



## **INFLUÊNCIA DA MODIFICAÇÃO NO CALOR DE HIDRATAÇÃO DE CONCRETOS COM CINZAS PESADAS NA DEFORMAÇÃO POR RETRAÇÃO PLÁSTICA**

**Leonardo B. Andrade (1); Janaíde C. Rocha (2); Malik Cheriaf (3)**

(1) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail:

[leonardo@ecv.ufsc.br](mailto:leonardo@ecv.ufsc.br)

(2) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail:

[janaide@ecv.ufsc.br](mailto:janaide@ecv.ufsc.br)

(3) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e-mail:

[malik@infohab.org.br](mailto:malik@infohab.org.br)

### **RESUMO**

Essa pesquisa enfoca a hipótese da incorporação de agregados reciclados de resíduos da queima de carvão mineral – cinza pesada (CZP) – serem boas soluções para a substituição de agregados miúdos naturais na produção de concretos. Analisando-se as características físicas dos agregados como granulometria e diâmetro de partículas se viu que há boa compatibilidade na substituição de agregados naturais (AGN) por resíduos, pois há melhora na distribuição granulométrica. A consideração referente a porosidade e quantidade de finos deve ser levada em conta já que há um aumento considerável na demanda de água para se obter uma consistência semelhante. Ensaios concernentes ao calor de hidratação das amostras, como calor máximo gerado, máxima taxa de calor e tempo do pico de calor máximo, revelaram que não há diferenças que possam causar danos nas propriedades dos concretos estudados.

Palavras-chave: resíduo, cinza pesada, concreto, calorimetria, retração plástica.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações sobre o calor de hidratação

Do ponto de vista químico, a hidratação do cimento Portland consiste em uma série de reações entre os minerais presentes no clínquer, o sulfato de cálcio e a água. Essas reações iniciam imediatamente com o contato com a água e iniciam também simultânea e sucessivamente em diferentes taxas, com as reações iniciais influenciando as reações posteriores.

O desenvolvimento da hidratação do cimento Portland depende basicamente de três processos (Lea, 2004): da taxa de dissolução das fases envolvidas; da taxa de nucleação e crescimento de cristais dos hidratos formados; da taxa de difusão de água e íons dissolvidos através do material hidratado já formado.

Nesse desenvolvimento, alguns fatores determinam a cinética do processo de hidratação do cimento Portland: a história do processamento do clínquer, incluindo taxa de aquecimento, temperatura máxima de queima e taxa de resfriamento, a quantidade e forma cristalina do sulfato de cálcio presente no cimento, a finura do cimento, a relação água/cimento, as condições de cura, a temperatura de hidratação, a presença de aditivos químicos na mistura (Lea, 2004).

As reações químicas entre o cimento anidro e a água durante a pega e o endurecimento de uma pasta liberam calor que resulta numa elevação da temperatura. Dessa forma, a seqüência de hidratação de um material à base de cimento Portland pode ser muito bem entendida levando-se em consideração o ensaio de calorimetria e observando-se a curva resultante da medição da temperatura ou do calor gerado em função do tempo.

O calor de hidratação consiste no calor químico das reações de hidratação e no calor de adsorção da água na superfície do gel formado no processo (Neville, 1981).

As reações de hidratação do cimento Portland são essencialmente exotérmicas.

Segundo o escopo da recomendação técnica RILEM TC 119-TCE1, um dos fatores mais importantes associados com a fissuração térmica em materiais à base de cimento Portland (podendo ser originada no estado fresco por retração plástica) é a evolução e distribuição de aumento de temperatura numa seção em qualquer tempo após a moldagem.

Dentro da cinética de hidratação do cimento Portland, é interessante comentar que há uma hipótese de melhoramento do processo de hidratação com a incorporação de partículas minerais na mistura, provocando uma diminuição da espessura da camada hidratada formada ao redor do grão de cimento (Lawrence *et al.*, 2003). Quando a parte anidra passa a ser hidratada por fenômenos de difusão, a presença de partículas finas minerais facilita o processo.

Conseqüentemente, se as partículas minerais são suficientemente finas e próximas dos grãos de cimento, então isso pode levar a um melhoramento da hidratação do cimento Portland.

A explicação disso é que a nucleação heterogênea é um processo físico que leva a uma ativação química da hidratação do cimento Portland. A nucleação dos hidratos por outras partículas minerais pode catalisar o processo de nucleação por redução da barreira de energia relativa ao grão de cimento (Lawrence *et al.*, 2003).

A presença de partículas minerais finas pode ocorrer pela incorporação de resíduos também minerais reciclados e utilizados como material substituinte ao agregado miúdo.

