

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL – PPGEC/AM

ESTUDO DA TEMPERATURA DE PASTAS COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA SILICA ATIVA AO CIMENTO
UTILIZANDO O METODO SEMI-ADIABÁTICO

JOSE GERALDO DA SILVA

MANAUS
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL – PPGEC/AM

JOSE GERALDO DA SILVA

**ESTUDO DA TEMPERATURA DE PASTAS COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DA SILICA ATIVA AO CIMENTO UTILIZANDO O
MÉTODO SEMI-ADIABÁTICO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Materiais e Componentes de Construção.

Orientador: Prof. Dr. João Almeida Melo Filho

MANAUS
2017

Ficha Catalográfica
Catalogação na fonte pela Biblioteca Central da
Universidade Federal do Amazonas – UFAM

Silva, Jose Geraldo

S586p Estudo da temperatura de pastas com substituição parcial da sílica ativa ao cimento utilizando o método semi-adiabático. / Jose Geraldo Silva. 2017.

127 f.; Il. color, 31 cm.

Orientador: Prof. Dr. João Almeida Melo Filho

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas.

1. Método Semi Adiabático Alternativo. 2. Projeto do produto.
3. Planejamento experimental. 4. Reação exotérmica do concreto. 5. Projeto térmico do concreto massa. I. Melo Filho, Prof. Dr. João Almeida (Orientador) II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

JOSE GERALDO DA SILVA

**ESTUDO DA TEMPERATURA DE PASTAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
DA SILICA ATIVA AO CIMENTO UTILIZANDO O METODO SEMI-
ADIABÁTICO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Materiais e Componentes de Construção.

Aprovado em 07 de novembro de 2017

BANCA EXAMINADORA

**Prof. JOÃO ALMEIDA MELO FILHO, D. Sc, Orientador
Universidade Federal do Amazonas**

**Prof. Raimundo Pereira de Vasconcelos, D. Sc, Membro
Universidade Federal do Amazonas**

**Profa. Luciane farias Rimas, D. Sc, Membro
Universidade Federal do Amazonas**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pela oportunidade em mais uma conquista. Acredito que através dele pude contar com a ajuda de pessoas maravilhosas às quais sou ternamente grato!

Ao meu orientador pela maestria na orientação dos mais variados segmentos deste trabalho !

Aos professores Raimundo Kennedy e Vasconcelos pelas sugestões e experiências compartilhadas!

A professora Virgínia pela força na manutenção do tema proposto!

A professora Adalena Kennedy pelas inestimadas dicas indispensáveis a execução deste trabalho científico!

A Votorantim Cimentos e Silmix pela doação do material de amostragem!

A colaboração do Aedjota nos ensaios!

Ao pessoal da coordenação da pós-graduação pelo apoio!

A Faculdade de Rondônia (FARO) pela cessão do laboratório e estruturas de apoio e incentivo a este trabalho!

A Ulbra pelo empréstimo de equipamentos de ensaio!

Aos meus familiares pelo apoio, incentivo e compreensão em minha ausência!

À minha prima Luciene e meu irmão pelo apoio incondicional na importação do sensor!

Em especial ao meu filho Ryan pela graça e formação pessoal internalizada, me apoiando com seu “Então termina Pai eu vou entender, na boa !” !

Aos meus colegas do mestrado pelo apoio nos mais variados assuntos!

E,

Enfim a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho e que poderiam compreender que são muito poucas linhas para tanta gratidão !

“ Podemos nós ter a pretensão de limitar a ciência, isto é, o conhecimento do mundo, às noções ínfimas e informes que, laboriosa e pensadamente conquistamos, e consignamos nos nossos livros? ”

(RICHET)

*Ao Grande Arquiteto do Universo, Criador, Deus, ...
como prefira em sua crença ao ler este enfim!*

*Aos meus pais Abel, Lourdes e família pelo apoio
incondicional e reconhecimento de vitória!*

Ao meu filho, Ryan, por sua compreensão e amizade!

*Ao meu orientador Prof. Dr. João Almeida pelo grande
apoio!*

*A todos enfim, que de alguma forma contribuíram para
a conclusão este trabalho!*

RESUMO

As crescentes solicitações de menores prazos de execução em projetos utilizando concreto massa traz consequente demanda ao controle térmico. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a utilização da sílica na redução da temperatura em reações cimentícias através de ensaios em pastas de cimento empregando dispositivo e método semi-adiabático desenvolvidos nesta pesquisa. Para tanto foi elaborada um equipamento e método de uso. Este trabalho apresenta um método, incluindo o projeto do dispositivo de medição semi-adiabática da reação, contando com a aplicação de materiais adequados a obtenção dos resultados, bem como um planejamento experimental adequado possibilitando obter avaliação da sílica ativa como proposta de controle térmico. Os resultados mostraram as diferentes indicações de temperatura, conforme as respectivas dosagens de sílica ativa. Foram praticadas as dosagens de sílica em substituição ao cimento nas proporções de 0, 7, 14 e 20% ambas com relação a/c de 0,5. A sílica apresentou-se aumentando ou diminuindo as temperaturas das reações conforme dosagem, aspecto, portanto, determinante ao processo de aplicação da mesma para tal finalidade segundo os dados observados.

Palavras Chaves: Sílica ativa, Controle Térmico, Método semi-adiabático alternativo, projeto do produto, planejamento experimental, concreto massa.

ABSTRACT

The increasing requests for shorter execution times in concrete using concrete results in a consequent demand for thermal control. This work aims to evaluate the use of silica in the reduction of temperature in cement reactions through tests on cement pastes using device and semi-adiabatic method developed in this research. For that, an equipment and method of use was developed. This work presents a method, including the design of the semi-adiabatic reaction measuring device, with the application of suitable materials to obtain the results, as well as an adequate experimental planning, allowing the evaluation of the active silica as a thermal control proposal. The results showed the different temperature indications, according to the respective dosages of active silica. The dosages of cement were substituted by silica in the proportions of 0, 7, 14 and 20% both with respect to w / c relation of 0.5. The silica was presented increasing or decreasing the temperatures of the reactions according to dosage, aspect, therefore, determinant to the process of application of the same for such purpose according to the data observed.

Key words: Silica fume, Thermal control, Alternative semi-adiabatic method, product design, experimental planning, mass concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 : Expansão térmica da pasta de cimento / nano sílica e hidratação aos 28 dias	21
Figura 02: Resultado do teste temperatura adiabática	23
Figura 03: Processo de hidratação e temperaturas externas	24
Figura 04: Resultado teste temperatura adiabática	25
Figura 05: Processo de aglomeração do cimento	25
Figura 06: Elevação adiabática típica para diferentes dosagens de cimento	26
Figura 07: Micrografia ótica, luz refletida, do clínquer do cimento <i>Portland</i> não hidratado.	27
Figura 08: Micrografia ótica	27
Figura 09: Substancias cimento durante hidratação	28
Figura 10: Gráfico da reação de hidratação do cimento apartir dos 90 dias	29
Figura 11: Portlandite observada apartir da hidratação do cimento	29
Figura 12: Química do Cimento <i>Portland</i>	30
Figura 13: Calor de hidratação dos componentes do cimento	30
Figura 14: Diferença entre temperatura no interior e na superfície da camada de concreto	31
Figura 15: Mecanismo de fissuração em função da expansão térmica	31
Figura 16: Retração química e autógena	33
Figura 17: Temperatura Anual de Porto Velho	34
Figura 18: Incidencia raios ultra violeta em Porto Velho	35
Figura 19: Processo produtivo Silica Ativa Adaptado de SFA (2005).	37
Figura 20: Quartzito apresentando foliação marcada pela biotita	37
Figura 21 : Textura granoblástica em quartzito, aumento 40x	38
Figura 22: Microfotografia Eletronica	38
Figura 23: Grão de cimento (direita) e Silica ativa (esquerda)*	39
Figura 24 : Sinótipo do Processo Produtivo da Sílica Ativa	40
Figura 25: Energia Cimento A (W Kg ⁻¹)	43
Figura 26: Energia Cimento B (W Kg ⁻¹)	43
Figura 27: Diagrama esquemático dos tipos de calorímetros	49
Figura 28 : Princípio de funcionamento wattmetro tipo condução adiabática	51

Figura 29: Calorímetro tipo solução (Arranjo geral)	54
Figura 30: Princípio Geral de Funcionamento dos calorímetros diferenciais (Adaptado)	59
Figura 31: Diagrama esquemático calorímetro condução	61
Figura 32: Calorímetro Semi adiabático Típico	62
Figura 33: Calorímetro semi-adiabático	63
Figura 34: Calorímetro semi-adiabático	63
Figura 35: Predição de temperatura na condição adiabática versus experimental	66
Figura 36 : Evolução da taxa de aquecimento	69
Figura 37 : Calorímetro Semiadiabático: Curvas para cinza e controle de argamassa	69
Figura 38: Etapas de um estudo por simulação	76
Figura 39: Fluxograma Desenvolvimento e Aplicação do Protótipo I	77
Figura 40: Fluxograma Desenvolvimento e Aplicação do Protótipo II	78
Figura 41: Permeabilímetro de Blaine ToniPERM	80
Figura 42: Espectrômetro de Fluorescência	81
Figura 43 : Sensor e conector P2	85
Figura 44 : Adaptador e conector P2	85
Figura 45: Garrafa de poliestireno	86
Figura 46: Wattímetro tipo condução semi-adiabática	89
Figura 47: Diagrama esquemático dos tipos de calorímetros (Adaptado)	91
Figura 48 : Tara do conjunto de medição	96
Figura 49 : Preparação do papel alumínio e sensor	96
Figura 50 : Pesagem (Amostra e dispositivos)	97
Figura 51 : Conexão do sensor e parametrização	97
Figura 52 : Parametrização do intervalo de amostragem no aplicativo	98
Figura 53 : Parametrização da unidade temperatura no aplicativo	98
Figura 54 : Comparações gerais de aderencias das modelagens matemáticas	100
Figura 55 : Comparação gráfica de aderencias e erros das duas melhores modelagens matemáticas	100
Figura 56 :Temperaturas das Amostras conforme dosagem percentual de Sílica Ativa	105
Figura 57 : Temperatura amostradas conforme tipo de cimento ensaiado	106

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Cement Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIM	Building Information Modeling
°C	Graus Célsius
CAD	Concreto Auto Adensável
CAR	Concreto de Alta Resistencia
CET	Coeficiente de Expansão Térmica
CNTP	Condições Naturais de Temperatura e Pressão
COPPE/UFRJ	- Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Corpo de Prova
DOE	Desing Of Experiments
EVA	Acetato-Vinilico de etileno
FDA	Food and Drug Adminstration
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico
PIAP	Pesquisa Industrial Anual de Produtos (IBGE)
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IN	Inglês
INMET	Instituto Nacional de Metereologia
NBR	Norma Brasileira
NT	Nord Test
PCA	Portland Cement Association
PDP	Projeto de Desenvolvimento de Produto
RMSE	Root mean square error
STP	Sistema Toyota de Produção
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UFPR	Universidade Federal do Paraná
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
USP	Universidade De São Paulo
V1	Variável Número 1
V2	Variável Número 2
XP	Sistema Operacional Windows XP

LISTA DE TABELAS

SUMÁRIO	xv
Tabela 1 : Quantidade de Sílica Ativa por tonelada de liga metálica produzida	40
Tabela 2 : Comparação química e física das características do cimento, cinza e sílica	42
Tabela 3: Calor específico de algumas substancias	44
Tabela 4: Condutividade Térmica de alguns Materiais	45
Tabela 5: Valores típicos de condutividade térmica	46
Tabela 6 : Difusividade de Alguns Materiais	47
Tabela 7 : Valores de difusibilidade térmica em função do tipo de agregado	48
Tabela 8 – Correlação das etapas e atividades do PDP	72
Tabela 10: Análise Composição Silica Ativa por Fluorescencia de Raio X	80
Tabela 11: Características do Cimento tipo I	82
Tabela 12: Ensaio Químicos do Cimento tipo II	82
Tabela 13: Ensaio Físicos e Mecânicos do Cimento tipo I	83
Tabela 14: Ensaio Físicos e Mecânicos do Cimento tipo II	83
Tabela 15 : Ensaio de Resistencia a Compressão do Cimento tipo I (NBR 7215/96)	84
Tabela 16 : Ensaio de Resistencia a Compressão do Cimento tipo II (NBR 7215/96)	84
Tabela 17: Matriz de Planejamento do Experimento Fatorial	93
Tabela 18 : Matriz de Amostragem	94
Tabela 19 : Aspectos de Moldagem	109

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE CÓDIGOS E ABREVIATURAS	xiii
SUMÁRIO	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.0 INTRODUÇÃO	17
1.1 <i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</i>	17
1.2 <i>JUSTIFICATIVA DA PESQUISA</i>	17
1.3 <i>OBJETIVO GERAL</i>	18
1.3.1 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	19
1.4 <i>ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO</i>	19
CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 <i>O CONCRETO MASSA E SUAS ESPECIFICIDADES</i>	21
2.1.1 <i>O CONCRETO MASSA</i>	23
2.1.2 <i>SÍLICA ATIVA</i>	36
2.1.3 <i>PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO</i>	44
2.2 <i>PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE REAÇÃO QUÍMICA: CALORÍMETROS E METODOLOGIAS</i>	48
2.2.1 <i>Calorímetro tipo Condução Adiabática</i>	50
2.2.2 <i>Calorímetro tipo Solução Adiabática</i>	52
2.2.3 <i>Wattímetro tipo diferencial de varrimento</i>	58
2.2.4 <i>Metodologias existentes: wattímetro tipo Condução Semi-Adiabática</i>	59
2.3 Planejamento experimental (desenvolvimento do Equipamento e ensaios)	70
2.3.1 <i>Planejamento para Desenvolvimento do Produto (PDP e Uso)</i>	70
2.3.2 <i>Planejamento Experimental (DOE, Coleta e Tratamento de Dados)</i>	73
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	77
3.1 <i>Materiais</i>	79
3.1.1 <i>Materiais para ensaios (amostras)</i>	79
3.1.2 <i>Caracterização da Sílica Ativa</i>	79
3.1.3 <i>Caracterização do Cimento</i>	81
3.2 <i>Acessórios utilizados na montagem do dispositivo</i>	85
3.2.1 <i>Sensor de temperatura</i>	85
3.2.2 <i>Recipiente de Poliestireno</i>	86
3.3 <i>Desenvolvimento do Equipamento</i>	87

3.3.1 Conceito e princípio de funcionamento	87
3.3 Projeto conceitual do Equipamento	88
3.3.1 Procedimento de preparo da amostra	89
3.3.2 Teste para calibragem do equipamento	90
3.4 Planejamento e Métodos de ensaios (Planejamento e a aplicação)	90
3.4.1 Definição dos Fatores ou Variáveis de Controle e Níveis	92
3.4.2 Seleção das Variáveis de Processo e construção do planejamento fatorial fracionado	92
3.4.3 Seleção das Variáveis de Resposta	95
3.4.4 Preparação e metodologia de Amostra	95
3.4.5 Monitoramento da temperatura dos corpos de prova	98
3.4.6 Modelagem Matemática da Curva de Temperatura	99
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1 Método Utilizado	103
4.2 Análise dos Materiais e da Utilização da Sílica	106
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Variações nos processos produtivos dos materiais bem como variações nos percentuais dos elementos que compõem os materiais podem trazer resultados inesperados ou bem diferentes dos esperados. Edificações utilizando grandes volumes de concreto em regiões de clima equatorial, por exemplo, trazem a necessidade, cuidados adicionais e um deles é a predição e controle da temperatura da reação exotérmica durante o processo de cura do concreto.

A busca incessante pelo desenvolvimento de concretos que apresentem maiores resistências iniciais tem sido cada vez maior. Entretanto, tal característica tende a ter relação direta e proporcional ao aquecimento da massa e por consequência ao aparecimento de problemas patológicos do concreto. Este trabalho trata das especificidades desta busca em conseguir medir as temperaturas ensaiadas em reações químicas. Utiliza-se para tanto as reações químicas dos traços do concreto-massa para ensaios. O concreto massa é definido pelo Instituto Americano de Concreto (ACI) como sendo qualquer volume de concreto em que a combinação de dimensões, composição do traço, restrições dimensionais e condições ambientais, possam levar a tensões térmicas indesejáveis como fissuras, trincas ou até rachaduras, reações químicas prejudiciais, ou redução da resistência a longo prazo em função das altas temperaturas do concreto devido ao calor de hidratação. Eis então a grande motivação ao desenvolvimento do tema, pois tais temperaturas podem ser previstas mitigando grandes patologias.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O desafio da concretização de grandes obras para atendimento as necessidades da sociedade cada vez mais exigente, faz com que estas tenham performances cada vez mais arrojadas com execução em menores tempos e qualidade garantida. Desta forma um dos grandes problemas na execução das estruturas de obras civis utilizando concreto em massa passam a ser principalmente os processos de concretagem e cura. Sendo assim para a obtenção das características projetadas do concreto, deve-se realizar a cura conforme recomendações (BABU & PRAKASH, 1995). A cura tem objetivo de manter o concreto

saturado, mantendo a água até que os espaços da pasta de cimento fresca, tenham sido preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento (GOWRIPALAN, 1990). Segundo HANAI (2005) o processo de cura, para qualquer concreto que seja, deve ser cauteloso visando permitir que o concreto atinja a plenitude de suas qualidades.

Ocorre que para a manutenção da temperatura do concreto tanto no lançamento quanto nos primeiros ciclos de cura, é necessária a montagem de equipamentos que possam produzir gelo que manterão a temperatura do concreto adequada para garantir que a cura se processe de maneira a evitar fissuração e trincas. Tais estruturas representam mobilização e custos consideráveis ao projeto, dado a alta demanda de concreto e consequente produção de gelo tanto para correção das altas temperaturas externas quanto para adequação das temperaturas de reação química do concreto massa. Daí a importância em prever a temperatura utilizando metodologia científica que traga informações precisas para a tomada de decisão e inclusive antecipe uma solução, desenvolvimento de traço adequado neste caso, mitigando os custos no controle posterior das temperaturas o que poderia acontecer em vários outros processos.

Do ponto de vista socioeconômico, a aplicação comprovada de um traço que dispense tal estrutura contribuiria para a redução considerável de custos dos projetos que tenham no concreto massa seu principal componente. Tais projetos, devido a característica de médio/longo prazo de retorno financeiro, são na maioria das vezes encampados pela iniciativa pública e/ou financiamentos de órgãos ligados ao desenvolvimento econômico e que são também geralmente públicos por natureza.

Sendo assim, avaliar previamente o resultado de tais melhorias no traço do concreto antes de seu lançamento é de fundamental importância para garantir o sucesso do projeto.

1.3 OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetivo de avaliar a utilização da sílica na redução de temperatura das reações em pastas de cimento empregando dispositivo e método semiadiabático desenvolvido na pesquisa.

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Visando alcançar o objetivo geral, alguns tópicos específicos serão enfatizados tais como:

- Avaliar o uso da sílica ativa em pastas para posterior aplicação em traços de concreto massa;
- Propor um novo método semiadiabático para predição de temperatura de reação química em materiais cimentícios à base de cimento *Portland* destacando-se os aspectos que o diferenciam dos demais já empregados;
- Testar a aplicação da sílica em substituição ao cimento Portland e da metodologia proposta através de um planejamento experimental.

1.4 ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado conforme breve descrição dos capítulos que se segue.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema desta dissertação, relatando o objetivo geral e os específicos. Nas considerações iniciais é possível perceber a contextualização do tema e a conexão deste com o desenvolvimento desta dissertação. Faz-se também uma breve descrição do exposto em cada capítulo.

Já no segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o concreto massa buscando elucidar o conceito e facilitar o entendimento das principais diferenças entre o concreto massa e os concretos de volumes pequenos. Bem como trata as principais características do concreto massa. Mostrando a importância do controle de temperatura em grandes volumes de concreto e a necessidade de predição da temperatura. É feita ainda, uma revisão sobre calorímetros adiabáticos e é detalhada a proposta desta dissertação. Na revisão são apresentados os princípios de funcionamento de ambos, possibilitando o entendimento por analogia com a metodologia proposta. No detalhamento da proposta é mostrado o passo a passo desde a construção dos equipamentos até a utilização.

No terceiro são apresentados os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados. Neste capítulo é apresentado o planejamento e o passo a passo para a obtenção dos resultados. Como foi concebido o equipamento para predição da temperatura bem como os ensaios que foram planejados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios, bem como análise destes.

Então, no quinto capítulo, são feitas as conclusões embasadas nos resultados obtidos.

CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

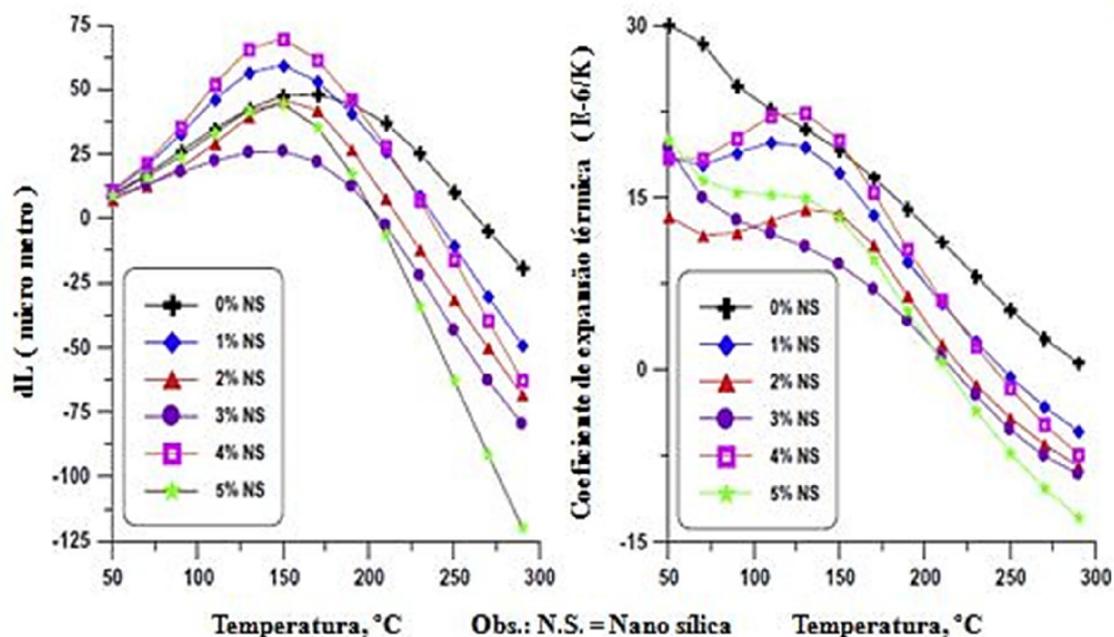
2.1 O CONCRETO MASSA E SUAS ESPECIFICIDADES

Este capítulo visa trazer uma revisão sobre o concreto massa, analisando o efeito do calor de hidratação e a aplicação da sílica ativa e sua contribuição ao aspecto geração de calor durante o processo de hidratação.

Os tópicos a seguir visam elucidar a diferenciação do concreto massa em relação a concretos convencionalmente utilizados em pequenos volumes, e ou sem a interferência do fator exotérmico da reação de hidratação.

Os concretos convencionais tendem a diferir dos com aditivos ou sílica ativa. DE ROJAS (1995) trata deste assunto mostrando o papel da sílica ativa no aquecimento durante a hidratação do cimento *Portland*. Os concretos que contam com adição de sílica ativa, nano sílica e ou aditivos de retardo tendem a apresentar curva de temperatura suavizada em seu pico de temperatura registrado nas primeiras idades, conforme evidencia HEIKAL (2014) na figura 01.

Figura 01 : Expansão térmica da pasta de cimento / nano sílica e hidratação aos 28 dias.



Fonte: HEIKAL (2014)

A partir do conceito físico da estrutura dos compostos químicos reagindo, gerando calor e conseqüentemente expandindo, haverá de se considerar alteração da distância entre

átomos, induzindo a formação de trincas de várias formas especialmente em estruturas expostas a temperaturas elevadas em curtos períodos (SERWAY, 2004).

A pasta de cimento curado e os agregados do concreto possuem diferentes propriedades de expansão térmica, o que explica diferentes mudanças volumétricas caso o concreto seja aquecido ou resfriado rapidamente. Tensões internas são geradas, causando trincas e fissuras. Valores típicos de coeficientes de expansão térmica da pasta de cimento curado estão entre $15 \text{ a } 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ou seja, aproximadamente duas vezes o dos demais agregados.

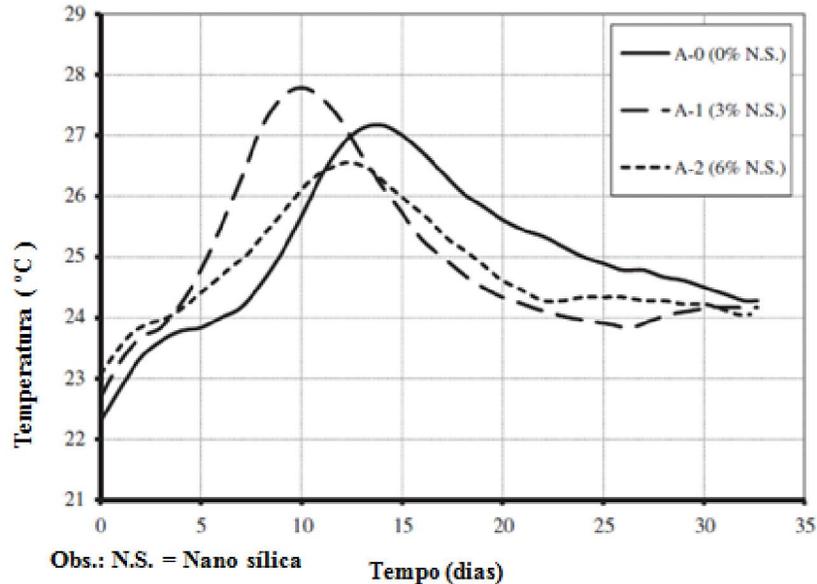
A composição dos sólidos, o volume de água e a porosidade da estrutura são fatores principais para a determinação do coeficiente de expansão térmica. O coeficiente de expansão térmica (CET), também pode ser afetado pela água do concreto, e em especial da água livre. A presença de grande quantidade de água é a principal razão para o alto coeficiente de expansão térmica (CET) no início de cura. O CET de um material compactado é menor do que a de um material poroso (SIAVASH, 2009). Tem sido relatado que, as propriedades físicas dos produtos de hidratação, tais como a densidade desempenham um papel importante na dilatação térmica de pastas de cimento.

