. Especificamente, temperaturas iniciais mais altas resultam resistências menores para uma mesma maturidade total do que quando o aquecimento é retardado por pelo menos uma semana, ou do que quando não é aplicado (NEVILLE, 1997).

GAUTHIER e REGOURD (1982) constataram que concretos conservados a temperaturas entre 60°C e 80°C tinham resistências iguais a cerca de 70% da obtida em concretos conservados a 20°C, mas a resistência a longo prazo foi alcançada antes a temperaturas mais altas. A influência da temperatura inicial sobre a resistência a idades mais avançadas com uma mesma maturidade foi confirmada por CARINO (1984).

O método da maturidade foi criado com o intuito de se estimar o desenvolvimento das propriedades do concreto relacionando-as com o histórico de

temperatura durante o processo de cura, em funções de maturidade que envolva as variáveis: tempo e temperatura (SALVADOR FILHO, 2001).

Na construção civil, o uso do método da maturidade é empregado para se determinar o tempo aproximado para o concreto atingir "in loco" uma resistência à compressão desejada, analisando-se o histórico de temperatura ao qual ocorre a cura e em amostras analisadas em laboratório com temperaturas controladas.

O monitoramento da temperatura pode ser feito com sensores colocados em pontos estratégicos da estrutura, ainda com concreto em estado fresco, ou seja, logo após a moldagem. Esses pontos estratégicos devem ser considerados como pontos onde as condições de temperatura de cura são menos favoráveis e as cargas estruturais são mais críticas. Esse procedimento é de extrema importância quando são consideradas as operações subseqüentes de detalhes construtivos como a desforma e a aplicação de cargas de protensão, por exemplo.

A utilização da cura térmica no concreto é bastante usada na indústria de pré-moldados, para reduzir o tempo de cura das peças, uma vez que existe a necessidade de alta rotatividade das formas. O aumento da temperatura de cura do concreto acelera as reações químicas de hidratação do cimento, conferindo maiores resistências iniciais e diminuindo o tempo para a desforma das peças de pré-moldados.

Segundo PINTO (2000), qualquer propriedade mecânica ou física do concreto que esteja relacionada com o grau de hidratação, a princípio, poderia ser modelada pelo método da maturidade, não se resumindo então ao processo de estimar a resistência à compressão.

4.1. O MÉTODO DA MATURIDADE.

SAUL (1951) introduziu o conceito de maturidade, relacionando-o com a resistência à compressão, denominada *lei do ganho de resistência com maturidade*:

“Uma mesma mistura de concreto com um mesmo fator de maturidade - medido como função de temperatura e tempo - tem, aproximadamente, a mesma resistência qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o fator de maturidade”.

O autor relacionou os efeitos da cura térmica ao desenvolvimento da resistência do concreto, tendo como hipótese que a idade e a temperatura acima de uma determinada temperatura de base (datum temperature – T_0) tinham efeito similar sobre o ganho de resistência. A equação 01 representa a maturidade, segundo o autor:

$$M = \sum_0^t (T^c - T_0^c) \Delta t \quad (\text{equação 01})$$

Onde:

M é a maturidade na idade t;

T^c é a média de temperatura no intervalo Δt ($^{\circ}\text{C}$) e,

T_0^c é a temperatura de base ($^{\circ}\text{C}$).

A temperatura de base é a menor temperatura onde o ganho de resistência é observado, ou seja, é a temperatura abaixo da qual as reações de hidratação do cimento não ocorrem.

BERGSTROM (1951), citado por KIM et al. (2001), observou que o método da maturidade poderia ser também aplicado para estimar a resistência de concretos curados à temperatura ambiente. Utilizando uma temperatura de base de -10°C , o autor analisou os resultados de laboratório de diversos pesquisadores comprovando a eficácia do método, para qualquer histórico de temperatura.

McINTOSH (1956) observou que o concreto submetido a uma baixa temperatura nas primeiras idades atingia uma baixa resistência inicial e maior

resistência em idades avançadas do que concretos submetidos a uma alta temperatura de cura inicial. Diante disso, o autor concluiu que a maturidade expressa pela equação 01, poderia não estimar de forma precisa a influência da temperatura no ganho de resistência do concreto. Isto se deve ao fato de que a equação proposta por SAUL não tem nenhuma relação com os processos reais físicos e químicos da hidratação do cimento, a não ser a temperatura de base.

CARINO (1991) propôs uma relação da maturidade com o grau relativo de desenvolvimento da resistência à compressão, modificando a lei de SAUL (1951):

*“Uma mesma mistura de concreto a um mesmo grau de maturidade (medido como função de temperatura e tempo) tem, aproximadamente, a mesma resistência **relativa** qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o grau de maturidade”.*

RASTRUP (1954), citado por SALVADOR FILHO (2001), introduziu o conceito de idade equivalente – t_e . Neste caso, admite-se que o concreto atinge o mesmo grau de maturidade que atingiria caso tivesse sido mantido continuamente a uma temperatura de referência até a idade t_e . Usualmente utiliza-se a temperatura de referência de 20°C.

A equação 01 na forma de idade equivalente é:

$$t_e = \sum_0^t \frac{T - T_o}{T_r - T_o} \cdot \Delta t \quad (\text{equação 02})$$

Onde:

T_r é a temperatura de referência (°C),

T_o é a temperatura de base,

T_e é a idade equivalente na temperatura de referência (horas).

A função desenvolvida por Freiesleben - Hansen e Pedersen (FHP), baseada no modelo de Arrhenius para dependência de uma reação com a temperatura, é a mais usual para aplicação do método da maturidade, com a inclusão de um parâmetro relacionado à sensibilidade térmica da reação, chamado energia aparente de ativação (E_a), assim como mostra a equação 03 a seguir:

$$te = \sum_0^t \left[\exp \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \Delta t \quad (\text{equação 03})$$

onde:

E_a = energia aparente de ativação;

R = constante universal dos gases (8,314 J/mol.K);

T = temperatura absoluta do concreto durante o intervalo de tempo Δt (K).

T_r = temperatura de referência (K)

4.2. ENERGIA DE ATIVAÇÃO.

De acordo com PERES et al. (2003), para a aplicação do método da maturidade são necessários o conhecimento de um parâmetro de sensibilidade térmica da mistura, que estará avaliando a dependência da velocidade da reação de hidratação do cimento com a temperatura chamada de Energia Aparente de Ativação (E_a).

Segundo ATKINS (1998) citado por CARVALHO (2002), a energia de ativação provém da idéia de que as moléculas devem possuir uma quantidade mínima de energia cinética para reagir. Esta energia é aquela necessária para transformar os reagentes e produtos. Nas reações exotérmicas (caso da hidratação do cimento) os reagentes estão em um estado de energia maior que o dos produtos. Assim sendo, a energia de ativação é a diferença entre a energia necessária para ativar a reação e o nível de energia dos reagentes (figura 4.1).

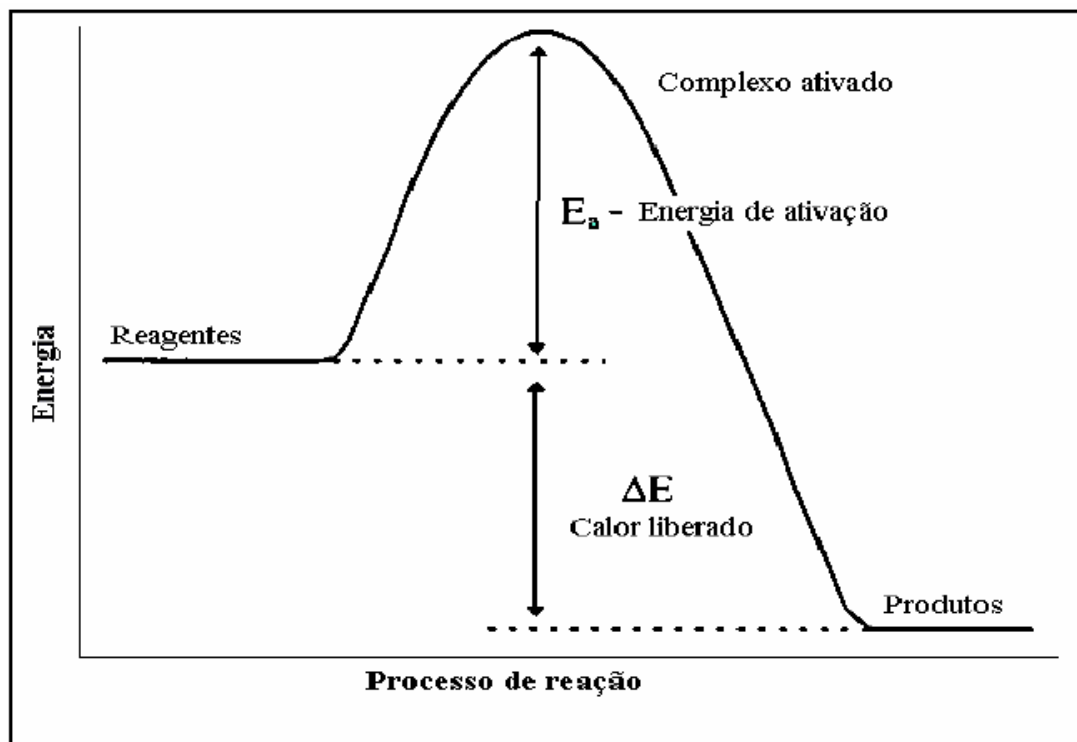


Figura 4.1 – Perfil de energia das reações (BROWN, 1991).

A uma mesma temperatura, reações que demandam um valor muito alto de energia de ativação são ditas reações lentas, ao passo que valores de energia de ativação baixos são indicadores de reações que ocorrem rapidamente. Maiores valores de E_a indicam uma necessidade de energia maior para iniciar a reação, implicando assim que esta reação será mais vulnerável à influência da temperatura (CARVALHO, 2002).

Pela cinética química, o termo utilizado para descrever uma alteração em determinada quantidade por unidade de tempo, é chamado de taxa. Seria, então, uma mudança na concentração de um componente de determinada reação dentro de um período de tempo (mol/segundo).

A taxa de reação a cada ponto de uma curva de concentração por tempo, por exemplo, é diretamente proporcional à concentração naquele exato momento. Esta equação representa uma lei experimental que descreve a taxa dessa reação e é conhecida como lei de reação. A constante de proporcionalidade que rege esta lei é a taxa constante (CARVALHO, 2002).

Entre os fatores que determinam a taxa de uma reação, o mais conhecido é expresso pela teoria da colisão. Essa teoria se baseia no fato de que a taxa de reação depende diretamente da frequência da ocorrência das colisões entre as partículas. Para haver reação entre as moléculas é necessário que elas: colidam, tenham certa quantidade de energia e possuam determinada geometria.

Qualitativamente a teoria da colisão explica bem os quatro fatores que influenciam a velocidade das reações (PLANE e SIENKO, 1977), citado por PERES et al. (2003):

1) A velocidade da reação química depende da natureza dos reagentes químicos porque a energia de ativação é diferente de uma reação para outra;

2) A velocidade da reação depende da concentração dos reagentes, porque o número de colisões aumenta quando se aumenta a concentração;

3) A velocidade da reação depende da temperatura, porque um aumento da temperatura faz as moléculas moverem-se mais depressa, aumentando a frequência das colisões;

4) A velocidade da reação depende da presença de catalisadores, de maneira com que as colisões se tornem mais efetivas.

4.3. A EQUAÇÃO DE ARRHENIUS.

De forma quantitativa a taxa constante pode ser observada através de uma equação empírica denominada equação de Arrhenius.

Segundo Arrhenius, a velocidade de uma reação química é função da chamada taxa constante (k_t) conforme equação seguinte:

$$k_t = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (\text{equação 04})$$

onde:

k_t = taxa constante;

A = constante ou fator de frequência, dada pela geometria;

E = energia de ativação;

R = constante universal dos gases (8.316 J/mol.K)

T = temperatura absoluta (K).

Segundo PINTO (2000), o fator de frequência A é utilizado para quantificar a probabilidade de que as colisões ocorram em direções favoráveis ao início da reação química, com os átomos posicionados de tal forma a possibilitar novas ligações. Se a geometria das partículas for simples, então o valor de A será maior.

O valor de k_t não é constante, pois varia de acordo com a temperatura. Grande parte das moléculas que se envolvem em reações químicas, não reage o tempo todo. Elas precisam colidir entre si, mas a velocidade entre elas é muito alta. De fato, é necessário que elas possuam uma certa energia (velocidade) para que possam romper uma barreira e reagirem. Essa barreira é chamada energia de ativação (E). Pode-se entender que essa energia é dada pelo calor molecular das moléculas, e que precisa ser superada para que aconteça a reação (CARVALHO, 2002).

Segundo alguns autores, entre eles ATKINS (1998) E LEVINE (1995), citando ARRHENIUS, para todas as reações químicas ordinárias (reações simples como a do cimento Portland) e a maioria das reações complexas, a energia de ativação é um parâmetro considerado constante, podendo ser obtido pela equação de uma reta na forma da equação de Arrhenius.

4.4. ENERGIA DE ATIVAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.

Segundo COURTAULD e BRIAND (1960) e PAULINI (1988), citados por CARVALHO (2002), o conceito de reação química ativada não é muito fácil de ser entendido dentro da química dos aglomerantes, em virtude do caráter espontâneo

das reações de hidratação do cimento. Ainda assim, esse conceito mostra-se apropriado para o entendimento da influência da temperatura na hidratação e conveniente para a determinação da maturidade de argamassas e concretos.

Em função do elevado grau de complexidade das reações de hidratação do cimento, a energia de ativação é determinada a partir de uma função que relaciona a modificação de uma propriedade particular ao longo do tempo, a uma determinada temperatura. Uma dessas propriedades pode ser a liberação de calor de hidratação ou o grau de hidratação (SILVA e AGOPYAN, 1998).

Em se tratando de reações de hidratação do cimento, a utilização do termo energia aparente de ativação (E_a) torna-se mais satisfatória, já que são processos heterogêneos com diversas reações que ocorrem simultaneamente, sendo então E_a expressa como um valor médio referente a todas as reações envolvidas.

A determinação experimental da energia aparente de ativação pode ser realizada por meio de testes mecânicos ou calorimétricos. Com resultados obtidos de testes mecânicos é possível a determinação da E_a através de procedimentos já conhecidos e de melhor assimilação.

WIRKIN et al. (2002) compararam valores de energia de ativação obtidos experimentalmente por testes mecânicos e calorimétricos. O procedimento previu o uso de três temperaturas de cura (10°C , 20°C e 40°C). Os autores concluíram que os dois testes resultaram em valores similares de E_a , observando uma diferença máxima perto de 3 kJ/mol . Ainda nesse estudo, os autores se propuseram a verificar a influência da adição de superplastificante no valor final de E_a para os dois testes realizados, concluindo que sua influência é desprezível dentro da cinética de hidratação do concreto estudado, principalmente quando comparada à da temperatura.

Uma das maneiras de se calcular o valor de E_a de forma experimental é através do procedimento descrito pela ASTM 1074 (1998), cujo detalhamento é apresentado no Capítulo V, de acordo com o programa experimental realizado.

De acordo com esse procedimento, é possível estimar a resistência do concreto no campo, através de ensaios não destrutíveis, permitindo a execução de

atividades construtivas tais como a remoção de formas, aplicação de cargas de protensão, etc.

Segundo a própria ASTM 1074, algumas limitações da aplicação desse procedimento devem ser observadas:

- 1) o concreto deve ser mantido em condições de cura que permitam a hidratação do cimento;
- 2) o método não prevê a longo prazo os efeitos da temperatura a que o concreto foi submetido nas primeiras idades; e
- 3) o método precisa ser acrescido de outras indicações da resistência potencial da mistura de concreto em questão.

Com relação à resistência a compressão, CARINO (1991) sugeriu que a utilização do conceito da maturidade deveria ser feita em conjunto com outros testes locais para se verificar a resistência da estrutura. Esta sugestão foi mais tarde incorporada pela ASTM 1074 (1998)

O cálculo do valor da maturidade é realizado a partir da obtenção do histórico de temperatura ao qual o concreto foi submetido ao longo do tempo de cura. Para expressar esse valor, conhecido como Índice de Maturidade, pode-se utilizar as equações 01 (fator de maturidade) e a equação 02 (idade equivalente).

4.5. AS FUNÇÕES DE MATURIDADE.

Na utilização do conceito de maturidade para estimar o desenvolvimento de uma propriedade mecânica, é necessária uma função de maturidade que relacione tempo e temperatura. As funções de maturidade propostas na literatura podem ser agrupadas em duas categorias básicas: as empíricas - as primeiras a serem desenvolvidas – e aquelas que relacionam o desenvolvimento do grau de hidratação com a taxa de hidratação do cimento.

Como já descrito anteriormente, as duas funções de maturidade mais utilizadas e que constam no procedimento sugerido pela ASTM 1074 são descritas pelas equações 01 e 02.

A utilização da equação 02 (NURSE-SAUL) requer o conhecimento prévio da temperatura de base (T_0), abaixo da qual a hidratação do cimento não ocorre. Diferentes valores para a temperatura de base foram sugeridos, sendo a mais utilizada no valor de -10°C (CARINO, 1991) citado por PINTO (1997). Assumindo uma temperatura de base relacionada à hidratação do cimento, a função de NURSE-SAUL (equação 02) se prende à teoria básica da cinética de hidratação, considerando a taxa constante uma função linear da temperatura, o que não ocorre na prática.

Em relação a função FHP (equação 03), possui uma forte base teórica, sendo baseada na Equação de Arrhenius, que descreve a dependência das taxas de reações químicas com a temperatura (PINTO, 1997).

PINTO e HOVER (1996) consideraram em seu estudo três diferentes funções para representar o desenvolvimento da resistência como função do fator de maturidade.

1) Equação exponencial sugerida por Freilesben-Hansen e Pederson (CARINO, 1991):

$$f_c = f_{c\infty} \cdot e^{(\tau/M)\alpha} \quad (\text{equação 05})$$

Onde:

M = fator de maturidade,

f_c = resistência a um dado fator de maturidade,

$f_{c\infty}$ = resistência a uma maturidade infinita.

τ = constante de tempo.

α = parâmetro de forma.

2) Função “linear-hiperbólica” que incorpora o conceito de maturidade “offset” (KNUDSEN, 1984):

$$fc = fc_{\infty} \cdot \left(\frac{k(M - Mo)}{1 + k(M - Mo)} \right) \quad (\text{equação 06})$$

Onde:

Mo = fator de maturidade “offset” – onde começa o desenvolvimento da resistência.

k = constante.

3) Equação “parabólica-hiperbólica” proposta por KNUDSEN (1984):

$$fc = fc_{\infty} \cdot \left(\frac{\sqrt{k(M - Mo)}}{1 + \sqrt{k(M - Mo)}} \right) \quad (\text{equação 07})$$

4.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FUNÇÕES DE MATURIDADE.

Para a utilização da função de Nurse-Saul (equação 02), é necessário o conhecimento prévio da temperatura de base, que se refere a temperatura na qual as reações de hidratação não ocorrem. Entre os diferentes valores sugeridos em estudos, segundo CARINO (1991) a temperatura de -10°C é a mais utilizada. A função de Nurse-Saul assume que a taxa constante (k) é linearmente relacionada à temperatura, o que não ocorre na realidade.

Por outro lado, a função de FHP (equação 03) possui uma forte base teórica, sendo baseada na função de Arrhenius e no conhecimento da E_a para

cada mistura de concreto, com resultados mais precisos que as demais funções apresentadas (PINTO, 1997).