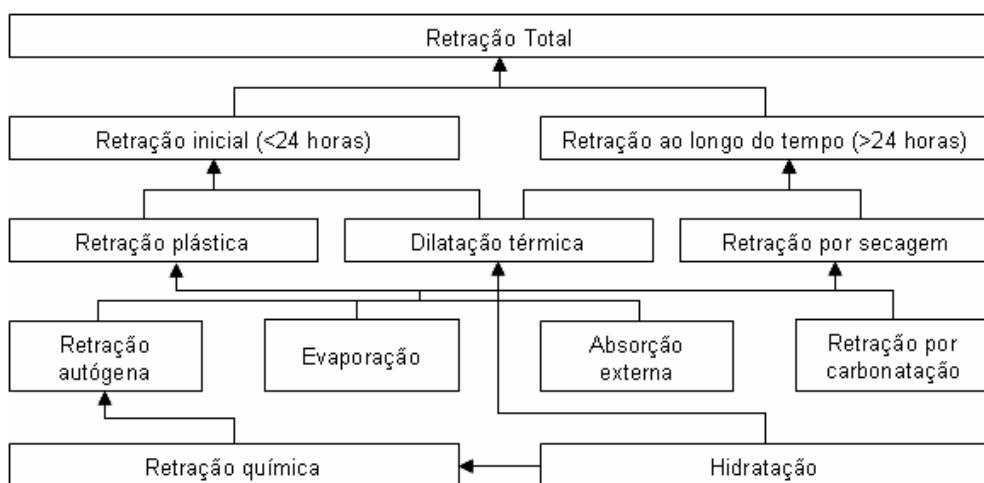
## 1.2 Considerações sobre retração plástica do concreto

Há uma diferença entre os volumes inicial e final de um concreto. Essa diferença é devida à perda de água mais a variação de volume em função das reações químicas. Tão logo as reações químicas de hidratação do cimento Portland iniciam, um processo de mudança volumétrica começa a ocorrer.

As mudanças ocorridas nas primeiras 24 horas do concreto, após o contato do cimento e água, referem-se ao adensamento e retração (Kronlöff *et al.*, 1995; Esping, 2007). O adensamento, que provoca uma mudança volumétrica no sentido vertical, diz respeito ao fenômeno de sedimentação das

partículas sólidas imersas na água, como é o caso do concreto. A matéria sólida formada pelas partículas de cimento Portland e agregados tende a ocupar níveis cada vez mais próximos da superfície inferior de um elemento de concreto devido a forças gravitacionais (Powers, 1960; Radocea, 1992). Com as partículas sólidas em sedimentação, a água passa a ocupar níveis mais próximos da superfície superior do elemento moldado (Mehta e Monteiro, 2005). Dessa forma, com a saída dessa água que ascende à superfície, o elemento de concreto passa a ter menor dimensão na direção vertical em relação à dimensão inicial antes da moldagem. Esse fenômeno ocorre somente antes de se atingir o tempo de início de pega, isto é, antes da formação da rede capilar inicial (Powers, 1960).

Após o tempo de início de pega, com o surgimento de um esqueleto sólido ordenado e de um sistema de poros inicial, o mecanismo de controle das possíveis mudanças volumétricas, ou retração total, passa a ser controlado por um conjunto de efeitos interconectados, conforme o organograma da figura 1.



**Figura 1 - Organograma dos mecanismos de governo da retração total**

### 1.3 Considerações sobre a cinza pesada de carvão mineral

Nessa pesquisa será utilizado um resíduo resultante da queima de carvão mineral em termelétricas cinza pesada (CZP), em substituição ao agregado miúdo natural.

A CZP possui interessante aplicação em materiais à base de cimento Portland como agregado inerte, pois tem características granulométricas semelhantes ao agregado natural (Ghafoori e Bucholc, 1997; Cheriaf *et al.*, 1999; Andrade *et al.*, 2007). Contudo, o teor de finos é significativamente maior já que o material não passa por processo de beneficiamento granulométrico por peneiramento, sendo utilizado in-natura. Dessa forma, é fundamental considerar a presença dos finos nas propriedades do estado fresco e endurecido dos concretos e argamassas de CZP (Andrade, 2004; Santos, 2006; Andrade, 2007).

Outra característica marcante da CZP com vistas na incorporação em argamassas e concretos como agregado é o potencial de fixação de água devido a sua porosidade e a sua forma irregular. A forma irregular e angular com superfície muito porosa pode demandar grande quantidade de água para obter o grau de lubrificação necessário para a trabalhabilidade da mistura (Ghafoori e Bucholc, 1997; Nisnevich *et al.*, 2001). A estrutura dos poros das partículas de cinza pesada é considerada a causa de um possível aumento do potencial de transporte de umidade (Bai *et al.*, 2005).