Substituindo o cimento *Portland* por micro e nano sílica reduz-se a quantidade total de CH através da reação pozolânica e altera-se a porosidade da pasta. O consumo de CH devido a reação pozolânica reduz a taxa de dilatação térmica (TDT) e (CET) (SHUI, 2010). A Sílica ativa tende a atuar como material pozolânico de alta reatividade combinando rapidamente com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, sendo o principal produto responsável pela resistência de pastas de cimento *Portland* (SIMPLICIO, 1999; RAO, 2003).

Outro aspecto a se ressaltar trata-se da análise da influência da dosagem da sílica ativa em relação ao calor de hidratação nas primeiras horas. Em seu trabalho SAID (2012), analisa a partir dos resultados obtidos e expressos na figura 02, que o aumento na temperatura chegando a pico, durante 15 horas posteriormente a mistura, indica aceleração da taxa de hidratação devido a presença de nano sílica. Este aumento não pode ser atribuído ao efeito pozolânico da nano sílica, pois a reação pozolânica ocorre geralmente mais tarde, após a formação adequada de portlandite (RAO, 2003). Assim, pode ser atribuída à área de superfície muito elevada de partículas nano sílica (tamanho médio de partícula de 35 nm e uma superfície específica de $80 \text{ m}^2/\text{g}$), que atuam como locais de nucleação para as reações de hidratação. Estes resultados indicam que o papel de nano sílica não se limita aos efeitos

pozolânicos ou material de enchimento, mas também acelera a cinética de hidratação devido à sua natureza ultrafina.

Figura 02: Resultado do teste temperatura adiabática



Fonte: SAID (2012)

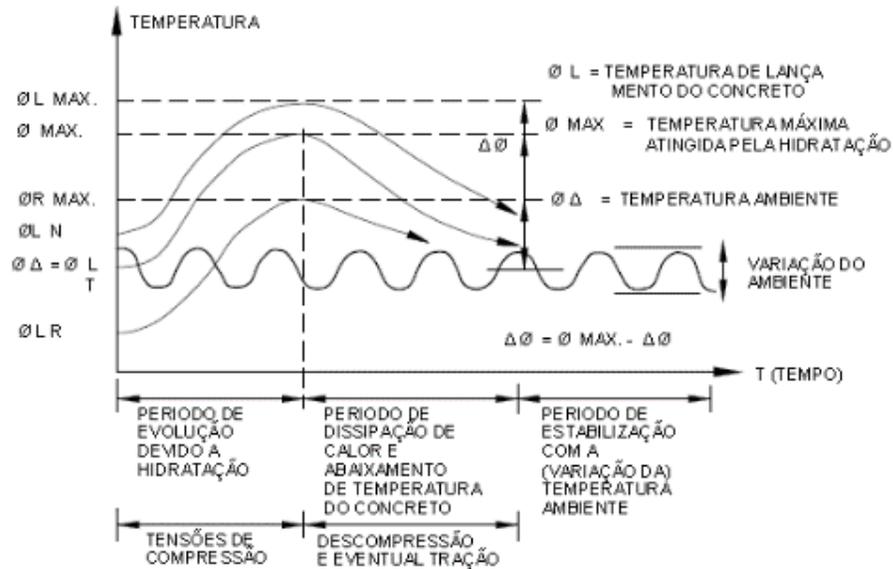
2.1.1 O CONCRETO MASSA

O Instituto americano de concreto (ACI), em seu guia de práticas (ACI 207.1R-05 - Guide to Mass Concrete), define concreto massa com sendo qualquer volume de concreto moldado *in situ*, com dimensões de magnitudes suficientes para que sejam tomadas medidas de controle a geração de calor e a variação de volume recorrente, a fim de minimizar a sua fissuração. Tem-se como exemplo, construções de grande porte, tais como barragens e fundações apresentando grandes dimensões e volumes, o que contribui para o aumento da temperatura no interior do bloco de concreto devido à liberação de energia do calor de hidratação. Ocorre em decorrência os efeitos de condução, radiação e convecção, bem como temperaturas iniciais e ambientes podem contribuir para a elevação da temperatura (COELHO, 2012).

Considerando as principais variáveis envolvidas no processo de lançamento do concreto massa, (ANDRIOLO 1985) esboça todo o cenário das principais variáveis envolvidas numa leitura especial na figura 03, onde observa-se as relações da temperatura do concreto durante o lançamento e hidratação com a temperatura ambiente. Todas essas variáveis são expressas em função dos diversos períodos, ou seja, hidratação e consequente aquecimento, dissipação e estabilização. Paralelo à etapa de hidratação observa-se ainda as

tensões de compressão enquanto na de dissipação observa-se a descompressão e eventual tração.

Figura 03: Processo de hidratação e temperaturas externas



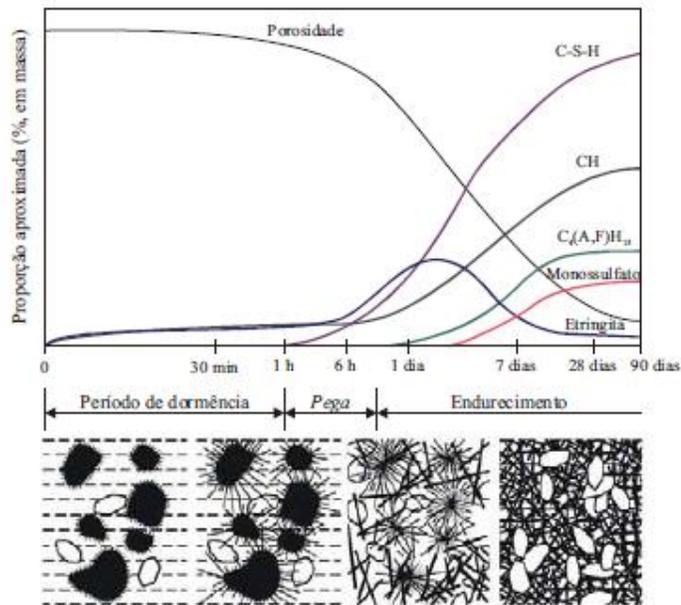
Fonte: ANDRIOLO, 1985

É muito comum, em função da grandiosidade de obras como usinas hidrelétricas por exemplo, que se faça alusão a utilização desse tipo de concreto. Recomenda-se análise cuidadosa das estruturas a serem concretadas. É o que trata PACELLI (1997), ao recomendar atenção especial em estrutura que possua a menor dimensão a partir de 0,50m, requerendo uma análise de suas tensões provocadas pela reação exotérmica do cimento com a água.

Já CORDEIRO (2006), traz em seu trabalho uma visão global do processo de hidratação do concreto ilustrando as fases de hidratação e respectivas microestruturas formadas na figura 04. Na primeira fase chamada período de dormência compreendida entre o momento de lançamento até uma hora depois.

A porosidade é alta e as reações resultam em baixa temperatura. Num segundo momento chamado de pega, compreendido entre uma e doze horas aproximadamente, observa-se uma queda de porosidade e aceleração das reações químicas. A terceira fase, também chamada de endurecimento, compreende o período posterior a pega e nele percebe-se a aceleração das reações químicas e respectivas substâncias.

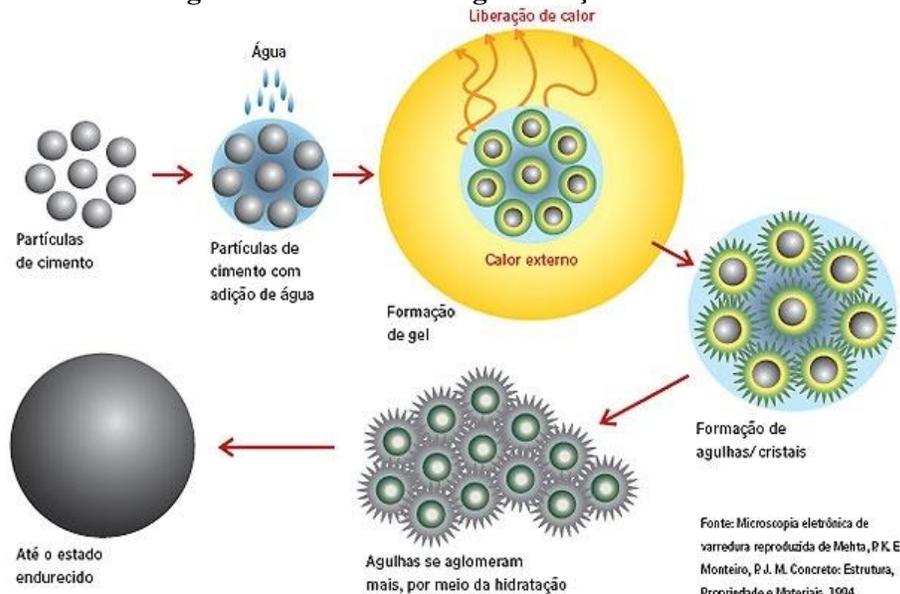
Figura 04: Resultado teste temperatura adiabática



Fonte: CORDEIRO (2006)

Analisando o processo de reação do cimento, principal componente desta reação, pode-se perceber os processos da reação do cimento. Ao receber água calor de hidratação conforme figura 05.

Figura 05: Processo de aglomeração do cimento



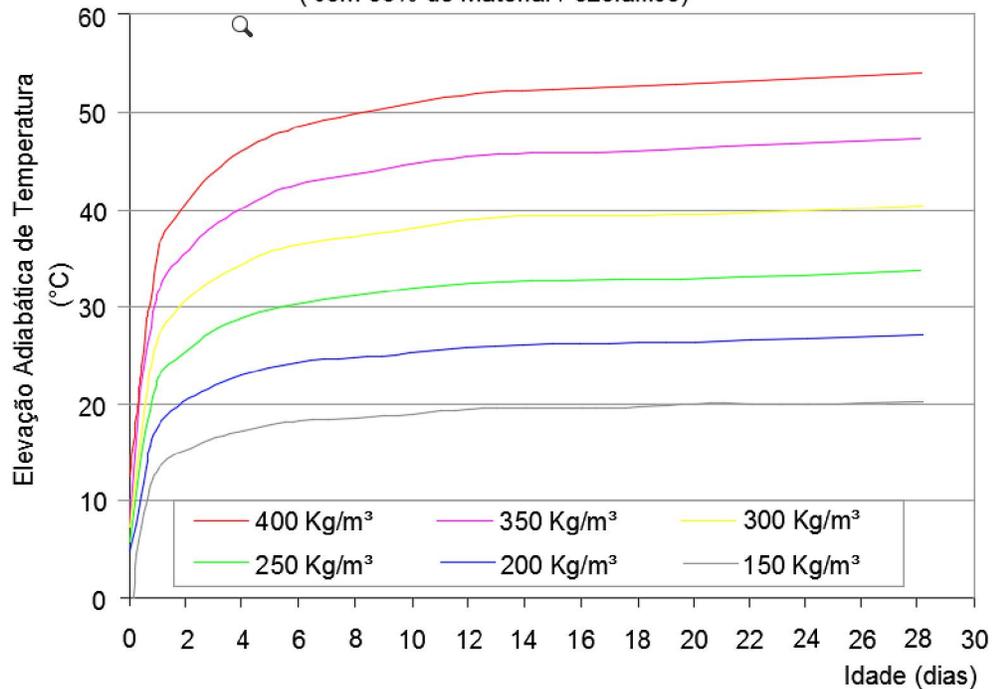
Fonte: Microscopia eletrônica de varredura reproduzida de Mehta, P.K, E Monteiro, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais, 1994

Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 1994.

Um aspecto importante a ressaltar, é o da relação direta da dosagem de cimento com a elevação de temperatura adiabática conforme ilustrado na figura 06. Onde fica evidenciado a

relação de maior dosagem com as maiores elevações de temperatura bem como as dosagens menores relacionadas a menores temperaturas.

Figura 06: Elevação adiabática típica para diferentes dosagens de cimento
 Concreto com Cimento Portland Pozolânico
 (com 35% de Material Pozolânico)



Fonte: ANDRIOLO, 2016

Uma análise detalhada da reologia do cimento, como proposto a seguir, poderia facilitar o entendimento do processo.

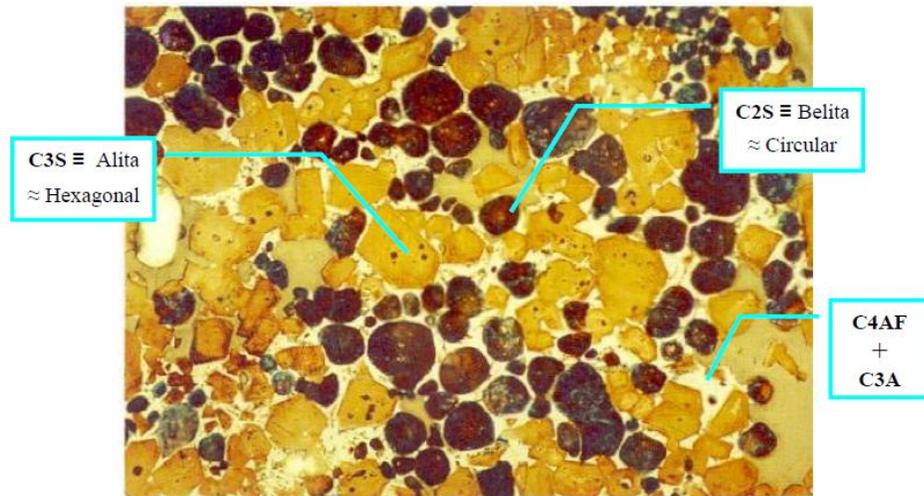
O cimento *Portland* possui 4 componentes principais (FROHNSDORFF, 1991), conforme ilustrado numa visualização do clínquer do cimento *Portland* elaborado pela *Lea's Chemistry of cement* na figura 07:

- $C_3S = (3.CaO) . (SiO_2)$;
- $C_2S = (2.CaO) . (SiO_2)$;
- $C_4AF = (4.CaO) . (AL_2O_3).(Fe_2O_3)$;
- $C_3A = (3CaO).(AL_2O_3)$.

Com a seguinte terminologia usual:

C = CaO A = AL₂O₃ S = SiO₂ H = H₂O F = Fe₂O₃

Figura 07: Micrografia ótica, luz refletida, do clínquer do cimento *Portland* não hidratado.

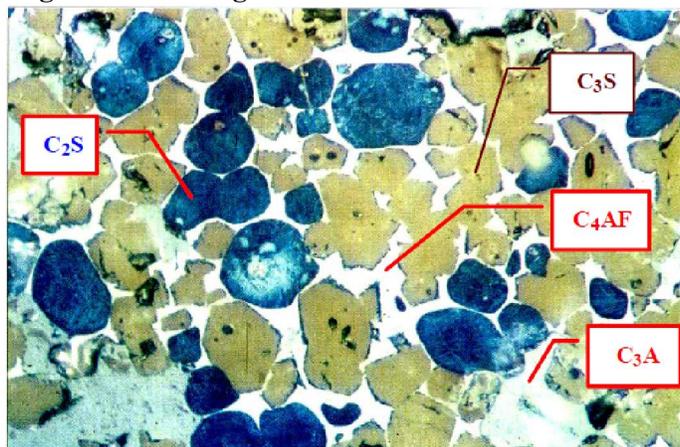


Fonte: FROHNSDORFF, 1991

1. Largura do campo da figura: 0,19 mm = 190 μ m (\approx espessura de 2 folhas de papel)
2. Os cristais amarelados, mostrando forma hexagonal, são C3S (Alita).
3. Os cristais marrons, escuros e arredondados, são C2S (Belita).
4. A massa entre os grãos de C3S e C2S é composta de ferrita C4AF e de C3A
5. Pode-se observar a predominância dos cristais de C3S (Alita).
6. O segundo componente mais freqüente são os cristais de C2S (Belita).

Outro autor (FROHNSDORFF, 1991) descreve sobre a micrografia deste cimento, de forma semelhante ao analisar a micrografia conforme ilustrado na figura 08.

Figura 08: Micrografia ótica



Fonte: DONALD, 1998

Largura do campo da figura=0.60 mm= 600 μ m (\approx espessura de 6 folhas de papel)

Castanho = C3S = Alita

Azul = C2S=Belita

A matriz é composta de:

1. Cinza Claro = C3A = Tri-cálcio Aluminato

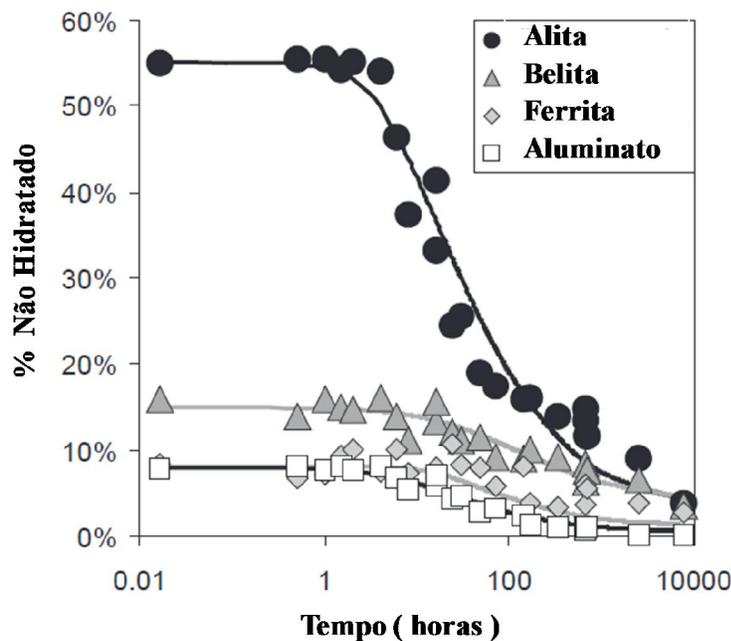
2. Branco = C4AF= Ferrita = Cálcio Alumino-Ferrita

Terminologia :

C = CaO; A = Al_2O_3 ; S = SiO_2 H = H_2O ; F = Fe_2O_3 ; S = SO_3

A partir destas análises do cimento *portland* não hidratado avaliamos na etapa seguinte o comportamento e reação destas substâncias durante o processo de hidratação, conforme figura 09.

Figura 09: Substancias cimento durante hidratação



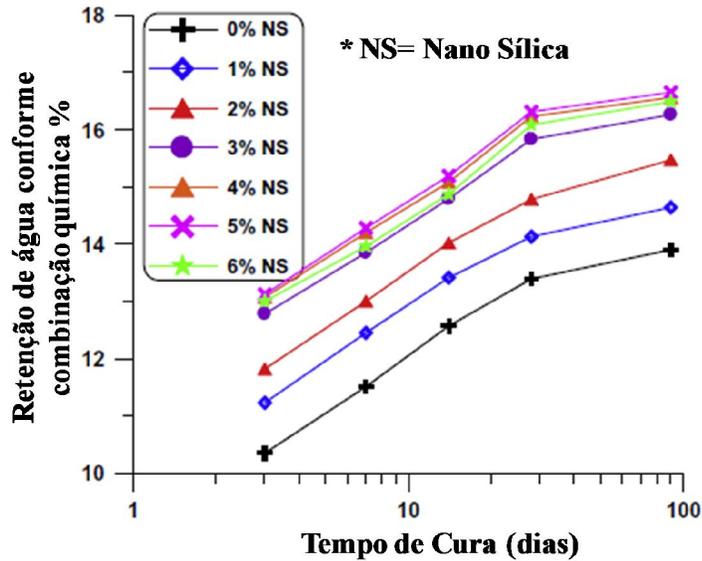
Fonte: LOTHENBACH, 2006

A figura 09 mostra a hidratação percentual dos componentes do clínquer em função do tempo em horas numa pasta de cimento de fator água/cimento = 0,50 e avaliação semi-quantitativa através de padrões XRD. A composição percentual em t=0 corresponde a composição básica do clínquer do cimento.

C3S = 56 % C2S = 15 % C3A = 9 % C4AF = 9 %

A partir da adição da água para hidratação e composição do concreto é possível observar a reação como demonstrado na figura 10.

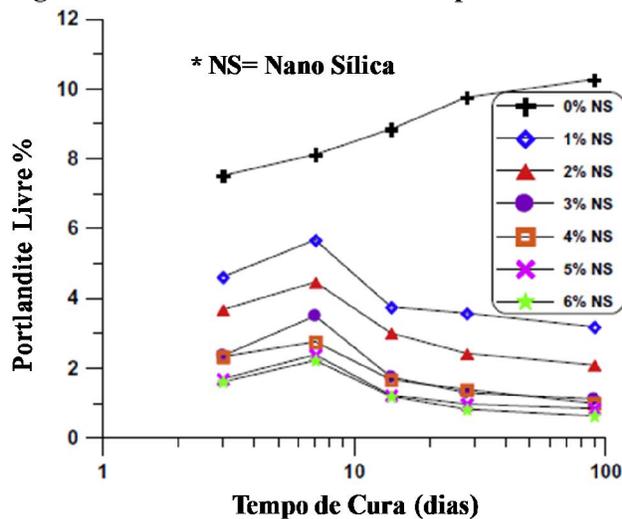
Figura 10: Gráfico da reação de hidratação do cimento a partir dos 90 dias



Fonte: HEIKAL (2013)

A partir da adição da água para hidratação e composição do concreto é possível observar a formação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ conhecido por portlandite devido a sua formação através da hidratação do cimento *Portland*, GLASSER (2005). Esta reação do cimento com a água é demonstrada em função do tempo conforme figura 11.

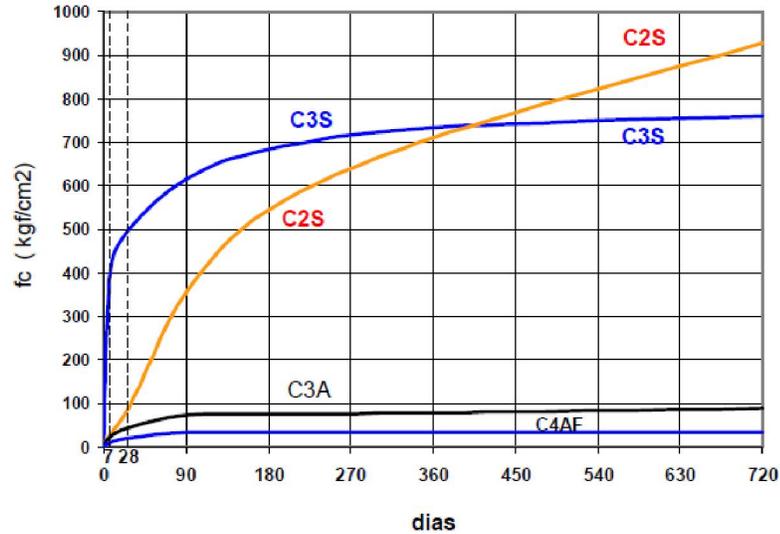
Figura 11: Portlandite observada a partir da hidratação do cimento



Fonte: HEIKAL, 2013

Em seu clássico e ainda referencial trabalho BOGUE (1955), demonstra a resistência dos componentes do cimento em função do tempo, onde é possível observar o destaque do componente alita (C3S) como o principal elemento a conferir resistência mecânica, ilustrado na figura 12.

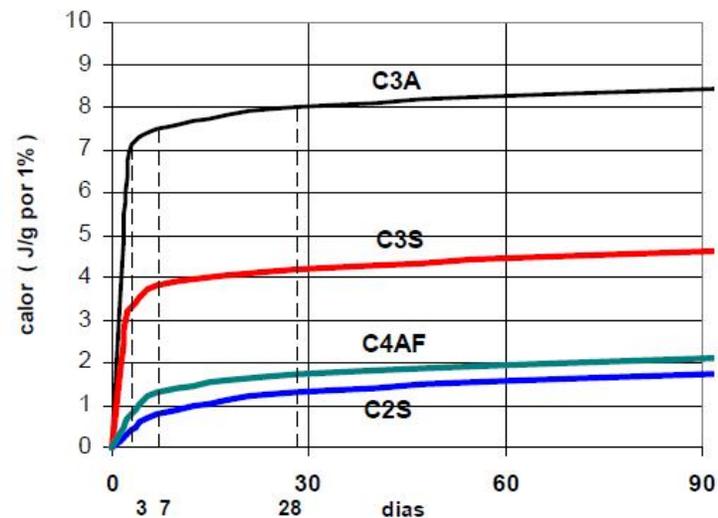
Figura 12: Química do Cimento *Portland*



Fonte: BOGUE (1955)

Por sua vez a reação química libera calor conforme ilustrado o desenvolvimento do calor em função do tempo na figura 13.