Porém, de acordo com CARINO (1984), para uma E_a aproximadamente de 30 kJ/mol, o termo contido na somatória da equação 03, denominado fator de conversão de idade, tem um comportamento linear em função da temperatura. Nesse caso, a função de FHP possui uma razoável precisão para o valor da maturidade, levando em conta os efeitos combinados de tempo e temperatura. Entretanto, para uma E_a de 60 kJ/mol, o comportamento do fator de conversão de idade é uma função não-linear da temperatura de cura, cuja magnitude do erro de precisão aumenta com o aumento da temperatura a partir de 23°C, demonstrando que a equação 03 pode não ser adequada para o cálculo da maturidade.

Esta questão reforça as recomendações da ASTM C 1074 (1998), de que é extremamente necessário o conhecimento do valor de E_a para cada mistura de concreto a ser analisada e assim, estimar com maior precisão o desenvolvimento do ganho de resistência do concreto.

As funções de maturidade são relacionadas à temperatura durante o ganho de resistência inicial do concreto e, portanto não existe uma única função aplicável a todas as composições de concreto. Para uma dada mistura, deve-se utilizar uma função obtida da relação entre a variação da taxa constante em função da temperatura.

A aplicação do método da maturidade, embora normalmente associada ao ganho de resistência do concreto, possui um campo maior de aplicações, uma vez que qualquer propriedade do concreto relacionada ao grau de hidratação, pode ter o seu valor estimado por uma função de maturidade desenvolvida para esta finalidade.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL.

O programa de ensaios experimentais, desenvolvido para cumprir os objetivos propostos nesta pesquisa, foi realizado em duas etapas:

- Na primeira etapa verificou-se a influência das características físicas da CCA na resistência à compressão da argamassa com o objetivo de se determinar a sua faixa ótima de dosagem. Nessa etapa também foi realizada a caracterização físico-química da CCA.
- A segunda etapa consistiu em avaliar a influência da dosagem da CCA no concreto submetido à cura térmica a vapor, através do Método da Maturidade. Para tanto, variou-se a porcentagem de adição da CCA no concreto em 0%, 5% e 10%, dosagens determinadas na primeira etapa.

Uma representação esquemática do programa de ensaios é apresentada na figura 5.1.

REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.

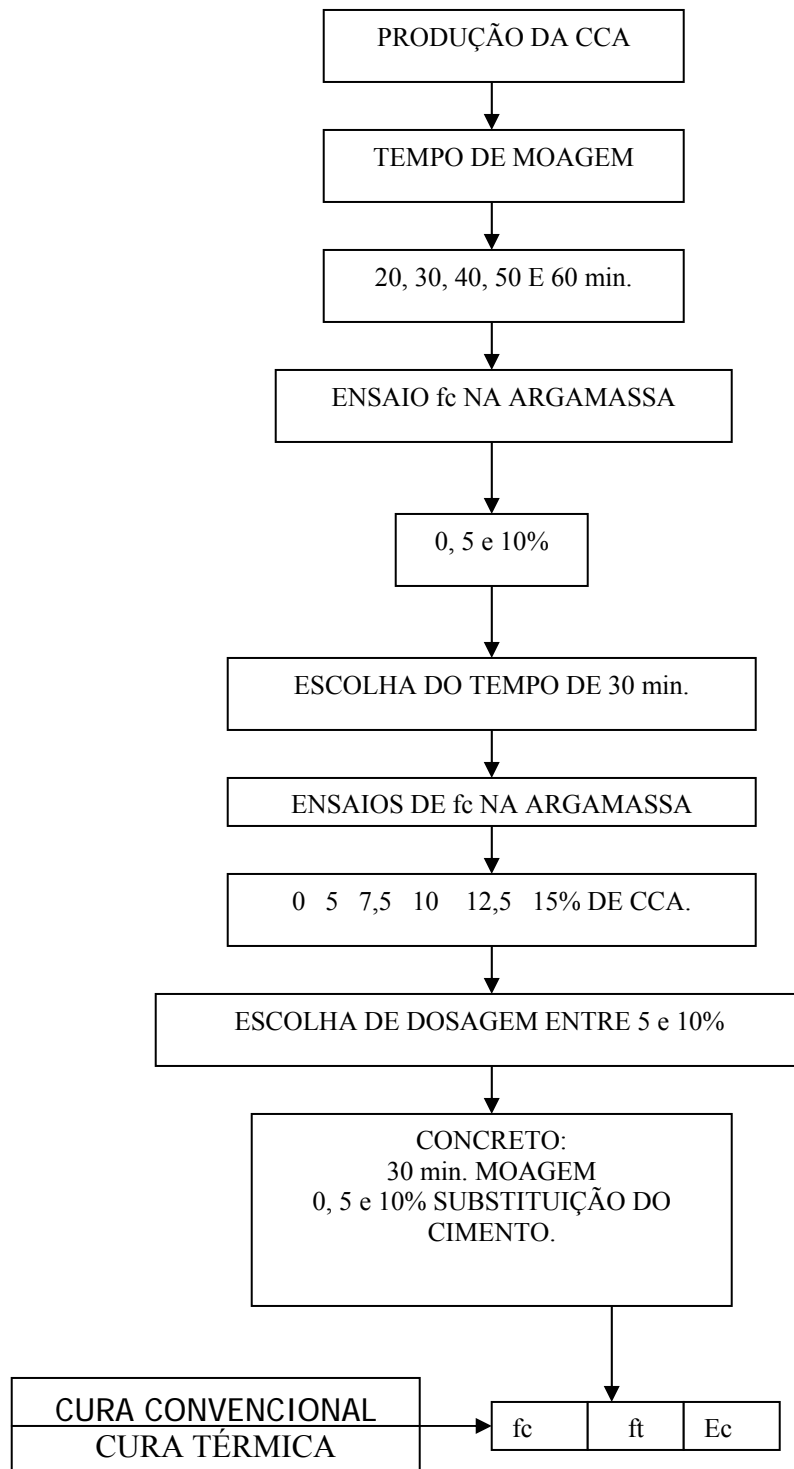


Figura 5.1 – Representação esquemática do programa experimental.

5.1 – MATERIAIS UTILIZADOS.

5.1.1 – Cimento.

Devido a diversos estudos já em andamento, o cimento utilizado nas misturas de concreto foi o CPV ARI PLUS Ciminias, com suas características físicas, químicas e mecânicas atendendo às especificações da NBR-5733 (1991), NBR-9202 (1985), NBR/NM-76 (1998), NBR-7810 (1983), NBR/NM-23 (2000) e NBR-7215 (1996) apresentadas na tabela 6.3.

5.1.2 – Agregado miúdo.

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural proveniente do leito do rio Tietê, com módulo de finura igual a 2,25 e massa específica aparente de 2,585g/cm³. As características físicas completa são mostradas na tabela 6.1 e especificadas pelas normas NBR-7217, NBR/NM-52, NBR-7810, NBR-9776, NBR-7218, NBR/NM-49.

5.1.3 – Agregado graúdo.

O agregado graúdo utilizado foi uma brita de origem basáltica, com dimensão máxima característica de 19mm e massa específica aparente de 2,956g/cm³. A tabela 6.2 contém as características físicas completas do agregado graúdo especificadas pelas normas NBR-7217, NBR-7812, NBR-7810, NBR-9937 e NBR/NM-49.

5.1.4 – Superplastificante.

Foram utilizados dois tipos de superplastificantes:

- na primeira etapa, para o estudo inicial na argamassa, foi utilizado o Sikament-300, composto melanímico sulfonado.

- na segunda etapa, para o concreto submetido à cura térmica foi utilizado o Viscocrete 5, composto policarboxílico.

5.1.5 – Cinza de casca de arroz.

No desenvolvimento da pesquisa foi necessário a busca por uma fonte de fornecimento do material cinza de casca de arroz. Optou-se por produzir a cinza por queima não controlada da casca em laboratório, a partir de um forno experimental confeccionado com um tambor de óleo, tendo ao fundo um fogareiro alimentado a gás (figura 5.2). A casca foi fornecida por uma empresa de beneficiamento de arroz da cidade de Andradina-SP e a procedência do arroz era da região de Dourados-MS.

O procedimento de obtenção da cinza iniciava-se com o acendimento do forno e a colocação de uma pequena quantidade de casca que entrava em contato direto com a chama. Com o início da auto combustão da primeira camada de casca, o forno era desligado e quase todo preenchido com mais casca e coberto. O volume total de casca para cada processo de queima era de aproximadamente 12 kg.

A queima total do volume de casca ocorria durante várias horas e a retirada da cinza só era feita após o resfriamento da mesma. O tempo médio de queima da casca era de 36 horas e a temperatura ao longo deste processo atingia até 850°C, ficando acima dos 600°C durante aproximadamente 18 horas. A tabela 6.4 mostra de forma detalhada a evolução da temperatura de queima da casca.

A retirada da cinza era feita manualmente, separando-se a parte mais escura (preta) que se concentrava basicamente na superfície da camada e nas laterais, descartando-se em seguida. A cinza final utilizada era retirada da parte central até o fundo do forno, sendo uma cinza de cor mais clara, variando de branca a cinza.

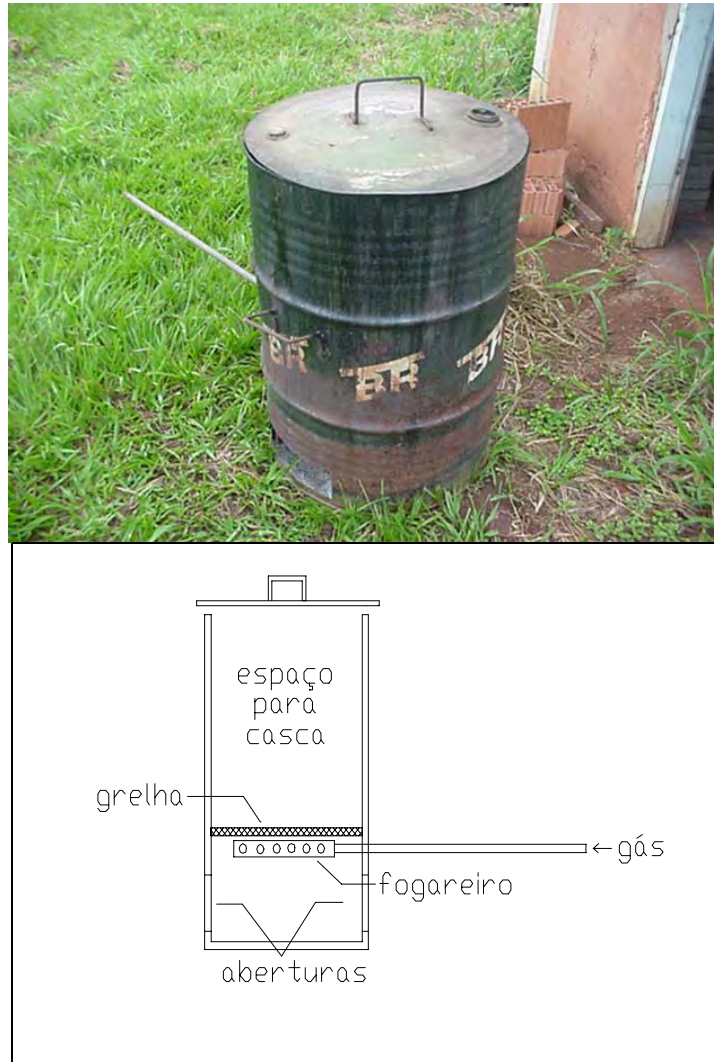


Figura 5.2: Forno utilizado para a queima da casca de arroz.

A quantidade produzida por queima era de aproximadamente 10% do volume de casca queimada, ou seja, por volta de 1,20 kg.

Em seguida, um acumulado de cinza era levado para o processo de moagem em um moinho de bolas utilizado para produção de cimentos (figura 5.3), localizado no Laboratório CESP de Engenharia Civil em Ilha Solteira. A massa total de bolas do moinho era de 52,5 kg e a quantidade de cinza moída por vez era de 5,5 kg.

O tempo de moagem foi objeto de estudo, sendo este realizado através da moagem da cinza em diferentes tempos (20, 30, 40, 50 e 60 minutos). As

amostras foram devidamente caracterizadas e utilizadas em estudos de resistência à compressão da argamassa.

Com esse procedimento ficou determinado a partir do melhor resultado de resistência, o tempo de moagem a ser adotado para o restante da pesquisa. Os resultados mostrados na tabela 6.8 indicaram o tempo ideal em 30 minutos de moagem.

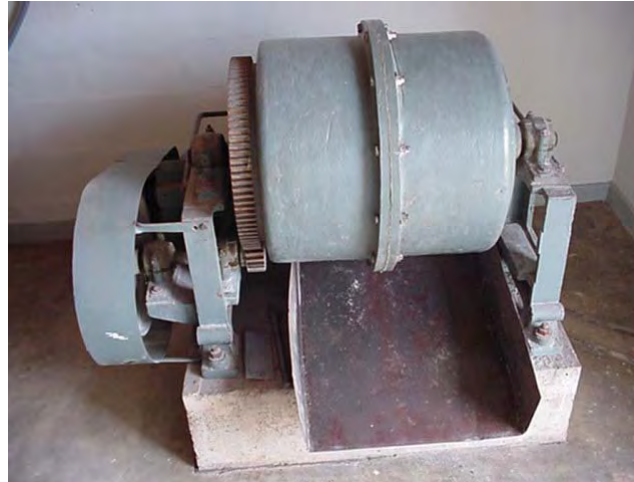


Figura 5.3 – Moinho de Bolas.

Após a moagem da cinza, agora estabelecida em 30 minutos, iniciou-se a etapa de caracterização, que consistiu em determinar (NBR-12653):

- (a) superfície específica;
- (b) densidade aparente e absoluta;
- (c) diâmetro médio das partículas;
- (d) índices de atividade pozolânica com o cimento e a cal;
- (e) perda ao fogo;
- (f) composição química;

Além do ensaio de difração de raio X, para determinar a morfologia da amostra.

Uma amostra da cinza após a moagem é apresentada na figura 5.4.

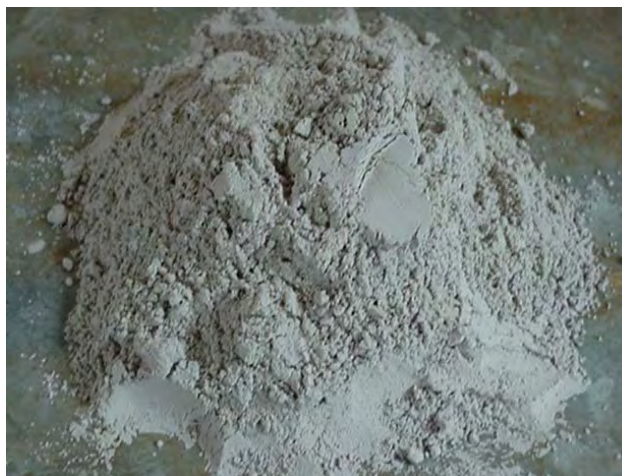


Figura 5.4 – Aspecto da cinza após a moagem.

5.2 – ESTUDO DA PORCENTAGEM ÓTIMA DE ADIÇÃO DE CCA NA ARGAMASSA.

Os traços utilizados para a composição das argamassas são apresentados na tabela 5.1. Foram realizadas 5 dosagens de CCA diferentes, além de uma argamassa de controle sem adição de cinza. A adição da cinza foi feita em substituição a parte do cimento, em massa. A relação água/cimento+cinza foi fixada em 0,4 em todos os casos.

A adoção do uso do superplastificante teve o intuito de melhorar a trabalhabilidade da argamassa, uma vez que a presença da cinza leva a uma hidratação mais rápida da mistura, conforme observado em trabalhos anteriores. Sua dosagem foi fixada em 1% da massa da mistura de cimento+cinza.

Tabela 5.1 – Composição da argamassa (kg/m³)

material	traços					
	0% CCA	5% CCA	7,5% CCA	10% CCA	12,5% CCA	15% CCA
cimento	509,3	483,8	471,1	458,4	445,6	432,9
areia	1527,9	1527,9	1527,9	1527,9	1527,9	1527,9
a/c+CCA	0,40					

As amostras foram submetidas a ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura em câmara úmida. Os resultados são apresentados na tabela

6.9 e indicaram a faixa de dosagem ideal para a continuação da pesquisa, que ficou entre 5 e 10% de adição de cinza. Essas dosagens foram então repetidas para o concreto em seguida, nas duas condições de cura: em câmara úmida e cura térmica a 80°C.

5.3 – ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE CCA.

Nesta etapa da pesquisa, iniciou-se a utilização da CCA no concreto.

A tabela 5.2 mostra os traços utilizados na composição do concreto estudado. As dosagens de CCA foram de 5 e 10%, com o critério de substituição do cimento em massa, mantendo constante o volume da argamassa.

O superplastificante Viscocrete 5 foi dosado em 0,2% da massa de cimento+CCA para os traços sem adição de cinza e para 5% de cinza. Para o traço com 10% de cinza a dosagem foi de 0,3%. O abatimento para cada traço foi fixado em 120±20 mm.

Tabela 5.2 - Composição do concreto (kg/m³).

material	traços		
	0% CCA	5% CCA	10% CCA
cimento	490,0	465,5	441,0
areia	651,7	651,7	651,7
brita	1112,3	1112,3	1112,3
a/c+CCA	0,42	0,42	0,42

Os corpos-de-prova foram curados inicialmente em câmara úmida por 7 e 28 dias, idades dos ensaios de resistência à compressão (NBR-5739), compressão diametral (NBR-7222) e módulo de elasticidade (NBR-8522). Os resultados são apresentados na tabela 6.10 e nas figuras 6.8 a 6.10.

A seguir, iniciou-se a etapa de estudo do concreto submetido à cura térmica.

5.4 – A CURA TÉRMICA DO CONCRETO.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 100x200 mm, com adensamento em mesa vibratória, sendo uma parte levada para a cura úmida e a outra destinada à cura térmica.

Os CPs utilizados para a cura térmica foram vedados com filme plástico e fita crepe (figura 5.5) para impedir a perda de umidade durante o processo. Durante a cura a temperatura é monitorada por termopares instalados em três CPs. Para isso, são colocados tubos de cobre de 100 mm no interior do CP, onde são introduzidos os termopares, preenchidos com óleo e vedados com massa de calafetar na parte inferior. A captação dos dados foi realizada com multímetros digitais com sistema de aquisição automático colocados na lateral do equipamento de cura, como mostra a figura 5.8. As leituras foram feitas em intervalos de 5 min.



Figura 5.5 – Adensamento dos corpos-de-prova.



Figura 5.6 - Vedação dos corpos-de-prova

Após este procedimento, os CPs foram imediatamente colocados no equipamento de cura térmica (figura 5.6), que já se encontrava na temperatura determinada para o ensaio, definida neste trabalho em 80 °C. A cura é realizada em ambiente saturado por vapor nessa temperatura de forma constante, tendo uma pequena variação apenas no instante em que as amostras são retiradas para os ensaios.



Figura 5.7 - Equipamento de cura térmica.



Figura 5.8 – Disposição dos CPs no forno de cura.