As cinzas pesadas apresentam características higroscópicas marcantes, levando a um maior conteúdo de umidade absorvido nos poros do material, principalmente pelo aumento da quantidade de microporos ( $\phi < 20\text{Å}$ ) e de mesoporos ( $20\text{Å} < \phi < 500\text{Å}$ ) (Santos, 2006).

Sendo assim, a análise de uma possível modificação na evolução do calor de hidratação de concretos de CZP como material granulares reciclados em substituição ao agregado miúdo natural será abordada neste artigo.

As considerações e discussões serão apresentadas de acordo com a influência que os concretos e os teores de substituições sofreram pela incorporação dos resíduos de CZP. O enfoque da análise será na presença dos finos provenientes dos resíduos e de sua natureza porosa.

## 2 OBJETIVO

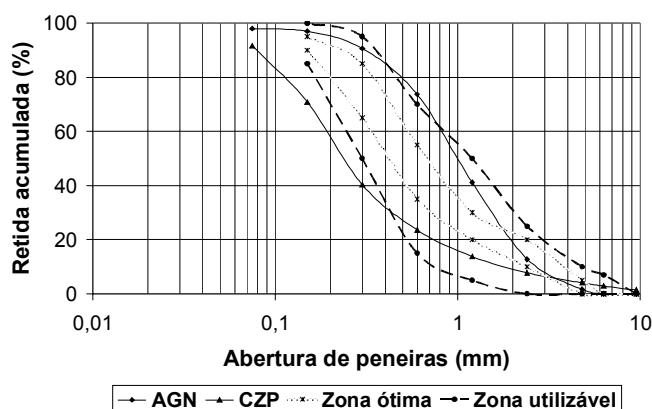
O objetivo deste artigo é avaliar a influência da cinza pesada em substituição ao agregado miúdo natural na evolução do calor de hidratação e da deformação por retração plástica de concretos.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Materiais

O cimento Portland utilizado foi o cimento Portland comum sem adições minerais CPI-S 32, segundo a norma brasileira NBR 5732/91 (semelhante ao tipo I ASTM C 150-07). A escolha do cimento deve-se ao fato de este não conter adições minerais normalizadas, que possibilita a avaliação da interação dos resíduos com um aglomerante formado praticamente de clínquer puro.

O agregado miúdo natural (AGN) utilizado foi uma areia de rio, que pode ser classificada, segundo critérios de composição granulométrica, dentro da zona utilizável, de acordo com a norma brasileira NBR 7211/2005, posicionando-se mais próxima da parte superior da faixa de classificação. Possui massa específica de 2,641 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura de 3,17. A curva de distribuição granulométrica está mostrada na figura 2, que inclui também a curva da CZP.



**Figura 2** - Comparaçao das curvas granulométricas dos agregados miúdos natural e resíduos associadas às zonas da ABNT

A cinza pesada desta pesquisa foi coletada na usina de Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo, em Santa Catarina. Possui massa específica de 2,054 kg/dm<sup>3</sup> e módulo de finura de 2,53. O teor de material fino abaixo da peneira 0,075mm é de 9,5%.

O aditivo utilizado foi um redutor de água de alta eficiência superplastificante, com base química de éter policarboxilato, comercialmente conhecido como Glenium 51, fabricado pela BASF construction chemicals.

### 3.2 Dosagens

A composição dos concretos foi definida de acordo com o consumo de agregados miúdos e os teores de substituição natural-resíduo de um estudo inicial em argamassa, segundo ANDRADE (2008). Foi fixado um consumo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup>.

O teor de agregado graúdo no traço unitário foi fixado para manter o consumo de cimento em 400 kg/m<sup>3</sup>, o teor de agregado miúdo conforme o estudo em argamassa e a relação a/c em 0,60. Assim, o resultado do teor unitário é de 1:1,81, na proporção cimento:agregado graúdo.