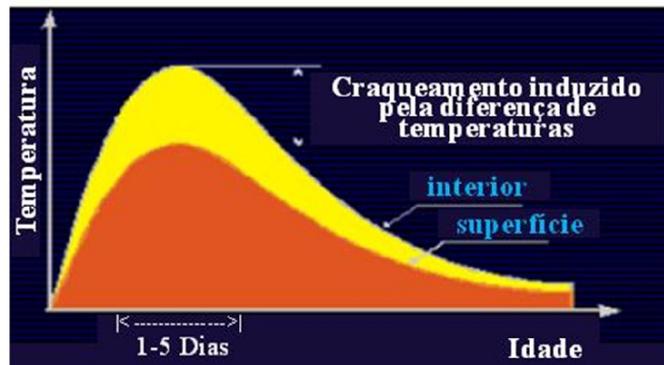
Figura 13: Calor de hidratação dos componentes do cimento



Fonte: GLASSER, (2005)

Considerando todo este contexto, ao buscarmos entender melhor as patologias originadas por causas térmicas, ressalta JAHREN (2011) que o fissuramento térmico é o resultado de grandes gradientes térmicos no concreto massa. Estes induzem tensão no bloco, com resultados mais rápidos na face externa em função da dissipação mais rápida que a interna. Se a tensão induzida exceder a resistência a tração do bloco, poderá causar o fissuramento. Dados históricos têm indicado que mantendo o diferencial de temperatura (interna em relação a externa do bloco) abaixo dos 35 °F ou 19 °C (JOHN, 2002 Apud KIM, 2010), foi suficiente para reduzir o risco de fissuramento térmico perceptível pelo aparecimento de fissuras e até trincas. KIM (2010) na figura 14, gráfico da temperatura em função do tempo para o concreto enquanto ilustra em amarelo indica a região onde as trincas podem acontecer em função das diferenças entre a superfície e interior da camada.

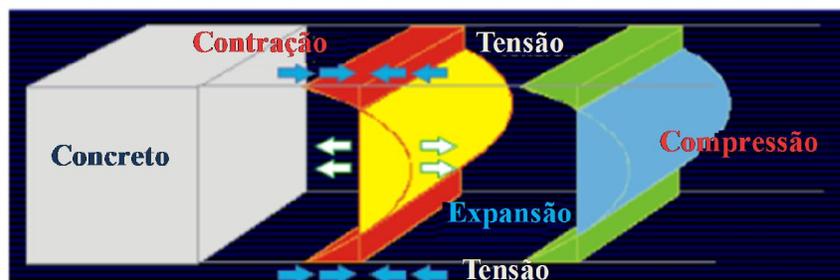
Figura 14: Diferença entre temperatura no interior e na superfície da camada de concreto



Fonte: KIM, 2010.

Já a figura 15 mostra o efeito das tensões percebidas pelo concreto, ou seja, em amarelo a expansão comprimindo as extremidades com restrições físicas ou não (cura química ou com água) que resfria a superfície e baixa a temperatura evitando o aquecimento das superfícies e consequente expansão térmica.

Figura 15: Mecanismo de fissuração em função da expansão térmica



Fonte: KIM, 2010.

D'AMBROSIA (2015) apresenta vários aspectos da mudança de volume nas primeiras idades do concreto, ou seja, durante suas 24 primeiras horas que podem influenciar na tensão de tração e formação de trincas no concreto:

- Retração química: ocorre devido a redução no volume absoluto de sólidos e líquidos na pasta de hidratada. A retração química continua a ocorrer, enquanto o cimento hidrata. Após etapa inicial, o calor persiste causando a formação de vazios na microestrutura. Neste caso (GAMBHIR, 2013), expõe soluções como a aplicação de agentes de expansão, tais como ferro granulado e produtos químicos, e sulfo-aluminato anidro, dentre outros que tendem a promover a oxidação de produtos químicos de ferro resultando na formação de óxido de ferro, que ocupa um volume de sólido aumentado. Estes aditivos são aplicados em fundações de máquinas pesadas, reparos (remendos), a produção de concreto protendido, grouting para condutos de membros pós-tensionados, grouting de fundações, consolidação *in loco* de pré-moldados e para a introdução de auto tensionamento no concreto. Cimentos de compensação auto expansiva são particularmente úteis para evitar rachaduras em estruturas de concreto de grandes áreas de superfície, tais como pistas de taxiamento, tabuleiros de pontes contínuas, grandes áreas de estacionamento, grandes lajes, dentre outras.

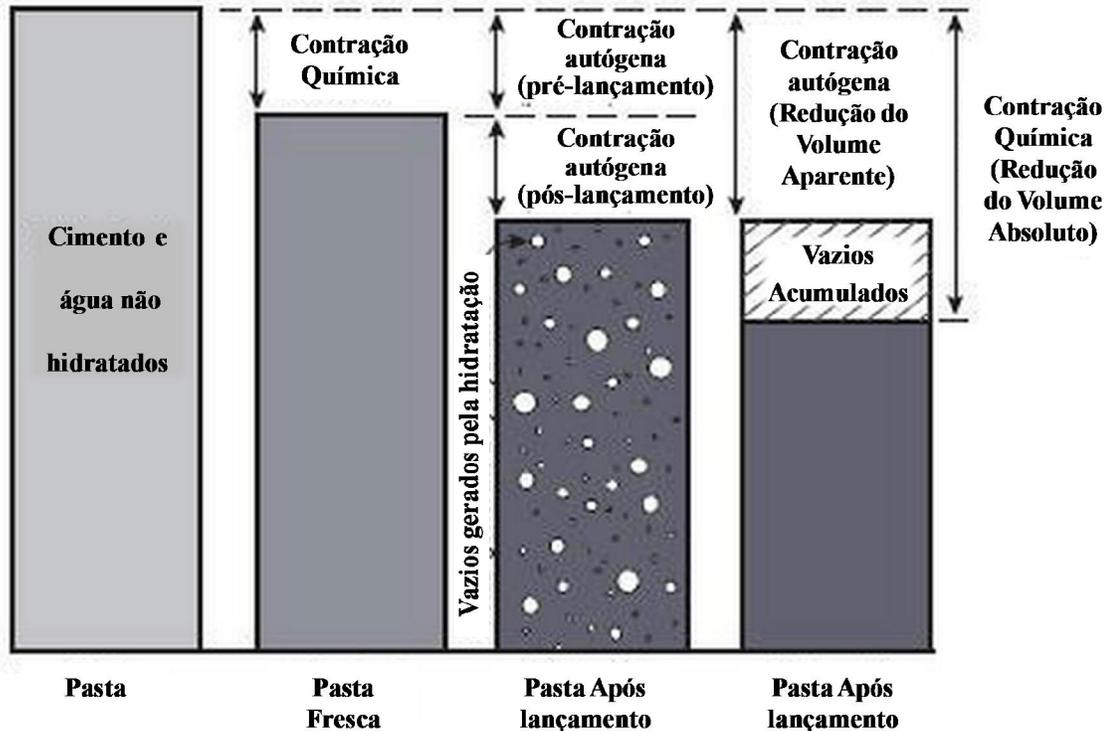
- Retração autógena: é a alteração dimensional de pasta de cimento, argamassa ou concreto, causadas por retração química (figura 16). Quando interna de umidade relativa é reduzida abaixo de um determinado limite (ou seja, a água extra não está disponível), auto dessecação da massa ocorre, resultando em uma redução uniforme de volume.

- Fissuras: Fluência é a deformação dependente do tempo de concreto sob carga sustentada. Durante a idade inicial, a fluência do concreto geralmente é três a cinco vezes superior ao cimento maduro. Aplicação de carga precoce devido a forças de construção ou operações de pré-esforço, portanto, pode ter um impacto significativo na deformação total. Além disso, a magnitude da fluência em tensão é maior do que na compressão, e fluência de tração precoce pode ser invocada como um mecanismo de relaxamento do estresse. Fluência é influenciada por secagem ou dessecação auto nas primeiras idades, e esta sinergia é muitas vezes referida como o efeito de Pickett, após Gerald Pickett, um pesquisador da *Portland Cement Association* ter descoberto o fenômeno na década de 1940.

- Inchaço: Concreto, argamassa e pasta de cimento às vezes vão inchar quando selada, ou na presença de água externa. Inchaço é geralmente causado por pressão de poros, mas pode ser acentuado pela formação de alguns produtos de hidratação expansiva. O inchaço não é significativo, entre 50-100 milionésimos na idade média.

- Expansão térmica: Enquanto o cimento hidrata, a reação fornece uma quantidade significativa de calor. Em grandes elementos, este calor está preso e pode induzir UMA expansão significativa. Quando mudanças térmicas são sobrepostas em cima retração autógena nas primeiras idades, pode ocorrer fissuração. Em particular, estresse térmico diferencial pode ocorrer devido a refrigeração rápida de elementos maciços.

Figura 16: Retração química e autógena



Fonte: D'AMBROSIA, 2015

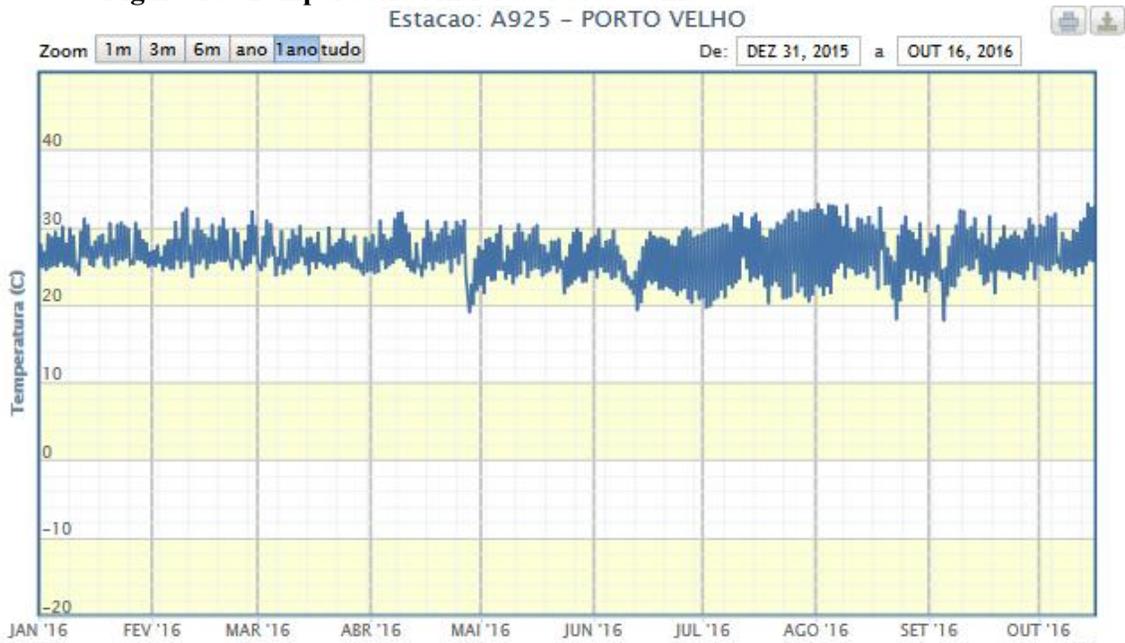
2.1.1 O CONCRETO MASSA NA REGIÃO NORTE

Considerar as condições climáticas, é muito importante para a execução de estruturas de concreto. TERZIAN (2007) ressalta a importância das condições climáticas, e estas devem ser monitoradas a partir de medidas de variação da temperatura em obra, temperatura do concreto no estado fresco, velocidade e direção predominante do vento e umidade do ar. Estas medições poderão influenciar na decisão do tecnologista responsável pela dosagem de concreto sobre a necessidade de refrigeração do concreto, na escolha do período de concretagem (i.e. diurno, vespertino ou noturno), consumo máximo de aglomerante, utilização de aditivos e procedimento de cura.

A Região Norte tem uma característica climática muito singular. Um período com seis meses de chuva e os outros seis de estiagem, o inverno e o verão respectivamente. Porto

velho, capital de Rondônia, estado federativo da região norte do Brasil, possui esse clima típico, apresentando uma temperatura média anual de 25°C e picos que já alcançaram valores acima de 40 °C no verão, conforme a figura 17. (Lima, 2008) argumenta em seu trabalho o impacto deste cenário, já que como a evaporação d'água tem relação direta com as altas temperaturas em regiões próximo à linha do Equador com temperaturas superiores a 18°C, fato que aliado à baixa capacitação dos trabalhadores da construção civil tende a piorar o quadro.

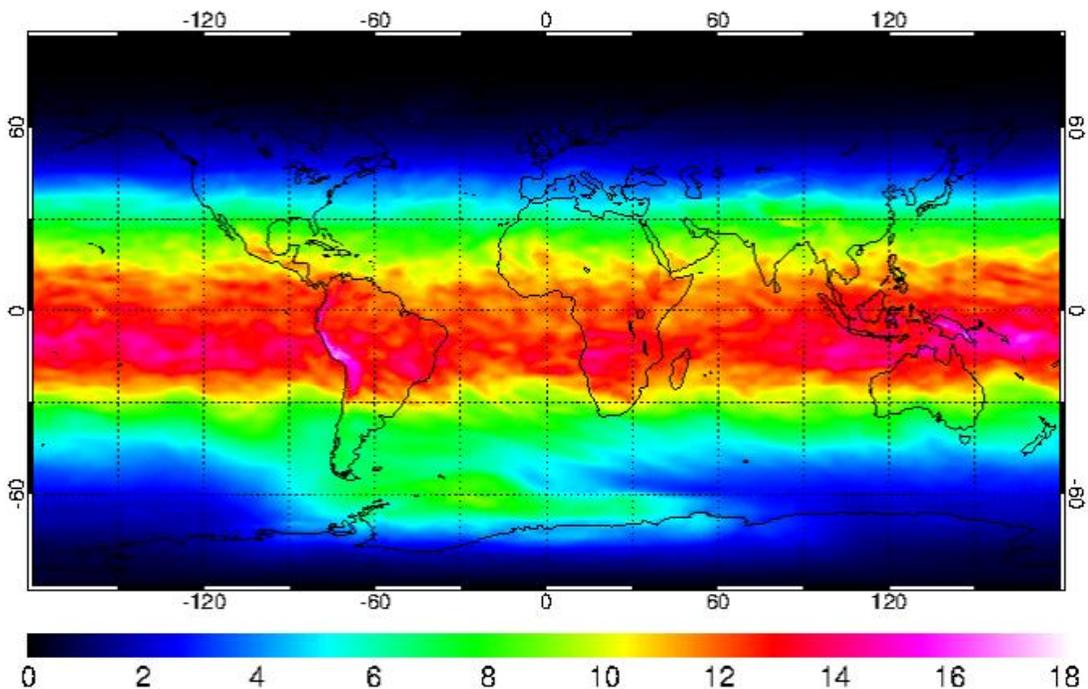
Figura 17: Temperatura Anual de Porto Velho



Fonte : INMET, 2016.

As temperaturas máximas na região, costumam superar 35° e, conforme a NBR-14931 em seu tópico 9.3.3, alguns cuidados devem ser tomados nessa situação. Quando a concretagem for efetuada em temperatura ambiente muito quente (35°C), devem ser adotadas as medidas necessárias para evitar a perda de consistência e reduzir a temperatura da massa de concreto. Imediatamente após as operações de lançamento e adensamento, devem ser tomadas providências para reduzir a perda de água do concreto.

Figura 18: Incidencia raios ultra violeta em Porto Velho



Fonte : Monitor Global, 2016.

Concretagens nesta região, conforme expõe as temperaturas na figura 18, tende a demandar maiores cuidados com a mão de obra e as peças metálicas embutidas no concreto, como é caso comum na execução de projetos em usinas hidrelétricas, onde tais peças tendem a absorver muito calor.

Em regiões com esse clima tropical, PACELLI (1997) argumenta que caso o concreto seja lançado sem refrigeração, ele assumirá valores próximos à temperatura média ambiente diária. Caso a estrutura esteja exposta nas primeiras idades a temperaturas mais altas, ela aquecerá ainda mais, e poderá ter resfriamento retardado. Uma alternativa recomendada e usual é a cura úmida. Por outro lado, um aspecto de relevante à manutenção das características de projeto é que os laboratórios de concreto ao elaborarem as dosagens, façam levantamentos e levem em consideração as condições de temperatura, umidade e vento durante a dosagem e cura do concreto *in loco*, LIMA (2008)

Segundo o Instituto Americano de Concreto em seu periódico ACI 305R_99 (1999), os potenciais problemas relacionados ao clima quente podem ocorrer durante todo o ano, mas especialmente no inverno e outono as trincas de idades iniciais devido a causas térmicas são mais frequentes devido às grandes diferenças de temperatura por cada período de 24 horas.

Em seu trabalho MEHTA e MONTEIRO (2006), chama a atenção ao significativo efeito do volume de água por unidade de massa de concreto em relação aos demais componentes quando se trata da temperatura do concreto. Daí a recomendação da água refrigerada como sendo uma das melhores indicações para controle da temperatura e manutenção da mesma nas reações químicas necessárias ao processo de maturação.

GAPINSKI e SCANLON (2006) cita o uso da sílica ativa como uma outra alternativa para controle de temperatura em estruturas de concreto massa. Tal aplicação contribui ainda para ganho de outras propriedades tais como ganho de resistência inicial, vida útil maior e resistência a ataques químicos dentre outros.

Considerando o cenário citado, uma das alternativas propostas pode ser a utilização de elementos de comportamentos pozolânicos. Daí a utilização da sílica ativa para avaliação da metodologia proposta neste trabalho com um fim duplamente útil, ou seja, não somente testar a metodologia, mas também a utilidade no controle de temperatura do concreto massa.

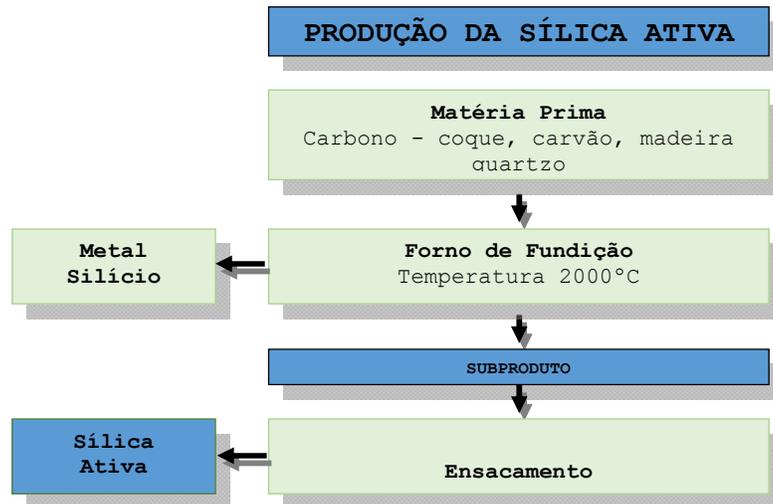
2.1.2 SÍLICA ATIVA

O princípio do uso da sílica ativa, ocorreu em função da geração do grande volume de resíduos provenientes das indústrias de ferrosilício e ligas metálicas, buscou-se sua adoção como pozolanas em estruturas off-shore visando a produção de um concreto com alto desempenho, CAD (MEHTA e MONTEIRO 1994). Além do ótimo resultado relacionado à durabilidade do concreto, também proporcionou à estrutura altos valores de resistência, permitindo o uso também com o intuito de se obter o concreto de alta resistência, CAR.

Dado a excelente performance da atividade pozolânica, pode ser denominada de pozolana de alta reatividade.

Seu processo produtivo tem origem nos grandes fornos, sendo um subproduto, de fornos elétricos de fusão do tipo arco voltaico, onde o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas, como indica fluxograma da figura 19.

Figura 19: Processo produtivo Silica Ativa Adaptado de SFA (2005).



Fonte: Autor.

Neste processo produtivo, com a formação do monóxido de silício gasoso (SiO), este se condensa ao entrar em contato com temperaturas mais baixas, formando o dióxido de silício (SiO_2), exibindo uma coloração que pode variar do cinza claro ao escuro. Originalmente, ainda em rocha antes de processada na produção metalúrgica, esta origina-se do quartzito conforme figura 20.

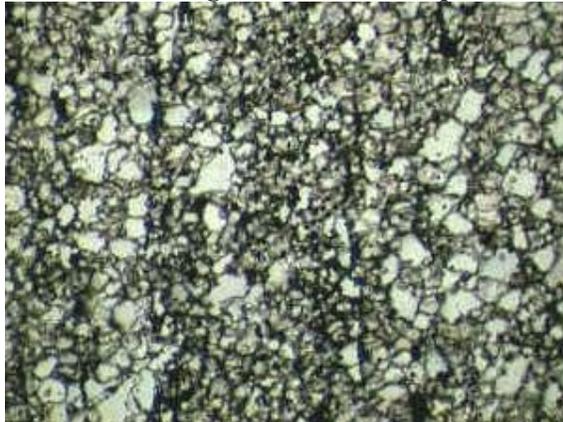
Figura 20: Quartzito apresentando foliação marcada pela biotita



Fonte: MACHADO (2016)

Esta rocha é matéria prima para materiais tais como tijolos e refratários de sílica, siderurgia, fusão em altos fornos, rocha ornamental (rústica, talhada, polida dentre outros). A figura 21 ilustra a textura deste material.

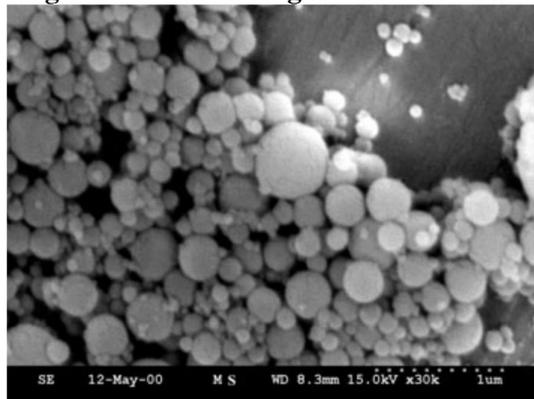
Figura 21 : Textura granoblástica em quartzito, aumento 40x



Fonte: MACHADO (2016)

Segundo MALHOTRA, CARETTE e SIVASUNDARAM (1994), a variação de cor está diretamente relacionada, ao excesso de carbono residual, proveniente do carvão combustível ou da madeira utilizada como carga para o forno. É possível ainda considerar que tal coloração seja o resultado do controle da queima. Tal controle pode responder pelo alto poder pozolânico quando a sílica é mantida na forma não cristalina e microestrutura celular como mostrado na figura 22, MEHTA e MONTEIRO (2006).

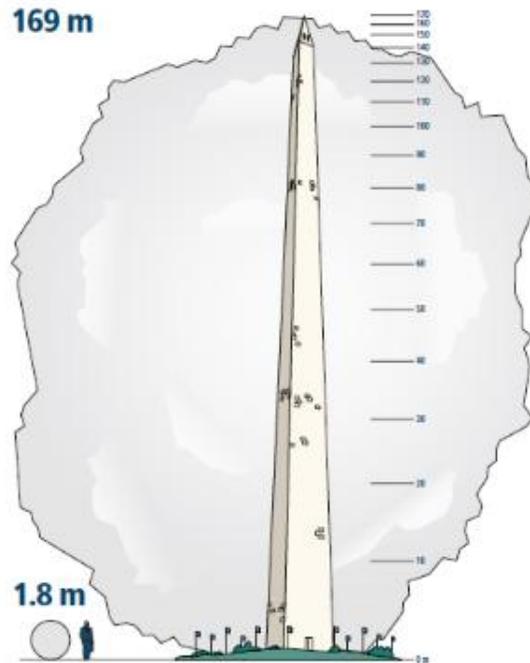
Figura 22: Microfotografia Eletronica



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2006)

A figura 23 e traz uma comparação das dimensões da sílica ativa em relação ao cimento *Portland*.

Figura 23: Grão de cimento (direita) e Silica ativa (esquerda)^{1*}



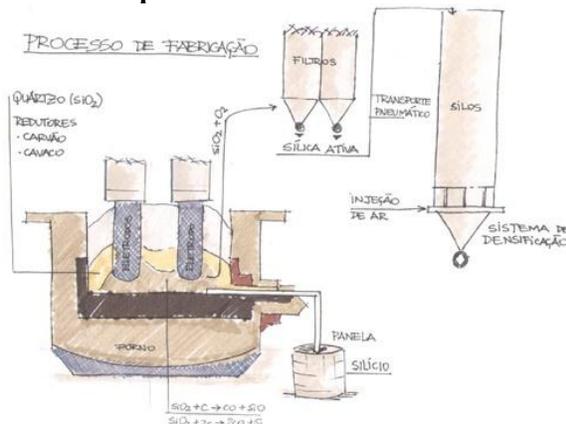
Fonte: SFA (2005)

Em sua tese, DAL MOLIN (1995) sustenta que a presença de uma cor mais clara é resultado da temperatura mais alta na parte superior do forno, conforme ilustrado na figura 24 fazendo com que a maior parte do carvão ascendente seja queimado. O que pode ser compreendido pela teoria de que quanto maior a temperatura, melhor poderá ser a queima do material. Uma outra influência pode ter origem no teor de ferro, embora com menor impacto.

A figura 24 ilustra o processo de produção da sílica ativa como subproduto do processo produtivo das ligas metálicas. Ou seja, na adição da sílica ativa junto as ligas metálicas esta se funde e gaseifica-se e é recolhida no estado sólido nos filtros de manga.

^{1*} homem e monumento de Washington respectivamente

Figura 24 : Sinótipo do Processo Produtivo da Sílica Ativa



Fonte: TECNOSIL (2017)

Observa-se que conforme as matérias primas utilizadas, tipo de forno, procedimentos operacionais utilizados, tipo de liga produzida dentre outros, se obtêm diferentes quantidades de sílica ativa por tonelada de liga metálica produzida. Na Tabela 1 se apresentam alguns valores médios indicados por Dastol (1984) apud Dal Molin (2005).

Tabela 1 : Quantidade de Sílica Ativa por tonelada de liga metálica produzida

Liga Metálica	Sílica Ativa
1000 Kg de Silício Metálico	550 Kg
1000 Kg de Ferro-silício 75%	350 Kg
1000 Kg de Ferro-silício 50%	90 Kg

Fonte: DAL MOLIN (2005)

A sílica ativa, um resíduo ou rejeito da indústria metalúrgica recebeu também várias outras denominações tais como, nano sílica, microssílica e fumos de sílica, contudo, a NBR 13956 (1997) estabeleceu-se como sílica ativa a denominação padrão no Brasil.

No Brasil, segundo Pesquisa Industrial Anual de Produtos, foram produzidas 71.806 toneladas em 2013 (PIAP, 2013).

