



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Análise das Características Térmicas dos Materiais Ativados Alcalinamente

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Especialidade de Estruturas

Autor

Diogo Fidalgo da Mota Longo

Orientador

Adelino Vasconcelos Lopes

Maria Isabel Moita Pinto

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Fevereiro, 2016

AGRADECIMENTOS

Ao longo da realização do presente estudo pude contar com um apoio incondicional de pessoas da qual não poderia de deixar a minha homenagem e o meu agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Adelino Lopes, por toda a dedicação a este trabalho experimental, por todas as horas de ajuda e pelos ensinamentos prestados.

À Professora Isabel Pinto, por todas as oportunas sugestões dadas na presente dissertação

Ao Professor Alberto Martins, pela ajuda que me deu.

Aos meus pais, Manuel Fidalgo e Almerinda e ao meu irmão, Rafael, e aos meus avós pelo apoio incondicional e incentivo que me sempre deram ao longo destes anos.

Aos meus Amigos e a minha Namorada, que estiveram sempre lá.

RESUMO

Na presente dissertação pretende-se estudar a evolução das temperaturas atingidas em ligantes hidráulicos ou em materiais ativados alcalinamente no sentido de amenizar os problemas que podem ser originados pelos diferenciais de temperatura na fase inicial da cura do material. Para tal simulou-se o problema, em ensaio adiabático, de modo a poder conhecer-se as características térmicas das reações desenvolvidas na ativação alcalina.

Pretende-se também estudar a viabilidade da utilização de um material ativado alcalinamente na substituição do tradicional betão de cimento. Num estudo anterior, verificaram-se diversos problemas que urgia resolver. Um dos mais importantes consistiu no endurecimento precoce do material, aquando da concretização de um conjunto de vigas, em resultado das elevadas temperaturas que se verificaram no processo de amassadura.

Na presente dissertação procede-se também a introdução de um adjuvante nas misturas de argamassa e nas misturas de metacaulino com o intuito de retardar a presa de ambas, contrariando assim o endurecimento precoce, referido anteriormente.

ABSTRACT

This dissertation intends to study the evolution of the temperatures reached in hydraulic binders or alkali-activated materials in order to mitigate the problems that can be generated by temperature differences in the initial hardening of the material. To this end, the problem was simulated in an adiabatic test, to meet to the thermal characteristics of the reactions developed in the alkaline activation.

It is also intended to investigate the feasibility of using an alkali-activated materials in replacing the traditional cement concrete. However, a previous study found there are some problems that need to be solved. One of the most important consisted of premature hardening of the material, after a set of beams was poured, as a result of the high temperatures that have occurred just after pouring.

The present work also includes the addition of an adjuvant in the mortar and the metakaolin mixes to delay hardening and to prevent the premature hardening, as previously mentioned.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
SIMBOLOGIA	vi
ABREVIATURAS	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CONCEITOS TEÓRICOS	4
2.1 Problemas térmicos.....	4
2.2 Calor de Hidratação	5
2.3 Hidratação	5
2.4 Controlo das temperaturas	5
2.5 Estudos da temperatura no material Betão	6
2.6 Adjuvantes/plastificantes	13
2.7 Geopolimeros.....	15
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
3.1 Materiais	20
3.1.1 Cimento	20
3.1.2 Metacaulino	20
3.1.3 Silicato de sódio	21
3.1.4 Hidróxido de sódio	21
3.1.5 Areia	21
3.1.6 Água	22
3.1.7 Redutor de água/plastificante	22
3.1.8 Termopares	23
3.1.9 Data Logger	23
3.1.10 Estufa	23
3.1.11 Moldes	24
3.1.12 Misturadora.....	24
3.1.13 Mesa vibratória.....	25
3.2 Procedimento experimental	26
3.2.1 Procedimento experimental base.....	26
4 RESULTADOS	33

4.1	Provetes 150x150x100mm	33
4.1.1	Provetes de argamassa Normal.....	33
4.1.2	Provetes de metacaulino	37
4.2	Provetes (200x200x200mm).....	39
4.2.1	Provetes de argamassa	40
4.2.2	Provetes de Metacaulino.....	45
4.3	Argamassa com Plastificante	49
4.4	Metacaulino com plastificante	54
5	ABAQUS.....	58
5.1	Exemplo 1	58
5.2	Exemplo 2	60
5.3	Exemplo 3	61
6	CONCLUSÕES	63
6.1	Trabalhos Futuros	64
	BIBLIOGRAFIA	65

SIMBOLOGIA

q_t - quantidade de calor por unidade de massa de cimento

C_p - capacidade de calor específico do betão

T_t - temperatura da amostra de betão no tempo t , durante o ensaio adiabático

T_0 - temperatura da amostra no início do ensaio;

m_s - massa da amostra de betão no ensaio

m_c - massa de cimento da amostra

A/C - relação água cimento

A/L - relação água ligante

“*Central*” - Temperatura medida através do termopar localizado no centro do provete

“*Face*” - Temperatura medida através do termopar localizado na face do provete

“*Canto*” - Temperatura medida através do termopar localizado no canto do provete

t^* - tempo da estufa ligada.