A relação a/c e o teor de superplasticificante (SP) foram os parâmetros que sofreram variações, dando origem a três séries distintas de concretos:

- Série 1, com relação a/c variável e teor de SP constante e igual a 0,6%. Nesta série, as relações a/c dos concretos foram as mesmas do estudo em argamassa (relações a/c variáveis), com a inclusão do aditivo SP. A avaliação da consistência foi feita através do ensaio de abatimento de tronco de cone – *slump test* – com procedimento descrito pela norma NBR NM 67/1998. Não houve fixação do valor do *slump*, mas buscou-se um resultado de consistência e trabalhabilidade compatíveis com um concreto para fins de bombeamento (e.g., abatimento acima de 120 mm). Também foi avaliada a consistência visualmente e através da colher, observando maior ou menor facilidade de manipulação da mistura. Isso levou a diferentes valores do *slump*, conforme as tabelas 1 e 2;
- Série 2, com relação a/c fixada em 0,60 e teor de SP constante e igual a 0,6%. Na série 2 fixou-se a/c e SP sem limitação pela consistência no *slump test* ou pela trabalhabilidade. Para alguns teores, o fato da fixação de a/c e de SP resultou em concretos com pouca ou nenhuma trabalhabilidade pelo *slump test*, conforme a tabela 2;
- Série 3, com relação a/c fixada em 0,60 e teor de SP variável conforme o valor do abatimento em tronco de cone. Na série 3 buscou-se fixar um intervalo da medida do *slump* entre 80 e 150 mm, mantendo a relação a/c fixa e variando o SP.

**Tabela 1** - Traço unitário dos concretos com CZP

Dosagem	Teor - volume (%)			Traço unitário, em kg		
	Areia	CZP	c	AGN	CZP	p
M500	100,0	0,0	1	2,36	0,00	1,81
M450	90,0	10,0	1	2,12	0,13	1,81
M400	80,0	20,0	1	1,89	0,29	1,81
M350	70,0	30,0	1	1,65	0,34	1,81
M300	60,0	40,0	1	1,42	0,43	1,81
M250	50,0	50,0	1	1,18	0,53	1,81
M200	40,0	60,0	1	0,94	0,63	1,81
M150	30,0	70,0	1	0,71	0,72	1,81
M100	20,0	80,0	1	0,47	0,85	1,81
M50	10,0	90,0	1	0,24	0,95	1,81
M0	0,0	100,0	1	0,00	1,05	1,81

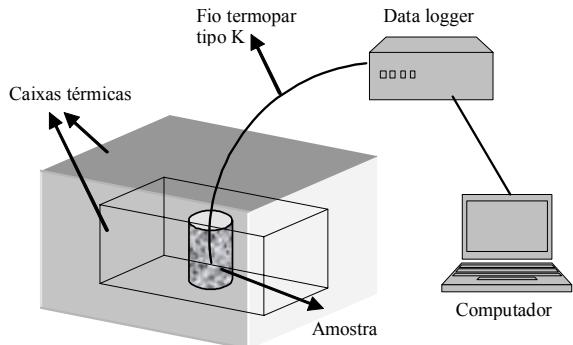
**Tabela 2** - Relações a/c e teores de SP para os concretos com CZP

Dosagem	a/c – série 1 (g/g)	SP – série 3 (%)	Slump (mm)		
			Série 1	Série 2	Série 3
M500	0,510	0,15	83	∞	165
M450	0,517	0,15	170	∞	130
M400	0,558	0,34	225	∞	115
M350	0,546	0,39	180	∞	160
M300	0,561	0,50	215	∞	160
M250	0,583	0,83	160	240	∞
M200	0,601	1,73	145	230	∞
M150	0,643	1,35	210	175	∞
M100	0,670	2,44	215	103	∞
M50	0,702	5,09	230	0	∞
M0	0,729	7,40	∞	0	∞

∞: abatimento com espalhamento do concreto maior do que a dimensão da base do equipamento de medição do slump test

### 3.3 Métodos

A medição da evolução de calor foi realizada utilizando um calorímetro semi-adiabático tipo de Langavant, segundo a figura 3.



**Figura 3** - Calorímetro semi-adiabático para medição da evolução de calor de hidratação

As leituras da temperatura no corpo-de-prova foram feitas utilizando um termopar tipo K. A amostra, no estado fresco, recém misturada, foi lançada em um recipiente cilíndrico de EPS, com espessura de 1,5 cm, altura de 12 cm e diâmetro de 7 cm. O termopar foi mantido na metade da altura da amostra. O recipiente cilíndrico foi coberto com uma manta térmica revestida com uma folha de alumínio (manta radiante).

Depois de lançada a amostra, o recipiente cilíndrico revestido com a manta térmica era lacrado com fita adesiva para fixar as partes, reduzindo o fluxo de ar no espaço entre a manta e o recipiente da amostra. Após isso, era colocada em uma caixa térmica dentro de uma outra caixa térmica de maior dimensão que a anterior. Ambas as caixas são fabricadas com uma espécie de isoplástico, com paredes em duas camadas, com uma camada de ar entre as paredes.

O ensaio com o calorímetro foi realizado em ambiente climatizado de temperatura  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa de  $60 \pm 5\%$ .

As perdas de calor não foram consideradas para efeito de cálculo dos parâmetros já que os resultados serão qualitativos (comparativos), onde se acredita que o desempenho é o mesmo.