Em seu trabalho CARMO (2006), cita que sílica ativa foi a primeira pozolana altamente reativa utilizada realmente com o objetivo de se alcançar altas resistências. As primeiras investigações tiveram como origem a Noruega, em meados da década de 60, sendo aplicada pela primeira vez numa estrutura de concreto no ano de 1971 (MALHOTRA, CARETTE e SIVASUNDARAM (1994); JONES (1997)). Esta linha de pesquisa se estendeu,

na década de 80, a outros países como Estados Unidos e Canadá, que coincidiu com o início da exploração comercial deste produto.

Ainda, com o início da comercialização da sílica na década de 80, observa-se que o comportamento do concreto com esta pozolana de alta reatividade, ainda não estava totalmente conhecido. Esta situação é relatada (CARMO, 2006), ao mencionar sobre poucas produções literárias da sílica ativa até o ano de 1983.

Apartir deste panorama, observou-se um crescimento no número de pesquisas visando o melhor entendimento da ação da sílica ativa no comportamento do concreto, que resultou na promoção de eventos internacionais como congressos e conferências sobre o assunto.

Em relação ao Brasil, a adoção da sílica ativa no concreto principiou debate em congressos no ano de 1984, contudo no 8º Congresso Internacional da Química do Cimento no Rio de Janeiro, que o assunto recebeu maior atenção.

Conforme MALHOTRA e MEHTA (1996), as recomendações da CSA – A 23.5 da Canadian Standard e ASTM C 311 indicam que a sílica ativa deve conter pelo menos 85 por cento de SiO_2 e no máximo 10 por cento de partículas maiores que $45 \mu\text{m}$ (peneira 325).

Debates e publicações começaram a ocorrer no Brasil, no início da década de 90, produzindo dissertações e teses sobre o uso da sílica no concreto onde abordavam o aspecto mecânico, como o de (DAL MOLIN, 1995; MORAES, 1990; RAMIRES, 1993) e outros que abordavam o aspecto da durabilidade, como o de (HASPARYK, 1999; WOLF, 1991; FORNASIER, 1995; ISAÍÁ, 1995; LOPES, 1999), que tiveram um grande papel na consolidação do conhecimento com relação a este assunto CARMO (2006).

A tabela 2 traz algumas características comparativas entre a sílica e outros materiais correlatos.

Tabela 2 : Comparação química e física das características do cimento, cinza e sílica

Substancia	Cimento Portland (%)	Cinza F (%)*c	Cinza C (%)*c	Cimento Escória (Branco) (%)	Sílica Ativa (%)
SiO ₂	21	52	35	35	85 – 97
AL ₂ O ₃	5	23	18	12	-
Fe ₂ O ₃	3	11	6	1	-
CaO	62	5	21	40	< 1
Finos *b	3,15	2,38	2,65	2,94	2,2
Uso Geral em concreto	Componente primário	Substituição ao cimento	Substituição ao cimento	Substituição ao cimento	Aprimoramento de propriedades

Fonte: SFA (2005) ²

TALERO e RAHHAL (2009) concluem em seu trabalho que a alta, rápida e inicial atividade pozolanica é mais específica que genérica, estimulada mormente pela hidratação do C₃A que C₃S, mas apenas nas primeiras 16 horas observadas naquele trabalho. Observa-se nas figuras 25 e 26 que o comportamento da sílica pode variar conforme cimento utilizado. Na figura 25 a maior dosagem de sílica ativa (20%) foi responsável pela maior liberação de energia superando inclusive a liberação de energia apresentada pela amostra do cimento A (14% C₃A) utilizado sem adição de sílica ativa em substituição.

²

Nota: Valores aproximados. Valores de materiais específicos poderão variar.

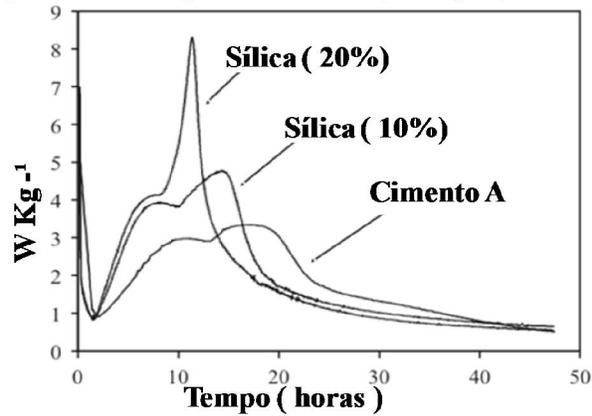
Fonte: SFA e Kosmatka, Kerkoff e Panarese (2002).

*b – Medições da área de superfície para a sílica ativa por meio do método de adsorção de nitrogênio. Outros por método de permeabilidade ao ar (blaine).

*c – Classificação e especificações de Cinzas conforme ASTM C618.

Através da figura 25 as dosagens e respectivas performances ficam melhor evidenciadas.

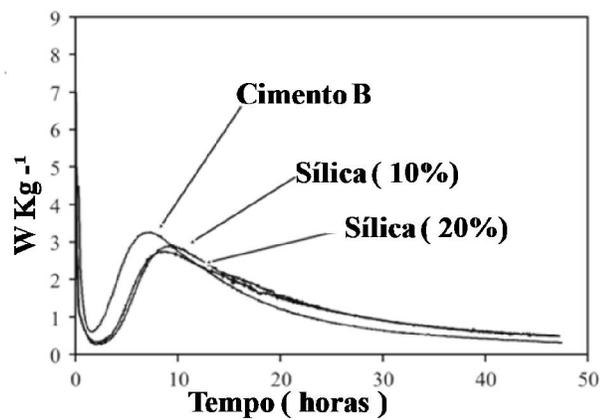
Figura 25: Energia Cimento A (W Kg⁻¹)



Fonte: Talero e Rahhal (2009)

Já na figura 26 esta mesma dosagem apresentou comportamento oposto, ao liberar menos energia que a amostra do cimento B ($\approx 0\%$ C₃A) e a dosagem de sílica a 10%.

Figura 26: Energia Cimento B (W Kg⁻¹)



Fonte: Talero e Rahhal (2009)

2.1.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO

Observa-se que algumas propriedades são elencadas por vários autores do assunto, como sendo primordiais para o projeto e controle da temperatura do concreto (ANDRIOLO, 2016; DE FARIA, 2004; MEHTA e MONTEIRO, 2006; PACELLI, 1997). Sendo assim exploradas aqui, já que esta dissertação visa contribuir para a predição e controle da temperatura do concreto. Daí a motivação como segue através de revisão sobre as quais seguem o calor específico, a condutividade e a difusividade.

2.1.3.1 CALOR ESPECÍFICO

O calor específico é uma das principais propriedades que influenciam na capacidade de perceber calor, sendo expressa numericamente pela quantidade de calor que deve ser cedida à unidade de massa do material para a mudança de temperatura BAUER et. al. (2013).

Observa-se a relevância em pontuar que o calor específico até certo ponto tem correlação com a temperatura inicial e o intervalo de temperatura (YOUNG e FREEDMAN, 2008).

Esta propriedade pode determinar quanto de calor é fornecida para que a substância eleve sua temperatura (SATO e RAMOS, 2014). A Tabela 3 mostra algumas substâncias e respectivos valores de calor específico.

Tabela 3: Calor específico de algumas substâncias

Substancia	c (cal/g ° C)
Água	1
Álcool	0,60
Alumínio polido	0,21
Asfalto	0,22
Cimento	0,20
Cobre	0,095
Ferro	0,11
Gesso	0,26
Pinho (madeira)	0,65
Vidro comum	0,20

Fonte: SATO e RAMOS (2014)

Pode-se afirmar que o calor específico simula a capacidade térmica do concreto e é pouco influenciado pelas características mineralógicas do agregado, mas aumenta consideravelmente com a elevação de umidade e diminuição da massa específica do concreto. Para concretos convencionais pode assumir valores entre 840 e 1.170 J/Kg °C (NEVILLE, 2015).

2.1.3.2 CONDUTIVIDADE

A condutividade térmica, segundo (YUNUS e GHAJAR, 2012), é possível de ser definida, como sendo a propriedade que representa a capacidade do material em conduzir calor, especificado através de uma taxa de transferência de calor. Considerando a unidade de comprimento do material em questão por unidade de área por unidade de diferença de temperatura. Tal fluxo é determinado a partir de a uma taxa constante (ASHBY, 2013). Através da tabela 4 é possível visualizar tal característica de alguns materiais.

Tabela 4: Condutividade Térmica de alguns Materiais

Material	Condutividade térmica [cal/(h*cm²*°C*cm)]	Material	Condutividade térmica [cal/(h*cm²*°C*cm)]
Cobre	3400	Ouro	2500
Alumínio	1900	Latão 70-30	1000
Polietileno de Alta densidade	4 – 4,5	Polietileno de Baixa densidade	2,9
Papel	2,3	PVC Flexível	1,9 – 2,1
Poliestireno	0,9 – 1,9	PVC Rígido	1,4
Pinus	0,89	Lã de vidro	0,32
Cinza do Carvão	9,2	Espuma de poliuretano	0,28
Ar a 38°C	23	Polipropileno	1,0 – 1,4

Fonte: CARPES JR (2014)

No caso do concreto, pode ser entendido como a característica que o mesmo possui de conduzir calor sendo caracterizada pela relação entre o fluxo de calor e o gradiente de

temperatura. Podendo ser definida como a velocidade do fluxo de calor através de uma espessura unitária, sobre uma área unitária, dos materiais submetidos a uma diferença de temperatura unitária entre as duas faces paralelas (PACELLI, 1997).

NEVILLE (2015) enuncia que a condutividade do concreto comum depende da composição e que ao saturar pode variar entre 1,4 e 3,6 J/m²*s °C/m. O grau de saturação é o principal fator. Em concretos leves, por exemplo, um aumento de 10% no teor de umidade aumenta a condutividade em 50%.

Já a tabela 5 apresenta a condutividade de alguns materiais agregados na composição do concreto ou argamassas.

Tabela 5: Valores típicos de condutividade térmica

Tipo de agregado	Massa específica úmida do concreto (Kg /m³)	Condutividade (J/m²*s °C/m)
Quartzito	2440	3,5
Dolomito	2500	3,3
Calcário	2450	3,2
Arenito	2400	2,9
Granito	2420	2,6
Basalto	2520	2,0
Barita	3040	2,0
Folhelho expandido	1590	0,85

Fonte: NEVILLE (2015)

2.1.3.3 DIFUSIVIDADE

A difusividade pode representar a razão entre a capacidade de um material conduzir e armazenar calor RODRIGUES et. al. (2015).

Segundo YUNUS e GHAJAR (2012), é a propriedade do material em trocar temperatura com o meio em função da área e tempo. Podendo ser entendido como a razão entre o calor conduzido e o calor armazenado, conforme equação 1.

$$\alpha = \frac{\text{Condução de calor}}{\text{Armazenamento de Calor}} = \frac{k}{\rho c_p} = (m^2/s) \quad (1)$$

Observando a fórmula acima, materiais com alta condução ou baixa capacidade de calor terá proporcionalmente alta difusividade. Por outro lado, materiais que armazenam calor com facilidade e tendem a liberar pouca energia, possuem baixa difusividade.

Observa-se na tabela 6 alguns exemplos de materiais e respectivos valores de difusividade.

Tabela 6 : Difusividade de Alguns Materiais

Material	α , m² / s
Prata	149 x 10 ⁻⁶
Ouro	127 x 10 ⁻⁶
Cobre	113 x 10 ⁻⁶
Alumínio	97,5 x 10 ⁻⁶
Ferro	22,8 x 10 ⁻⁶
Mármore	1,2 x 10 ⁻⁶
Concreto	0,75 x 10 ⁻⁶
Tijolo	0,52 x 10 ⁻⁶
Água (ℓ)	0,14 x 10 ⁻⁶
Madeira (Carvalho)	0,13 x 10 ⁻⁶

Fonte: YUNUS e GHAJAR (2012)

LAMOND e PIELERT (2006) alertam para a manutenção das unidades dimensionais quando o cálculo é feito utilizando a condutividade, massa específica e o calor específico. Pois a difusividade resulta da consolidação de três propriedades que aparecem em equações diferenciais que definem o fluxo de calor e a capacidade de armazenamento sob condições instáveis.

Enfim, a difusividade térmica permite indicação clara da taxa de elevação da temperatura em determinado ponto (NOORT, 2011).

PAULON (1987) apresenta valores de difusividade conforme tabela 7, onde se estabelece relação direta entre a difusividade e a propagação do calor através do concreto.

Tabela 7 : Valores de difusibilidade térmica em função do tipo de agregado

Tipo de agregado graúdo e procedência	Difusibilidade Térmica (m ² / dia)
Cascalho (quartzo) - Balsas Mineiro	0,192
Quartzito - Estreito	0,187
Cascalho (quartzo) - São Felix	0,168
Cascalho (quartzo) - Ilha Grande	0,150
Calcário - Itaberá	0,130
Gnaisse - Boa Esperança	0,123
Gnaisse - Angra	0,096
Metagrauvaque - Tucuruí	0,095
Basalto - Tucuruí	0,078
Basalto - Ilha Grande	0,076
Basalto -Itaipu	0,066
Basalto -Itumbiara	0,062

Fonte: PAULON (1987)

2.2 PREDIÇÃO DA TEMPERATURA DE REAÇÃO QUÍMICA: CALORÍMETROS E METODOLOGIAS

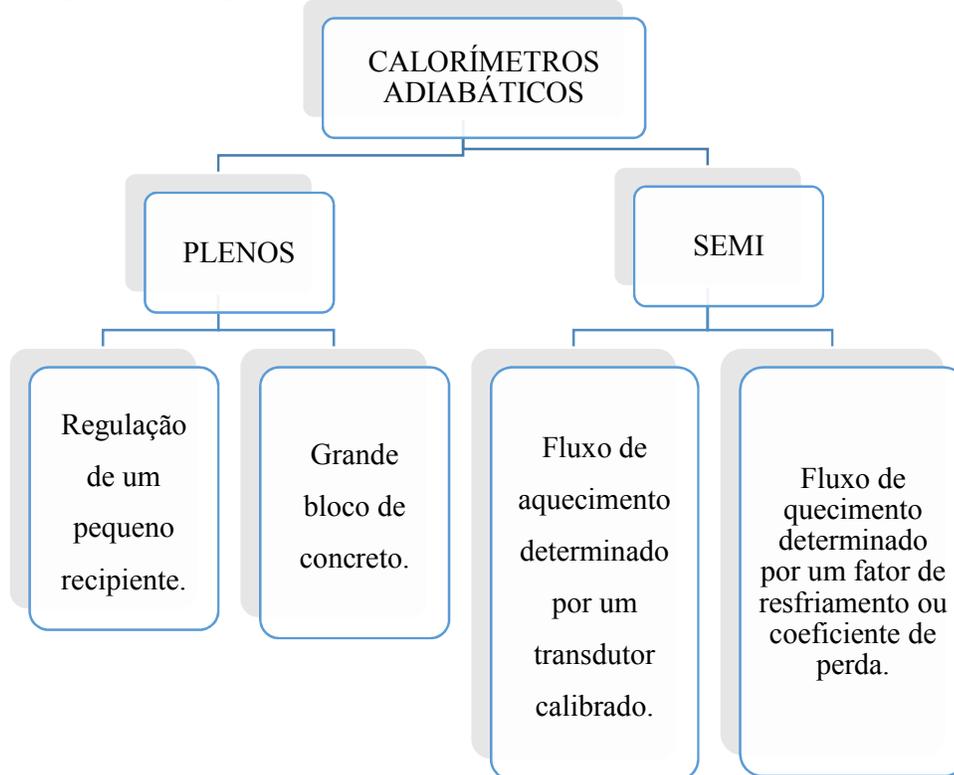
A temperatura da massa do concreto é importante variável a ser monitorada visando manter a integridade da estrutura conforme enfatizado nos capítulos anteriores. Prever o comportamento térmico da temperatura após o lançamento do concreto também é alvo de um projeto a parte ao projeto estrutural. Sendo assim faz-se necessário avaliar o comportamento do traço versus sua capacidade de atendimento ao projeto térmico. Ao fazer este monitoramento do comportamento experimental do concreto para um determinado traço ainda em laboratório, economiza-se tempo, diminui-se custo e melhoram-se as possibilidades de se obter melhor resultado também na qualidade final da estrutura.

Grande parte deste cenário pode ser embasado pelo que considera WADSO (1968), ao afirmar que a princípio mudanças de entalpia acompanhada de uma reação sempre pode ser

calculada pela mudança de temperatura, que assim posto considera-se válido para todas substancias participantes.

Em seu trabalho JONASSON et al. (2013) traz um levantamento sobre as principais metodologias atualmente propostas e ou já em uso, sendo algumas padronizadas por organismos certificadores como indicado na figura 27.

Figura 27: Diagrama esquemático dos tipos de calorímetros



Fonte: JONASSON (2013)

Estudos mostram uma tendência em relação a avaliação das tecnologias de medição do calor específico do cimento. Observa-se através destes, novas tecnologias tendendo ao desenvolvimento de métodos de condução e semi-adiabáticos. Em trabalho desenvolvido em colaboração com Heidelberg Cement e Dyckerhoff e o Instituto de pesquisa para a Indústria do Cimento alemão, ARNDT (2007) iniciou um estudo com 24 laboratórios de 6 países diferentes. Cada participante testou cinco amostras de cimento diferentes através da realização de quatro medições individuais por amostra. Destes laboratórios 21 utilizaram o método de condução com base no Método Nordtest NT compilação 505, utilizaram o método padronizado de solução (EN 196-8) e 3 utilizaram o método semi-adiabático (EN 196-9). Os

dois com repetibilidade (4,6 vs. 8 J / g) e reprodutibilidade (13,6 vs. 17,6 J / g) respectivamente.

Os de condução apresentaram-se melhor que os tradicionais métodos de solução, se considerados apenas os instrumentos de acordo com as exigências da Nordtest Método NT BUILD 505. Observou-se que o calor de hidratação determinado por calorimetria de condução era consistentemente mais elevado do que o valor obtido por meio do método de solução. Uma revisão do “estado da arte” nos diz que, essa diferença média foi de cerca de 22 J / g. Este desvio sistemático não é satisfatório e deve ser tratado no âmbito da padronização pretendida de calorimetria de condução de calor como um método de referência adicional para determinação do calor de hidratação do cimento.

Esta amostragem traz indicação primária da temperatura interna do bloco. Tal indicação da temperatura interna do bloco é de grande importância, considerando a relevância do coeficiente de expansão térmica para as demais características do concreto.

2.2.1 Calorímetro tipo Condução Adiabática

2.2.1.1 Conceito e princípio de funcionamento

Este procedimento, segundo a NT BUILD 505 (2003) de avaliação tipo condução adiabática, avalia o montante de energia do calor de hidratação no período de 3 a 7 dias a 20°C em pequenas amostras de pasta de cimento com relação água/cimento de 0,5.

A preparação se dá com amostras representativas em relação ao montante que se pretende avaliar, normalmente são feitas duas medições por amostra.

Seu princípio de funcionamento se dá ao captar as diferenças de temperaturas entre a amostra a ser analisada em relação a uma amostra de referência, utilizando sensores de temperatura. O calorímetro por condução de calor isotérmico aqui chamado de calorímetro tipo condução adiabática, consiste de um recipiente com dois sensores. A amostra é colocada numa ampola, e esta ampola num porta-ampola que fica em contato com o sensor de temperatura. O resultado é determinado a partir dos resultados obtidos nas diferenças percebidas pelos sensores de fluxo de calor na amostra considerada e na de referência.

Nestes calorímetros, os sensores de fluxo de calor captam tanto o calor das amostras quanto do ambiente.

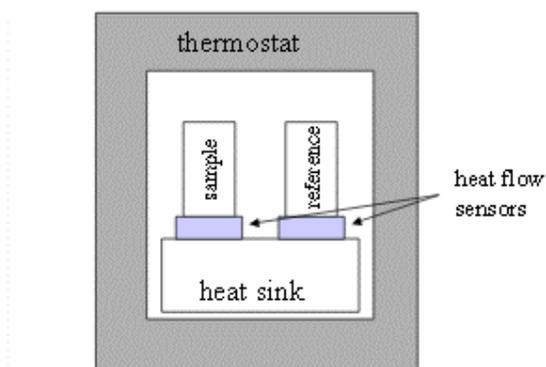
A figura 28 ilustra o arranjo geral comum, ainda que possam variar bastante. As tolerâncias nos resultados podem variar em torno de 3% aos 3 dias para o cimento *Portland* padrão.

2.2.1.2 Equipamento

Recomenda-se equipamentos tais como:

- Balança com uma reprodutibilidade de pelo menos 0,05 g (isto é, uma equilibrar com uma resolução de 0,01 g);
- Transparente copos, por exemplo, 250 copos ml de vidro;
- Um dispositivo para adicionar rapidamente uma quantidade conhecida de água;
- Dispositivos de mistura de aço inoxidável;
- Ampolas que se encaixam nos suportes de ampolas do calorímetro;
- Funis para facilitar a cobrança dos frascos.

Figura 28 : Princípio de funcionamento wattímetro tipo condução adiabática



Fonte: NT BUILD 505

2.2.1.3 Calibração

Neste caso, a calibração precisa ser feita em intervalos regulares para determinar o coeficiente de calibração. Caso os coeficientes de calibração encontrados, sejam maiores que 2% de um para outro resultado, estes devem ser repetidos até que duas calibrações fiquem dentro do limite. A duração dos intervalos de tempo é dependente do instrumento e o laboratorista. Um instrumento novo pode ser calibrado duas vezes por mês até que se familiarize com o procedimento.

Depois disso, a calibração pode ser feita a cada três meses. Retorna para calibrações de duas vezes por mês, se nova mão de obra for usar o instrumento ou se suspeitar de problemas com o instrumento. O aquecedor pode ser móvel (Colocado numa ampola de

amostra) ou fixos (permanentemente colocado no porta-ampola). Em qualquer caso, é importante que exista uma boa condução de calor a partir do aquecedor para o sensor de fluxo de calor.

2.2.1.4 Procedimento de teste

O procedimento segue em cinco etapas:

1. Calibração;
2. Determinação do valor de referência;
3. Mistura e moldagem;
4. Medição
5. Tratamento dos dados.

2.2.1.5 Expressão dos resultados

Dentre duas amostras tiradas da mesma mistura, caso os resultados difiram em 3% as medições devem ser rejeitadas. Para instrumentos com somente um calorímetro, as duas amostras devem ser coletadas por ao menos duas misturas.

2.2.2 Calorímetro tipo Solução Adiabática

2.2.2.1 Conceito e princípio de funcionamento

Historicamente MONK e WADSO (1968), considera que o calorímetro de fluxo tenha sido desenvolvido inicialmente a partir dos estudos de taxa de reação ou entalpia da titulação.

No arranjo geral consiste de um recipiente metálico (i) com uma unidade de aquecimento centrada (ii), rodeada pela unidade calorimétrica (iii). A unidade calorimétrica consiste de sensores de fluxo rodeado por sensores térmicos que estão em contato com o recipiente metálico. O recipiente metálico é termicamente isolado e imerso numa banheira termostática.

Os líquidos calorimétricos são bombeados da unidade de calor para a dos sensores e de lá para o calorímetro externo. O sinal registrado em um experimento é o diferencial de dois sensores térmicos e interferências externas são consideradas.

O princípio de funcionamento se baseia na união de dois líquidos calorimétricos numa zona de mistura da célula de fluxo. Uma taxa de fluxo constante dá origem a um efeito de calor constante na célula calorimétrica. Se este efeito do calor for por tempo suficiente, condições de estado estacionário será estabelecido, o calor gerado na célula por unidade de tempo ser igual ao calor transportado para fora da célula. Utilização de condições de estado estacionário é o método mais preciso de operação traduzindo o estado presente.

A maior parte do efeito de calor gerado, vai em estado estacionário ser transportado a partir da célula por condução de calor através do envolvimento ao sensor de temperatura, e uma fração menor poderá se dispersar e serão perdidos no intervalo de ar entre as partes da superfície da célula de fluxo e que não estiverem em contato com o sensor de temperatura.

O recipiente metálico ou revestido por teflon receberá a amostra como segue.

O método, segundo a NT TR 522, visa encontrar o calor total produzido durante o processo de hidratação do cimento durante período de 3 a 7 dias.

A preparação se dá através da dissolução das amostras em solução de ácido fluorídrico e nítrico num recipiente coberto por teflon tendo a partir daí a temperatura medida e convertida.

A diferença entre o calor produzido entre pastas hidratadas e não hidratadas dissolvidas em ácido (mesma condição de completa dissolução) é tido como o calor produzido durante a hidratação.

A técnica somente é usada para análise de pasta de cimento e o procedimento com ácidos fortes são atualmente regulados por normas de segurança, tornando o método de difícil aplicação.

Um problema potencial é que este método não funciona bem se os ácidos não dissolverem a pasta de cimento e o cimento hidratado no mesmo estado. Este método não funciona bem em alguns tipos de cimentos, embora seja tradicional e padronizado pelas normas ASTM C186 e EN 196-8 (CEN 1994).