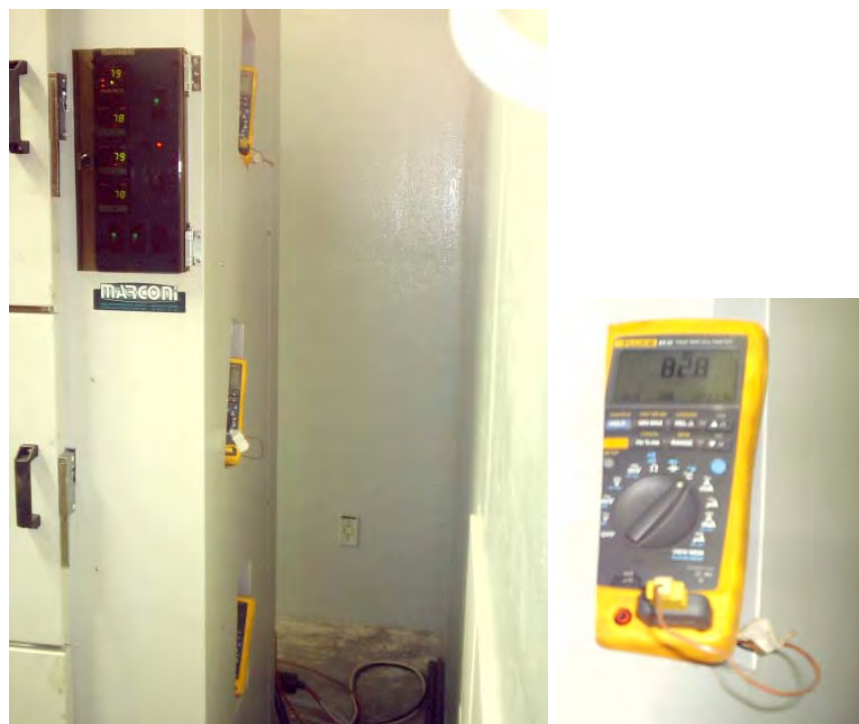


Figura 5.9 – Multímetros na lateral do equipamento.

A retirada das amostras foi feita em intervalos de 1 hora, dentro de um ciclo de cura de duração de 6 horas. Os CPs foram desmoldados, capeados e ensaiados à compressão simples assim que eram retirados. O mesmo procedimento foi repetido para as outras propriedades estudadas.



Figura 5.10 - Ensaio de compressão simples.



Figura 5.11 – Preparo de CP para ensaio de compressão diametral.

Os resultados dos ensaios com a cura térmica são apresentados na seção 6.4 do Capítulo 6.

Os valores obtidos foram então utilizados na aplicação do Método da Maturidade, através da relação entre os Índices de Maturidade e resistências.

5.6 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE.

Conforme já detalhado no Capítulo 3, o Método da maturidade permite avaliar o efeito da temperatura de cura na resistência do concreto através das curvas representativas dos Índices de Maturidade expressos em função de Fator de Maturidade ou Idade Equivalente.

Para a aplicação correta deste método é necessário obter experimentalmente o valor da Energia Aparente de Ativação (E_a) de cada composição de concreto utilizada, cujo procedimento estabelecido pela ASTM C 1074 (1998) é descrito a seguir.

5.7 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EA.

O método de determinação da energia aparente de ativação do concreto proposto pela ASTM C 1074 (1998) pode ser realizado a partir da resistência à compressão do próprio concreto ou da argamassa do concreto estudado. Nesta pesquisa a determinação de E_a foi realizada com a argamassa do concreto.

5.7.1 - Traço da argamassa.

O traço utilizado para as argamassas ensaiadas é apresentado na tabela 5.3. Foram realizados três traços, sendo um de controle, sem CCA e outros dois com incorporação de CCA, substituindo 5% e 10% da massa de cimento. As quantidades expressas são equivalentes ao volume de 24 corpos-de-prova de dimensões 5x5x5 cm. O superplastificante utilizado aqui é o mesmo utilizado na composição do concreto, ou seja, o Viscocrete 5.

Tabela 5.3 - Traços da argamassa.

Material	Qtde. (Kg)		
	Controle	5%CCA	10%CCA
Cimento	2,710	2,525	2,349
Areia	3,360	3,360	3,360
Água	1,220	1,220	1,220
Superplastificante	0,00542	0,0080	0,0082
CCA	-	0,094	0,189

5.7.2 - Moldagem e cura.

As amostras de argamassa foram misturadas manualmente e colocadas em moldes cúbicos com 5x5x5 cm. O instante em que a água foi colocada na mistura foi anotada como sendo o tempo inicial. Após a moldagem as amostras foram colocadas nos respectivos ambientes de cura. As temperaturas utilizadas foram 30°C, 55°C e 80°C. As amostras para cura em 55°C e 80°C foram inicialmente colocadas em uma câmara de vapor (figura 5.11) até a idade da primeira ruptura, para em seguida, após a desmoldagem, serem levadas ao banho térmico (figura 5.12). Na câmara úmida foram colocadas as amostras para cura em 30°C até o instante da primeira ruptura, sendo levadas após, ao banho térmico.



Figura 5.12 – Câmara a vapor.



Figura 5.13 - Banho térmico.

5.7.3 - Ensaio de resistência.

Durante o período inicial da cura, uma amostra era retirada para ensaio de resistência à compressão, anotando-se como tempo final o instante em que este valor de resistência atingisse aproximadamente 4 MPa. O tempo final menos o inicial (no instante em que a água é adicionada à mistura) determinou o intervalo de tempo da primeira idade de ruptura. A partir daí, as cinco rupturas seguintes foram realizadas em idades com o dobro de tempo da idade imediatamente anterior. Três corpos-de-prova foram ensaiados por idade.

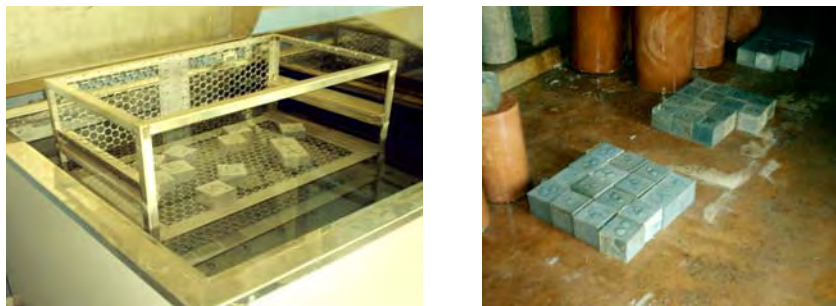


Figura 5.14 – Amostras no banho térmico e câmara úmida, respectivamente.

Com os resultados das resistências, seguindo o procedimento de cálculo descrito na ASTM C 1074 (1998), o valor da Energia Aparente de Ativação foi determinado para cada um dos traços. A descrição do procedimento de cálculo e os resultados finais são apresentados na seção 6.5 do Capítulo 6.

Em seguida, o Método da Maturidade pode ser aplicado para os resultados do concreto submetido à cura térmica. Os detalhes são apresentados na seção 6.6 do Capítulo 6.

6. RESULTADOS.

Neste capítulo são apresentados os resultados de caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, estudo das dosagens de CCA na argamassa e no concreto e os ensaios de resistência à compressão simples, compressão diametral e módulo. Para o caso da cura térmica são apresentados os resultados da utilização do Método da Maturidade.

6.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.

6.1.1. Agregado miúdo.

Tabela 6.1 – Características físicas do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4
Areia	100	98	77	31	13	5	1	0				

diâmetro máximo (mm)	módulo de finura	massa específica		absor- ção (%)	pulve- rulento (%)	massa unitária		matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm ³)	seco (g/cm ³)			aparente seca (g/cm ³)	aparente 4% (g/cm ³)	
4,76	2,25	2,585	2,577	0,30	0,34	1,533	1,16	abaixo

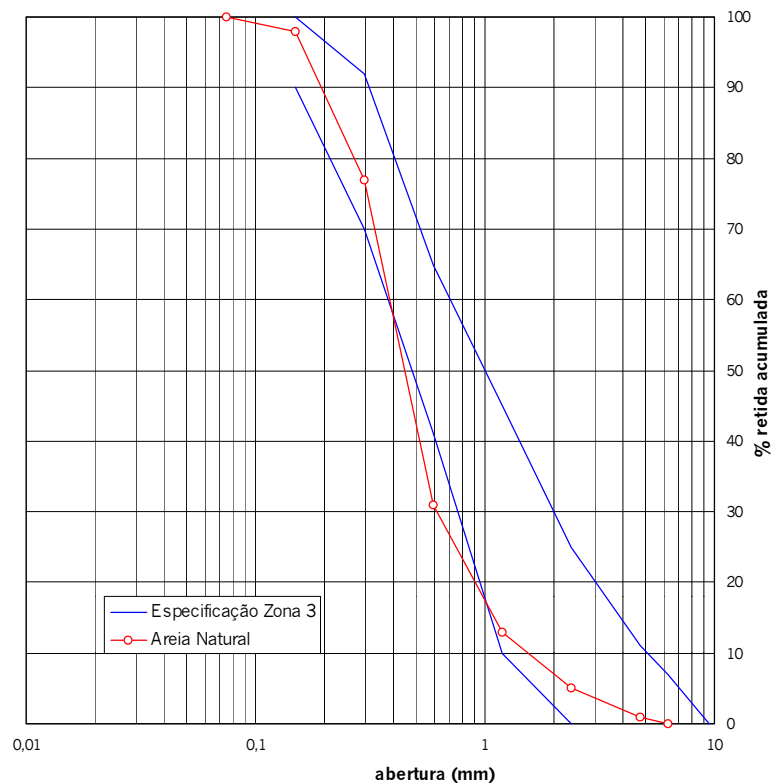


Figura 6.1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

6.1.2. Agregado Graúdo.

Tabela 6.2- Características físicas do agregado graúdo.

Peneiras (mm)	% Retida Acumulada											
	0,15	0,30	0,60	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4	38,1
Areia	100	100	100	100	100	99	98	95	87	1	0	

agregado	diâmetro máximo (mm)	módulo de finura	massa específica s.s.s. (g/cm ³)	massa específica seco (g/cm ³)	massa unitária (g/cm ³)	absorção (%)	Pulverulento (%)
B 1	19,0	6,95	2,956	2,920	1,494	1,23	0,19

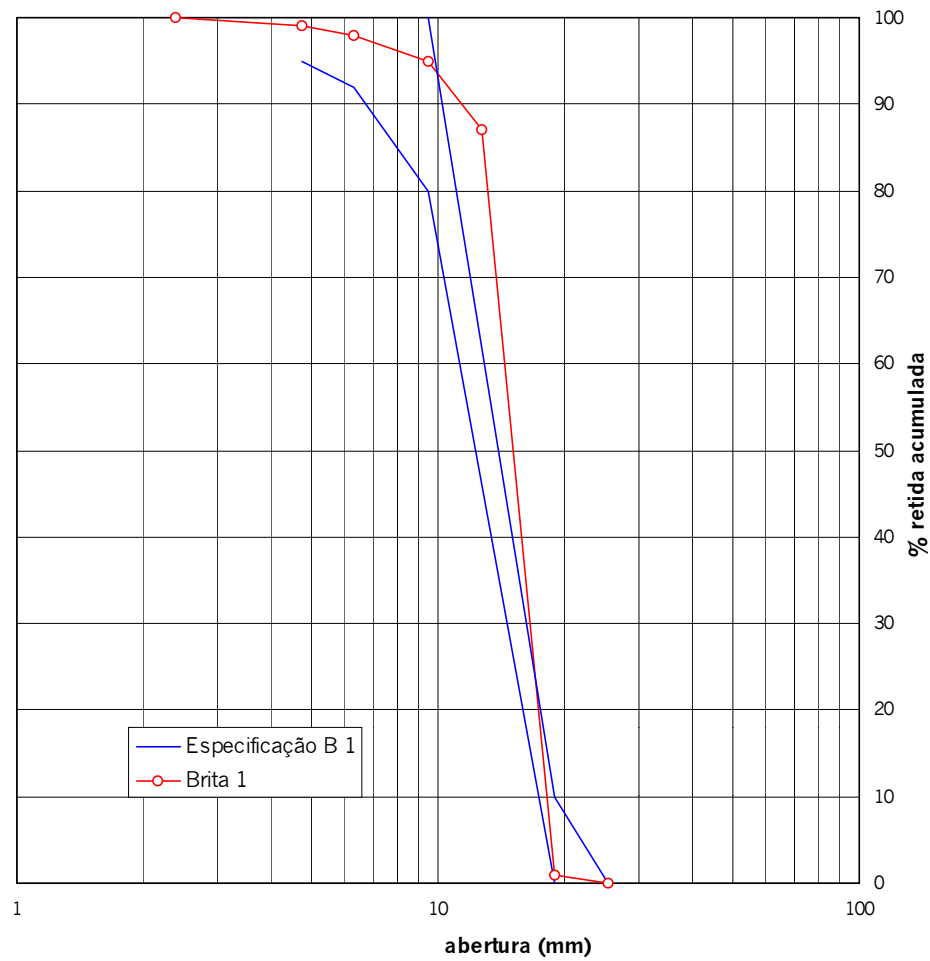


Figura 6.2 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

6.1.3. Cimento.

A tabela 6.3 mostra o resultado da caracterização física-química do cimento CP V ARI Plus.

Tabela 6.3 – Características físicas e químicas do cimento CP V ARI Plus.

Referência		22718	Especificações		
Amostra		13	NBR-5733		
Data da coleta /03		18.09.2003	min.	máx.	
Finura Peneira 200	(% retida)	0,09	-	6,0	
Finura Peneira 325	(% retida)	1,0	-	-	
Superf. espec. Blaine	(cm ² /g)	4499	3000	-	
Densidade aparente	(g/cm ³)	0,96	-	-	
Densidade absoluta	(g/cm ³)	3,15	-	-	
Água de consistência da pasta	gramas	145	-	-	
	(%)	29,0	-	-	
Início de pega (h:min)		02:02	01:00	-	
Expansão em auto-clave (%)		0,013	-	-	
Resistência à Compressão Axial	Consistência	gramas	150	-	-
	argamassa	a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		30.09	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	45,9	24,0	-
		07 dias	54,1	34,0	-
28 dias		53,7	-	-	
Análise Química (%)	Perda ao fogo		3,62	-	4,5
	Insolúveis		0,21	-	1,0
	SiO ₂		18,23	-	-
	Fe ₂ O ₃		2,57	-	-
	Al ₂ O ₃		5,99	-	-
	CaO		64,70	-	-
	MgO		0,81	-	6,5
	SO ₃		3,04	-	3,5
	Na ₂ O		0,19	-	-
	K ₂ O		0,72	-	-
	Equiv alcalino Na ₂ O		0,66	-	-
Cal livre em CaO		1,42	-	-	

6.1.4. Cinza de casca de arroz.

A tabela 6.4 e a figura 6.3 mostram a evolução da temperatura de queima da casca de arroz ao longo de 36 horas. Pode-se observar que a temperatura máxima é de quase 850°C, e que a temperatura permanece acima dos 600°C por aproximadamente 18 horas.

Tabela 6.4 – Temperatura de queima da casca de arroz

Hora	temperatura (°C)
-	28,8
2 ^a	378,9
4 ^a	576,8
6 ^a	636,7
8 ^a	711,2
10 ^a	755,1
12 ^a	782,3
14 ^a	824,4
16 ^a	847,5
18 ^a	622,3
20 ^a	593,4
22 ^a	517,3
24 ^a	435,2
26 ^a	286,4
28 ^a	135,2
30 ^a	65,1
32 ^a	35,2
34 ^a	31,7
36 ^a	30,4

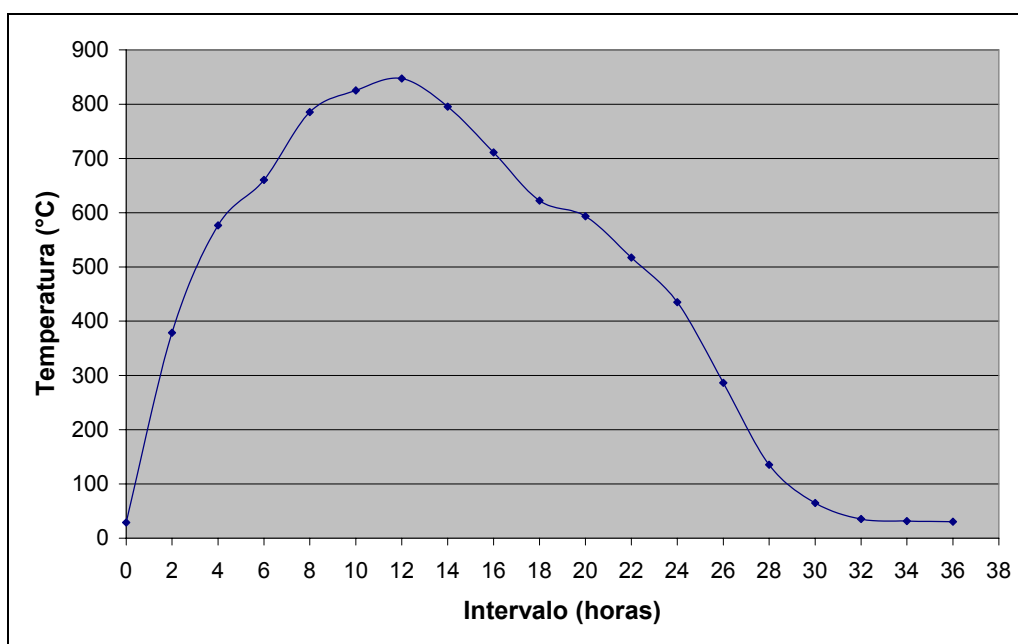


Figura 6.3 – Evolução da temperatura de queima da casca de arroz.

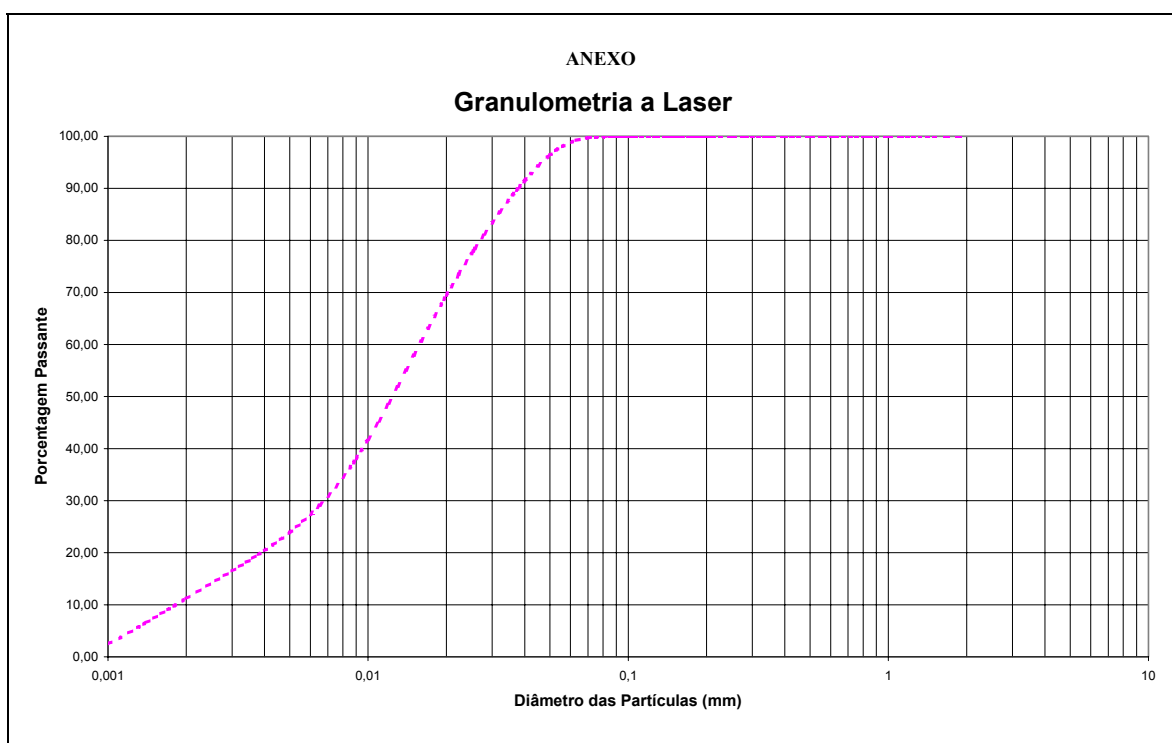
A seguir apresentam-se os resultados da caracterização físico-química da CCA. A tabela 6.5 mostra como se dá o aumento da superfície específica e a

diminuição do diâmetro médio das partículas com o aumento do tempo de moagem, através de ensaio de granulometria a laser.