### 3.4 Cálculo dos parâmetros de calorimetria semi-adiabática

De acordo com o procedimento utilizado para a avaliação da cinética de hidratação, alguns parâmetros de calor foram determinados para melhor caracterizar a influência da CZP.

A partir da medição da temperatura ao longo do tempo de ensaio, o procedimento experimental utilizado permitiu determinar uma série de parâmetros que contribuíram para a análise comparativa da influência dos resíduos nos concretos

- temperatura da amostra  $T_i$  e variação da temperatura com o tempo  $\Delta T_i$ : o aparato de medição de calor de hidratação gerado permite a medição da temperatura da amostra no calorímetro durante o tempo de ensaio. Assim sendo, é possível determinar uma curva de evolução de temperatura ao longo do tempo de ensaio. Já a variação da temperatura  $\Delta T_i$  pode ser determinada através da eq.1.

$$\Delta T_i = T_i - T_1 \quad (\text{eq.1})$$

$\Delta T_i$ : variação da temperatura da amostra em função da temperatura inicial, em °C

$T_i$ : temperatura da amostra no intervalo de tempo  $i$  considerado, em °C

$T_1$ : temperatura da amostra no início do ensaio, em °C

- calor gerado no tempo  $Q_i$  e taxa de calor gerado no tempo  $\Delta Q_i$ : com a evolução da temperatura ao longo do tempo, pode-se calcular o desenvolvimento do calor gerado na amostra tomando-se por base a sua capacidade térmica calculada. Da mesma forma, a taxa do calor gerado ao longo do tempo é possível de se obter relacionando o calor e o tempo. Eq.2 e eq.3 foram utilizadas para o cálculo de  $Q_i$  e  $\Delta Q_i$ .

$$Q_i = \frac{C_s \cdot \Delta T_i}{m_c} \quad (\text{eq.2})$$

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo  $i$ , em J/g

$C_s$ : capacidade térmica da amostra, em J/K

$\Delta T_i$ : variação da temperatura no tempo  $i$ , em °C

$m_c$ : massa de cimento na amostra, em g

$$\Delta Q_i = \frac{Q_i}{t} \quad (\text{eq.3})$$

$\Delta Q_i$ : taxa de calor gerado no tempo  $i$ , em J/g/h

$t$ : intervalo de tempo  $i$ , em h

- calor total gerado  $Q_{\max}$ : o acumulado da quantidade de calor gerado no tempo possibilita a obtenção do valor total do calor envolvido no tempo de ensaio. Essa relação está mostrada em eq.4.

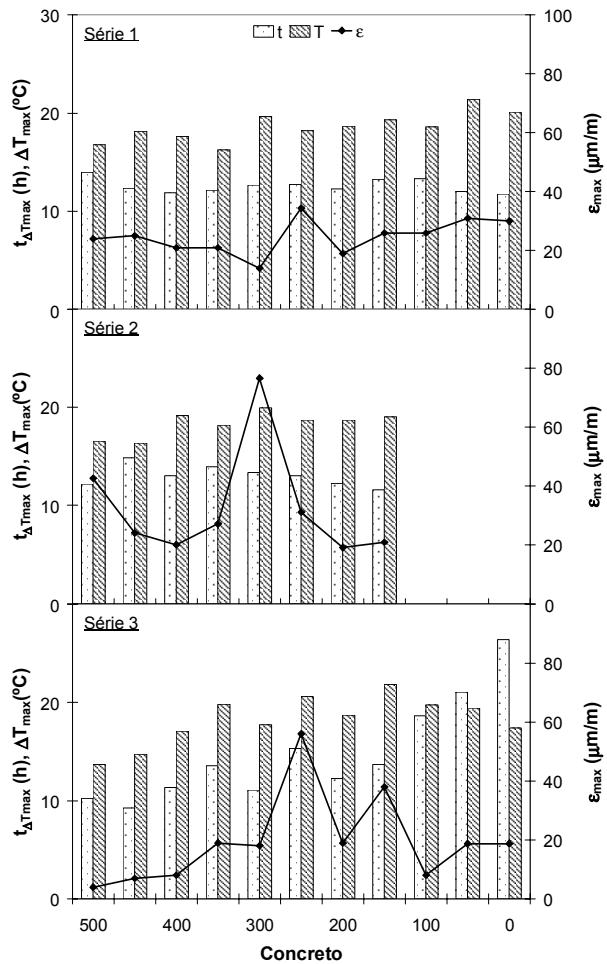
$$Q_{\max} = \sum Q_i \quad (\text{eq.4})$$

$Q_{\max}$ : quantidade do calor total gerado durante o ensaio, em J/g

$Q_i$ : quantidade de calor gerado no tempo  $i$ , em J/g

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Observando os resultados referentes às variações máximas de temperatura e o tempo até alcançá-las, mostrados na figura 4, é possível traçar uma tendência para modificações em virtude do teor de CZP, da presença e teor de SP, da influência da relação a/c e, principalmente, do tipo de dosagem (série 1, 2 e 3).