2.2.2.2 Equipamentos e Materiais

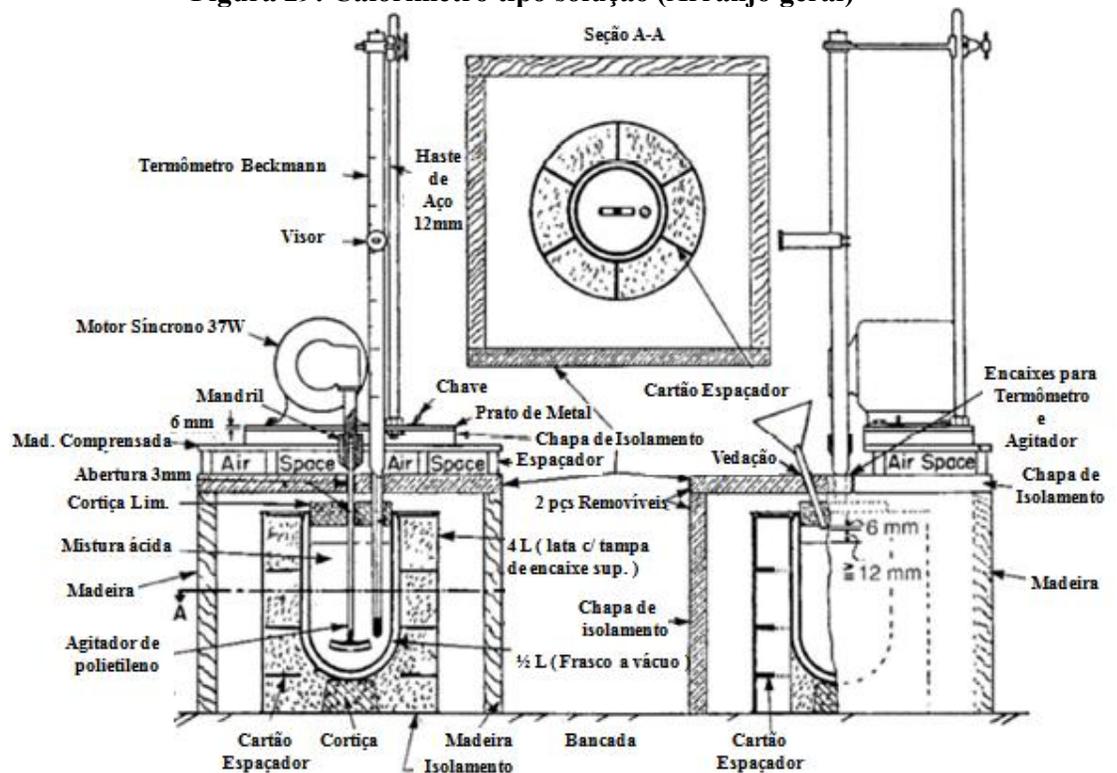
A figura 29 apresenta o arranjo geral típico de um exemplar.

Recomenda-se equipamentos tais como:

- Calorímetro;
- Recipiente com lacre a vácuo de 0,5 litro;
- Caixa com isolamento térmico;

- Termômetro para solução;
- Termômetro de referência;
- Funil;
- Conjunto dispositivo de mistura e agitação;
- Misturador / batedeira ;
- Espaço de armazenamento com temperatura controlada;
- Almofariz;
- Forno de secagem;
- Vasilhame de metal, platina, 30 ml com tampa;
- Forno de Mufla;
- Balança;
- Pesos e dispositivos de peso.

Figura 29: Calorímetro tipo solução (Arranjo geral)



Fonte: ASTM 186

Os seguintes materiais e reagentes são necessários:

- Ácido fluorídrico;
- Ácido Nítrico;
- Cera de parafina ou similar para vedação;

- Óxido de zinco;

Obs.: Pureza dos reagentes – recomenda-se avaliar o grau de pureza dos reagentes.

2.2.2.3 Determinação da Capacidade de Aquecimento e Calibração

Sob os direcionamentos da ASTM C186 trata-se, portanto, da determinação da capacidade de aquecimento do sistema avaliando a energia em joule necessária para que se consiga atingir a temperatura de 1 °C, medindo a temperatura correta obtida a partir da dissolução de 7g de ZnO queimado em mistura ácida específica.

Transfere-se 400g de HNO₃, resfriado a 4 a 5 °C abaixo da temperatura ambiente, para a o dispositivo a vácuo. Adiciona-se 8ml de HF e NHNO₃ até atingir 425g. Então liga-se o calorímetro e o agitador. Após os 20 minutos iniciais necessários para a estabilização da temperatura, anota-se a temperatura ambiente e horário, imediatamente adiciona-se o ZnO com o funil a uma taxa constante, finalizando em 1 a 2 min. Anota-se a indicação da temperatura da amostra introduzida no calorímetro e a ambiente da sala. Faz-se a leitura da temperatura próxima a 0,0001 °C, a 20 min e novamente a 40 min após o início da introdução da amostra. A temperatura aumenta nos primeiros 20 min em função do aquecimento da solução da amostra e outros ganhos ou perdas de aquecimento ao meio ambiente, no chamado período de solução. A temperatura muda durante o segundo período de 20 min, em função da perda ou ganho de aquecimento ao meio ambiente ou em função dele, no chamado período de correção.

O cálculo correto do aumento da temperatura, segue através das equações 2 a 3:

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0 \quad (2)$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20}) \quad (3)$$

Onde:

R_0 = Elevação de temperatura observada, °C;

θ_{20} = Temperatura do calorímetro ao final do período de solução;

θ_0 = Temperatura do calorímetro na introdução da amostra;

R = Temperatura de elevação corrigida, °C;

θ_{40} = Temperatura do calorímetro ao final do período de correção;

O cálculo da capacidade de aquecimento do calorímetro, segue conforme equação 4:

$$C = \frac{W [1072 + 0,4 (30 - t) + 0,5 (T - t)]}{R} \quad (4)$$

Onde:

C = Capacidade de aquecimento, k J / °C;

W = Massa de ZnO, g;

t = temperatura final do calorímetro, °C (θ_{20} ou maior, considerando termômetro Beckmann indicando “0”);

T = temperatura do ZnO (temperatura ambiente da sala), °C, quando introduzida ao calorímetro;

R = temperatura de elevação corrigida, °C.

Considerando que a energia do ZnO seja 1072 k J / kg (256,1 cal / g) a 30 °C, estes valores sobem 0,4 kJ/kg (0,1 cal/g) por cada grau decrescido em temperatura abaixo de 30 °C. O calor específico do ZnO é 0,5 kJ/kg*K ou (0,12 cal/g°C).

2.2.2.4 Procedimento de teste

A norma ASTM C186 recomenda procedimentos distintos a cada condição de amostra a ser avaliada. Segue procedimentos para determinação da amostra de cimento seco, pasta (amostra parcialmente hidratada) e perda por ignição.

2.2.2.5 Procedimento de teste – Cimento Seco

Neste procedimento segue-se os passos determinados para a determinação da capacidade de aquecimento descritos no sub item 2.2.2.3 anterior, visando determinar o calor específico da amostra de cimento seco mas usando uma amostra de 3g pesada a uma precisão próxima de (0,001) de cimento seco ao invés de ZnO.

2.2.2.6 Procedimento de teste – Perda por ignição

Imediatamente, ainda conforme ASTM C 186, antes e após pesagem da amostra, pesa-se uma amostra similar num cadinho de platina para determinação da perda por ignição, com o valor sendo usado após as duas amostragens. O cimento terá temperatura elevada até 950 ± 50 °C, por pelo menos uma hora e meia ou estabilização da massa. Posteriormente, de imediato, coloca-se o cadinho contendo o material em um dessecador e baixe a temperatura ambiente da sala, e então pesa-se o cadinho. Quando determinado a perda por ignição do cimento hidratado, primeiro seque a amostra num forno a 100 a 110 °C por uma hora, e então coloque a amostra num forno mufla a 950 ± 50 °C durante a noite ou até massa constante. A redução da massa do cimento que foi introduzida no calorímetro para avaliação da massa base seca é usada no cálculo final como segue no item seguinte.

2.2.2.7 Expressão dos resultados

Para avaliação da massa base seca é usada no cálculo final como segue na equação 5:

$$W_i = (A / B) * W \quad (5)$$

Onde:

W_i = Massa da amostra do calorímetro, em base seca, (g);

A = Massa da amostra em base seca, (g);

B = Massa da amostra antes da secagem, (g);

W = Massa da amostra do calorímetro, (g);

Apartir deste ponto, o cálculo do calor específico da solução do cimento seco se dá ao observar a necessidade de corrigir o valor do calor de solução. Se a temperatura final do calor de solução da amostra em teste é diferente da temperatura da amostra do calorimétrico quando introduzido. Então neste caso, para o cimento seco, que tem calor específico de 0,2 cal/g °C, se a temperatura final do calorímetro exceder a temperatura da amostra ao ser introduzida, adicione a diferença de correção em relação a 0,2 cal/g °C, conforme a equação 6.

$$H_1 = (RC / W_i) - 0.8 (T - t_d) \quad (6)$$

Onde:

H_1 = Calor de solução do cimento seco, kJ / kg;

R = temperatura de elevação corrigida, °C;

C = Calor específico, kJ / °C;

W_i = Massa da amostra do calorímetro, em base seca, (g);

T = Temperatura da sala, no momento em que a amostra é introduzida, °C;

t_d = Temperatura final ao final da determinação do cimento seco, °C;

Já para os casos de avaliação do calor específico de amostras parcialmente hidratadas o cálculo se dá da mesma forma adicionando correções.

Desde que um acréscimo de 1 °C na temperatura da amostra em curso cause um decréscimo de aproximadamente 0,3 cal / g no calor da solução, se a temperatura da solução de cimento parcialmente hidratado exceda a temperatura determinada para a do cimento seco, uma correção da diferença em relação a 0,3 cal / g deverá ser adicionada ao valor.

Também deve-se corrigir o calor indicado da solução caso o valor da temperatura final indicada, indique valor diferente da amostra do calorímetro quando introduzida. Assim, para uma amostra parcialmente hidratada que tenha calor específico de aproximadamente 0,4

cal / g de cimento seco, se a temperatura final exceder a temperatura da amostra quando foi introduzida, adicione a correção de 0,4 cal / g (1,7 kJ / kg) no cálculo das temperaturas.

O cálculo do calor da solução será conforme indicado pela equação 7:

$$H_2 = (RC / W_i) - 1,7 (T - t_h) - 1,3 (t_d - t_h) \quad (7)$$

Onde:

H_2 = Calor da solução amostra parcialmente hidratada, kJ / kg;

R = temperatura de elevação corrigida, °C;

C = Calor específico, kJ / °C;

W_i = Massa da amostra do calorímetro, em base seca, (g);

T = Temperatura da sala, no momento em que a amostra é introduzida, °C;

t_d = Temperatura final ao final da determinação do cimento seco, °C;

t_h = Temperatura final da determinação do cimento parcialmente hidratado, °C;

2.2.3 Wattímetro tipo diferencial de varrimento

2.2.3.1 Conceito e princípio de funcionamento

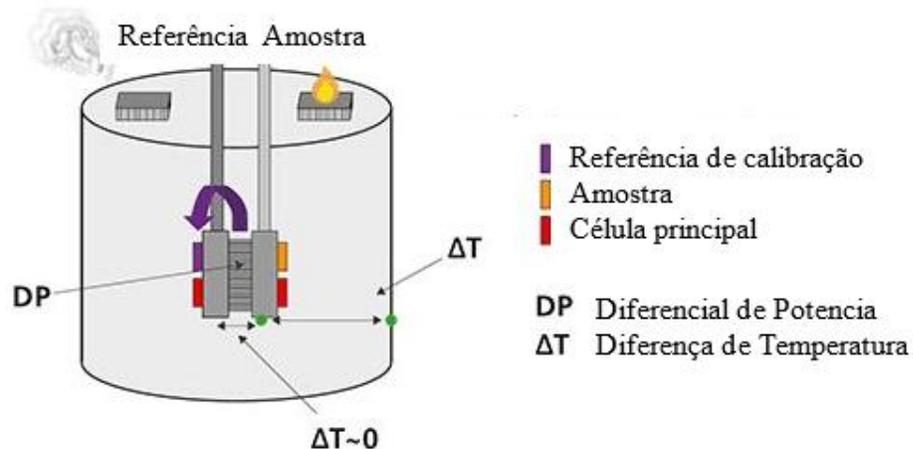
Nesta metodologia denominada calorimetria diferencial de varrimento, a diferença de fluxo de calor para a amostra e para a referência é monitorizada em função do tempo ou temperatura (GONSALVES et. al., 2011).

Podem ser inseridos neste grupo os aparelhos de fluxo de calor e os de compensação de potência.

Nos equipamentos de fluxo, a amostra e a referência são aquecidas a partir da mesma fonte e a percepção de fluxo de calor diferente entre ambas, indica um ΔT .

A figura 30 ilustra o princípio geral de funcionamento deste equipamento MALVERN (2017).

Figura 30: Princípio Geral de Funcionamento dos calorímetros diferenciais (Adaptado)



Fonte: MALVERN (2017)

Na variação deste método, o calorímetro de varrimento diferencial de compensação de potência, a amostra e a referência poderão estar em fornos distintos termicamente desacoplados, munidos de elementos de aquecimento e sensores independentes. Na amostragem é fornecido energia a amostra e à referência de visando observar a variação de temperatura.

2.2.4 Metodologias existentes: wattímetro tipo Condução Semi-Adiabática

2.2.4.1 Conceito e princípio de funcionamento

A metodologia semiadiabática vem sendo a de melhor correlação demonstrada entre os demais métodos. Este método também é utilizado para percepção do calor de hidratação do cimento durante o processo de cura através do monitoramento da temperatura. Este procedimento, é embasado em princípios da NT BUILD 480 (1997) e na EN 196-9 (2010) de avaliação de condução semiadiabática, e descreve o montante de energia em função da idade de maturação. Para determinar o desenvolvimento da temperatura por unidade de massa do cimento é necessário conhecer o coeficiente térmico dos componentes. A amostra é colocada no calorímetro, onde a temperatura na amostra bem como a perda por convecção é

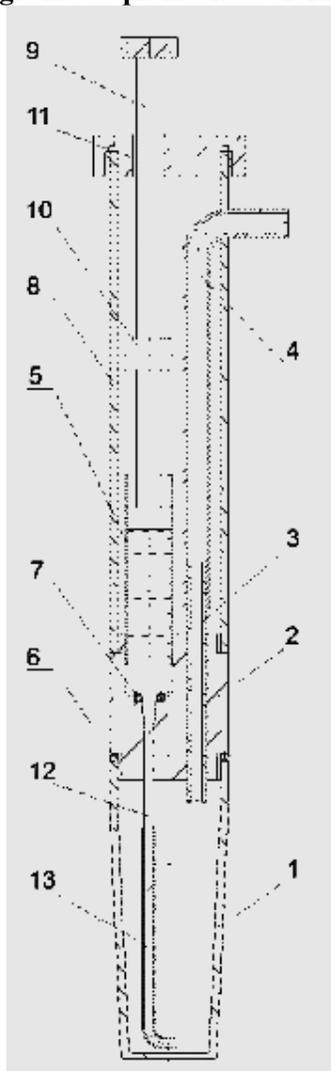
determinada. O montante do calor gerado é a soma do calor acumulado na amostra e da perda ao meio externo.

Um transdutor dentro do calorímetro, é usado para medir a perda. A temperatura que aumenta na amostra é usada como uma medida do aquecimento acumulado.

O método semiadiabático pode inclusive ser mais indicado ao considerarmos que com ele, a curva de hidratação poderia estar relativamente mais próxima da realidade *in loco*. Pois na realidade há vários fatores que na verdade desenvolve-se na estrutura imprecisões de naturezas diversas e qualquer ajuste que permita menores desvios da temperatura real na estrutura da curva semiadiabática pode ser considerado mínimo (MORABITO, 1997).

ZIELENKIEWICZ e KAMIŃSKI (2001) elucida o funcionamento de um exemplar apresentado na figura 31 que mostra seu diagrama esquemático. Uma célula calorimétrica de 30 ml é feita de aço inoxidável no formato de um cone truncado. Uma estrutura de teflon (2) é equipada com um tubo (3) posicionado sobre a célula, fixa a mangueira a vácuo (4) e conecta a uma seringa hipodérmica (5), contendo água ou uma solução. Para calibração, um aquecedor elétrico tem derivações conduzidas através do tubo (3). Os anéis (6) e (7) são usados para manter as conexões adstritas. A estrutura (2) serve também para isolar o topo. Uma capa de proteção feita de teflon é fixada ao tubo (3). Esta compreende uma mangueira conectada ao vácuo e uma haste roscada (9) ligada por meio de uma articulação com o êmbolo da seringa. A articulação evita que o êmbolo da seringa se mova espontaneamente antes da reação ter sido iniciada no calorímetro. O segmento (11) permite a haste (9) rotacionar e por conseguinte, o êmbolo da seringa mover e admitir líquido da seringa para a célula calorimétrica. Um capilar de metal (13) é sobreposto na agulha da seringa, permitindo que a água flua sob a amostra de cimento e também permite que a seringa e a agulha sejam retiradas do cimento endurecido durante o experimento.

Figura 31: Diagrama esquemático calorímetro condução

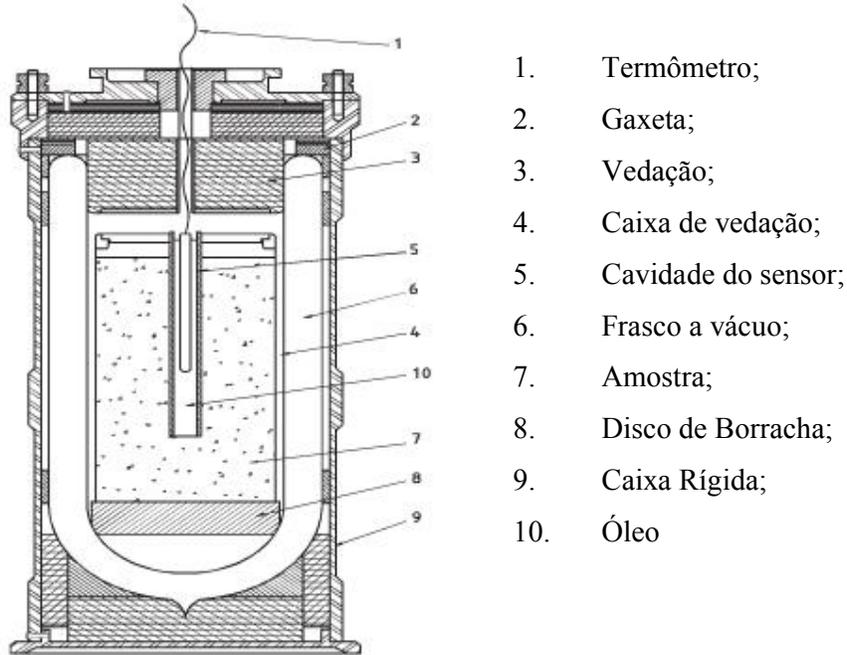


Fonte: ZIELENKIEWICZ e KAMIŃSKI (2001)

2.2.4.2 Equipamentos

Vários arranjos são observados na literatura, a figura 32 traz a ilustração geral de um equipamento de funcionamento do método semiadiabático e do tipo condução. Este tem indicação primária na temperatura interna da amostra. Um sensor geralmente inserido na parte superior percebe a temperatura e faz a transdução ao meio externo. Contando com um material responsável pela vedação entre o cabo do sensor demais estruturas e ambientes. Uma tampa superior conta com uma gaxeta para fazer a vedação entre a mesma e o frasco da amostra. Um disco de borracha garante apoio ao corpo da amostra e o frasco. Por sua vez, o frasco é apoiado numa caixa rígida.

Figura 32: Calorímetro Semi adiabático Típico



Fonte: EN 196-9

Já a figura 33 traz a ilustração do modelo utilizado por KLEMCZAK e BATOG (2015). Nele observa-se a amostragem de vários corpos de prova ao mesmo tempo.

Figura 33: Calorímetro semi-adiabático



Fonte: KLEMCZAK E BATOG (2015).

Um outro exemplo de configuração e construção é mostrado na figura 34.

Figura 34: Calorímetro semi-adiabático



Fonte: COST (2008)

2.2.4.3 Calibração

Na calibração, as temperaturas indicativas do sensor de temperatura externo e da água são anotadas ao menos uma vez por hora durante 3 dias.

Outro aspecto que pode favorecer o entendimento da acuracidade prática da calibração, pode considerar a observação que se propõe a NT BUILD 505 (2003) ao considerar o resultado a partir da análise de relação com os valores de uma amostra de referência. Neste trabalho, esta referência considerada foi tida pela amostra de cimento *Portland* com 0% de dosagem de sílica ativa. Ou seja, puro e portanto, referência às demais dosagens.

Considerando estes dados o fator de calibração é determinado conforme equação 8 por:

$$Fc = \frac{m \cdot Ce \cdot (\theta_0 - \theta_t)}{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{f_{w,n} + f_{w,n-1}}{2} \cdot \Delta t_n} \quad (8)$$

Onde:

- . m = peso da água para calibração (kg) ;
- . Ce = coeficiente energético da água (4.182 kJ/kg.K) ;
- . θ_0 = Temperatura de calibração no início t = 0 (°C);
- . θ_T = Temperatura de calibração no instante t = T (°C);
- . θ_n = Temperatura da amostra (CP) no intervalo de tempo n (°C);
- . $f_{w,n}$ = Temperatura de saída do sensor em t = t_n, durante a calibração (°C);
- . Δt_n = Intervalo de tempo n (s);

Após 24 horas de calibração, a diferença entre dois valores deste fator não deverá exceder a 4%. Após o procedimento de calibração, o fator Fc é dado como uma constante.

Já o trabalho de AN e KIM (2015) traz uma análise entre os métodos semi-adiabáticos e adiabáticos com contornos de curvas de temperaturas em função do tempo ilustradas na figura 35, propondo que a calibração observe a temperatura adiabática, a compensação por perda e a compensação por taxa de reação. A proposta feita na equação 9 sugere a proposta de temperatura adiabática Japan Concrete Institute (1986) apud NA e KIM (2015).

$$T_{adi} = K (1 - e^{-\alpha(t-t_0)}) \quad (9)$$

T_{adi} = Temperatura adiabática, °C;

K = Temperatura adiabática máxima, °C;

α = Taxa de reação

A equação 10 sugere um modelo para a quantificação da compensação por perda de temperatura. Considerando ser possível calcular a temperatura da condição adiabática mediante a semi-adiabática, (JIN, et al., 2012 apud AN e KIM, 2015).

$$\Delta T_{adi}(t) = \Delta T(t) + hL \int_0^t (T_s(t) - T_{air}(t)) dt \quad (10)$$

Onde:

T_{adi} = Mudança de Temperatura em condição adiabática, °C ;

ΔT = Mudança média de Temperatura, °C ;

hL = Coeficiente de perda do dispositivo, kcal / (m²h°C) ;

T_s = Temperatura externa da amostra, °C ;

T_{air} = Temperatura ambiente, °C.

E finalmente na equação 11 sugere a compensação da taxa de reação, observando que o efeito da temperatura e tempo de cura se combinam na cura do concreto. Tal idade equivalente pode ser proposta na equação baseada no modelo de Arrhenius como mostra ROY et. al . (1993).

$$T_e = \int_0^t \exp\left[-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] dt \quad (11)$$

Onde:

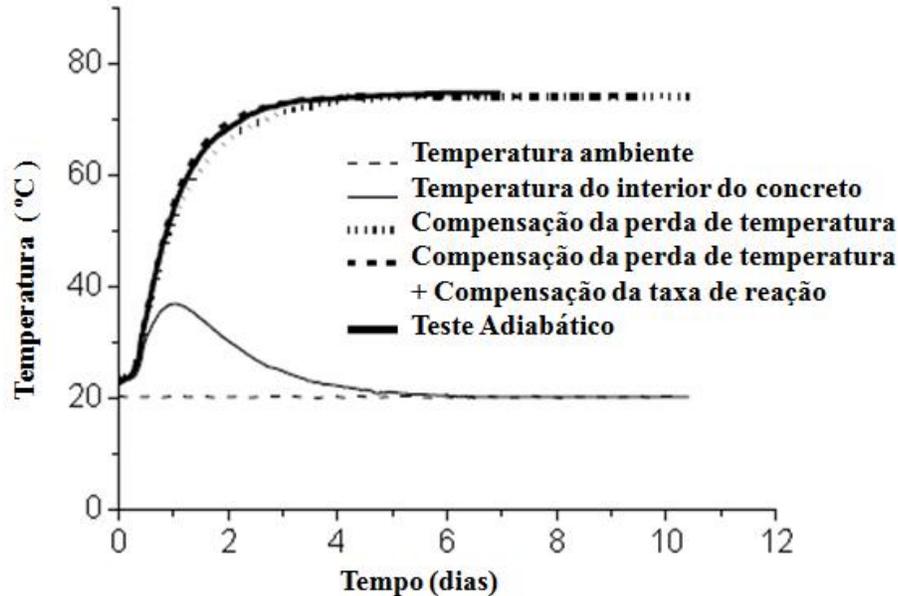
T = Temperatura em Kelvin;

T_r = Temperatura de referência, em Kelvin;

E = Energia Aparente de ativação;

R = Contante do gas, 8,3144 J/(mole *K).

Figura 35: Predição de temperatura na condição adiabática versus experimental



Fonte: AN e KIM (2015)

2.2.4.4 Procedimento de teste

Os componentes devem ser armazenados no laboratório, com temperatura controlada a $25 \pm 2^\circ\text{C}$ durante todo o período de teste. A homogeneização do cimento deverá seguir conforme a norma NBR 7215 e EN 196-7 e 1.

Todo teste requer ao menos duas amostras.

O procedimento de preparação e mistura segue:

- ✓ Colocar água no recipiente de mistura;
- ✓ Adicionar cimento e ou cimento e demais materiais;
- ✓ Homogeneizar por 120s;
- ✓ Parada por 30s enquanto confere aspectos gerais de mixigenação;
- ✓ Misturar por mais de 120s;
- ✓ Certificar se visualmente a mistura está homogênea;
- ✓ Acondicionar na embalagem de medição.

O período de teste deve continuar até a maturidade de 72 horas. Normalmente 3 dias em laboratório seguindo as orientações climáticas e com temperaturas dos materiais controlada quando o procedimento de mistura tiver início.

2.2.4.5 Expressão dos resultados

Os resultados são apresentados num diagrama onde a temperatura por kg de cimento de cada medida é relacionada ao valor de maturidade da amostra.

Os procedimentos de cálculo seguem na Equação 12:

$$Q_{tot}(t) = Q_{trans}(t) + Q_{acc}(t) \quad (12)$$

Onde:

$$Q_{trans}(t) = \sum_{n=1}^{N-1} \left[\frac{a \cdot \rho_m}{m_m \cdot P_c} * \frac{f_{m,n+1} + f_{m,n}}{2} * \Delta t_n \right] \quad (13)$$

$$Q_{acc}(t) = C_m * \frac{\rho_m}{P_c} * \sum_{n=1}^{N-1} (\theta_{n+1} - \theta_n) \quad (14)$$

$$C_m = \frac{\sum_{x=1}^n V_x * C_x * C_x}{\rho_m * \sum V} \quad (15)$$

Para efeito de cálculo, são consideradas constantes as capacidades de calor.