Tabela 6.5 - Características físicas da CCA.

Tempo de moagem (min)	Superfície específica (cm ² /g)	Diâmetro médio (μm)
20	15.698	14,56
30	17.302	12,38
40	20.894	9,19
50	22.576	7,85
60	23.243	7,34

A figura 6.4 mostra a distribuição granulométrica das partículas de CCA moída em 30 minutos.



A tabela a seguir apresenta as características físicas e químicas da amostra de CCA moída em 30 minutos, e que foi utilizada em toda a pesquisa, de acordo com resultados mostrados nas tabelas 6.7 e 6.8. A destacar, os índices de atividades pozolânicas ficaram abaixo dos especificados pela NBR-12653.

Tabela 6.6 – Características físicas e químicas da CCA moída em 30 minutos.

Referência		5508	Especificações NBR-12653 (Mat. Pozol.)	
Amostra		1		
Data da coleta /03		06.05	min.	máx.
Finura Peneira 325 (% retida)		3,4	-	34,0
Superf. espec. Blaine (cm ² /g)		17302	-	-
Diâmetro dos grãos (micras)		12,38	-	-
Densidade aparente (g/cm ³)		0,40	-	-
Densidade absoluta (g/cm ³)		2,16	-	-
Índices atividade pozolânica	Água requerida (%)	114,6	-	110,0
	Com cimento (%)	60,7	75,0	-
	Com cal (%)	4,9	6,0	-
	Umidade (%)	1,90	-	3,00
Análise Química (%)	Perda ao fogo	2,36	-	6,0
	Insolúveis	91,93	-	-
	SiO ₂	92,99	-	-
	Fe ₂ O ₃	0,43	-	-
	Al ₂ O ₃	0,18	-	-
	CaO	1,03	-	-
	MgO	0,35	-	-
	SO ₃	0,10	-	5,0
	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,61	-	-
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	93,50	70,00	-
	Na ₂ O	0,02	-	-
	K ₂ O	0,72	-	-
	Equiv alcalino Na ₂ O	0,49	-	-

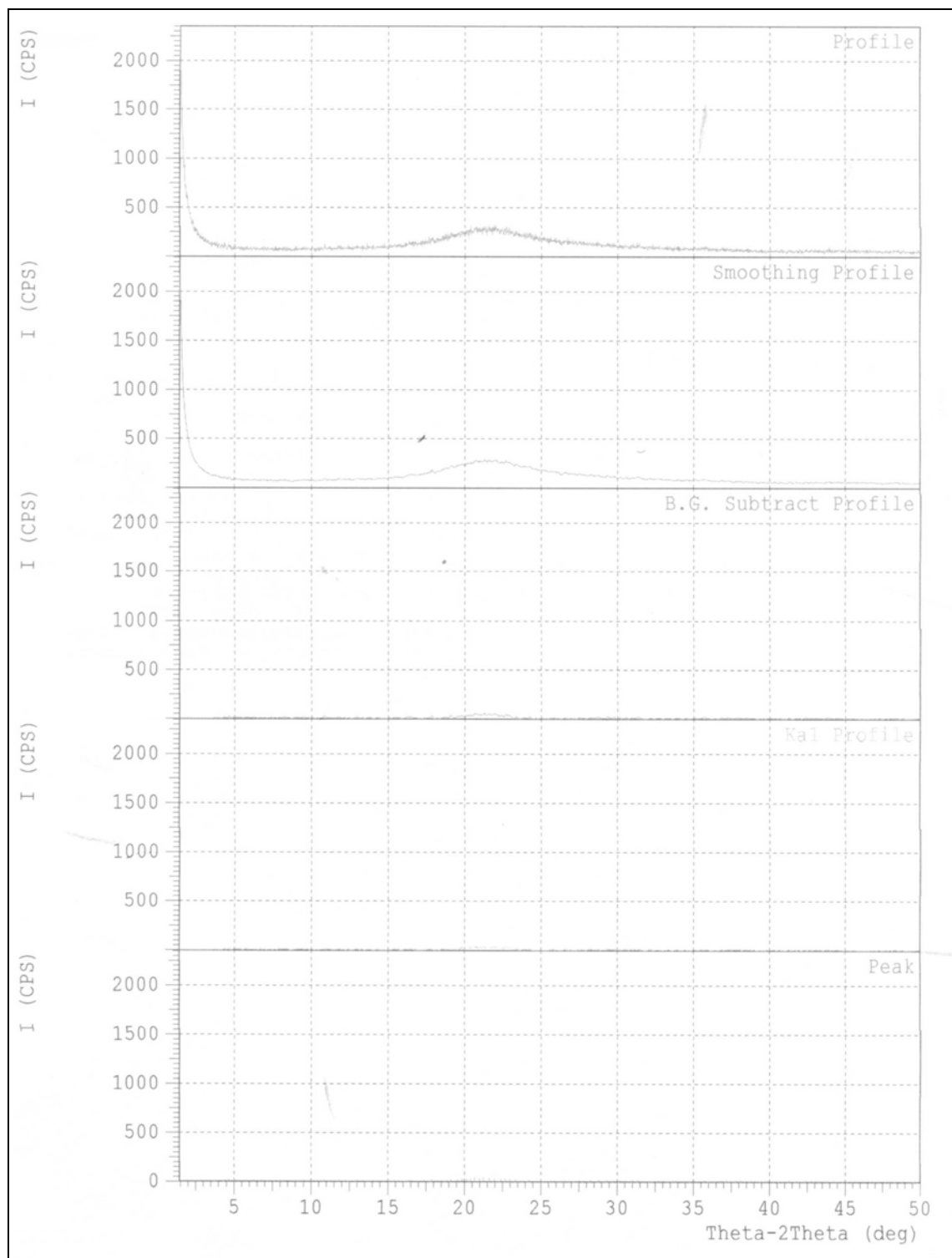


Figura 6.5 – Ensaio de difração de raio X .

A figura 6.5 é o resultado do ensaio de difração de raio X realizado na amostra estudada. Conforme pode ser observado, trata-se de um material de

composto pela presença de sílica amorfa, sem a presença de picos que representam formação de cristais.

6.2. ENSAIOS COM A ARGAMASSA.

As tabelas 6.7 e 6.8 e figuras 6.6 e 6.7 a seguir mostram os resultados do estudo realizado com a argamassa com relação ao tempo de moagem da CCA e a sua dosagem.

Tabela 6.7 – Características do traço de controle.

Resistência 7 dias (MPa)	Resistência 28 dias (MPa)
46,6	53,9

Tabela 6.8 – Resistências à compressão.

Tempo moagem (min)	Resistência 7 dias (MPa)		Resistência 28 dias (MPa)	
	5% CCA	10% CCA	5% CCA	10% CCA
	20	47,7	45,3	54,8
30	62,5	54,5	67,8	65,4
40	55,6	50,8	61,0	60,3
50	53,3	49,6	59,2	59,4
60	48,9	42,5	53,4	52,7

Os resultados apresentados com melhores ganhos de resistência nas duas idades indicam que a melhor granulometria é aquela obtida com 30 minutos de moagem, em ambas as dosagens estudadas aqui.

A partir dos resultados anteriores, a CCA utilizada em todos os ensaios posteriores teve seu tempo de moagem fixado em 30 minutos. A tabela 6.9 mostra os resultados de resistência da argamassa moldada com diferentes dosagens de CCA.

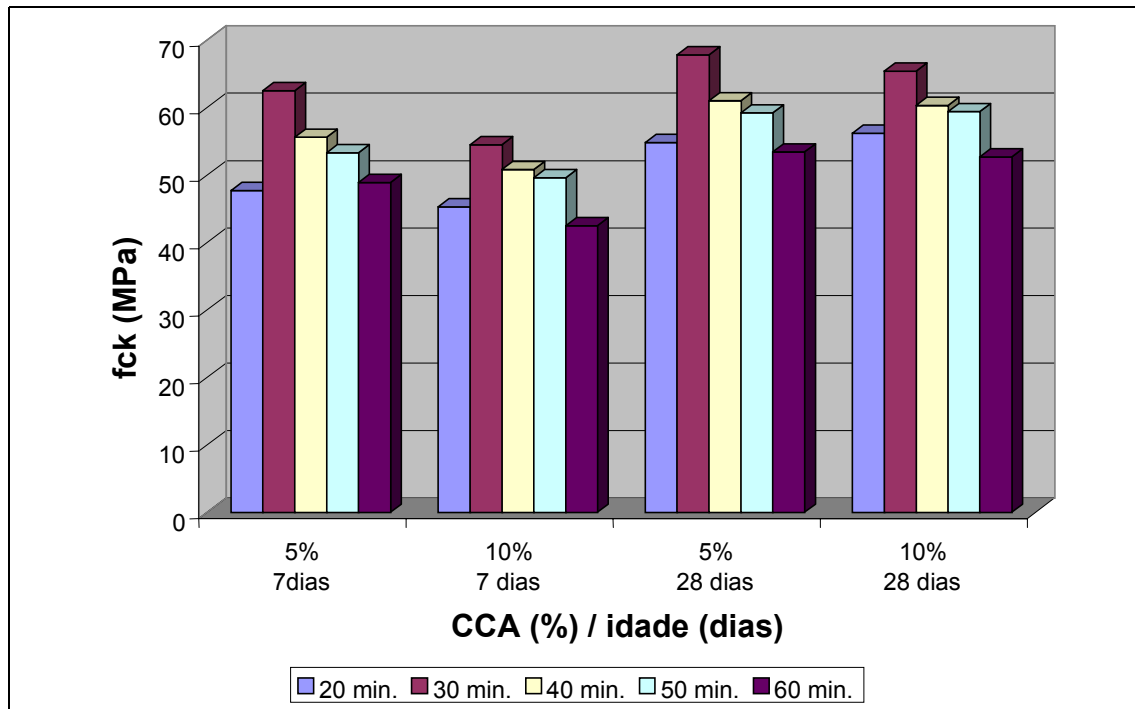


Figura 6.6 – Relação entre resistência à compressão e tempo de moagem.

Tabela 6.9 - Resistência à compressão da argamassa.

CCA	Resistência 7 dias	Resistência 28 dias
%	(MPa)	(MPa)
5,0	62,5	67,7
7,5	63,3	69,1
10,0	54,5	65,4
12,5	44,2	56,4
15,0	42,7	54,1
0	46,6	53,9

Conforme mostra a figura 6.7, as dosagens com melhores resultados de ganho de resistência estão entre 5 e 10%. Dosagens maiores só alcançam ganhos de resistência com relação à argamassa de controle a partir dos 28 dias.

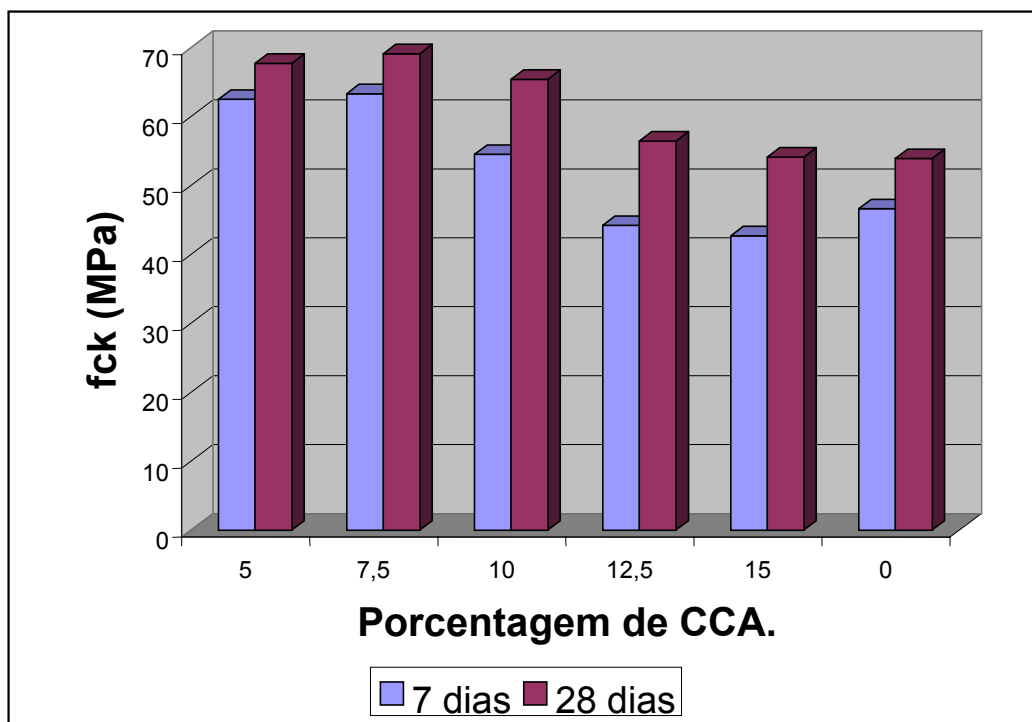


Figura 6.7 – Relação entre dosagem de CCA e resistência à compressão.

6.3. ENSAIOS COM O CONCRETO.

Os resultados dos ensaios com o concreto são mostrados para as duas curas utilizadas na pesquisa, a começar pela realizada em câmara úmida.

6.3.1. Cura em câmara úmida.

Tabela 6.10 – Resistência à compressão do concreto.

CCA	7 dias	28 dias
%	(MPa)	(MPa)
5	52,9	60,4
10	45,8	54,2
0	45,9	48,7

De acordo com a tabela 6.10 e a figura 6.8, o comportamento obtido no ganho de resistência à compressão na argamassa é repetido no concreto, com relação ao controle, nas duas dosagens estudadas.

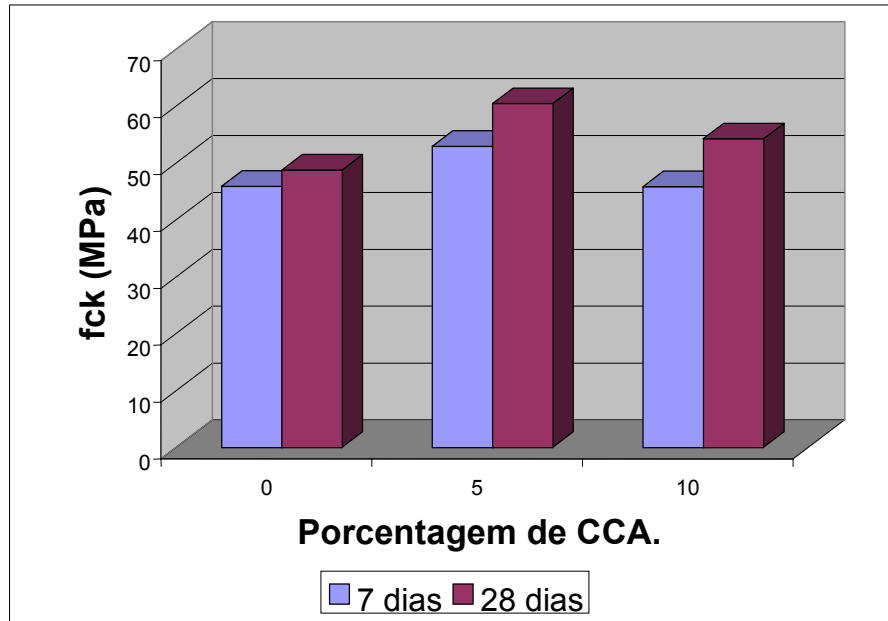


Figura 6.8 – Relação dosagem de CCA por ganho de resistência.

Também são apresentadas a seguir as figuras que mostram os resultados dos ensaios de compressão diametral e módulo de elasticidade, realizados nas mesmas idades.

Para o caso da compressão diametral (figura 6.9), observa-se que o aumento na resistência do concreto com CCA é menos significativa na idade de 28 dias, não se diferenciando em ambas as dosagens.

O módulo de elasticidade (figura 6.10) os valores para os três traços se situaram entre 40 e 41 GPa, não importando a idade ou dosagem de CCA. O valor correspondente ao concreto de controle aos 7 dias, pode ter sido afetado por falha de leitura ou mesmo do corpo-de-prova ensaiado.

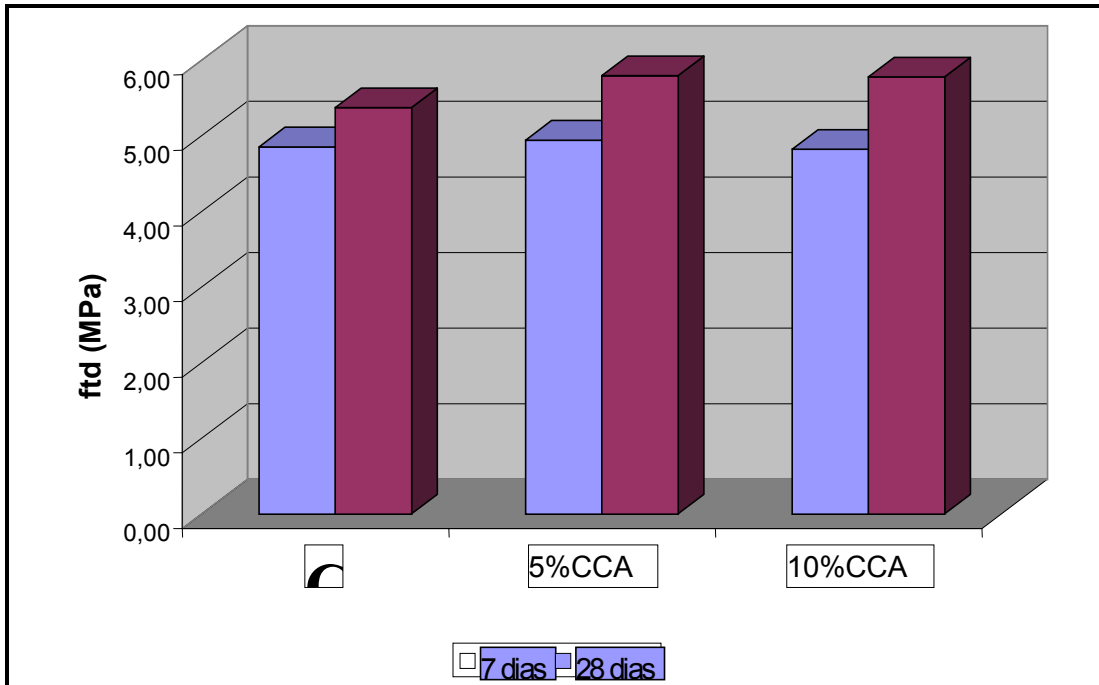


Figura 6.9 – Relação dosagem de CCA e compressão diametral.