**Figura 4** - Influência da variação máxima da temperatura e tempo até a máxima temperatura, na retração plástica dos concretos de CZP

O aumento da temperatura do concreto tende a estabelecer que há um aumento na quantidade de reações e, assim, um aumento da cinética de hidratação. Se o aumento da temperatura estiver relacionado com uma diminuição do tempo até o endurecimento, ou seja, redução do tempo até o pico de maior temperatura, pode-se afirmar que o concreto terá maior deformação por retração plástica.

Entretanto, se houver efeitos simultâneos de aumento da temperatura e do tempo até o pico de temperatura, não pode-se afirmar decisivamente que haverá aumento da deformação.

Segundo a figura 4, na série 1, para um mesmo tempo do pico de calor com um aumento da variação da temperatura em função do aumento do teor de CZP, observa-se que há um aumento na deformação máxima por retração plástica  $\epsilon_{\max}$ .

Como a série 1 teve a relação a/c variável, com valores mais altos para maiores teores de CZP, o esperado seria redução de  $\epsilon_{\max}$ , já que há uma maior quantidade de água disponível para aliviar o efeito da retração. Porém, com o efeito de melhoramento da dispersão das partículas pelo aditivo SP, pode-se considerar que há maior quantidade de reações, com consequente aumento da temperatura e também

maior concentração de calor pelo efeito da CZP, já explorado no capítulo quinto.

Contudo, se forem observados os menores teores de CZP (até 40%), percebe-se que há uma redução de  $\epsilon_{max}$ , para uma diferença de 7% na relação a/c, considerada baixa. Nessa direção, poder-se-ia intuir que a CZP poderia contribuir para a redução de  $\epsilon_{max}$ .

Para a série 2, a trabalhabilidade nos menores teores de CZP (até 30%) foi fortemente alterada pela elevação de a/c em relação à série 1, com a fixação de SP em um valor alto para a quantidade de água envolvida. Dessa forma,  $\epsilon_{max}$  apresentou redução considerável com o aumento do teor de CZP, exceto pelo valor em M300, que mostrou característica atípica em comparação aos outros teores.

Nessa série, o efeito de elevação do pico de temperatura e diminuição do tempo até esse pico pode ser conferido, embora o efeito da presença da CZP tenha sido o fator preponderante para a redução de  $\epsilon_{max}$ .

A partir da dosagem equilibrada do aditivo SP para a relação a/c utilizada na série 3, o efeito CZP já não pode ser considerado, pois o teor de SP foi significativo nos concretos com maior quantidade de CZP, resultando em aumento do tempo até o pico de temperatura. Assim, o retardo das reações não possibilitou maior deformação por retração, mesmo que com um patamar de temperatura maior do que M500 na série 3.

Já nos teores de CZP até 60%, considerando M250 como espúrio, o efeito da dosagem adequada do SP, sem provocar retardo nas reações, e o fato do aumento do teor de CZP elevar a temperatura, possibilitaram uma tendência de elevação de  $\epsilon_{max}$  com o aumento da temperatura. Nisso, não pode-se conferir o efeito de melhoramento da deformação por retração plástica esperada pela presença da CZP. Isso se explica pela relação a/c não ser adequada para uma migração efetiva da água para a CZP.

Os parâmetros de calor calculados a partir dos dados de temperatura e da amostra permitem que as afirmações anteriores sejam confirmadas. A figura 5 mostra os resultados calculados dos parâmetros do calor envolvido.

Como os valores de  $Q_i$ ,  $Q_{20h}$  e  $\Delta Q_i$  são calculados a partir dos dados da figura 5, então as tendências são as mesmas.

O pico de calor  $Q_i$  está diretamente envolvido com a elevação da temperatura; assim, onde na figura 5 houve aumento da variação máxima da temperatura o valor de  $Q_i$  aumentou, estabelecendo a afirmação de que há maior quantidade de reações e maior concentração de calor, devido à maior cinética de hidratação e à presença da CZP, respectivamente.