A influência da taxa de hidratação pela temperatura é determinada pela função de *Arrhenius*:

$$H(\theta) = \text{EXP} \left[\frac{E(\theta)}{R} * \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{293 + \theta} \right) \right] \quad (16)$$

Para o cimento *Portland*, considera-se as expressões seguintes:

$$E(\theta) = 33\,500 \text{ (J/mol)} \quad \theta > 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$E(\theta) = 33\,500 + 470(20 - \theta) \text{ (J/mol)} \quad \theta > 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (18)$$

Estas fórmulas são relevantes. Outros valores 33 500 e 1 470 J/mol podem ser usados para melhor correspondência a energia de ativação do cimento em questão.

A maturidade da amostra em função do tempo é dada por:

$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) = \sum_{n=1}^{N-1} \mathbf{H}(\theta_n) * \Delta t_n \quad (19)$$

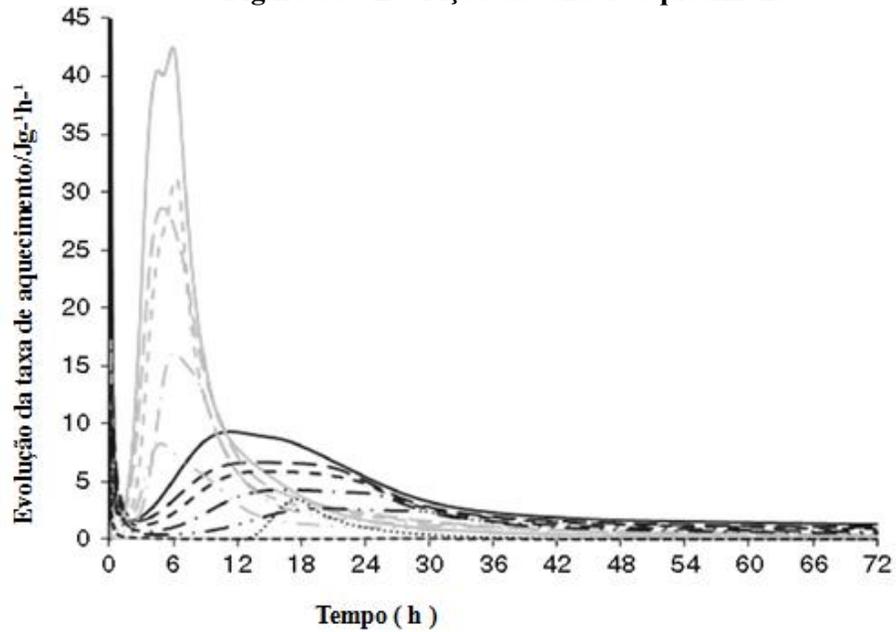
O aquecimento do cimento e a maturação correspondente são calculados em função do tempo utilizando as equações 12 e 19.

Normalmente o aquecimento do cimento ocorre em função da maturação e ou vice-versa, e pode ser aproximado pela Equação 12:

$$\mathbf{Q}_{\text{tot}}(\mathbf{M}) = \mathbf{Q}_{\infty} * \text{EXP} \left[- \left(\frac{\tau_e}{\mathbf{M}} \right)^{\alpha} \right] \quad (20)$$

No trabalho de KLEMCZAK e BATOG (2015), tem-se uma plotagem pela figura 36 da evolução da taxa de aquecimento de várias dosagens. Na ocasião, conforme observa-se na figura 36, foram utilizadas diferentes dosagens de cinza (representadas em linhas mais escuras) e respectivas taxas de aquecimento com menores valores, e curvas claras representando valores medidos das temperaturas obtidas apartir das reações de materiais subprodutos de alto forno metálico.

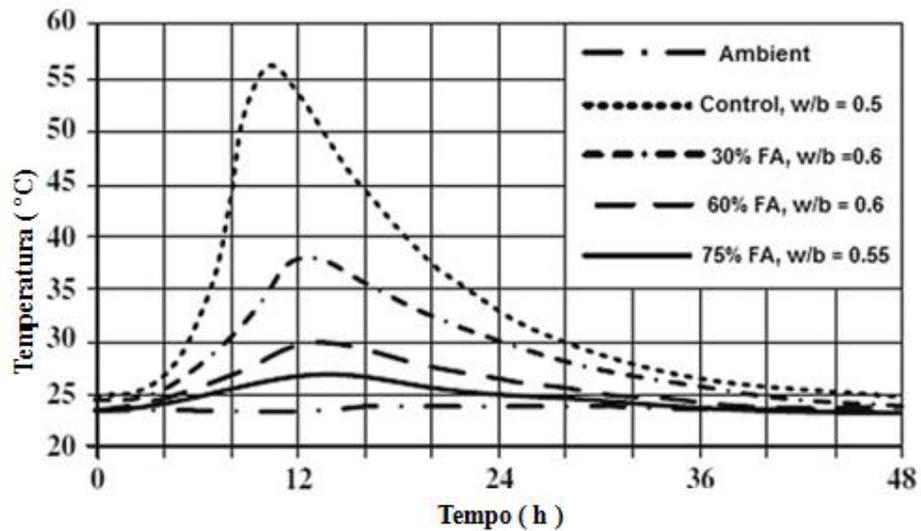
Figura 36 : Evolução da taxa de aquecimento



Fonte: KLEMCZAK e BATOG (2015)

Outro exemplo de curva típica dos resultados de um calorímetro semiadiabático, é apresentado pelo trabalho de HERRERA et. al. apud RASHAD (2015) na figura 37. Onde foi utilizado cinza em substituição ao cimento e valores da relação água/cimento variando de 0,5 a 0,6.

Figura 37 : Calorímetro Semiadiabático: Curvas para cinza e controle de argamassa



Fonte: HERRERA et. al. apud RASHAD (2015)

2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL (DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO E ENSAIOS)

Já enunciava BARKER (1985) que definir os objetivos, parâmetros do produto ou processo de fabricação, seleção de fatores de controle e variáveis de resposta, seleção da matriz experimental, realização do experimento, análise dos dados, interpretação dos resultados e ao elaborar relatórios de experimentos de forma planejada, as informações obtidas dos produtos ou processos tornam-se mais confiáveis.

Neste sentido, a revisão contempla dois segmentos, um para o desenvolvimento do equipamento e métodos necessários para obtenção destes dados (subitem 2.3.1) e outro quanto ao número de amostragens necessárias para testar o equipamento desenvolvido e a metodologia utilizada, considerando as variáveis e especificidade do tema exotermia das pastas (subitem 2.3.2).

2.3.1 Planejamento para Desenvolvimento do Produto (PDP e Uso)

A proposta de JURAN e GRZYNA (1992) ao definir o desenvolvimento de produtos como uma fase da espiral da qualidade que atenda às necessidades do usuário, considera informações de campo para a execução do que se deseja produzir.

Assim como traz MORGAN e LIKER (2008) planejar com cuidado e executar com precisão tende a ser uma estratégia bastante interessante para o planejamento tal qual a Toyota o faz em seu processo de desenvolvimento de produto. Concentrar os melhores recursos no estágio de desenvolvimento de Produto, resolve-se problemas em seu nível básico no começo do processo sanando problemas com mudanças tardias, dispendiosas, subótimas e que sempre degradam tanto o produto quanto o desempenho do processo.

Como praticado na filosofia da produção enxuta, melhoria continua eficiente começa no desencadeamento de um programa. Vale ressaltar ainda o importante papel da engenharia simultânea, envolvendo soluções conjuntas de projeto e manufatura simultaneamente. Sendo assim, avalia-se o projeto na implantação prática garantindo a geração de projetos exequíveis. Auxilia ainda na agilização dos processos de identificação e resolução de problemas cruciais.

Variação em projeto de produto pode ocorrer desde invenções sensacionais inéditas até aprimoramentos rotineiros de produtos existentes. Sendo possível classifica-los em quatro categorias de desenvolvimento de novos produtos:

1. Produtos revolucionários representando produtos ou tecnologias radicalmente diferentes. Podendo ser classificados como completos e inéditos. Podendo-se afirmar como sendo do tipo menos comum de projeto de desenvolvimento de

produto na indústria automobilística ou em qualquer outra madura.

2. Projetos de desenvolvimento de plataformas englobando produtos que requerem sistemas e componentes fundamentalmente novos. Trata-se de itens que comporiam um produto completamente novo utilizando versões aperfeiçoadas da tecnologia existente, possivelmente combinadas em modalidades inovadoras. Podem ser muito raros, ainda em empresas como Toyota, que tende a manter “plataformas” comuns no desenvolvimento de veículos derivados.
3. Produtos derivados construídos em plataformas existentes. Normalmente envolve atendimento a criação de novas formas, revestimento e síntese tecnológica secundária.
4. Existem ainda produtos que se destacam por seus aperfeiçoamentos incrementais. Com novas formas, revestimentos, inclusão de itens com novas formas, substituição de itens ou atualização tecnológica.

QUEIROZ e ARAÚJO JÚNIOR (2016) ressalta o desenvolvimento de novas práticas como fator motivado pela possibilidade de melhorar a taxa de sucesso de um novo produto. A tabela 8 faz uma correlação com as atividades que devem ser realizadas no processo de desenvolvimento de produto (PDP) em suas respectivas etapas.

Tabela 8 – Correlação das etapas e atividades do PDP

Macro Etapas	Micro Etapas	Atividades
Pré - Desenvolvimento	1. Planejamento estratégico de produto 2. Planejamento do projeto	Avaliação de oportunidades, demanda de mercado.
Desenvolvimento	1. Projeto informacional 2. Projeto Conceitual 3. Projeto Detalhado 4. Preparação da produção do produto 4. Lançamento do produto	Teste de conceito Teste de Protótipos Teste lote piloto
Pós- Desenvolvimento	1. Acompanhar e melhorar o produto 2. Descontinuar o produto	Teste do produto no mercado

Fonte: QUEIROZ E ARAÚJO JÚNIOR (2016)

Na Tabela 8 todas as informações trazem forte correlação com este trabalho. Em especial neste capítulo, a micro etapa onde enuncia o planejamento do projeto visa o desenvolvimento de um produto específico, viabilizado por meio da definição detalhada do escopo do produto e projeto, atividades previstas, pessoal, prazos, recursos necessários, orçamentos, análise de riscos e definição de critérios de avaliação (ROZENFELD et al., 2006).

Nesta micro etapa busca-se ainda:

- Determinar o custo e a duração do projeto;
- Determinar o nível de recursos que será necessário;
- Apoiar a alocação do trabalho e monitorar o progresso;
- Auxiliar na avaliação do impacto de qualquer mudança sobre o projeto.

2.3.2 Planejamento Experimental (DOE, Coleta e Tratamento de Dados)

Ao planejamento de pesquisa científica, SANTOS E CANDELORO (2006) redige sobre as várias possibilidades para a investigação visando chegar a uma comprovação ou refutação das hipóteses. Diante do problema, hipóteses, objetivo geral e específicos há necessidade de definir o método a ser utilizado para a realização da pesquisa, ou no que denomina-se “delineamento de pesquisa” ou explicitação da forma de abordagem e ou procedimentos do tema proposto.

Das abordagens faz-se necessário avaliar dentre os modos bibliográfico ou aplicadas (quantitativo, qualitativo ou quali-quantitativo).

A do tipo quantitativo visa mensurar variáveis e transformar os dados alcançados em tabelas, quadros, gráficos ou figuras.

Quanto aos procedimentos poderá ser descritivo (exploratório ou observacional) ou explicativo.

Neste sentido, pode-se dizer que o procedimento do tipo descritivo-exploratório pode ser marcado pela observação sistemática, considerando a pesquisa empírica imprimindo, portanto, caráter científico.

Já o procedimento explicativo estabelece relação de causa e efeito tentando explicar suas relações. E, portanto, ambos procedimentos descritivos exploratório e explicativo, serão válidos e poderão fundamentar os caminhos deste trabalho.

No que tange a conceito da técnica de pesquisa utilizada, este trabalho pode ser conforme menciona SANTOS e CANDELORO (2006), um dispositivo auxiliar na investigação de natureza empírica.

LAKATOS e MARCONI (2010), argumenta ainda, quanto ao uso de instrumentos adequados possibilitando a realização de observações mais refinadas.

No planejamento experimental comumente considera-se a necessidade de analisar um efeito ou mais fatores de controle envolvidos (ABRAHAM et al., 1999). No caso deste trabalho, o efeito culminou-se no desenvolvimento de uma metodologia que possibilite a medição da temperatura da reação química a ser analisada utilizando materiais de fácil aquisição *in loco*. A técnica de planejamento fatorial 2^{k-p} fracionado apresenta-se como uma alternativa viável em função da relação custo benefício. MONTGOMERY (1991), aponta a possibilidade de analisar desta forma, os efeitos sobre uma resposta de interesse, ou seja, k fatores com níveis discretos, em 2^{k-p} r combinações de teste, realizando uma parte. Ou seja,

metade do experimento quando p é igual a um ou um quarto do experimento se p for igual a dois, sem comprometer significativamente a precisão dos resultados.

Para TAYLOR (1997), ensaios em pastas permitem maior controle das condições experimentais, conduzindo à obtenção de informações mais precisas e detalhadas acerca dos parâmetros em questão.

2.3.2.1 Definição dos Fatores ou Variáveis de Controle e Níveis

A busca por variáveis adequadas pode ser tida dentre uma grande variedade das de processo e produto. Isto tem motivado a busca por modelos compostos por um número reduzido que leve à redução dos custos de coleta de dados, aumento da precisão das informações geradas e maior possibilidade de aplicações práticas (ZIMMER, 2016).

Na definição dos fatores de controle segundo (TEÓFILO E FERREIRA, 2006), é possível assumir que o domínio experimental seja regido por alguma função descrita pelas variáveis experimentais. Tal função descreve a relação entre as variáveis envolvidas e o resultado obtido.

Considerando-se, portanto, que o modelo possa eventualmente omitir detalhes desnecessários e triviais sendo capaz de isolar atributos importantes, úteis e cruciais destinando-se a dar resposta a determinado problema, (DAVENPORT e KIM, 2014).

Neste sentido, observa-se que o planejamento fatorial fracionado, pode também ser entendido como uma sequência de levantamento de dados para atingir um objetivo. Dentre outros, o planejamento fatorial é o mais indicado quando almeja-se conhecer os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada experimento, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável sejam investigadas (BARROS NETO et al., 1996 apud QUEIROZ e ARAUJO JUNIOR, 2016).

2.3.2.2 Construção do planejamento fatorial fracionado

É uma técnica muito utilizada em casos de duas ou mais variáveis independentes. Permitindo combinações em todos os níveis e variáveis, conseguindo assim uma análise de uma variável, combinada às demais, (CALADO e MONTGOMERY, 2003).

As combinações ou rodadas, terão número $n=2^k$ para um fatorial total com k fatores. As colunas ortogonais representariam todos os efeitos possíveis com quantidade $n-1$. Obviamente que quanto maior o número de fatores, maior será o número de observações que

representem todas as combinações de níveis com possibilidade suficientemente grande para permitir a inferência estatística (QUEIROZ e ARAUJO JUNIOR, 2016).

2.3.2.3 Seleção das Variáveis de Resposta

Variáveis de resposta tem por definição representar o resultado de um processo. Podendo também ser denominadas por dependentes já que ocorrem em função das variáveis independentes SILVESTRE (2007).

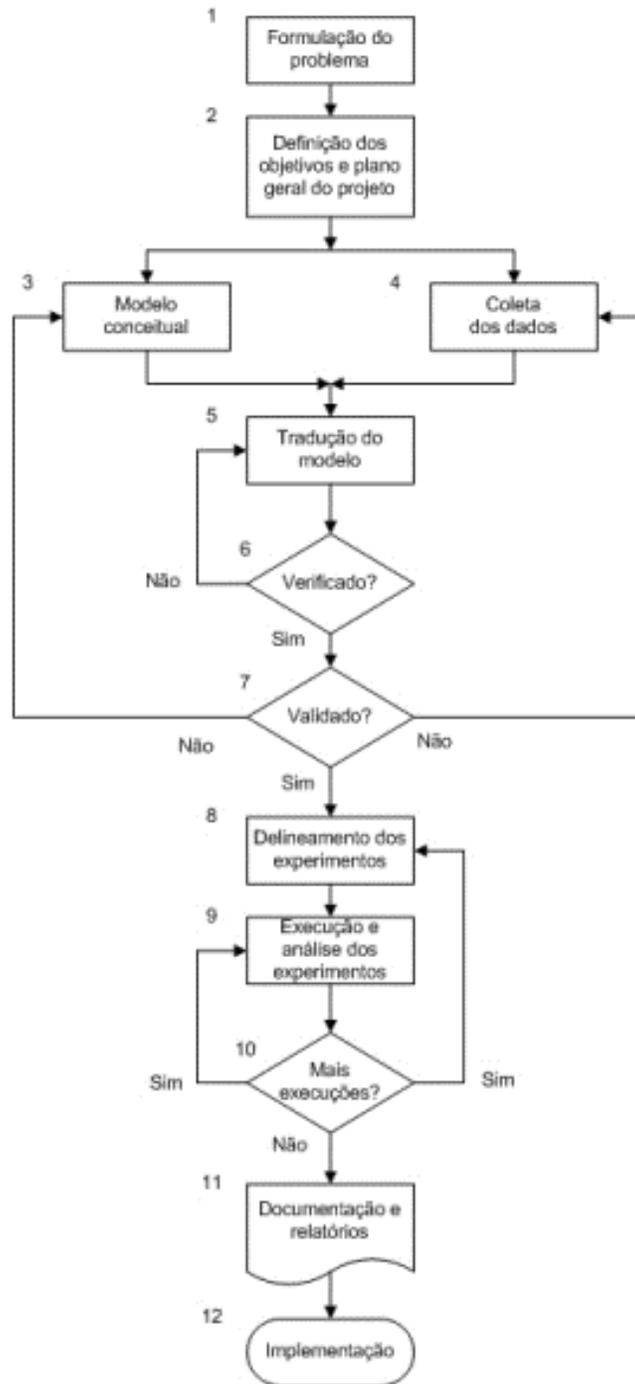
Pode ser também entendido como o resultado de uma previsão conforme modelo definido para ensaiar o comportamento de um processo de modelagem, AMARAL (2016).

REIS (2017) clarifica sobre o entendimento de que um determinado valor da variável de resposta, em função das variáveis de entrada, seja na verdade uma função densidade de probabilidade para a mesma, podendo a média prover da parte estrutural do modelo, enquanto sua forma e dispersão são originárias do seu termo aleatório.

2.3.2.4 Simulação e ensaios

Revisados aspectos teóricos importantes para a criação da solução. Faz-se necessário também cadenciar as etapas a serem realizadas. BANKS et. Al (2005), propõe como segue na figura 38, uma sequência lógica para execução das atividades multidisciplinares.

Figura 38: Etapas de um estudo por simulação



Fonte: BANKS et. Al (2005)

Figura 42: Espectrômetro de Fluorescência



Fonte: Cortesia Hitachi High-Technologie

3.1.3 Caracterização do Cimento

Os cimentos utilizados foram o cimento I e o cimento II. O cimento I é um cimento CP IV 32 B e cimento II o CP IV 32 ambos normatizados pela NBR 5736.

As principais características analisadas foram as relacionadas aos aspectos químicos, físicos/mecânicos e a resistência a compressão.

Tais características analisadas podem amparar possíveis entendimentos dos valores atuais apresentados nos resultados, bem como facilitam a comparação e reprodutibilidade destes ensaios e resultados.

3.1.3.1 Características Químicas do Cimento

Os ensaios químicos aqui apresentados trazem informações que podem contribuir para o entendimento das diferenças nos resultados ensaiados ou de reprodutibilidades futuras.

A Tabela 11 traz as principais características químicas ensaiadas do cimento I.

Tabela 11: Características do Cimento tipo I

ENSAIO	NORMA	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR
Perda ao fogo – PF	NM18/04	%	1,93	≤ 4,5
Óxido de Magnésio – MgO	NM11- 2/04	%	2,75	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NM16/04	%	2,70	≤ 4,0
Resíduo Insolúvel – RI	NM22/04	%	31,03	não aplicável
Óxido de Cálcio livre - CaO livre	NM13/04	%	0,56	não aplicável

Fonte: Autor com cortesia Votorantim Cimentos

Já a Tabela 12 traz as principais características químicas ensaiadas do cimento II.

Tabela 12: Ensaios Químicos do Cimento tipo II

ENSAIO	NORMA	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR
Perda ao fogo – PF	NM18/04	%	3,73	≤ 4,5
Óxido de Magnésio – MgO	NM11- 2/04	%	2,57	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NM16/04	%	3,01	≤ 4,0
Resíduo Insolúvel – RI	NM22/04	%	40,41	não aplicável
Óxido de Cálcio livre - CaO livre	NM13/04	%	-	não aplicável

Fonte: Autor com Cortesia Votorantim Cimentos

3.1.3.2 Características Físicas e Mecânicas

Os ensaios físicos e mecânicos são apresentados a seguir e podem contribuir para o entendimento das diferenças nos resultados ensaiados ou em reprodutibilidades futuras.

Na Tabela 13 são apresentadas as principais características físicas e mecânicas ensaiadas a partir das amostragens do cimento I.

Tabela 13: Ensaios Físicos e Mecânicos do Cimento tipo I

ENSAIO	NORMA	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR
Área Específica (Blaine)	NM76/98	Cm ² /g	5313	Não aplicável
Massa Específica	NM23/01	G/cm ³	2,93	Não aplicável
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	0,2	≤ 8,0
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	12826/93	%	5,0	Não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/03	%	34,1	Não aplicável
Início de Pega	NM65/03	min	238	≥ 60
Fim de Pega	NM65/03	min	282	≤ 720
Expansibilidade de Le Chateie - a Quente	11582/91	mm	0,0	≤ 5,0

Fonte: Autor com Cortesia Votorantim Cimentos

Na Tabela 14 são apresentadas as principais características físicas e mecânicas ensaiadas a partir das amostragens do cimento II.

Tabela 14: Ensaios Físicos e Mecânicos do Cimento tipo II

ENSAIO	NORMA	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR
Área Específica (Blaine)	NM76/98	cm ² /g	6056	não aplicável
Massa Específica	NM23/01	g/cm ³	-	não aplicável
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	0,8	≤ 8,0
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	12826/93	%	9,6	não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/03	%	35,2	não aplicável
Início de Pega	NM65/03	min	206	≥ 60
Fim de Pega	NM65/03	min	298	≤ 720
Expansibilidade de Le Chateie - a Quente	11582/91	mm	0,0	≤ 5,0

Fonte: Autor com Cortesia Votorantim Cimentos

3.1.3.3 Resistência a Compressão

Na tabela 15 são apresentadas as principais características específicas de resistência a compressão em corpos de prova obtidos a partir das amostragens do cimento I, durante o controle de qualidade do mesmo.

Tabela 15 : Ensaios de Resistencia a Compressão do Cimento tipo I (NBR 7215/96)

IDADE (DIAS)	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	DESVIO	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR
1	10,2	12,3	10,9	0,6	não aplicável
3	21,9	23,4	22,6	0,6	≥ 10,0
7	30,3	32,6	31,2	0,8	≥ 20,0
28	40,0	41,2	40,4	0,5	≥ 32,0

Fonte: Autor com Cortesia Votorantim Cimentos

Na Tabela 16 são apresentadas as principais características específicas de resistência a compressão ensaiadas a partir das amostragens do cimento II, durante o controle de qualidade do mesmo.

Tabela 16 : Ensaios de Resistencia a Compressão do Cimento tipo II (NBR 7215/96)

IDADE (DIAS)	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	DESVIO	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR
1	-	-	-	-	não aplicável
3	17,4	22,1	19,39	1,24	≥ 10,0
7	27,0	30,8	28,37	1,23	≥ 20,0
28	34,6	37,6	36,11	0,68	≥ 32,0

Fonte: Autor com Cortesia Votorantim Cimentos

O traço a ser analisado é preparado conforme recomendação da NBR 7215.

3.4.1 Definição dos Fatores ou Variáveis de Controle e Níveis

Considerando possível assumir que o domínio experimental seja regido por uma função descrita pelas variáveis experimentais, visando definir os fatores de controle. E que tal função descreve a relação entre as variáveis envolvidas e o resultado obtido, conforme item 2.3.2.1. Neste caso a equação 13 foi considerada por representar todas as principais variáveis envolvidas na maioria das literaturas do assunto deste trabalho. Ou seja, considerando que o calor específico da pasta (sílica em substituição percentual ao cimento) a ter análise relacional com o valor da amostra de referência (cimento puro) seja regida pela mesma lei da termodinâmica, seu resultado pode ser expresso através do quociente obtido da diferença de calor requerido para a mudança de temperatura observada, dividido pelo produto da massa e a diferença de temperatura observada em ensaio, conforme equação de referência 13.

$$C = \Delta Q / (m \times \Delta T) \quad (13)$$

Onde:

C = Calor específico;

ΔQ = Calor requerido para a mudança de temperatura;

ΔT = Diferença de temperatura;

M = Massa.

A ordem pode ser limitada pelo tipo de planejamento usado.

Neste trabalho os ensaios em pastas em conformidade com a condução dos estudos de hidratação, são conduzidos admitindo-se não haver interação significativa entre agregados e a pasta, quando observado uso de materiais limpos de boa qualidade conforme recomendado em norma de produção e aplicação de concreto.

3.4.2 Seleção das Variáveis de Processo e construção do planejamento fatorial fracionado

Portanto, considerando as variáveis de controle definidas em função da equação, foram consideradas:

- Calor específico do cimento;
- Massa;
- Calor de ativação da reação ou calor requerido para mudança de temperatura.