$T_{proвете}$ - Temperatura medida através do termopar localizado no centro do provete

$T_{molde} = \frac{2 \text{Face} + \text{Canto}}{3}$

Forno - Temperatura medida através do termopar localizado dentro da estufa

T_{ef} - amplitude da temperatura efectiva

ΔT - temperatura relativa ao longo do tempo ($\Delta T = T_{ef} - T_{ext}$)

ΔT_{mp} – subtração da variação de temperatura do molde (T_{molde}) com a variação de temperatura do $T_{provetete}$.

ΔT_{ma} - variação de temperatura média acumulada

f_c – Valor da tensão de rotura do betão à compressão

f_m – Valor da tensão de rotura do metacaulino à compressão

ABREVIATURAS

FA - cinzas volantes

Temp. - Temperatura

CPN - cimento Portland normal

MEF - Método dos Elementos Finitos

XPS - Poliestireno extrudido

T_{ext} - Temperatura exterior

Pan - Provete de argamassa normal

Panp - Provete de argamassa normal revestido com poliestireno extrudido

Pmn - Provete de metacaulino normal

Pap - Provete de argamassa com plastificante

Pmp - Provete de metacaulino com plastificante

1 INTRODUÇÃO

O betão e a argamassa são utilizados como materiais de construção há milhares de anos, tendo sido inicialmente produzidos pela mistura de argila ou argila margosa, areia, cascalho e água. Há registos de que os materiais eram, quando necessário, transportados ao longo de quilómetros. Existem até registos de que os romanos fizeram tentativas para armarem o “betão” com cabos de bronze, experiências que não foram bem sucedidas, devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica do bronze e do betão (Applenton J.@ (2016)).

O betão armado, tal como o conhecemos hoje, surgiu da necessidade de aliar a durabilidade da pedra à resistência do aço. Esta associação, o betão armado, resulta da união do betão simples às armaduras de aço. Sabe-se que o betão simples resiste bem aos esforços de compressão e muito pouco aos esforços de tração (Bastos, P.S.S. (2006)).

No entanto, elementos estruturais como lajes, vigas, pilares, são solicitados por outros esforços (tração, flexão, compressão e punçoamento), relativamente aos quais as características do betão simples só parcialmente podem responder. Por isso tornou-se necessário a adição de um material que resista bem à tração, destacando-se o aço. A união dos dois materiais é possível e é realizada com êxito devido a uma série de características comuns, entre as quais se destacam a boa aderência entre ambos (ECOCASA@ (2016)).

Contudo, os materiais de construção feitos à base de cimento, os chamados “materiais cimentícios”, podem ser considerados como os materiais mais importantes produzidos pelo homem, porque lhe possibilitou edificar todas as obras que lhe garantem a vivência social, como por exemplo as habitações, aquedutos, barragens, obras sanitárias, pontes, escolas, hospitais, entre tantos outros tipos de construções (Bastos, P.S.S. (2006)).

Deste modo, o betão armado tornou-se num material que vem sendo largamente usado em todos os países do mundo, em todos os tipos de construção, em função de várias características positivas tais como: economia, conservação, adaptabilidade, rapidez de construção, segurança contra o fogo, impermeabilidade, resistência aos choques e vibrações (Bastos, P.S.S. (2006)).

Pelos aspetos referidos anteriormente, o betão armado é um material utilizado na construção civil que se tornou num dos elementos mais importantes da arquitetura do século XX, principalmente após a 2ª Grande Guerra. Assistiu-se à afirmação das grandes possibilidades do betão armado como material estrutural, à exploração do betão aparente como solução arquitetónica e ao grande desenvolvimento do betão armado e pré-esforçado (Applenton J.@ (2016)).