A taxa de desenvolvimento do calor  $\Delta Q_i$  melhora o entendimento para a consideração de um efeito de retardo ou aceleração. Para a série 1, os concretos com maiores teores de CZP apresentaram maiores taxas  $\Delta Q_i$ , pois continham maior quantidade de água. Como a CZP não funcionou como mitigadora da deformação plástica e o tempo para o pico de calor foi menor do que o concreto de referência propõe-se que o fator de maior  $\Delta Q_i$  proporcionou mais reações em menores tempos.

Para a série 2, a taxa se manteve praticamente constante nos teores de CZP, e na série 3 mostrou a redução significativa devido ao retardo forte das reações de hidratação pelo aumento do aditivo SP.

Os valores do calor total em 20 horas de ensaio  $Q_{20h}$  concordam com as considerações feitas sobre a taxa de calor, já que depende do crescimento do calor ao longo do tempo. Esse parâmetro permite que seja relacionado o grau de hidratação do cimento no concreto em função do tempo. Logo, possibilita afirmações de que há aceleração ou retardo das reações de hidratação para valores maiores ou menores num mesmo tempo.

A evidência mais significativa dos resultados está na série 3, nos teores mais elevados de CZP M100, M50 e M0, devido ao retardo das reações pelo aumento do teor de aditivo SP.

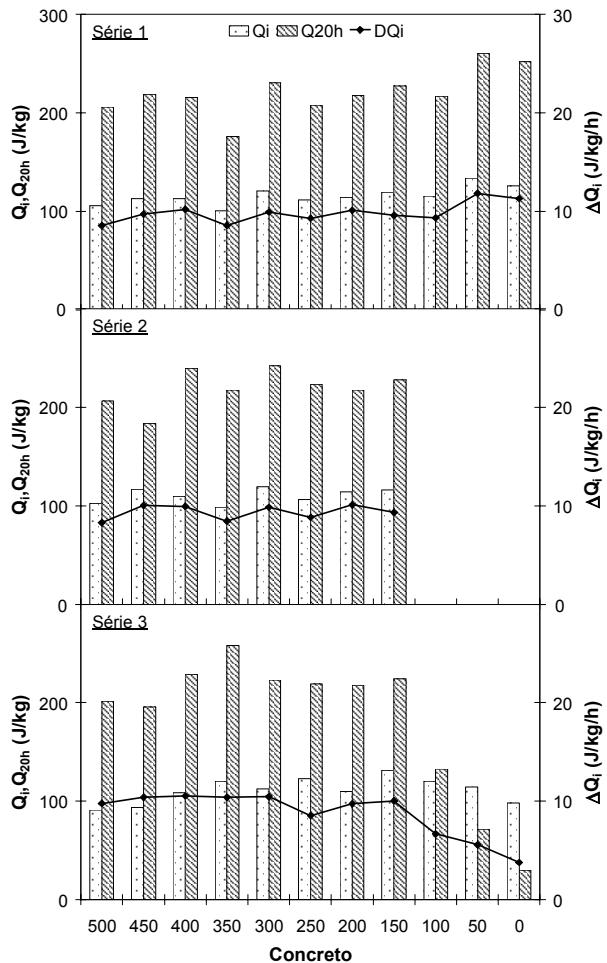


Figura 5 - Pico de calor, calor total em 20 horas e taxa máxima de calor

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e apresentados neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

- As diferenças das dosagens dos concretos das séries 1, 2 e 3 foram significativas para as modificações nos parâmetros da retração plástica. A série 1 teve como fator preponderante a elevação da relação a/c com o aumento do teor de CZP, que proporcionou concretos com maior tendência a deformações por retração plástica. A série 2 teve como característica marcante a alta dosagem de aditivo SP nos teores mais baixos de CZP para o nível de a/c utilizado (0,60). Porém, para os menores teores de CZP, a quantidade de SP incorporado foi bastante compatível com a/c devido à maior demanda pela CZP, resultando em concretos mais bem ajustados e de variação positiva em relação aos parâmetros de retração plástica. Por fim, os concretos da série 3 tiveram dosagens de SP mais justas em relação à trabalhabilidade, contudo a dosagem do aditivo SP precisou ser aumentada com o aumento do teor de CZP até que atingiu um nível acima do indicado pelo fabricante, levando a um excessivo retardamento das reações, levando o material a uma modificação significativa, inviabilizando a comparação com os outros teores;
- Os parâmetros da cinética das reações de hidratação pela medição contínua da temperatura da amostra em calorímetro semi-adiabático como parâmetros de influência na retração plástica foram importantes. A variação máxima da temperatura e o pico de calor são bons indicadores da intensidade de calor gerado, da permanência desse calor na amostra por mais ou menos

tempo e também de estimativa de maior ou menor número de reações num dado tempo. Na série 1, há um aumento da temperatura da amostra com o teor de CZP, mas com diminuição da deformação por retração plástica. Esse resultado pode indicar, por hipótese, que há uma contribuição da CZP para o alívio parcial da retração, mesmo com maior temperatura e, por consideração, maior quantidade de reações que aumentam a tendência à retração. Para os concretos da série 2, o aumento excessivo da fluidez para os teores de CZP até 30% provocou uma redução importante na deformação por retração plástica, mesmo com os picos de temperatura da mesma ordem dos da série 1. Já na série 3, não pode-se estabelecer a influência da CZP na deformação pelos valores dos picos de temperatura, pois o teor de aditivo SP foi o fator preponderante;