Como indicado neste caso de planejamento fatorial fracionado 2^{3-1} adota-se os procedimentos do fatorial completo 2^2 . Ou seja, duas variáveis V1 (Calor específico) e V2 (massa) com representação na tabela 17.

Tabela 17: Matriz de Planejamento do Experimento Fatorial

	(V1)	(V2)	(V1V2)
1	-1	-1	1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	1

Fonte: Autor (2016)

A Tabela 17 apresenta a interação das variações propostas de dosagens e suas respectivas amostragens. Ou seja, este planejamento propôs 4 amostragens por condição conforme indicado no planejamento fatorial. Sendo assim, propôs-se em função das principais variáveis envolvidas na reação dos materiais utilizados, 4 amostragens para cada condição de 1 a 7.

Já a Tabela 18 apresenta uma visão geral dos experimentos e todas as condições envolvidas neste trabalho. Visa facilitar o entendimento dos ensaios envolvidos bem como indicar os respectivos gráficos correspondentes aos ensaios, onde os dados resultantes são apresentados.

3.4.3 Seleção das Variáveis de Resposta

Quanto a variável de resposta a ser encontrada, esta foi função do processo de medição, ou seja, a temperatura medida.

Esta é também a variável principal deste trabalho. Ela fornece dados para a equação de avaliação do calor específico da mistura ensaiada, neste caso a amostra de dosagens diferentes de sílica ativa em substituição ao cimento. Outros componentes poderiam ser ensaiados a partir do método proposto.

3.4.4 Preparação e metodologia de Amostra

Neste subitem é feita uma explanação sobre o preparo dos corpos de prova mostrando a preparação a metodologia de amostragem térmica, ou seja, todos os preparativos e como foram feitos os ensaios.

Os materiais utilizados para a produção das pastas foram o cimento *Portland* CP-IV-RS32B e água potável. A pasta de referência (água e cimento *Portland*) e as pastas com sílica ativa (substituição de 7%, 14% e 20% em massa sobre o cimento) foram preparadas com a mesma relação água-cimento (0,50). A seguinte sequência foi planejada para ser executada durante o processo de preparação e moldagem:

- ✓ Pesagem do cimento;
- ✓ Pesagem da SiO₂;
- ✓ Pesagem da H₂O;
- ✓ Mistura e homogeneização do cimento e SiO₂ a seco;
- ✓ Adição de H₂O, mistura e homogeneização;
- ✓ Tara do conjunto de medição e moldagem (Isopor, embalagem plástica e sensor de temperatura), figura 48;

3.4.6 Modelagem Matemática da Curva de Temperatura

Embora existam alguns modelos capazes de prever a evolução do campo térmico em estruturas de concreto, ocorre também um hiato entre tal predição e os ensaios para validação de acompanhamento executivo. E ainda que seja feito em laboratórios de alta confiabilidade, tais resultados são obtidos após vários dias e com alto custo.

Este é um dos principais diferenciais deste trabalho pois as curvas de levantamento das temperaturas medidas poderão ser obtidas rapidamente (3 dias) no próprio canteiro de obra e poderá ser utilizado como subsídio para informações de apoio nos processos de decisão sobre possíveis desvios entre o valor projetado e o real naturalmente. A curva obtida a partir dos dados ensaiados fornecerá subsídios para a modelagem preditiva. Enfim vários modelos propõem, a predição em função do tempo pela equação padrão de evolução dos campos térmicos, conforme DE FARIA (2004), equação 14:

$$CT = Q + L_m m + k\nabla^2 T \quad (14)$$

Onde:

$C\varepsilon$ - calor específico a deformação constante para o concreto;

Q - o fluxo de calor originário de alguma fonte de calor;

k - a condutividade térmica;

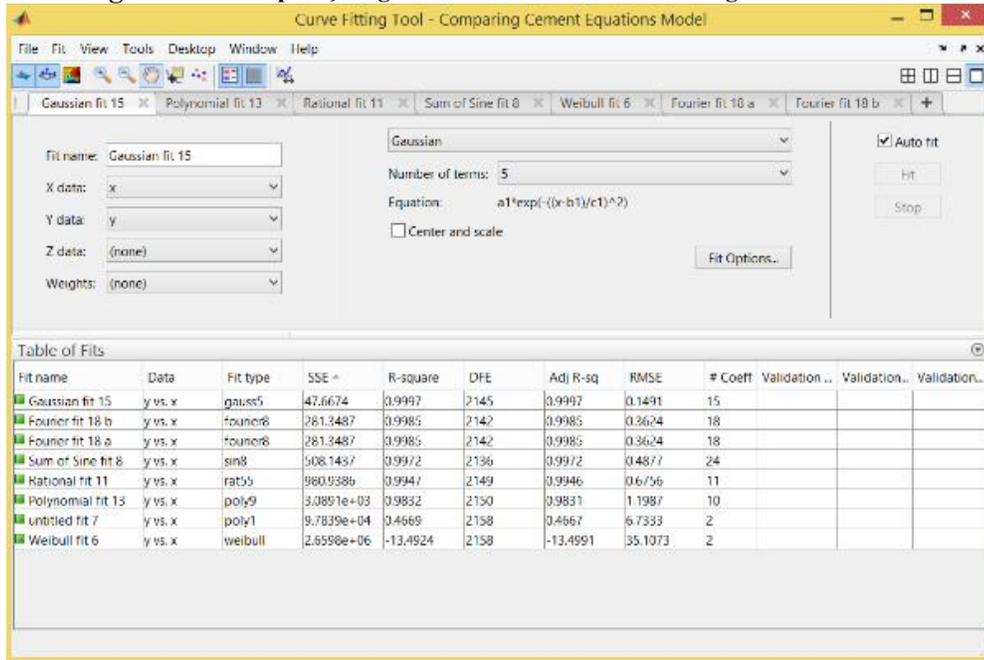
T - a temperatura;

L_m - corresponde ao acoplamento termo-químico e representa a geração de calor pela reação de hidratação (exotermia);

m - a velocidade da reação representada pela velocidade com que a massa de esqueleto aumenta (derivada de m em relação ao tempo).

Para análise do melhor modelo matemático recomendado para representação e extrapolação do ensaio proposto, vários tipos de modelos foram testados como mostra o resumo da figura 54.

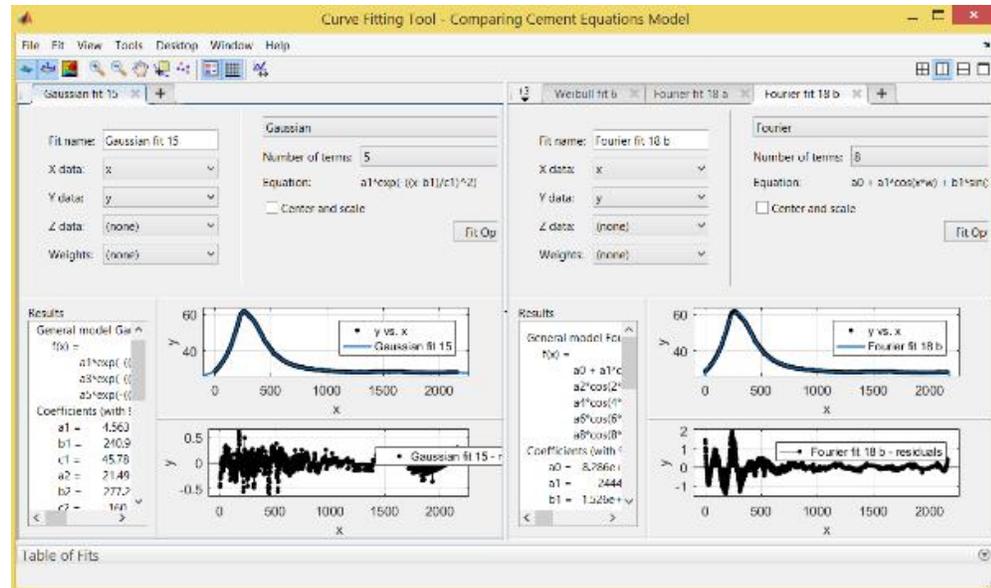
Figura 54 : Comparações gerais de aderências das modelagens matemáticas



Fonte: Autor (2016)

A figura 55 mostra a comparação das duas principais modelagens que melhor representaram os dados colhidos, segundo avaliação feita por aplicativo sob algoritmo genérico.

Figura 55 : Comparação gráfica de aderências e erros das duas melhores modelagens matemáticas



Fonte: Autor (2016)

O melhor modelo escolhido por apresentar melhor aderência e menor erro residual foi o Gaussiano de 15 coeficientes.

Modelo generalizado de Gauss (General model Gauss5) :

$$f(x) = a1*\exp(-((x-b1)/c1)^2) + a2*\exp(-((x-b2)/c2)^2) + a3*\exp(-((x-b3)/c3)^2) + a4*\exp(-((x-b4)/c4)^2) + a5*\exp(-((x-b5)/c5)^2)$$

Coefficientes com 95% de índice de confiança:

a1 =	4.563 (4.462, 4.664)
b1 =	240.9 (240.4, 241.4)
c1 =	45.78 (44.79, 46.77)
a2 =	21.49 (20.52, 22.46)
b2 =	277.2 (276.1, 278.3)
c2 =	160 (157.5, 162.6)
a3 =	11.77 (10.82, 12.73)
b3 =	390.9 (376.4, 405.5)
c3 =	291.6 (284.2, 299)
a4 =	1.144 (0.9929, 1.294)
b4 =	874.2 (853, 895.4)
c4 =	208.9 (189.2, 228.6)
a5 =	28.56 (28.55, 28.57)
b5 =	1507 (1475, 1539)
c5 =	5127 (4802, 5452)

Melhores modelagens:

SSE: 47.67

R-square: 0.9997

Adjusted R-square: 0.9997

RMSE: 0.1491

Onde:

SSE - mede o desvio total dos valores de resposta do ajuste para os valores de resposta. Também é chamado de soma do quadrado de resíduos.

R-square - mede o quão bem sucedido é o ajuste na explicação da variação dos dados. Dito de outra forma, *R-square* é o quadrado da correlação entre os valores de resposta e os valores de resposta previstos. É também chamado de quadrado do coeficiente de correlação múltipla e o coeficiente de determinação múltipla.

Adjusted R-square - pode assumir quaisquer valores menores ou igual a 1, quanto mais próximo a 1 melhor é a indicação do ajuste.

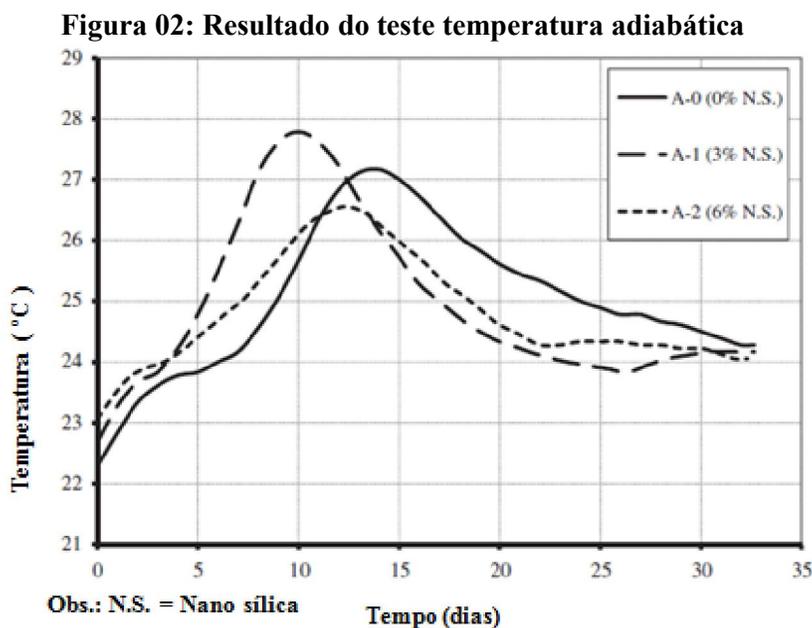
RMSE - é uma medida usada das diferenças entre valores (valores de amostra e população) previstos por um modelo matemático e os valores realmente observados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando analisar os resultados e discorrer da melhor forma possível os assuntos tanto da metodologia de desenvolvimento dos equipamentos utilizados para fazer a medição quanto do resultado das amostras ensaiadas, este capítulo foi dividido em tópicos. No subitem 4.1 foi abordado o método utilizado. A análise dos materiais e a sílica ativa visando auxiliar no controle da temperatura do concreto utilizados como teste da metodologia foi tratado no item 4.2. A performance aprimorada do protótipo II foi observada no subitem 4.3.

4.1 Método Utilizado

Das figuras 60 e 61, observa-se que o método conseguiu perceber variações da temperatura entre 30 e 62,6 graus célsius. Com valores de temperatura moldando uma curva característica semelhante a curva apresentada no trabalho de SAID (2012) na figura 2 aqui novamente apresentada.



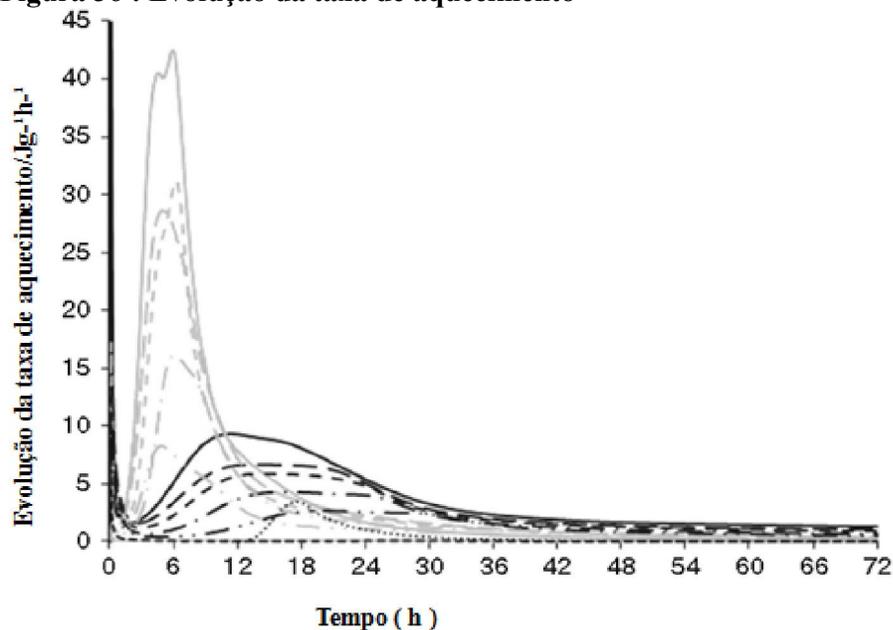
Fonte: SAID (2012)

Obviamente que valores de amplitude precisam ser ponderados pelas características das amostras ensaiadas oriundas de materiais que embora semelhantes, produziram resultados levemente diferenciados. Embora em ambos os casos a granulometria foi mantida, ou seja ambos foi utilizado nano sílica. Válido ressaltar que algumas bibliografias não diferenciam nanosilica e sílica ativa. A associação de sílica ativa recomenda apenas o percentual mínimo de 85% de SiO₂ como critério de avaliação. Naquele, aspectos como fator água cimento, traço

e uso de superplastificante foram diferentes. Neste apenas a argamassa foi utilizada conforme sugere TAYLOR (1997) por questões anteriormente expostas facilitando o controle.

O avanço inicial da temperatura nas primeiras horas também foi semelhante ao medido e apresentado no trabalho de KLEMCZAK e BATOG (2015), ilustrado pela figura 36 mostrando em cinza as curvas obtidas pelo medidor semi-adiabático. Resguardadas obviamente, as devidas ponderações de materiais do equipamento e amostras.

Figura 36 : Evolução da taxa de aquecimento

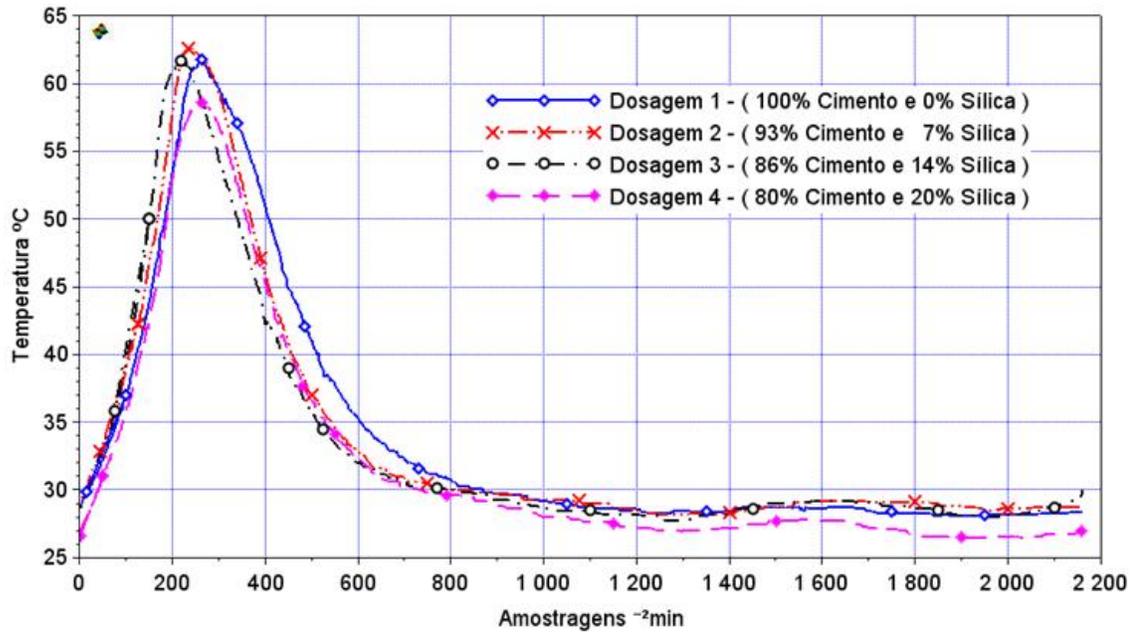


Fonte: KLEMCZAK e BATOG (2015)

Outro balizador pode ser observado também pelo trabalho de HERRERA et. al. apud RASHAD (2015) figura 34.

Observa-se, conforme amostragens dos resultados obtidos e apresentados na figura 56, que a metodologia e o conjunto de materiais utilizados foram capazes de perceber as diferentes temperaturas observadas em função das diferentes dosagens programadas. Na figura 56 são apresentados os dados das medições de temperaturas das diferentes dosagens ensaiados em função do tempo de 72 horas totais. Sendo feito, em ambas, a aquisição dos valores das temperaturas nas amostras a cada 2 minutos durante o período de 3 dias. Ambas as dosagens apresentadas nesta figura 56, foram obtidas a partir da utilização do cimento 1. Possibilitando perceber a influência das dosagens de sílica através da coleta das temperaturas médias. As temperaturas médias foram obtidas a partir de quatro amostragens por dosagem. Atendendo, portanto, o objetivo de conseguir medir alterações de temperatura mediante alteração de dosagem da sílica em substituição ao cimento.

Figura 56 :Temperaturas das Amostras conforme dosagem percentual de Sílica Ativa

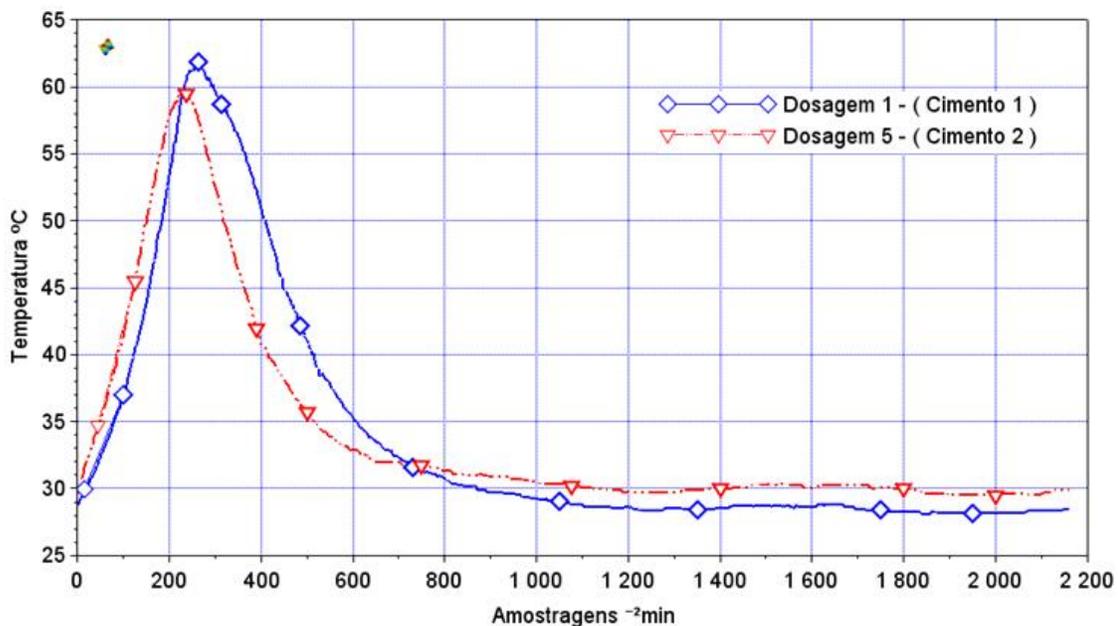


Fonte: Autor (2016)

O modelo de planejamento experimental visando prever a temperatura da pasta apresentou-se adequado para a percepção das diferentes dosagens.

Visando testar a eficácia da metodologia adotada (construir equipamento e medir as temperaturas), um outro teste foi feito e seus dados são apresentados na figura 57. Nela são apresentados os dados das medições de temperaturas dos dois cimentos ensaiados em função do tempo de 72 horas totais. Sendo feita a aquisição dos valores a cada 2 minutos durante o período de 3 dias. O cimento 1 apresentou temperaturas maiores que o cimento 2. A diferença percentual das temperaturas amostradas chegou a 3,6. De acordo com informações levantadas, o cimento 1 foi produzido com maior superfície específica. Visando obter maior reatividade.

Figura 57 : Temperatura amostradas conforme tipo de cimento ensaiado



Fonte: Autor (2016)

Por fim, observou-se as variações de temperatura das reações exotérmicas nas diferentes dosagens de sílica ativa em substituição ao cimento conforme demonstrada na figura 56. A dosagem de 7% de sílica em relação ao cimento apresentou temperatura máxima 1,3% maior que a amostragem do cimento sem adição extra de sílica (amostra de referência). Já a dosagem de 14% apresentou valor máximo idêntico ao da amostra de referência. Já a amostragem contendo dosagem de 20% de substituição da sílica ao cimento, apresentou valor de temperatura máxima 5,1% inferior à amostra de referência.

Foi possível ainda perceber a capacidade diferenciada de emitir calor de reação entre o cimento 1 e o cimento 2. E por fim, com o aprimoramento do protótipo 1 verificou-se a maior eficiência do protótipo 2 em relação ao anterior. E foi possível observar conforme indicado no

4.2 Análise dos Materiais e da Utilização da Sílica

Observa-se, analisando os resultados em função das adições de 0%, 14% e 20% de sílica, temperaturas menores que o percentual de 7%, conforme figura 56 e mais claramente

na 62. Assim como percentual menor em ensaios utilizando nanosilica em outro trabalho do gênero, também apresentou comportamento semelhante. A exemplo do que se vê no trabalho de SAID (2012), a dosagem intermediária de 3% apresentou maior elevação da temperatura enquanto a dosagem de 6% apresentou diminuição da temperatura de pico como ilustra a figura 2. Ou seja, dosagem com menor percentual inicialmente elevando a temperatura em relação às demais.

O desafio de desenvolver um modelo que pudesse prever a redução de temperatura mediante adição substitutiva ao cimento, foi assunto explorado em abrangente trabalho estado da arte de SHANAHAN, TRAN e ZAYED (2016), onde observou-se a redução de temperatura não proporcional às dosagens. Embora por outro lado, seus experimentos mostraram que na média, os materiais suplementares do cimento (Metacaulin, Sílica e Cinza) apresentaram aparente linearidade com a dosagem.

GAPINSKI e SCANLON (2006), enuncia que a reação pozolanica ocorrendo em função da hidratação, produz vários componentes incluindo o silicato de cálcio hidratado (CSH) e hidróxido de Cálcio Ca(OH)_2 . O silicato de cálcio hidratado (CSH) é a fonte de resistência do concreto. Quando a sílica ativa é adicionada, esta reage quimicamente com o Ca(OH)_2 produzindo (CSH) adicional. Daí os benefícios obtidos na zona interfacial de consolidação entre a pasta e os agregados, aumentando consideravelmente a resistência mecânica e a ataques químicos. Ou seja, com propriedades muito melhores que as do hidróxido de Cálcio.

A SFA (2005), em seu manual, enuncia que a sílica em comparação com outros materiais é muito mais reativa particularmente na cura inicial, devido ao alto índice de dióxido de silício e partículas de tamanho muito pequeno. Tal enunciado é de entendimento compartilhado por ZIELINSKI & KETTLE (2013) ao correlacionar a grande área específica em relação proporcional à alta reatividade.

Uma possibilidade aventada, conforme tal teoria e que pode ser melhor investigada em trabalhos futuros, é que em determinados percentuais como aqui observado no de 7%, tal dinâmica na combinação química acelere a reação que por sua vez tende a aumentar a temperatura de reação. Ainda que separadamente a sílica ativa não reaja com a água mas acelere a reação da mistura (cimento + sílica + água) elevando a temperatura inicial a patamares maiores que os do uso singular do cimento.

Tal resultado fomenta uma visualização deste comportamento da dosagem em função da temperatura conforme tratado no gráfico de barras horizontais elucidado na figura 58.