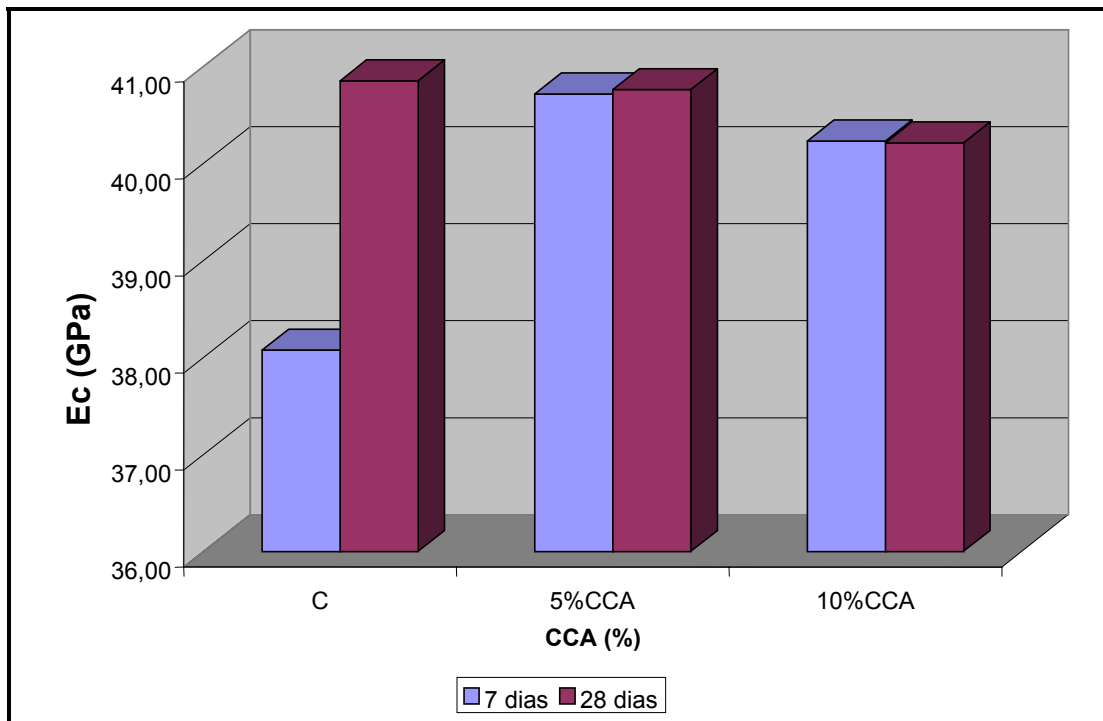


Figura 6.10 – Relação entre dosagem de CCA e módulo de elasticidade.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios a partir da cura térmica do concreto, e a posterior aplicação do Método da Maturidade.

6.4 CURA TÉRMICA.

As tabelas apresentadas a seguir (6.11 a 6.13) mostram os valores médios (M) de tensão de compressão, de tração e módulo de elasticidade obtidos durante o ciclo de cura térmica de 6 horas, bem como o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV). Pode-se notar que em nenhum dos casos, o CV foi maior que 25%, garantindo a qualidade da amostras.

Tabela 6.11 – Valores para compressão simples.

Resistência à compressão (MPa)									
Ciclo	C			5C			10C		
	M	DP	CV	M	DP	CV	M	DP	CV
1h	1,82	0,43	0,24	1,67	0,19	0,11	1,79	0,41	0,23
2h	14,54	1,10	0,08	13,13	0,21	0,02	12,21	0,68	0,06
3h	19,59	0,93	0,05	13,19	0,19	0,01	18,56	1,11	0,06
4h	21,69	1,07	0,05	19,90	2,28	0,11	17,49	2,13	0,12
5h	21,81	0,65	0,03	21,39	2,21	0,10	18,00	1,28	0,07
6h	24,06	1,92	0,08	18,72	0,67	0,04	21,35	1,68	0,08

Tabela 6.12 – Valores para tração.

Resistência à tração na compressão diametral (MPa)									
Ciclo	C			5C			10C		
	M	DP	CV	M	DP	CV	M	DP	CV
1h	0,10	0,01	0,10	0,13	0,00	0,00	0,14	0,01	0,07
2h	1,57	0,12	0,08	1,58	0,18	0,11	1,81	0,16	0,09
3h	2,46	0,03	0,01	2,50	0,18	0,07	2,40	0,09	0,04
4h	2,67	0,17	0,06	2,61	0,03	0,01	2,51	0,08	0,03
5h	2,89	0,36	0,12	2,83	0,15	0,05	3,01	0,04	0,01
6h	3,10	0,21	0,07	2,81	0,11	0,04	3,03	0,10	0,03

Tabela 6.13 – Valores para módulo de elasticidade.

Módulo de Elasticidade(GPa)									
Ciclo	C			5C			10C		
	M	DP	CV	M	DP	CV	M	DP	CV
1h									
2h	12,93	1,14	0,09	13,57	1,06	0,08	12,73	0,18	0,01
3h	20,14	1,57	0,08	17,65	0,80	0,05	15,44	1,29	0,08
4h	21,79	1,80	0,08	21,41	0,07	0,00	15,95	0,45	0,03
5h	22,50	0,85	0,04	22,05	1,40	0,06	19,79	1,18	0,06
6h	22,65	1,82	0,08	22,08	0,64	0,03	20,41	1,15	0,06

Na tabela 6.13 não são apresentados os valores de módulo para a primeira hora do ciclo. Isso se deve ao fato de que não foi possível aplicar a carga mínima exigida pelo equipamento, devido à baixa resistência à compressão obtida na primeira ruptura.

6.5 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO.

Seguindo o procedimento estabelecido na ASTM C 1074 (1998), as energias aparentes de ativação para cada um dos traços de concreto estudados foram determinadas experimentalmente a partir de três temperaturas isotérmicas (30°C, 55°C e 80°C).

A seguir são apresentadas as tabelas (6.14 a 6.22) contendo os valores dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, além dos valores utilizados para os gráficos, necessários para a obtenção dos parâmetros **A** (fator de frequência), **Su** (resistência última) e **k** (taxa constante).

6.5.1 Tabelas de resultados.

Algumas observações sobre os dados das tabelas.

- O tempo da primeira ruptura em horas se refere à primeira idade em dias. As idades seguintes são calculadas como o dobro da anterior.
- A tensão em MPa foi calculada dividindo-se a média das cargas (em kgf) pela área de contato do corpo-de-prova, que é de 25 cm².
- As linhas com valores de inversos da idade e da tensão foram utilizadas para o gráfico necessário para o cálculo de Su (Figura 6.14).
- Su é calculado como sendo o inverso do valor onde a reta intercepta o eixo y (1/tensão) multiplicado por 100.

- O cálculo de A (fator de frequência) foi feito utilizando-se a fórmula:

$$A = \frac{S}{Su - S}$$

onde S são as respectivas tensões (MPa).

- O valor de k (taxa constante) é a inclinação da reta do gráfico dos valores de A pelas idades em dias (Figura 6.15).
- Os gráficos foram feitos utilizando-se o programa Excel 97, modelo de gráfico de dispersão. As linhas de tendência utilizadas foram lineares.

Tabela 6.14 - Resultados para o traço de controle com temperatura de cura de 30°C.

	Tempertura de cura = 30 °C			Tempo 1ª ruptura = 12:05 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,5	1	2	4	8	16
Tensão (MPa)	4,04	28,67	39,15	52,80	63,40	72,45
DP	0,44	5,16	4,70	4,22	2,54	9,42
CV	0,11	0,18	0,12	0,08	0,04	0,13
1/idade	2,00	1,00	0,50	0,25	0,13	0,06
1/tensão	24,75	3,49	2,55	1,89	1,58	1,38
A	0,05	0,54	0,93	1,85		
Su=81,37			k=0,4863			

Tabela 6.15 - Resultados para o traço de controle com temperatura de cura de 55°C.

	Temperatura de cura = 55 °C			Tempo 1ª ruptura = 3:35 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,15	0,30	0,60	1,20	2,40	4,80
Tensão (MPa)	3,99	30,75	36,14	38,19	40,17	42,10
DP	0,48	4,61	3,25	0,42	6,03	5,47
CV	0,12	0,15	0,09	0,01	0,15	0,13
1/idade	6,67	3,33	1,67	0,83	0,42	0,21
1/tensão	25,06	3,25	2,77	2,62	2,49	2,38
A	0,10	2,66	5,86	9,27		
Su=42,31			k=8,3288			

Tabela 6.16 - Resultados para o traço de controle com temperatura de cura de 80°C.

	Temperatura de cura = 80 °C			Tempo 1ª ruptura = 2:30 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,10	0,21	0,42	0,83	1,67	3,33
Tensão (MPa)	4,47	24,27	29,00	32,67	35,87	39,07
DP	0,13	0,49	1,45	1,31	1,79	1,95
CV	0,03	0,02	0,05	0,04	0,05	0,05
1/idade	9,62	4,80	2,40	1,20	0,60	0,30
1/tensão	22,39	4,12	3,45	3,06	2,79	2,56
A	0,13	1,55	2,67	4,53		
	Su=39,88			k=5,6248		

Tabela 6.17 - Resultados para o traço com 5% de CCA com temperatura de cura de 30°C.

	Temperatura de cura = 30 °C			Tempo 1ª ruptura = 10 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,42	0,84	1,68	3,36	6,72	13,44
Tensão (MPa)	3,90	34,20	42,25	50,13	62,26	71,45
DP	0,20	2,74	3,38	6,02	6,85	2,86
CV	0,05	0,08	0,08	0,12	0,11	0,04
1/idade	2,38	1,19	0,60	0,30	0,15	0,07
1/tensão	25,64	2,92	2,37	1,99	1,61	1,40
A	0,05	0,84	1,29	2,02		
	Su=75,00			k=0,6022		

Tabela 6.18 - Resultados para o traço com 5% de CCA com temperatura de cura de 55°C.

	Temperatura de cura = 55 °C			Tempo 1ª ruptura = 2:45 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,11	0,23	0,46	0,92	1,83	3,67
Tensão (MPa)	4,05	28,65	33,12	38,22	43,52	45,68
DP	0,24	1,43	1,66	4,20	3,48	2,28
CV	0,06	0,05	0,05	0,11	0,08	0,05
1/idade	8,73	4,36	2,18	1,09	0,55	0,27
1/tensão	24,69	3,49	3,02	2,62	2,30	2,19
A	0,09	1,48	2,22	3,89		
	Su=48,04			k=4,3279		

Tabela 6.19 - Resultados para o traço com 5 % de CCA com temperatura de cura de 80°C.

	Temperatura de cura = 80 °C			Tempo 1ª ruptura = 2:05 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,09	0,17	0,35	0,69	1,39	2,78
Tensão (MPa)	3,99	20,80	26,53	29,79	34,87	38,60
DP	0,36	1,66	3,18	2,98	4,53	3,47
CV	0,09	0,08	0,12	0,10	0,13	0,09
1/idade	11,52	5,76	2,88	1,44	0,72	0,36
1/tensão	25,08	4,81	3,77	3,36	2,87	2,59
A	0,11	1,11	2,05	3,07		
	Su=39,50			k=4,5239		

Tabela 6.20 - Resultados para o traço com 10% de CCA e temperatura de cura de 30°C.

	Temperatura de cura = 30 °C			Tempo 1ª ruptura = 11:30 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,48	0,96	1,92	3,84	7,68	15,36
Tensão (MPa)	4,02	33,15	39,27	44,95	53,07	68,47
DP	0,84	5,30	5,50	4,05	5,84	8,90
CV	0,21	0,16	0,14	0,09	0,11	0,13
1/idade	2,08	1,04	0,52	0,26	0,13	0,07
1/tensão	24,88	3,02	2,55	2,22	1,88	1,46
A	0,06	0,99	1,43	2,06		
	Su=66,72			k=0,5238		

Tabela 6.21 - Resultados para o traço com 10% de CCA e temperatura de cura de 55°C.

	Temperatura de cura = 55 °C			Tempo 1ª ruptura = 3:10 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,13	0,26	0,53	1,06	2,11	4,22
Tensão (MPa)	4,18	26,15	35,76	39,11	42,29	44,23
DP	0,38	2,88	6,44	5,48	3,81	3,54
CV	0,09	0,11	0,18	0,14	0,09	0,08
1/idade	7,58	3,79	1,89	0,95	0,47	0,24
1/tensão	23,92	3,82	2,80	2,56	2,36	2,26
A	0,10	1,37	3,78	6,41		
	Su=45,21			k=6,7253		

Tabela 6.22 - Resultados para o traço com 10% de CCA e temperatura de cura de 80°C.

	Temperatura de cura = 80 °C			Tempo 1ª ruptura = 2:15 h		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
IDADE (dias)	0,09	0,19	0,38	0,75	1,50	3,00
Tensão (MPa)	4,31	20,00	27,20	31,20	30,13	40,40
DP	0,39	2,20	0,30	1,87	0,36	2,02
CV	0,09	0,11	0,01	0,06	0,01	0,05
1/idade	10,66	5,33	2,67	1,33	0,67	0,33
1/tensão	23,22	5,00	3,68	3,21	3,32	2,48
A	0,13	1,15	2,66	5,01		
	Su=37,43			k=3,1305		

6..5.2 Cálculo da energia aparente de ativação (Ea).

A seguir são apresentadas as tabelas com os valores finais da Ea para os traços utilizados e as observações necessárias.

- Com valores de k e as temperaturas em °C, foi feito o gráfico (Figura 6.13) para a determinação de T_o (°C), que é a temperatura de base, temperatura abaixo da qual assume-se que as reações de hidratação não ocorrem. Seu valor é obtido pela interseção da reta no eixo x (temperatura).
- O valor de Q é obtido do gráfico (Figura 6.14) com os valores de ln (k) pelo inverso da temperatura em Kelvin (1/K). Q é a inclinação da reta, e é utilizado na equação que determina o valor de Ea.
- A equação para obter o valor de Ea:

$$Ea = \frac{QxR}{1000}$$

onde R é a constante de gás universal (8,314 J/mol.K)

As tabelas 6.23 a 6.25 apresentam os valores dos parâmetros T_0 e Q , além dos valores finais de E_a para os traços de concreto estudados. A Figura 6.15 é um gráfico comparativo entre os três valores de E_a obtidos experimentalmente.

Tabela 6.23- Cálculo de E_a para o traço de controle.

T (°C)	T (K)	1/K	k	ln(k)
30	303	0,0033	0,4863	-0,7209
55	328	0,0030	4,0782	1,4057
80	353	0,0028	5,6248	1,7272

T_0 (°C)	Q	E_a (KJ/mol)
21,94	5324,80	44,27

Tabela 6.24- Cálculo de E_a para o traço com 5% de CCA.

T (°C)	T (K)	1/K	k	ln(k)
30	303	0,0033	0,6022	-0,5072
55	328	0,0030	3,0243	1,1067
80	353	0,0028	4,5239	1,5094

T_0 (°C)	Q	E_a (KJ/mol)
20,37	4371,10	36,34

Tabela 6.25 - Cálculo de E_a para o traço com 10% de CCA.

T (°C)	T (K)	1/K	k	ln(k)
30	303	0,0033	0,5238	-0,6466
55	328	0,0030	3,9895	1,3837
80	353	0,0028	5,9973	1,7913

T_0 (°C)	Q	E_a (KJ/mol)
22,99	5293,20	44,01

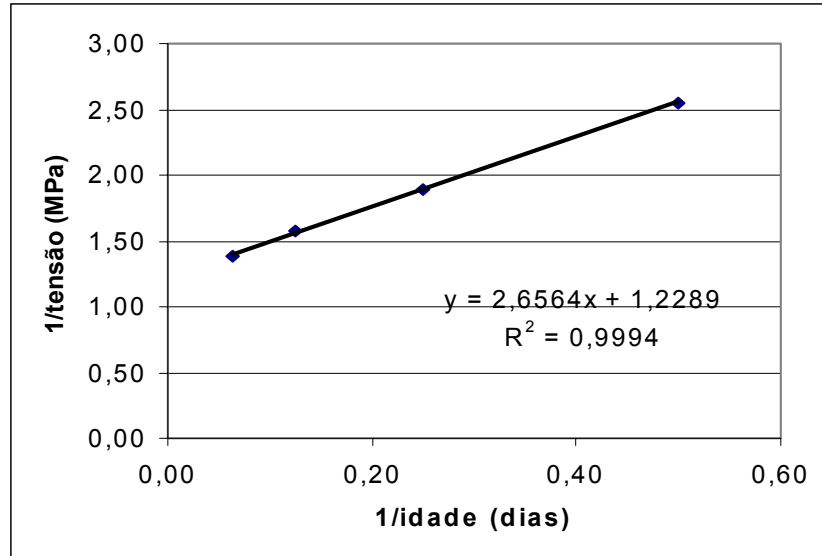


Figura 6.11 – Gráfico utilizado para o cálculo de S_u (controle 30°C).

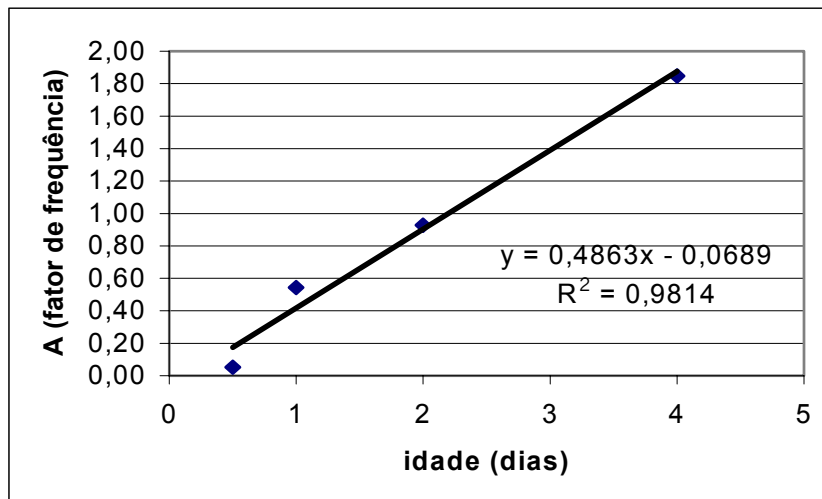


Figura 6.12 – Gráfico utilizado para determinação de k (controle 30°C).

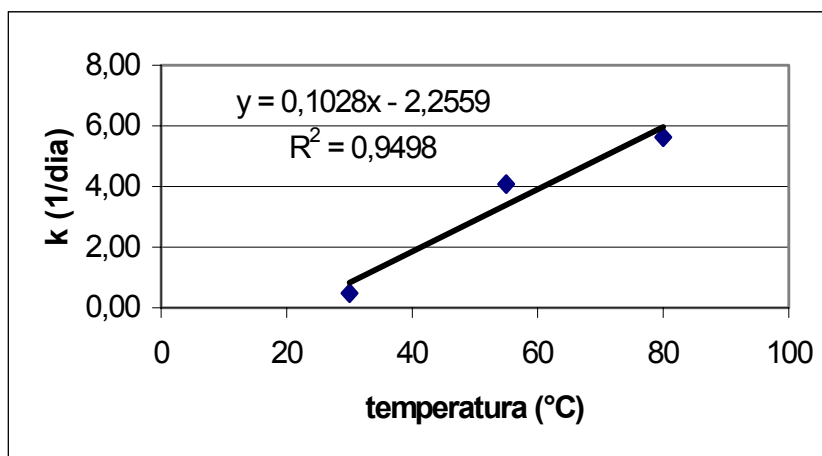


Figura 6.13 – Gráfico para determinação de T_o (controle 30°C).

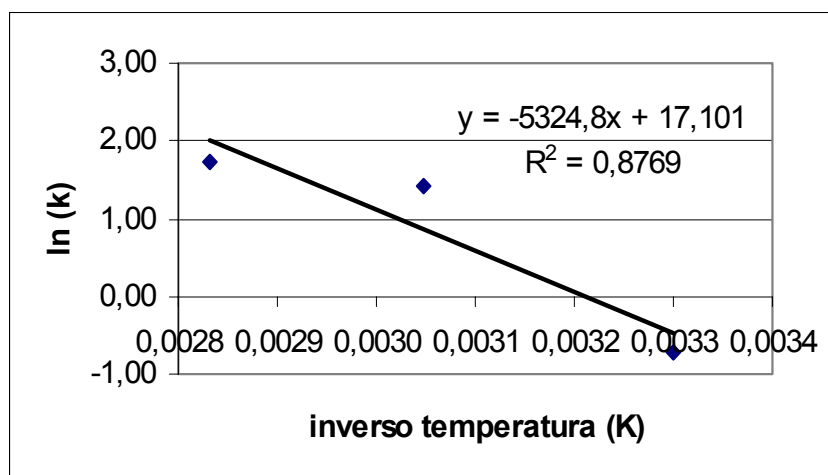


Figura 6.14 – Gráfico para determinação de Q (controle 30°C).