- A taxa de desenvolvimento de calor e o valor do calor total envolvido no tempo de 20 horas possibilitaram um melhor entendimento da velocidade e patamar das reações de hidratação. Os resultados mostraram que os concretos da série 1 apresentaram maiores taxas para maiores teores de CZP, com maior quantidade de reações em menores tempos, e com maior calor envolvido no tempo de 20 horas. Na série 2 não ficou evidenciada a modificação na taxa de calor e calor em 20 horas, permanecendo os resultados praticamente constantes com o aumento de CZP. E, na série 3, a forte influência do aditivo SP na redução da taxa e do calor em 20 horas, por consequência, retardo das reações de hidratação, retardo na pega;
- O desenvolvimento da cinética de hidratação é bem avaliado pelo grau de hidratação da mistura em um tempo determinado. A presença de CZP não reduziu o grau de hidratação das amostras, já que os concretos de CZP tendem a não liberar o calor gerado com maior facilidade do que o concreto referência. Portanto, as mesmas considerações do calor no tempo de 20 horas valem para o grau de hidratação, exceto para as mesclas M100, M50 e M0 da série 3. Observou-se ainda que o aditivo SP proporcionou um melhor desenvolvimento da hidratação, pois permite melhor dispersão das partículas de aglomerante.

## 6 REFERÊNCIAS

LEA, F.M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 4rd edition. London: Edward Arhold, 2004. 1092p.

NEVILLE A.M. **Properties of Concrete**. 3rd edition. Great Britain: Pitman international text, 1981. 779 p.

RILEM TC 119-TCE Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages. **Materials and Structures**, v. 30, p. 451-464, 1997.

LAWRENCE P., CYR M., RINGOT E. Mineral admixtures in mortars: effects of inert materials on short-term hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1939-1947, 2003.

ESPING O. **Early age properties of self-compacting concrete - Effects of fine aggregate and limestone filler**. 2007. 206 f. Thesis (PhD) – Chalmers University of Technology, Göteborg.

KRONLOF A., LEIVO M., SIPARI P. Experimental study on the basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1747-1754, 1995.

MEHTA P.K., MONTEIRO P.J.M. **Concrete**. 3rd edition. McGraw-Hill Professional, 2005. 659 p.

POWERS T.C. Physical properties of cement paste. In: International Symposium on the Chemistry of Cement: Session V – Properties of Cement Paste and Concrete, 4., 1960, Washington D.C. **Proceedings**... p. 577-613.

RADOCEA, A. **A study on the mechanisms of plastic shrinkage of cement-based materials.** 1992. 125 f. Doctoral dissertation – Chalmers University of Technology, Göteborg, 1992.

ANDRADE L.B. **Metodologia de avaliação para uso de cinzas pesadas de termelétricas como agregado natural para concreto.** 2004. 268 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2004.

NISNEVICH M., SIROTIN G., DVOSKIN L., ESHEL Y. Effect of moisture content of highly porous bottom ash on properties of concrete mixture and hardened concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, p. 283-288, 2001.

BAI Y., DARCY F., BASHEER P.A.M. Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 691-697, 2005.

GHAFOORI N., BUCHOLC J. Properties of high-calcium dry bottom ash concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, p. 90-101, 1997.

CHERIAF, M., PERA, J., ROCHA, J.C. Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1387-1391, 1999.

ANDRADE L.B. **Análise da influência da substituição do agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais nos parâmetros de retração plástica de concretos.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2008 (defesa aprovada em processo de publicação).

ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 231-241, 2007.

ANDRADE, L.B., ROCHA, J.C., CHERIAF, M. Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement. **Waste Management**, v. 27, p. 1190-1199, 2007.

SANTOS, F.I.G. **Avaliação das propriedades higrotérmicas das argamassas: estudo de caso com as cinzas pesadas.** 2006. 186f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2006.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos órgãos financiadores dessa pesquisa: ao CNPq, ao FINEP-HABITARE, à empresa Tractebel e à ANEEL. Às empresas Protensul, Imbralit e BASF pela contribuição à pesquisa com doação das matérias-primas.