Tabela 19 : Aspectos de Moldagem

Dosagem (%) das Misturas ^{*(a)}	Mixigenação ³	Viscosidade da Mistura	Trabalhabilidade p/ Moldagem
0	Mecanizada ^{*(b)}	Média	Baixa
7	Mecanizada ^{*(b)}	Média	Baixa
14	Mecanizada ^{*(b)}	Média	Baixa
20	Manual	Alta	Muito Baixa

Fonte: Autor (2016)

A relação água/cimento adotada de 0,5 apresentou baixa trabalhabilidade da pasta ao moldar os corpos de prova. Causando dificuldade considerável à moldagem, devido a não aplicação de aditivos. Talvez fosse possível considerar a relação 0,6 semelhante aos padrões de relação obtidos para o concreto auto adensável bombeado, objeto de aplicação em campo das grandes e ou concretagens especiais em obras utilizando o concreto massa.

^{*(a)} – Dosagem percentual de sílica em substituição ao cimento Portland.

^{*(b)} – Dosagem mecanizada utilizando furadeira e misturador de argamassa itens

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, B.; CHIPMAN, H.; VIJAYAN, K. (1999). Some risks in the construction and analysis of supersaturated designs. *Technometrics*, v. 41, n.2, p 135-141, May.

ACI 207.1R-96 - Mass Concrete - Reported by ACI Committee 207

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee N° 305R-99 – Hot Weather Concreting. American Concrete Institute. P.O. Box 9094, Farmington Hills, Mich. 48333-9094 and ASTM 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, Pa. 19428.

ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee N° 209 - "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", Detroit-USA, ACI Manual of Concrete Practice,

ACQUAYE, Lucy. A Dissertation Presented to the Graduated School of The University of Florida in Partial Fulfillment of the Requirements for The Degree of Doctor of Philosophy. University of Florida 2006.

AGUADO, Antonio; GETTU, Ravindra e SHAH, Surendra. *Concrete Technology: New trends, Industrial Applications. Proceedings of the International RILEM Workshop on Technology Transfer of the New Trends in Concrete Com Tech '94.* Chapman & Hall. London, 1995.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues e SCANDIUZZI, Luécio. *Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios.* São Paulo: Pini, 1986.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. *Concreto: Uso de maneira Sustentável.* ISBN:978-85-60064-58-8, 2016.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues; SGARBOZA, Bento Carlos. *A CESP e a tecnologia do Concreto Refrigerado no Brasil.* São Paulo: 1985.

ARNDT, Markus; LIPUS, Klaus; BECKER, Astrid. METHOD PERFORMANCE STUDY ON HEAT OF HYDRATION DETERMINATION OF CEMENT BY HEAT CONDUCTION CALORIMETRY. The First International Proficiency Testing Conference, Sinaia, România 11th – 13th October, 2007.

AMARAL, Fernando. Introdução à Ciência de Dados: Mineração de Dados e Big Data. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016.

ASHBY, Michael. Seleção de Materiais no Projeto Mecânico. Editora Elsevier, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND Guia básico de utilização do cimento portland. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASTM C 186 – 05 Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement.

ASTM C1240-15, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

BABU, G. K.e PRAKASH, P. V. S. Efficiency of silica fume in concrete. Cement and Concrete Research, V.25, no.6, 1995.

BARAI, Sudhirkumar V. e MUKHARJEE, Bibhuti Bhusan. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 2014. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, West Bengal 721302. India, 2014.

BARKER, T. B. (1985). Quality by experimental design. New York, Marcel Dekker; Milwaukee: ASQC Quality Press.

BARROS NETO et al. (1996) apud QUEIROZ, Fernanda Cristina Barbosa Pereira, ARAÚJO JÚNIOR, Luciano Queiroz De. Planejamento de experimentos no processo de desenvolvimento de produtos. 1 ed. Porto Alegre: Revolução eBook, 2016.

BERRIEL, Marina Jorge B459t. Tradução comentada da obra: Vida de Michelangelo Buonarroti, escrita por Ascanio Condivi / Mariana Jorge Berriel. Campinas, SP : [s. n.], 2008.

BAUER, Wolfgang; WESTFALL, Gary D. ; DIAS, Helio. Física para Universitários - Relatividade, Oscilações, Ondas e Calor. Editora AMGH (MCGraw Hill e Bookman), 2013.

BIANCHINI, Mauricio. Análise da Influência dos Teores de Sílica Ativa na Produção de Concretos de Alta Resistência em Central Dosadora de Concreto. Dissertação Mestrado em Construção Civil. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da UFPR. Curitiba : UFPR, 2010.

BIM 5D. Construtoras apostam no BIM 4D para melhorar assertividade do planejamento de obras. Disponível em: <

BOGUE, Robert Herman – The chemistry of Portland Cement – 2nd edition 1955 – Reinhold Publishing Corporation

BOIVIN, S. G., 2001, Retrait au jeune âge du béton. Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. Thèse de doctoral, LCPC, Paris, nov.

CALADO, Veronica e MONTGOMERY, Douglas C. Planejamento de Experimentos usando Estatística / Veronica Calado e Douglas C. Montgomery. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2003.

CAMARINI, Gladis; BARBOSA, Denise Cristina; BARDELLA, Paulo Sérgio. Influência da Cura Térmica na Estrutura Porosa do Concreto Com Sílica Ativa. Simpósio EPUSP VI, 2006.

CARMO, João Bosco Moreira. Análise Comparativa do Desempenho de Concretos de Compostos com Sílica Ativa e Metacaulim Face à Resistência Mecânica e à Viabilidade Econômica. Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE – Setor de Tecnologia - Universidade Federal do Paraná. Curitiba PR 2006

CARPES JR, Widomar P. Introdução ao Projeto de Produtos. Editora: Bookman, 2014.

COELHO, Nailde de Amorim. Um Estudo Numérico do Efeito Térmico em Concreto Massa. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília: UNB, 2012.

COST, Tim. Practical semi-adiabatic Calorimetry for concrete mixture evaluation. TTCC/NCC Conference, 2008.

D'AMBROSIA, Matthew; CTL Group Associate and Nathaniel Mohler, PCA Concrete Engineer, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2015. Disponível em: < <http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/concrete-technology/concrete-design-production/early-age-cracking>>. Acesso em:19/10/15.

GONSALVES, António Manuel d'A. Rocha; SERRA, Maria Elisa da Silva; EUSÉBIO, Maria Ermelinda. Estereoquímica. Imprensa da Universidade de Coimbra. Coimbra, 2011.

CORDEIRO, GUILHERME CHAGAS Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto [Rio de Janeiro] 2006 XXXIX, 445 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2006) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

COST, Tim – Pratical semi-adiabatic calorimetry for concrete mixture evaluation – ttcc/ncc Conference, September 23, 2008. Disponível em: < <http://www.cptechcenter.org/ncc/TTCC-NCC-2008.cfm> >. Acesso em: 17/03/2016.

DAL MOLIN, D. C. C. – Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de Alta Resistência com e sem adições de microssílica. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, Denise C. C. e SEIDLER, Nelson. Efeito da Sílica Ativa a Alcalinidade e Consumo de Hidróxido de Cálcio Durante a Hidratação do Cimento. Simpósio EPUSP V, 2003.

D'AMBRÓSIA, Matthew; CTL Group Associate and Nathaniel Mohler, PCA Concrete Engineer, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2015. Disponível em: <<http://www.cement.org/for-concrete-books-learning/concrete-technology/concrete-design-production/early-age-cracking>>. Acesso em:19/10/15.

DAVENPORT, Thomas e KIM, Jinho. Dados demais!: Como desenvolver habilidades analíticas para resolver problemas complexos, reduzir riscos e decidir melhor./Thomas Davenport, Jinho KIM; tradução Afonso Celso da Cunha. – 1. Ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

DE FARIA, ÉTORE FUNCHAL. Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados. 2004 130p. Tese (Mestre em Ciências) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

DE ROJAS, M. I. Sanchez and FRIAS, M. ⌈⌋. The Influence of Silica Fume on the Heat of Hydration of Portland Cement. ACI. Special Publication, 1995.

DONALD A. St.John , Alan W. Poole, and Ian Sims – Concrete Petrography – A handbook of investigative techniques – First edition 1998 - Arnold - John Wiley – New York

EN 196-8:2003 Methods of testing cement – Heat of hydration – Solution method.

EN 196-9:2003 Methods of testing cement – Heat of hydration – Semi-adiabatic method.

GLASSER, F. P. - Thermodynamics of Cement Hydration - Entalpia de Hidratação dos compostos do Cimento - Materials Science of Concrete VII – 2005 - The American Ceramic.

F.M.Lea - The chemistry of Cement and Concrete – First edition 1935- Third edition - 1970 – Chemical Publishing Co. Inc.- New York

FISPQ, Nº: 03 – SILMIX. Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda, FICHA DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO REVISÃO:03, DATA: 10/02/2010.

FITZGIBBON, M.E. “Large pours –2, heat generation and control”. Concrete, Vol.10, No. 4, pp. 33-5. Dec.1976, London.

FREITAS, Fernando Augusto Ernlund de. Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio da análise de imagens. Campinas, SP, 2001.

FROHNSDORFF, Geoffrey; PIERCE, James S. ; DIAMOND, Sidney ; MALHOTRA, V.M. et al.. Guide to the Selection of Hydraulic Cements. ACI Committee 225,1991.

GAPINSKI, G e SCANLON, J. Silica Fume. Norchem technical papers and articles. 2006.

GAMBALE, Eduardo de Aquino; ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. Discussões e Simplificações para Entendimento e Limitações dos Aspectos Térmicos para Execução de Estruturas Massivas. Comitê Brasileiro de Grandes Barragens: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu – PR Maio, 2015.

GAMBHIR, Murari Lal. Concrete Technology: Theory and Practice. Fifth editon. Mc Graw Hill Education, New Delhi, 2013.

GOWRIPLAN, N. Efect of curing on durability. Concrete International, 1990. Disponível em : <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/2528> < >. Acesso em: 02 nov. 2017, 14:43:07.

HANAI, João Bento de. Fundamentos do Concreto Protendido. Ebook de apoio para o Curso de Engenharia Civil. São Carlos, USP, 2005. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/protendido/arquivos/cp_ebook_2005.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2017, 14:29:03.

HAINES, P. J. ; Reading, M. and Wilbum, F. W. . – Deferential Thermal Analysis and differential scanning calorimetry, Chapter 5. Handbook of thermal analysis and calorimetry edited by Patrick K. Gallagher. Elsevier 1998, Amsterdam, Netherlands.

HEIKAL, Mohamed; ALEEM, Abd.El.; MORSI, W.M. Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica. Construction and Building Materials, 2014.

HEIKAL, Mohamed; ALEEM, Abd.El.; MORSI, W.M.. Characteristics of blended cements containing nano-silica. HBRC Journal. Chemistry Department, College of Science, Al Imam Mohammad Ibn Saud Islamic University (IMSIU), P.O Box 90950 Riyadh 11623, Saudi Arabia, 2013.

HEO, Young-Sun; KIM, Kyoung-Min; KANG, Suk-Pyo; LEE, Jun. Effect of sodium silicate- and ethyl silicate-based nano-silica on pore structure of cement composites. Cement & Concrete Composites, 2014. Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology, Hwaseong 445-861, Republic of Korea.

HOFFMANN, Anelise Todeschini. Influencia da adição da sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos. Dissertação de Mestrado em engenharia . Porto Alegre: UFRGS, 2001.

DURAN-HERRERA A.; JUAREZ, C.A.; VALDEZ P.; BENTZ, D.P.. Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes. Cement Concr. Compos. 33, 39–45 2011 apud RASHAD, Alaa M.. A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. Gulf Organisation for Research and Development International Journal of Sustainable Built Environment, 2015.

PIAP, Pesquisa Industrial Anual de Produtos v.32, n.2. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf . Acesso em : 16/10/2016

ISHIDA, Tetsuya; CHAUBE, Rajesh P. ; KISHO, Toshihan; MAEKAWA, Koichi. Micro-physical approach to coupled autogenous and drying shrinkage of concrete. JSCE N° 578/V-37. November. 1997.

JAHREN, Charles T.; SHAW, Jacob J.; WANG, Kejin and LI, Jinxin “Linda”. Iowa Mass Concrete For Bridge Foundation Study – Phase I Final Report. Institute for Transportation, Iowa State University, December 2011.

JIN, E.; KIM, C. and KIM, J., (2012). "Equipment for Measuring the Adiabatic. Temperature Rise of Concrete by Compensating Heat Loss" Journal of Korea Concrete Institute, 24(5), 535-542 apud AN, Gyeong Hee e KIM, Jin Keun. Compensation method for prediction of the adiabatic temperature rise of concrete from semi-adiabatic device. The 2015 World Congresso on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15). Incheon, Korea, August 25-29, 2015.

JONASSON, Jan-Erik; Fjellström, Peter ; Emborg, Mats; Hedlund, Hans. Heat Loss Compensation for Semi-Adiabatic Calorimetric Tests. Luleå University of Technology, Lulea, Suécia, 2013.

JURAN, J. M.; GRZYNA, Frank M. Controle da Qualidade. São Paulo: Makron Books, 1992.

Kauark, Fabiana; Manhães, Fernanda Castro e Medeiros; Henrique, Carlos. Metodologia da pesquisa: Guia Prático. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

KIM, Soo Geun, "Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement" (2010). Graduate Theses and Dissertations. Paper 11675. Digital Repository @ Iowa State University, 2010.

KLEMCZAK, Barbara e BATOG, Maciej. Heat of hydration of low-clinker cement. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015.

LAKATOS, Eva Maria e MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. 7. Ed. - São Paulo: Editora Atlas, 2010.

LANGANA, B.W.; WENGB, K.; WARDA, M.A.. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. Department of Civil Engineering, The University of Calgary, Calgary, AB, Canada. Received 23 July 1996; accepted 8 January 2002.

LAMOND, Joseph F. e PIELERT, James H.. Significance of Tests and Properties of Concrete and ..., Edição 169, Parte 4. STP 169D. ASTM 2006.

LOTHENBACH, Barbara; WINNEFELD, Frank – Thermodynamic modeling of the hydration of Portland cement. – Cement and Concrete Research 36 – page – 209-226 – EMPA – Laboratory for Concrete and Construction Chemistry – Switzerland - Elsevier – 2006.

LIMA, Sandra Maria e VALIN JR, Marcos de Oliveira. Influência do Clima Tropical na Cura do Concreto. Jornada da Produção Científica da Educação Profissional e Tecnológica da Região Centro Oeste. Cuiabá, MT 2008.

MACHADO, Fabio Braz. Quartzito. Disponível em: <
<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/metamorficas/quartzito.html> >. Acesso em
:27/03/2016.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K.; Pozzolanics and Cementitious Materials. Gordon and Breach Publishers, CANMET, Ottawa, 1996.

MALHOTRA, V.M.; CARETTE, G.G.; SIVASUNDARAM, V. Role of sílica fume in concrete – a review. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, 2, Ottawa: Energy Mines and Resources, 1994, p 915-990.

MALVERN INSTRUMENTS. Disponível em: <
http://www.malvern.com/Assets/500px_howitworks_itc01.png>. Acesso em: 14/03/2017

Mass Concrete - Reported by ACI Committee 207 ACI 207.1R-96.

Masterton, William L.; Slowinski, Emil J. ; Stanitski, Conrad L..Princípios de química / 6. ed. Rio de Janeiro : Guanabara Koogan, 1990. 681 p., il.

MAUREN, Aurich . Simulação Computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades. Tese de Doutorado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. . Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais. Editora PINI, 1994.

MEHTA PK, Monteiro PJM. Concrete: microstructure, properties, and materials. New York: McGraw-Hill; 2006.

MELO FILHO, João Almeida. Durabilidade Química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal. Tese para obtenção do grau de doutor em ciências em engenharia civil – COPPE, 2012.

MINDESS, S. , YOUNG, J. F. . Concrete. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981. 671p.

MONK, P. e WADSO. Acta Chem. Scand., 22 (1968) 1842.

MORABITO, P. RILEM TC 119-TCE: Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, Vol. 30, 1997.

MORGAN, James M.e LIKER, Jeffrey K.. Sistema Toyota de Desenvolvimento de Produto: Integrando Pessoas, Processo e Tecnologia. Artmed, 2008.

AN, Gyeong Hee e KIM, Jin Keun. Compensation method for prediction of the adiabatic temperature rise of concrete from semi-adiabatic device. The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15). Incheon, Korea, August 25-29, 2015.

NBR 12817, 1993, Concreto endurecido - Determinação do calor específico - Método de Ensaio. Rio de Janeiro.

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

NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004

Neville, A. M. 'Properties of Concrete' .4th Edition, John Wiley & Sons Inc., 1997.

NEVILLE, A. M. . Propriedades do Concreto. 5 edição. Bookman, 2015.

NEWMAN, John e CHOO, Ban Seng. Advanced Concrete Technology 2: Concrete Properties. Editado por John Newman,B S Choo. Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.

NEWMAN, John e CHOO, Ban Seng. Advanced Concrete Technology 2: Concrete Properties. Editado por John Newman,B S Choo. Elsevier Butterworth Heinemann, 2003.

Ng, P.L., Ng, I.Y.T., and Kwan, K.H. . Heat Loss Compensation in Semi-Adiabatic Curing Test of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 105, No. 1, January-February 2008, pp. 52-61.

NOORT, Van. Introdução aos materiais Dentários. 3ª Edição. Editora Elsevier Health Sciences, 2011.

NORTH STAR Disponível em: < http://www.northstarice.com/pdf/brochures/NS_Mobile-Ice-Plants_8-1-2x11-1.pdf > Acesso em: 30/01/2016.

NT BUILD 388. Concrete: “Heat Development,” Nordtest Method, 1992.

NT BUILD 480. Cement: Heat of Hydration, Nordtest Method (1997-11).

NT BUILD 505. Measurement of Heat of Hydration of Cement with Heat Conduction Calorimetry. Nordtest Method (2003-12)

P.J. Haines, Thermal Methods of Analysis - Principles, Applications and Problems, Blackie, Glasgow, 1995, chapter 5.

PACELLI, W. A.. Concretos – Ensaios e Propriedades, Laboratório de Concreto, Furnas, Editora Pini, 1997.

PACELLI, W. A.; GAMBALE E. A.; ALVES, E. F. R. et al. (Equipe de Furnas), 1997, Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo. 1 ed., São Paulo, Pini.

PAULON, Vladimir Antonio. O Fenômeno Térmico no Concreto. ABCP - São Paulo, 1987. (ET-85).

PETRONILHO, E. Princípios Fundamentais Para Projetar Estruturas Duráveis em Concreto Refrigerado – São Paulo, 2011.

PRUDENCIO, W.J. Durabilidade das estruturas de concreto em água do mar. In: Colóquio sobre “Patologia do concreto e recuperação das estruturas”. Anais. . IBRACON, 1987.

QUEIROZ, Fernanda Cristina Barbosa Pereira, ARAÚJO JÚNIOR, Luciano Queiroz De. Planejamento de experimentos no processo de desenvolvimento de produtos. 1 ed. Porto Alegre: Revolução eBook, 2016.

RAO, G. A . Investigations on the performance of sílica fume-incorporated cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 11, p 1765 – 1770, November 2003.

REIS, Marcos. S. Estatística para a melhoria de processo: A perspectiva Seis Sigma. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2016.

RITA, MARIANE RODRIGUES, Otimização da Fase Construtiva de Estruturas de Concreto Massa em Ambiente Paralelo/Mariane Rodrigues Rita. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015. XV, 111 p.: il.; 29, 7cm. Orientadores: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn Fernando Luiz Bastos Ribeiro Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2015.

RODRIGUES, Alessandro Roger et al. Desenho técnico mecânico: Projeto e fabricação no Desenvolvimento de produtos industriais. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ROY, D.M.; SCHEETZ, B.E.; SABOL, S; BROWN, P.W.;SHI, P.H. e LICASTRO, P.H. . Maturity Model and Curing Technology. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC 1993.

SAID, A.M. ; ZEIDAN, M.S. ; Bassuoni, M.T. ; TIAN, Y. . Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*. Contents lists available at SciVerse Science Direct. Ed. Elsevier 2012.

SANTOS, Vanice dos e CANDELORO, Rosana J. . *Trabalhos Acadêmicos: uma orientação para a pesquisa de normas técnicas*. Porto Alegre: RS: AGE, 2006.

SARAYA, Mohamed El-Shahate Ismaiel. Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study. *Construction and Building Materials*, 2014. Department of Chemistry, Faculty of Science, Al-Azhar University, Nasr City, P.O. 11884, Cairo, Egypt.

SATO, Hilton e RAMOS, Marchi Lainetti. *Física para Edificações: Eixo: Infraestrutura – Série Tekne*. Editora Bookman, 2014.

SCHWING Stetter Disponível em: < <http://www.schwingstetter.com.br/eventos-e-noticias/2013/02/schwing-stetter-central-gelo-uhe-jirau-uhe-sto-antonio/> > Acesso em: 30/01/2016.

SERWAY RA, Jewett JW. Physics for scientists and engineers book. 6th ed. Thomson Brooks/Cole; 2004. p. 586 [Chapter 19].

SFA – Silica Fume User’s Manual. Silica Fume Association. April, 2005.

SHANAHAN, Natallia; TRAN, Victor e ZAYED, A. . Heat of hydration prediction for blended cements. J Therm Anal Calorim (2017) 128:1279–1291. Akademiai Kiado’, Budapest, Hungary 2016.

SHUI ZH, Zhang R, Chen W, Xuan DX. Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste. Constr Build Mater. 2010;24:1761–7.

SIAVASH G, Jean S, Jérémie SM. The effect of undrained heating on a fluidsaturated hardened cement paste. Cem Concr Res 2009;39:54–64.

SFA - Silica Fume Association . Silica Fume User’s Manual, 2005. < <http://www.endmemo.com/physics/specifichheat.php> > Acesso em: 20/01/2016

SILVA, Eugênia Fonseca. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. [Rio de Janeiro] 2007. XXVI, 332p. 29,7cm (COPPE/UFRJ,D.Sc., Engenharia Civil, 2007). Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

SILVA, Francisco Gabriel Santos; DANTAS, Alexon Braga. Estudo Sobre a Retração Autógena em Concretos de Alto Desempenho (CAD’s). IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino Americano de Pós-Graduação - Universidade do Vale do Paraíba

SILVOSO, Marcos Martinez; FAIRBAIRN, Eduardo M. R.; ALVES, José L. D. ; FILHO, Romildo D. T. e EBECKEN, Nelson F. F.. “Otimização do Processo Construtivo de Estruturas de Concreto Massa Utilizando Algoritmos Genéticos”. Programa de Engenharia Civil / COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

SILVOSO, Marcos Martinez; Fairbairn, Eduardo M. R.; Alves, José L. D.; Filho, Romildo D. T. ; Ebecken, Nelson F. F.. Otimização do Processo Construtivo de Estruturas de Concreto Massa Utilizando Algoritmos Genéticos V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto Programa de Engenharia Civil / COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

SIMPLICIO, M. A S. Concreto de alto desempenho suas vantagens e aplicações. World Tec Net – Tecnologia do Concreto, Universidade Federal da Paraíba. In: Concreto de Alto Desempenho – CD IBRACON, 1999.

SOUZA, Vicente Custódio de - Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto / Vicente Custódio Moreira de SOUZA e Thomaz RIPPER. - São Paulo : Pini, 1998.

SILVESTRE, Antonio Luís. Análise de Dados e Estatística Descritiva. Portugal: Escolar, 2007.

TALERO, R. e RAHHAL, V.. CALORIMETRIC COMPARISON OF PORTLAND CEMENTS CONTAINING SILICA FUME AND METAKAOLIN: Is silica fume, like metakaolin, characterized by pozzolanic activity that is more specific than generic? Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 96 (2009) 2, 383–393

TAYLOR, H. F. W., 1997, Cement chemistry, 2 ed. London: Thomas Telford, 459 p.

TECNOSIL. Processo de Fabricação da Sílica Ativa. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/produtos/>>. Acess em: 20/03/17.

TERZIAN, Paulo. Prevenção de fissuras por retração plástica de origem climática em pavimentos, pisos e lajes de concreto. *Concreto e Construções – IBRACON*, nº 46, Abril – 2007.

TEÓFILO, Reinaldo F. e FERREIRA, Márcia M. C. . Quimioterapia II: Planilhas Para Cálculos de Planejamentos Experimentais, Um Tutorial. *Quim. Nova*, Vol. 29, No. 2, 338-350, 2006 .

THOMAZ, Eduardo C. S. Cimentos e Concretos 1900 – 2008

TOBÓN, Jorge; PAYÁ, I. Jordi, RESTREPO, Oscar J. . Study of durability of Portland cement mortars blended with sílica nanoparticles. *Construction and Building Materials*. Elsevier, disp. Online Jan, 2015.

TZU, Sun. A arte da guerra / Sun Tzu; tradução de Sueli. Barros Cassal. -- Porto Alegre: L&PM, 2006.

WADSÖ, L.: An experimental comparison between isothermal calorimetry, semi-adiabatic calorimetry and solution calorimetry for the study of cement hydration, Nordtest Report TR 522, (2003).

WINTER, Nicholas B. Understanding Cement, 2005. Disponível em: <http://www.understanding-cement.com/understanding-cement-book-bonus.html>. Acesso em 04/08/2016.

YOUNG, Hugh D. Física II: Termodinâmica e Ondas/Yong e Freedman; [colaborador A. Lewis Ford]; tradução Cláudia Santana Martins; revisão técnica Adir Moysés Luiz. 12. Ed. São Paulo: Addison Wesley, 2008.

YUNUS, A. Çengel e GHAJAR , Afshin J. . Transferência de Calor e Massa. Ed. McGraw Hill, 2012.

ZIELENKIEWICZ, W. e KAMIŃSKI, M. . Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 65 (2001) 335-340. Institute of Physical Chemistry of the Polish Academy of Sciences, Kasprzaka 44/52, 01-224 Warsaw, Poland, 2001.

ZIELINSKI, John M. & KETTLE, Lorna. Pharmaceutical Physical Characterization: Surface Area and Porosity. Intertek Whitepaper, 2013.

ZIMMER, Juliano. Seleção de variáveis preditivas com base e índices de importância das variáveis e regressão PLS. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Porto Alegre: UFRGS, 2012.