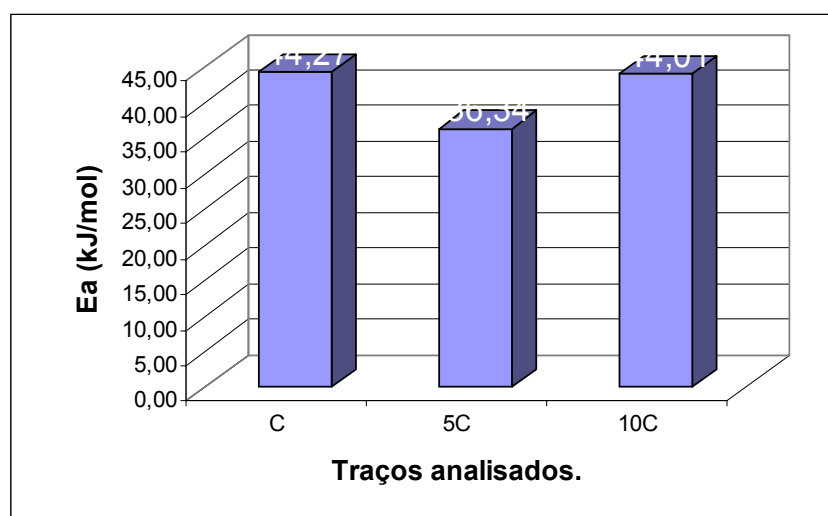


Figura 6.15 – Gráfico comparativo dos valores de E_a .

A figura 6.15 mostra de forma clara a influência da incorporação e da dosagem da CCA nas misturas de concreto. Assim como na cura úmida, tanto para argamassa como para concreto, a adição de CCA provoca um ganho de resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades, o que reflete nos valores mais baixos para E_a dos traços com CCA. Os valores aqui obtidos serão utilizados na aplicação do Conceito da Maturidade na cura térmica desenvolvida em ciclos de 6 horas.

6.6 - CÁLCULO DA MATURIDADE.

O cálculo do Índice de Maturidade do concreto analisado foi realizado conforme a ASTM 1074 (1998), cujo procedimento permite expressar esse Índice em termos de Fator de Maturidade (equação 01) ou de Idade Equivalente (equação 03). Neste trabalho, os resultados foram expressos pelas duas equações e são mostrados a seguir.

Para o cálculo do Fator de Maturidade, é necessário a utilização do valor da temperatura de base (t_0) do concreto, determinado durante a obtenção dos valores de E_a dos traços de concreto analisados, feitos previamente de acordo com os procedimentos da ASTM 1074 (1998). Esses valores se encontram nas Tabelas 6.23, 6.24 e 6.25.

As curvas de tendências adicionadas sobre os dados dos gráficos representam as relações entre os Índices de Maturidade e as respectivas propriedades estudadas dos concretos, sendo as mesmas utilizadas para estimar os valores destas propriedades de concretos curados sob outras combinações de tempo e de temperatura.

As tabelas 6.26 a 6.28 resumem os valores encontrados para os dois Índices. No caso da Idade Equivalente, são mostrados os valores para 80°C e para 23°C.

Tabela 6.26 – Índices para o traço de controle (C).

Traço - C			
Idade (h)	FM	Id.Eq. 80°C (h)	Id.Eq. 23°C (h)
01:00	46	0,69	12,5
02:00	111	2,02	36,7
03:00	176	3,34	60,8
04:00	238	4,52	82,3
05:00	298	5,61	102,1
06:00	357	6,65	121,2

Tabela 6.27 – Índices para o traço com 5% de CCA (5C).

Traço - 5C			
Idade (h)	FM	Id.Eq. 80°C (h)	Id.Eq. 23°C (h)
01:00	50	0,78	8,4
02:00	120	2,20	23,9
03:00	190	3,63	39,3
04:00	256	4,91	53,2
05:00	319	6,04	65,4
06:00	381	7,10	76,9

Tabela 6.28 – Índices para o traço com 10% de CCA (10C).

Traço - 10C			
Idade (h)	FM	Id.Eq. 80°C (h)	Id.Eq. 23°C (h)
01:00	47	0,76	13,7
02:00	115	2,30	41,2
03:00	182	3,84	68,7
04:00	246	5,18	92,8
05:00	307	6,34	113,5
06:00	365	7,41	132,7

A figura 6.16 mostra a relação entre o Fator de Maturidade e a evolução da resistência à compressão e a figura 6.17 mostra a relação com a Idade Equivalente.

O procedimento seguinte foi estabelecer as relações com as outras propriedades estudadas. Para a resistência à tração, as relações são mostradas nas figuras 6.18 e 6.19, para cada traço de concreto. O mesmo pode ser conferido nas figuras 6.20 e 6.21 para o módulo de elasticidade.

Pode-se verificar nos gráficos que para um mesmo Índice de Maturidade, expresso em termos de Fator de Maturidade (figura 6.16), as curvas que representam os traços com adição de CCA possuem aproximadamente o mesmo valor de tensão ao longo de toda a curva. O mesmo acontece quando expressamos esse Índice em termos de Idade Equivalente a 80°C (figura 6.17), sendo os valores de tensão ainda mais próximos que no caso anterior, para as curvas dos traços com CCA.

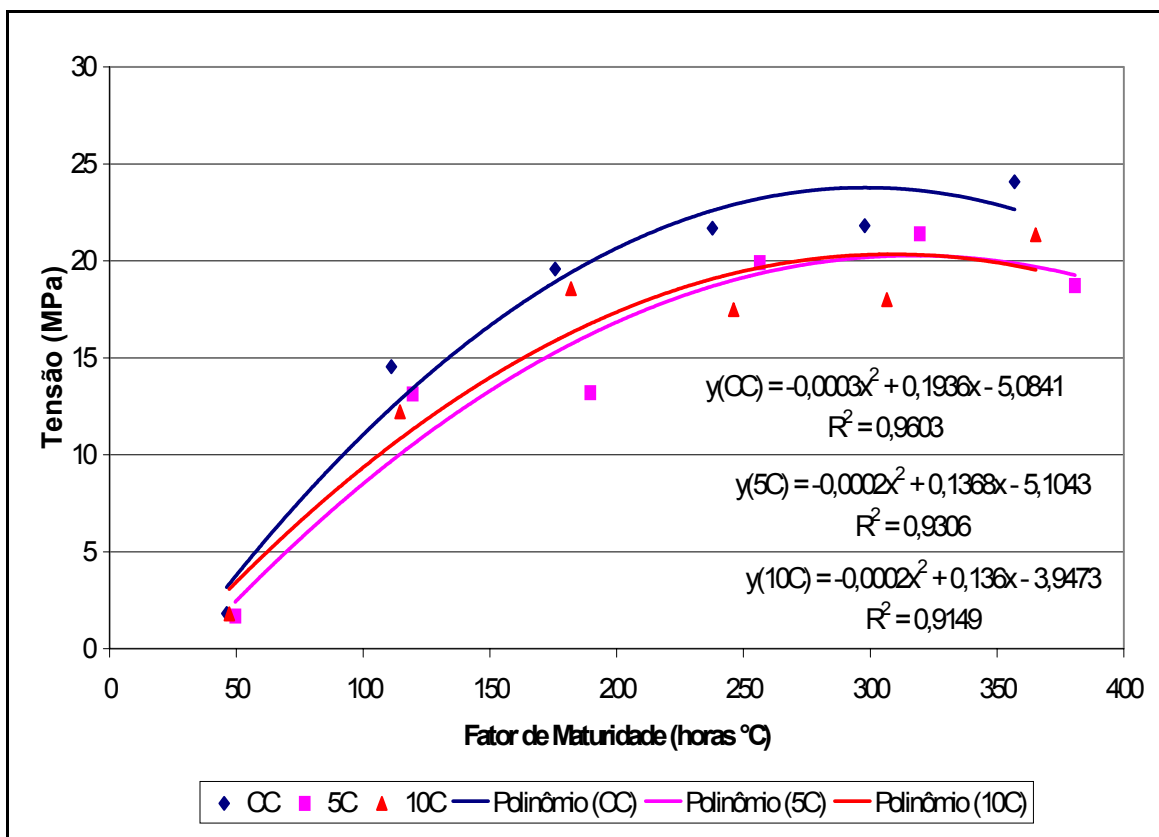


Figura 6.16 – Relação entre Resistência à Compressão e Fator de Maturidade.

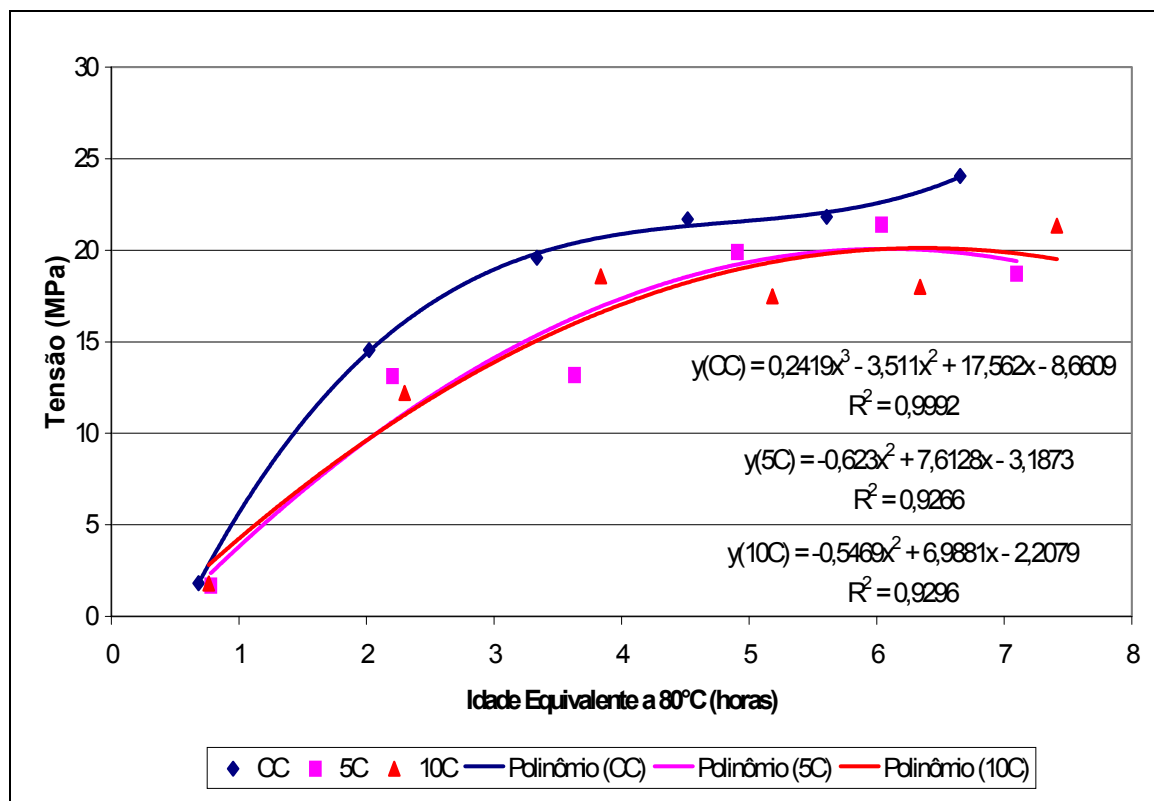


Figura 6.17 – Relação entre Resistência à Compressão e Idade Equivalente a 80°C.

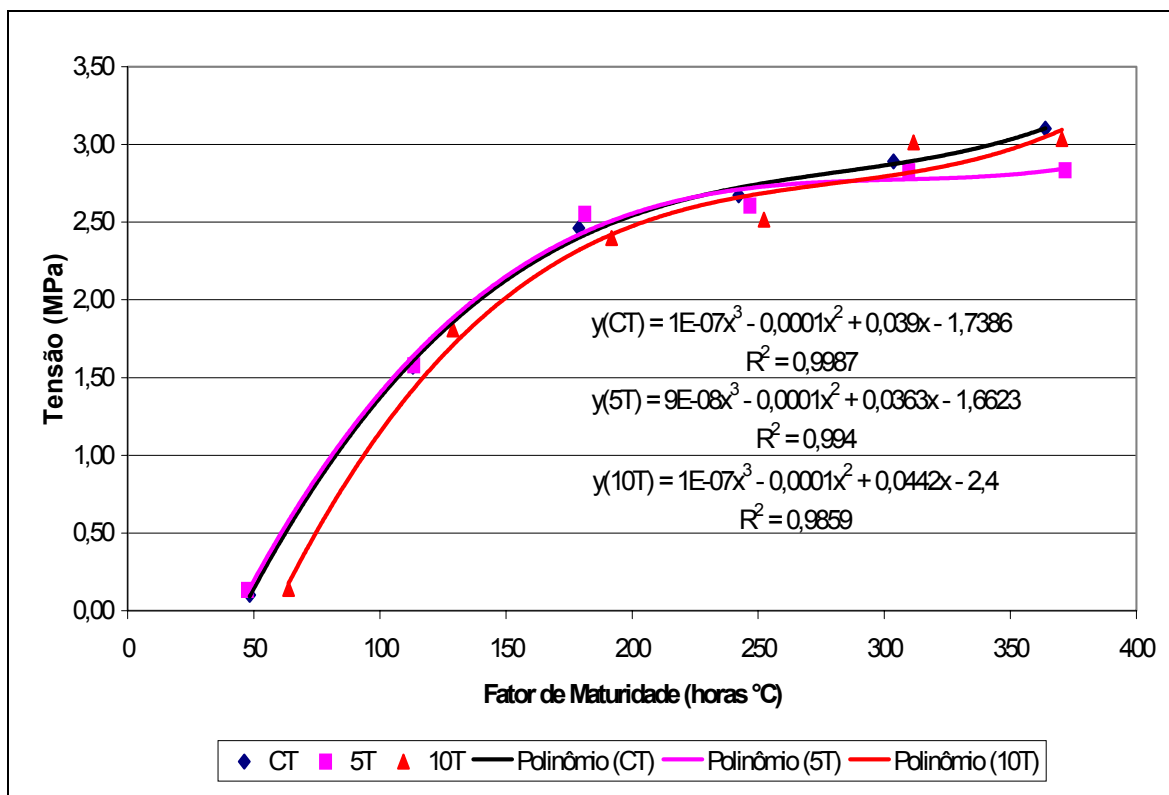


Figura 6.18 – Relação entre Resistência à Tração e Fator de Maturidade.

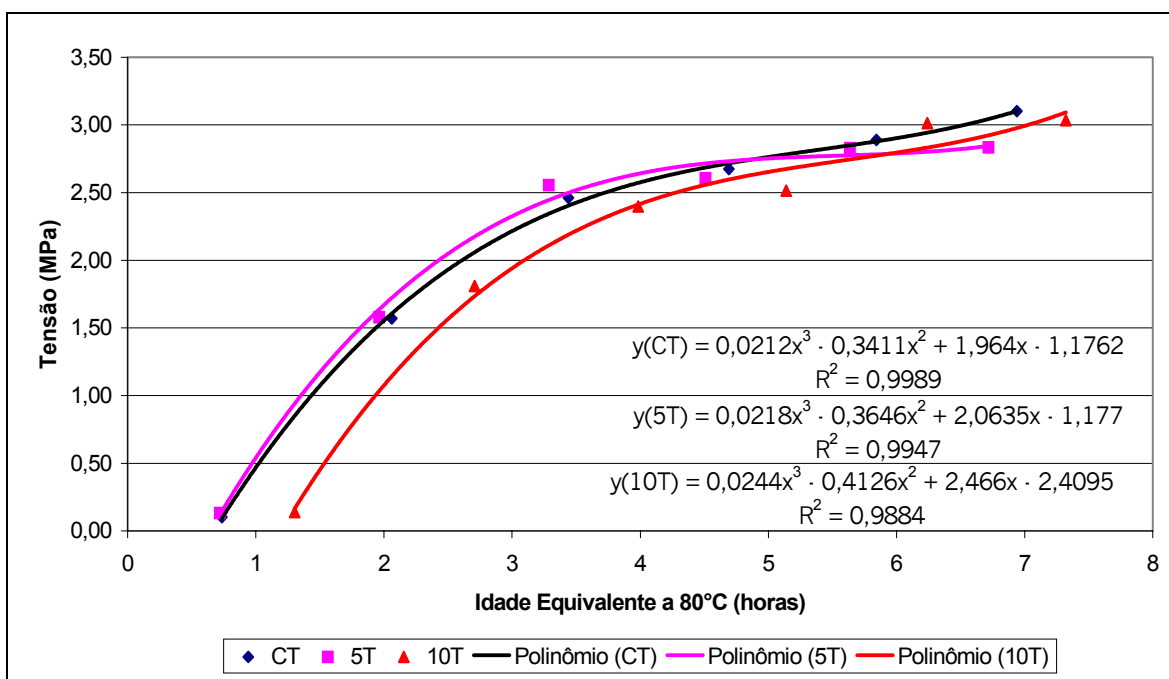


Figura 6.19 – Relação entre Resistência à Tração e idade Equivalente a 80°C.

Observando os gráficos mostrados nas figuras 6.18 e 6.19, verifica-se que, diferentemente da resistência à compressão, na tração tem-se as curvas um pouco mais definidas em torno de valores próximos, em especial no caso da relação da tensão com o Fator de Maturidade (figura 6.18), onde não é possível afirmar que os traços possuem curvas distintas ao longo do tempo com relação aos valores de Maturidade.

Na análise das curvas mostradas nas figuras 6.20 e 6.21, a distinção entre as curvas dos três traços de concreto estudados é mais nítida. As curvas nos dois Índices de Maturidade expressos são semelhantes e permitem a verificação da influência da composição dos traços nos resultados.

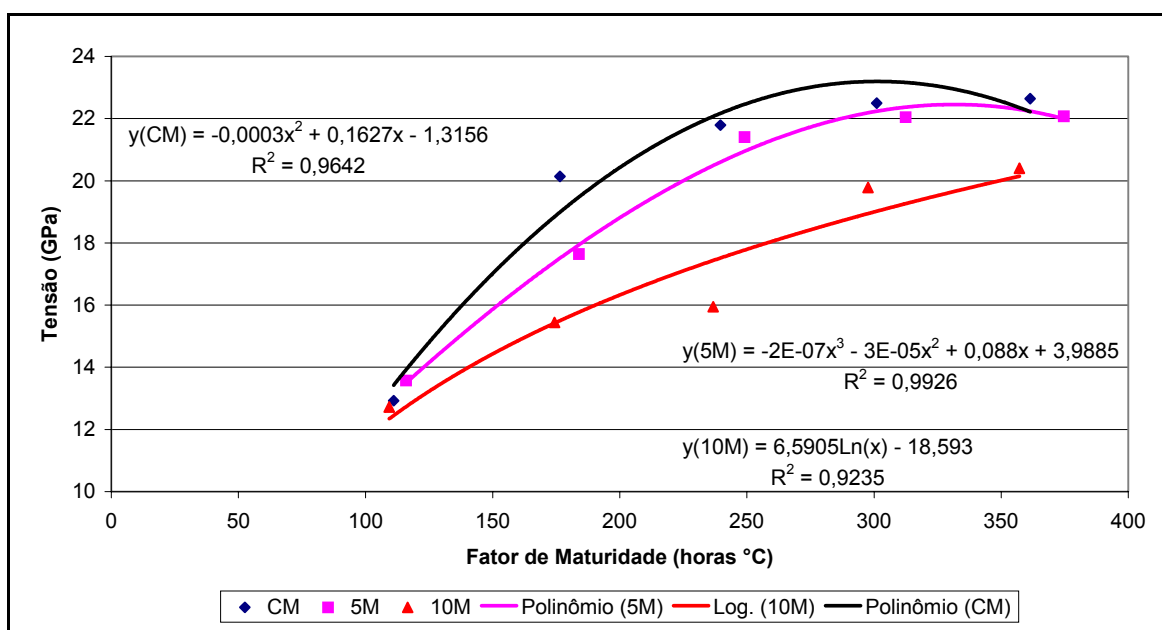


Figura 6.20 – Relação entre Módulo de Elasticidade e Fator de Maturidade.

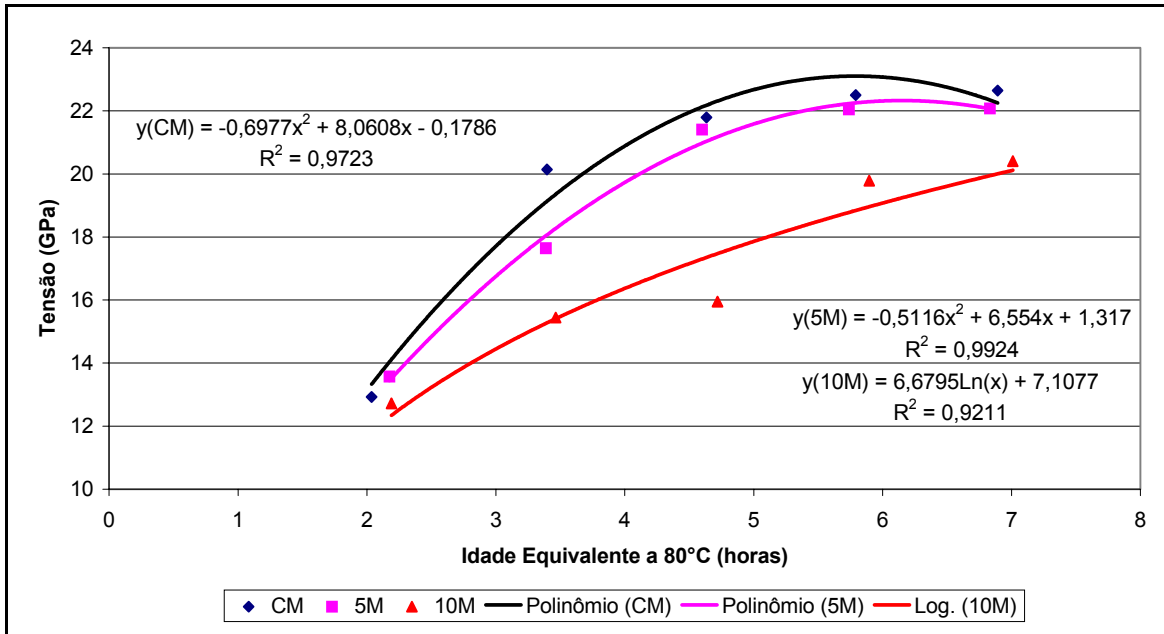


Figura 6.21 – Relação entre Módulo de Elasticidade e Idade Equivalente a 80°C.

A figura 6.22 apresenta a relação entre a idade real com a respectiva idade equivalente referente ao ciclo de 6 h. Pode-se observar que, para o final do ciclo real de 6 h a idade equivalente corresponde a 6,65 h, para a obtenção da mesma tensão de compressão, aqui no caso para o traço de controle (CC).

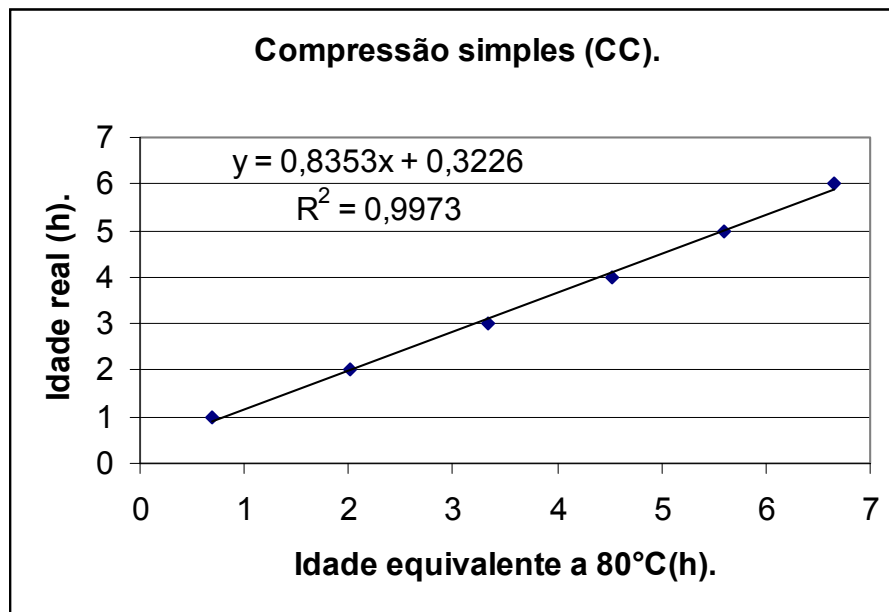


Figura 6.22 – Relação idade real x idade equivalente (CC).

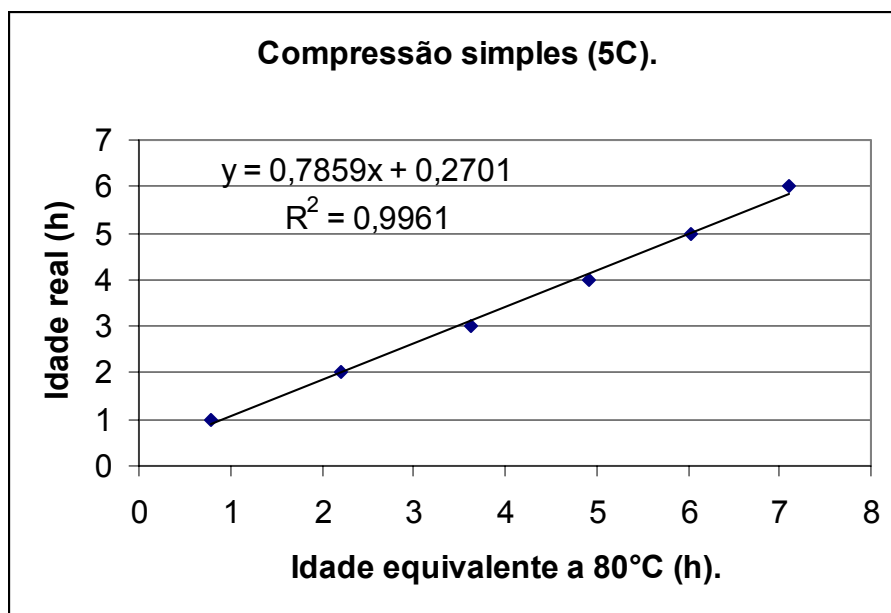


Figura 6.23 – Relação idade real x idade equivalente (5C).

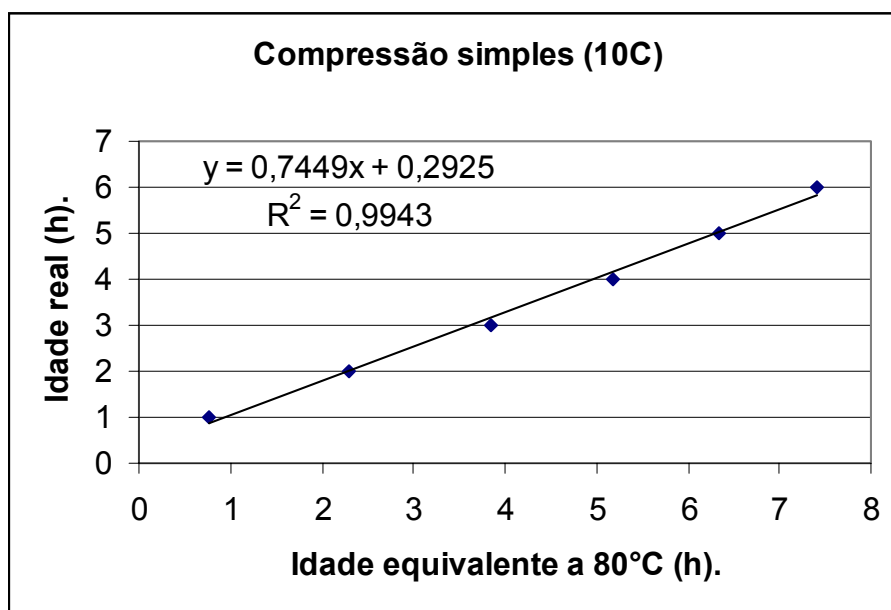


Figura 6.24 – Relação idade real x idade equivalente (5C).

As figuras 6.23 e 6.24 mostram essa relação para os traços com adição de CCA, onde se observa o aumento da idade equivalente em 1h para o traço com 5% de CCA e de pouco mais de 1h para o traço com 10%, em relação à idade real de 6h. Isto ocorre porque a temperatura do concreto durante a cura não permanece constante em 80°C durante todo o ciclo, o que leva a uma idade equivalente maior.

As figuras 6.25 a 6.27 mostram a comparação entre duas Idades Equivalentes, 80°C e 23°C. A partir do histórico de temperatura registrado durante o ciclo de 6 horas, curvas para idades equivalentes podem ser obtidas para qualquer temperatura de referência. A comparação entre essas duas temperaturas mostra a influência real da temperatura na obtenção de uma mesma propriedade mecânica, aqui no caso, a tensão de compressão simples. O mesmo pode ser conseguido para as outras propriedades.

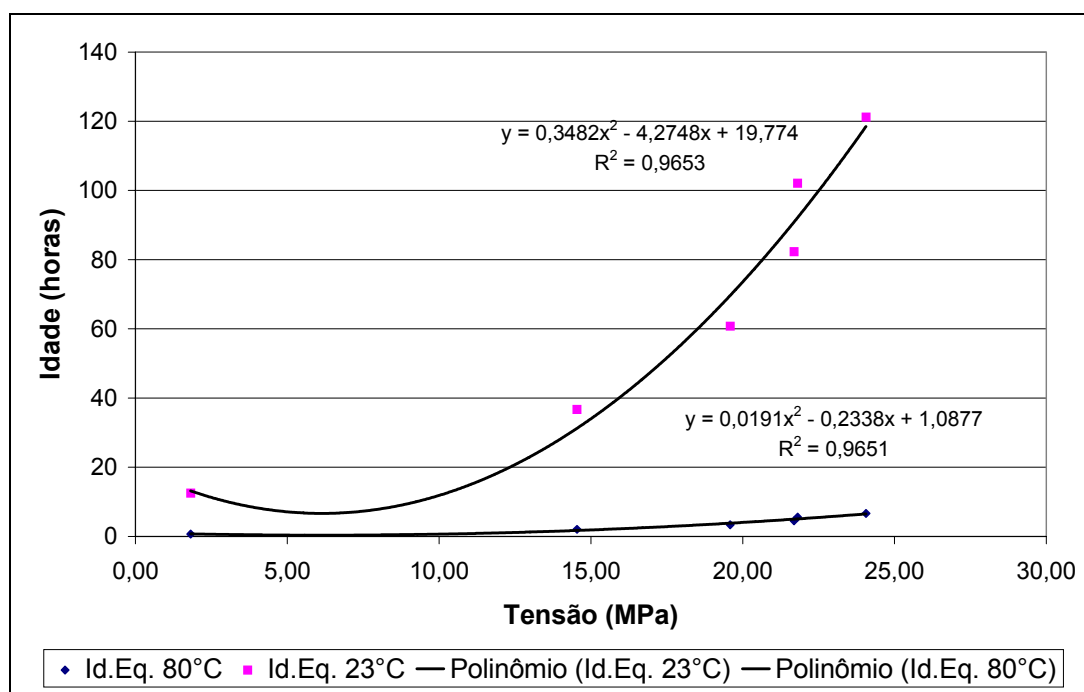


Figura 6.25 – Comparação entre Idade Equivalente a 80°C e a 23°C (traço C).

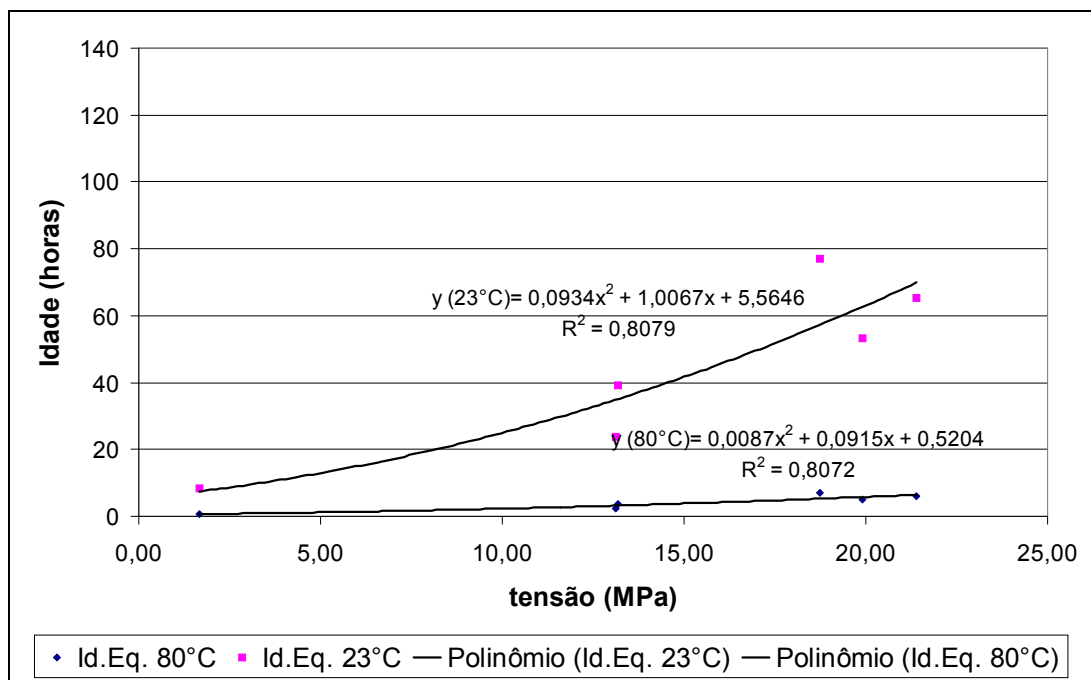


Figura 6.26 – Comparação entre Idade Equivalente a 80°C e 23°C (traço 5C).

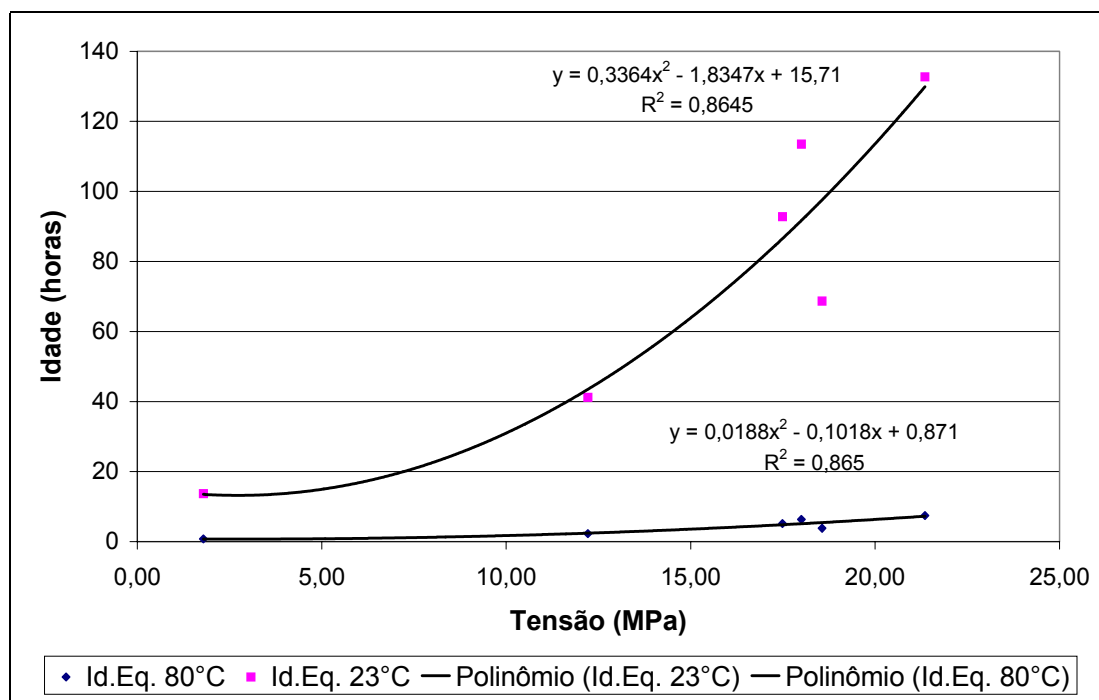


Figura 6.27 – Comparação entre Idade Equivalente a 80°C e 23°C (traço 10C).

Os resultados apresentados mostram, tanto para cura em câmara úmida como para a cura térmica, a influência da incorporação da CCA no concreto. Fica

evidente que maiores estudos serão necessários para definir melhor o processo de hidratação do concreto com CCA, na cura térmica, cujos valores de f_c aqui obtidos não representam ganho em relação ao concreto de controle.

7. CONCLUSÕES.

As considerações finais sobre a análise de todos os resultados obtidos para as propriedades estudadas nessa pesquisa são apresentadas a seguir.

7.1 – SOBRE A CINZA DE CASCA DE ARROZ.

A substituição de cimento por cinza de casca de arroz residual, proveniente de uma queima não controlada da casca, nos teores de 5 e 10% no concreto e na argamassa aqui estudados se mostrou satisfatória do ponto de vista de ganho de resistência à compressão, chegando a percentuais de até 24% para o concreto e de 28% para a argamassa, nas idades de 28 dias.

A granulometria ideal para o uso da CCA nessa pesquisa foi de aproximadamente 12 μm , obtida após um tempo de moagem de 30 minutos. As dosagens estudadas apresentaram resultados melhores entre 5 e 10% em substituição ao cimento. As dosagens maiores na argamassa (de 10 a 15%), embora com ganhos menores de resistência comparados ao traço de controle também podem ser classificadas como satisfatórias, uma vez que mesmo aumentando a substituição do cimento, a resistência aumenta a partir dos 28 dias, indicando que as dosagens menores aceleram o ganho de resistência nas primeiras idades.

7.2 – SOBRE A ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO.

A Energia Aparente de Ativação é um parâmetro químico que mede a velocidade das reações de hidratação dos cimentos. Trata-se de um parâmetro

muito sensível, com variações que podem ser influenciadas por pequenas alterações na composição dos traços e pelas diversas adições hoje empregadas no concreto. Isso faz a E_a um parâmetro único para cada mistura de concreto, como observa-se nessa pesquisa. Conforme constatado nos estudos de dosagens da CCA no concreto, a dosagem de 5% promove uma aceleração inicial do ganho de resistência à compressão, colaborando para a diminuição do valor de E_a em relação ao traço de controle. A dosagem de 10% de cinza também promove um ganho de resistência, porém de forma mais lenta e mais próxima do traço de controle, levando a um resultado de E_a também próximo, ligeiramente abaixo do valor encontrado para o traço de controle.

7.3 – SOBRE O MÉTODO DA MATURIDADE.

A avaliação das propriedades estudadas pelo Método da Maturidade permitiu a observação real do comportamento dos traços de concreto submetidos à cura térmica a 80°C, com base nas curvas representativas dos Índices de Maturidade.

Na resistência à compressão, pode-se observar que as curvas que representam os Índices de Maturidade para os concretos possuem valores de tensão mais próximos apenas num intervalo inicial ($FM < 100$ e $Idade Eq. < 2$). Porém os valores para o traço de controle (CC) assumem a partir daí valores maiores até o final da curva e que, para um mesmo Índice de Maturidade, expresso em termos de Fator de Maturidade, as curvas que representam os traços com adição de CCA possuem aproximadamente o mesmo valor de tensão ao longo de toda a curva. O mesmo acontece quando esse Índice é expresso em termos de Idade Equivalente a 80°C, sendo os valores de tensão ao longo da curva ainda mais próximos que no caso anterior, para os traços com CCA.

Para esse caso, há a indicação de que apenas a presença de cinza altera a configuração das curvas, sendo indiferentes as dosagens aqui empregadas.

Porém, na compressão diametral, as curvas referentes aos três traços estão semelhantes, sem que haja diferença entre o traço sem cinza e os demais.

O inverso ocorre quando analisamos as curvas referentes ao módulo de elasticidade. As três curvas são distintas, mas semelhantes nos dois índices de maturidade apresentados. Esse comportamento adverso mostrado nesses dois últimos casos não permite estabelecer uma influência direta da alteração do traço com a adição da cinza, mesmo em dosagens diferentes.

A utilização do Método da Maturidade, inicialmente proposto para estimar a resistência à compressão de peças de concreto “in situ”, foi aqui aplicado na determinação de índices de maturidade também para a compressão diametral e módulo de elasticidade. Uma avaliação mais real dessas propriedades poderia ser feita a partir de determinações de taxa constante das reações de hidratação específicas para essas mesmas propriedades, e não apenas através da resistência à compressão da argamassa do concreto.

Nota-se que, com a aplicação da Maturidade na avaliação das propriedades mecânicas do concreto, o tempo necessário para que o concreto obtenha uma determinada tensão ou módulo vai além da idade real inicialmente estipulada, ou seja: para qualquer atividade de desforma, por exemplo, ou aplicação de cargas, o tempo necessário é superior ao ciclo experimental. Isso garante maior segurança na execução de obras onde o método é aplicado como ensaio não-destrutivo para estimar a resistência do concreto nas peças estruturais monitoradas.

7.4 – PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.

Na condição de que a continuação da pesquisa é um fator importante diante da complexidade dos assuntos aqui abordados, seguem algumas propostas:

7.4.1 – Sobre a cinza de casca de arroz.

Entre vários fatores positivos apresentados pela cinza aqui utilizada, se destaca como fatores negativos, a duração da queima e a conseqüente dificuldade

de separação da cinza. O rendimento do forno é baixo em se considerando que a quantidade de cinza produzida é de apenas 10% da quantidade queimada.

Por outro lado, o aspecto visual da cinza é muito bom, sendo sua coloração semelhante ao cimento. Essa coloração não é a esperada quando se fala em cinza com características amorfas. A combinação de tempo de queima e temperatura não afetou essa característica, sendo então necessário um aprofundamento nos estudos que comprovem a influência de outros fatores, como a composição química da casca, na condição em que a sílica se apresenta após a queima.

7.4.2 – Sobre a cura térmica.

A proposta mais importante talvez se relaciona à durabilidade do concreto, uma vez que esta é prejudicada na cura térmica em elevadas temperaturas, podendo causar a expansão por formação tardia de etringita. Também é possível verificar nessas condições, a possibilidade da adição da cinza de casca de arroz trazer algum benefício, utilizando-se não apenas as dosagens aqui estudadas, mas dosagens maiores ou mesmo em combinação com outras adições.

7.4.2 – Sobre o Método da Maturidade.

A continuação dos trabalhos pode se concentrar em promover a cura de um mesmo traço de concreto sob outras temperaturas de cura, obtendo-se assim históricos diferentes, permitindo buscar uma relação entre os Índices de Maturidade, em especial quando expresso em Idade Equivalente, ao longo de ciclos de cura que não sejam restritos a horas, e sim ao longo de períodos maiores.

A modelagem dos parâmetros que compõe a determinação das Energias Aparentes de Ativação específicos para cada propriedade a ser estudada, seguindo o método proposto na ASTM C 1074.

BIBLIOGRAFIA.

ASTM C 618 "**Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete**". American Society for Testing Materials, 2003.

ASTM C 1074-98 " **Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method** ", Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto: Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação: procedimento. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica: procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento: procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman: procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9937**: Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo: procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939**: Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo: procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM 30**: - Agregado miúdo - Determinação da absorção de água: procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

AÏTCIN, P. C.. High Performance Concrete. Editora E & FN Spon, Québec, 1998.

AÏTCIN, P. C.. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo, Editora PINI, 667p., 2000.

ANWAR, M.; MIYAGAWA, T.; GAWEESH, M.. **Using rice husk ash as a cement**

replacement material in concrete. Waste Materials in Construction, p. 671-684, 2000.

ARBOLAEZ, I. A.. **Productive technology of pozzolanic cement start from the rice husk.** Sustainable Construction into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials, p. 138-150, 2000.

ATKINS, P. W.. **Physical Chemistry.** Oxford University Press, New York, 1998.

BARBOSA, M. P.; DURÃO, A. V.; SALVADOR FILHO, J. A. A.. **Influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas do concreto ordinário submetido à cura térmica.** 43^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.

BATTAGIN, A. F.; CURTI, R.; SILVA, C. O.; MUNHOZ, F. A. C.. **Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho.** 44^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.

Borges, F. P. S.. **Otimização Via Algoritmo Genético do Processo Construtivo de Estruturas de Concreto Submetidos à Retração Restringida Tendo em Vista a Fissuração nas Primeiras Idades.** Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2002.

BUI, D. D.; STROEVEN, P.. **Effect of rice husk ash blending of portland cement on compressive strength of gap-graded concrete.** Advances in Concrete Technology Proceedings, vol. 1, p. 297-308, 1997.

CAMARINI, G.. **Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água.** 41^o Congresso Brasileiro do Concreto, 1999.

CARVALHO, A. G.. " **Energia de Ativação dos Concretos: Modelagem e Experimentação**". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

CARINO, N. J.. **The Maturity Method: Theory and Application**. Journal of Cement, Concrete, and Aggregates (ASTM), Vol. 6, No. 2, p. 61-73, 1984.

CARINO, N.J.; "**The Maturity Method**", CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, V. M. Malhotra and N.J. Carino eds, CRC Press, p.101-146, 1991.

CASSA, J. C., CARNEIRO, A. P., SILVA, A. S. R., et al.. **Avaliação da Compatibilidade Físico-Química entre Cimento e Aditivo Superplastificante**. 41^o Congresso Brasileiro do Concreto, 1999.

CASSA, J. C., CARNEIRO, A. P., SILVA, A. S. R., GOMES, A. O., et al. **Comportamento Reológico de Alguns Cimentos e Aditivos Superplastificantes Comerciais**. 41^o Congresso Brasileiro do Concreto, 1999.

COUTINHO, J. S.. **The effect of controlled permeability formwork (CPF) on concrete with rice husk ash**.. Sustainable Construction into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials, p. 569-584, 2000.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; ALARCON, O. E. et al. **Method to obtain gray color rice husk ash from black color rice husk ash**. CIB Symposium on Construction & Environment: Theory into Practice, p. 1-10, 2000.

DAFICO, D. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. **Um Estudo Visando a Identificação das Condições de Queima da Casca de Arroz para Produção de Pozolana**

Branca. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, 2002.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para o uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica.** Revista Química Nova. Vol. 24, no. 06, 778-782, 2001.

DE MELLO, A. B., LIBÓRIO, J. B. L., SILVA, I. J.. **Evidências da perda de resistência mecânica final devido à cura térmica observadas através de imagens de microscopia eletrônica de varredura.** In: 42º Concreto Brasileiro do Concreto, Fortaleza, 2000.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C.; ALVES, A. S.. **Concrete carbonation with fly ash, rice husk ash and calcareous filler.** Sustainable Construction into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials, p. 151-164, 2000.

GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; CASALI, J. M.. **Comparação entre diferentes metodologias utilizadas no Brasil para avaliação da pozolanicidade da cinza volante e da cinza de casca de arroz.** 5º Congresso Brasileiro do Cimento, 1999.

GAULTHER, E.; REGOURD, M.. **Le durcissement du béton en fonction de la température.** RILEM International Conference on Concrete at Early Ages, ENPC Paris, p. 145-150, 1982.

HARTMANN, C. T., HELENE, P. R. L. **Influência do Uso de Aditivos Superplastificantes na Resistência à Penetração de Íons Cloretos em Concretos.** 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.

HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M.; CARASEK, H.. **Efeito da cinza de**

casca de arroz e sílica ativa na reação álcali-agregado. 41^o Congresso Brasileiro do Concreto, 1999.

HOUSTON, D. F. **Rice Hulls.** In: **Rice: Chemistry and Technology.** American Association Cereal Chemists (AACC), USA, 1972, p. 301-352.

IKPONG, A. A.. **The relationship between the strength and non-destructive parameters of rice husk ash concrete.** Cement and Concrete Research, vol. 23, p. 387-398, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores conjunturais – produção agrícola.** Disponível em : <http://www.ibge.gov.br>, em 11 de maio de 2003.

ISAIA, G. C.. **Efeito sinérgico de misturas ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e microssílica na durabilidade do concreto de elevado desempenho.** Proceedings of the International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, vol. 1, p. 578-589, 1996.

KIM, J. K.; HAN, S. H., LEE, K. M.. **Estimation of compressive strength by a new apparent activation energy function.** Cement and Concrete Research, p. 217-225, 2001.

KLIEGER, P.. **Effect of mixing and curing temperature on concrete strength.** Journal of the American Concrete Institute, v. 29, no. 12, p. 1063-1081, 1958.

KNUDSEN, T. **The dispersion model for hidration of Portland cement: general concepts.** Cement and Concrete Research, v. 14, p. 622-630, 1984.

LEVINE, I. N.. **Physical Chemistry.** McGraw Hill, New York, 1995.

- LIBÖRIO, J. ; SOUZA, M. F. **Cimento nobre com casca de arroz.** Revista Pesquisa FAPESP, São Paulo, out. p. 56-58, 2000
- LIN, L. K.; HWANG, C. L.. **Characteristics and hidration mechanism of RHA cement paste.** 10th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. 3, p. 169-172, 1997.
- McINTOSH, J.D.. **The effects of low-temperature curing on the compressive strength of concrete.** RILEM Symposium on Winter Concreting. Copenhagen, Danish Institute for Building Research (1956)
- MARTINS, A. R.; MONTICELLI, I.; CAMARINI, G.. **Carbonatação em concretos submetidos a diferentes procedimentos de cura.** 43^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.
- MARTINS, M. L. C.; FERREIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C.. **Durabilidade de concreto com cinza de casca de arroz – atenção especial ao ensaio de absorção de água por capilaridade.** Sustainable Construction into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials, p. 767-780, 2000.
- MEHTA, P.K. **Rice Husk Ash - A unique supplementary cementing material.**
In: Advances in Concrete Technology. Athens, 1992. Proceedings...Ontario: CANMET, 2a edição, p.419-443, 1992.
- MEHTA, P, K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, propriedades e materiais.** Ed. Pini. São Paulo, 1994. 1^a ed. 573p.

METHA, P. K.; FOLLIARD, K. J.. **Rice husk ash – A unique supplementary cementing material: durability aspects**. Advances in Concrete Technology. Second CANMET/ACI International Sympo, 1995, p. 531-541.

MEHTA, P.K.; PITT, N. A new process of rice husk utilization. In: International Conference on the Utilization of Rice By-Products, Valencia, Spain, 1974. Proceedings...Valencia: IATA, 1977, p.45-58.

MORAES, R. G.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, et al.. **Influência das adições minerais sobre as ações físicas e químicas intervenientes na resistência mecânica do concreto**. 43^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.

NASCIMENTO, W. N., et al.. **Adição de cinza de casca de arroz (CCA) no concreto, sob o aspecto da durabilidade**, 44^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.

NEVILLE, A.M. **Concrete in the Year 2000**. In: MALHOTRA, V.M. Advances in Concrete Research. Ottawa, Energy and Mines Resources, p. 21-78, 1992.

ORDÓÑEZ, L. M.; PAYÁ, J.; COATS, A. M.; GLASSER, F. P.. **Reaction of rice husk ash with OPC and portlandite**. Advances in Cement Research, 2002, vol. 14, no. 3, p. 113-119.

PAYÁ, J. et al. **Studies on crystalline rice husk ashes and the activation of their pozzolanic properties**. In: WOOLLEY, G. R. ; GOUMANS, J. J. J. M. ; WAINWRIGHT, P. J. Waste materials in construction wascon 2000. Amsterdam: Pergamon, 2000. p. 493-503.(Waste Management Series, 1).

PAYÁ, J. et al. **Cenizas de cáscara de arroz (CCA) obtenidas en condiciones de combustión no controlada: posibilidades de uso en**

- hormigones.** In: Actas del congreso nacional de materiales compuestos, 3, 1999, Bernalmádena. Actas... Benalmádena: AEMAC, 1999. p. 501-508.
- PERES, L. D. P.; BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. A.. "**Determinação da Energia de Ativação para Cimentos Nacionais Aplicando o Procedimento ASTM C 1074-98**". 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Vitória - ES, 2003.
- PINTO, R. C. A.; The Effect of curing temperature on the development of mechanical properties of fresh and hardened high strength silica fume mixtures – a maturity approach. 1997, 293p. Dissertation (Doctor of Philosophy) Faculty of Graduate School, Cornell University, Cornell.
- PINTO, R. C. A.; HOVER, K. C. **Further studies on the utilization of maturity functions to a high strength concrete mixture.** IN; 4º International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, p. 711-718, Paris, 1996.
- PINTO, R. C. A.. "**O Método da Maturidade e sua Utilização em Construção Civil**". In: Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 29, 2000, Punta del Este. Anais, 2000.
- POUEY, M. T.; DAL MOLIN, D.. **Estudo comparativo da resistência à compressão de concretos com adição de cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas,** 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.
- RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A..**A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos,** 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.

RONCERO, J., GETTU, R.. **Aditivos Superfluidificantes para Hormigones de Altas Prestaciones.** Disponível em: <http://joana2000.epc.es>. Acesso em 18 de dez. de 2002.

SALVADOR FILHO, J. A. A.. **Cura térmica dos concretos de alto desempenho: análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade.** Dissertação de Mestrado, FEIS – UNESP, 2001.

SAMPAIO, J.; COUTINHO, J. S.; SAMPAIO, M.N.. **Melhoria do desempenho de um betão com a adição de cinza de casca de arroz.** 5º Congresso Brasileiro do Cimento, 1999.

SANTOS, S.; PRUDÊNCIO JR., L. R.. **Estudo comparativo do desempenho da sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz residual em concreto de cimento Portland.** 40º Congresso Brasileiro do Concreto, 1998.

SANTOS, S.. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** Dissertação de Mestrado, UFSC, 1997.

SAUL, A. G. A.. **Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure.** Magazine of Concrete Research, London, v.2, n.6, p.127-140, 1951.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C.. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz.** 43º Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.

- SILVA, M. G.; AGOPYAN, V.. **A Influência da Temperatura na Hidratação dos Cimentos de Escória de Alto-Forno**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.
- SILVA, C. O.; VIEIRA, S. R. S. S.. **Influência da temperatura de cura nas características reológicas, físico-mecânicas e microestruturais do concreto**. 43^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.
- SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C.; A influência do tratamento térmico da cinza de casca de arroz no pozolanicidade e na resistência à compressão de argamassas. I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, 1995.
- SILVEIRA, A. A.. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 1996.
- SINGH, N. B; BHATTACHARJEE, K. N.; SHUKLA, A. K.. **Hydration of portland blended cements**. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 5, p. 1023-1030, 1995.
- SUGITA, S.; YU, Q.; SHOYA, M.; TSUKINAGA, Y.; ISOJIMA, Y.. **On the semi-industrial production on highly reactive rice husk ash and its effect on cement and concrete properties**. 10th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. 3, p. 173-182, 1997.
- VAGHETTI, M. A. O.; ISAIA, G. C.. **Concreto de alto desempenho com misturas pozolânicas: um estudo sobre a influência na carbonatação**. 5^o Congresso Brasileiro do Cimento, 1999.
- VENQUIARUTO, S. D.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.. **A influência do teor**

e da quantidade de adições minerais na carbonatação do concreto. 43^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.

VERBECK, G. J.; HELMUTH, R. H. **Structure and physical properties of cement paste.** In: Internenational Symposium on the Chemistry of Cement, 5, Tokyo, 1968.

WIRKIN, E.; BRODA, M.; DUTHOIT, B.. **Determination of the apparent activation energy of one concrete by calorimetric and mechanical means Influence of a superplasticizer.** Cement and Concret Research, v. 32, 2002.

ZHANG, M.H.; LASTRA, R.; MALHOTRA, V. M.. **Rice-husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste.** Cement and Concrete Research, vol. 26, n0. 6, p. 963-977, 1996.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.

BAUER, L. A. **Materiais de Construção Civil.** v.1, 5^a ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000. 447p.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** 1 ed São Paulo: Editora Pini Ltda, 1993. 349 p.

MEHTA, P. K. **Reflections on Recent Advancements in Concrete Technology.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40, 1998, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: BPS, 1998. CD-ROM.

SOARES, J. M. D.; QUINTANA, L. M. H.. **The use of rice husk ash in the production of structural ceramics.** CIB Symposium on Construction &

Environment: Theory into Practice, p. 1-9, 2000.

TARTUCE, R. **Dosagem Experimental do Concreto**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1989. 115 p.

TARTUCE, R., GIOVANNETTI, E. **Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1990. 107 p.

ANEXO

Apresenta-se neste anexo, os valores obtidos para E_a dos traços de concreto estudados a partir de outras três temperaturas isotérmicas (10°C, 30°C e 60°C). O procedimento experimental se diferiu apenas para a temperatura de 10°C, cujas amostras foram curadas em uma geladeira com controle de temperatura. As tabelas A.1 a A.3 mostram os valores obtidos.

Tabela A.1 – E_a para o concreto de controle.

T (°C)	T (K)	1/K	k	ln(k)
10	283	0,0035	0,5701	-0,5619
30	303	0,0033	0,6261	-0,4682
60	333	0,0030	8,5755	2,1489
To (°C)		Q	Ea	
13,98		5275,20	43,86	

Tabela A.2 – E_a para concreto com 5% de CCA.

T (°C)	T (K)	1/K	k	ln(k)
10	283	0,0035	0,3285	-1,1132
30	303	0,0033	0,9114	-0,0928
60	333	0,0030	3,5516	1,2674
To (°C)		Q	Ea	
11,45		4490,90	37,34	

Tabela A.3 – E_a para concreto com 10% de CCA.

T (°C)	T (K)	1/K	k	ln(k)
10	283	0,0035	0,3884	-0,9457
30	303	0,0033	0,8072	-0,2142
60	333	0,0030	6,4363	1,8620
To (°C)		Q	Ea	
16,16		5367,80	44,63	

A tabela A.4 mostra a comparação com os dados apresentados no corpo da dissertação (D2) com os valores deste anexo (D1).

Tabela A.4 – Comparação entre os valores de Ea.

Traço	D1	D2	M	DP	CV
C	43,86	44,27	44,06	0,205	0,00465
5C	37,34	36,34	36,84	0,500	0,01357
10C	44,63	44,01	44,32	0,301	0,00679

Pela análise estatística pode-se verificar que a qualidade dos resultados é bastante satisfatória, uma vez que, o coeficiente de variação foi muito abaixo de 25%.