As grandes estruturas de betão, tais como as barragens, as pontes, etc, apresentam um elevado potencial para fissurar, em resultado de tensões induzidas por gradientes de temperatura

no interior do betão. Estes gradientes de temperatura ocorrem quando o calor gerado no betão é dissipado para o meio envolvente. Nestas condições, a temperatura na superfície do betão é inferior à verificada no interior, daí as tensões de tração no betão superficial. Como este fenómeno se verifica no início do endurecimento do betão, é fácil as tensões de tração serem superiores à sua resistência à tração, provocando fissuras, que em última instância afetam a integridade e a durabilidade da estrutura (Tayade et al, (2014) e CONCRETE RESEARCH PORTAL@ (2016)).

Apesar de todas as vantagens apresentadas anteriormente em relação ao betão, existem também desvantagens. Sendo uma das grandes desvantagens do betão é que da sua produção resulta de forma directa ou indirecta de cerca de 9% do dióxido de carbono gerado pela actividade humana. Para travar este descontrolo ambiental, tem sido uma preocupação na busca de materiais cimentícios mais sustentáveis (BETÃO ECOLOGICO DE GEOPOLIMERO@ (2016)).

Pinto, A.T. (2006) refere que “a ativação alcalina de aluminossilicatos veio promover o reencontro com técnicas muito provavelmente já usadas anteriormente pelo Homem e que, a despeito de terem ficado perdidas nos labirintos da História, deixaram marcas e realizações notáveis, como o Coliseu de Roma ou Panteão Romano.

A (re)descoberta destes materiais com propriedades cimentícias podem implicar uma mais valia assinalável, pois tudo indica que as conhecidas limitações do cimento Portland parecem ser em grande parte ultrapassados com estes ligantes. Tais limitações manifestam-se não só quanto aos problemas de carácter ambiental com peso considerável em termos da poluição por emissões de CO_2 , como também do ponto de vista do seu comportamento mecânico e desempenho face às condições químicas do meio envolvente. Para além das questões ambientais, desde 2015, as questões energéticas também foram levantadas, isto é a produção de cimento Portland foi limitado a 1000 milhões de toneladas de clínquer a nível mundial por ano”.

A presente dissertação tem como objetivo estudar as questões térmicas, tanto da argamassa como do geopolímero. Pretende-se conhecer o poder calorífico e o coeficiente de transmissibilidade destes materiais enquanto maciços infinitos. Para o efeito, foram construídos diversos cubos onde se tentou compreender a evolução da temperatura ao longo do tempo, quer quando colocados em condições ambientais, quer quando em ambiente controlado, usando uma estufa para o efeito.

Para além disso, importa ainda avaliar o efeito da adição de aditivos comerciais, no sentido de controlar a temperatura excessiva inicial, principalmente a correspondente taxa, quer na argamassa de cimento, quer no metacaulino. Pode-se constatar no Capítulo 4, que o plastificante retardou efectivamente a libertação de calor, fazendo-o a uma velocidade muito inferior, bem como as temperaturas máximas atingidas são menores do que nas misturas sem plastificantes.

Esta dissertação está organizada em 3 partes. Na primeira parte é apresentada uma revisão bibliográfica, em que são apresentados os conhecimentos de diversos investigadores. Na

segunda parte é apresentado uma descrição sobre todo o trabalho de laboratório, bem como os resultados destes. Na última parte é apresentada uma simulação do trabalho laboratorial, através do programa de elementos finitos Abaqus.

De uma forma mais particularizada esta dissertação é organizada em 6 capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma introdução geral onde se apresenta a razão do tema desta dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica onde estão presentes os conhecimentos de diversos autores, sobre os problemas térmicos e métodos para os conseguir amenizar.

No capítulo 3 é explicitado o processo laboratorial da composição e realização das misturas e dos moldes, fazendo-se uma descrição detalhada das ações desenvolvidas e que interessam para a análise.

No capítulo 4 são evidenciados os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados. É feita a análise e comparação: da temperatura relativa ao longo do tempo, com a variação de temperatura prevista para o próprio provete; do incremento da temperatura do molde com a temperatura da estufa; da variação da temperatura do molde com a variação prevista, da diferença para a estufa e do intervalo em que se pretende efetuar a tal variação.

No capítulo 5 pretende-se simular numericamente, através do programa de elementos finitos Abaqus, o que foi feito no Capítulo 3, isto é, comparar os resultados dos ensaios laboratoriais com os numéricos.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta dissertação, assim como sugestões de trabalhos futuros sobre o tema

2 CONCEITOS TEÓRICOS

Neste ponto começa-se por apresentar os problemas térmicos associados a grandes volumes de betão, tais como a fissuração provocada por gradientes de temperatura, devido ao comportamento térmico do betão na sequência da hidratação do cimento. Posteriormente avalia-se o calor de hidratação, tendo como objetivo controlar e minimizar o envelhecimento precoce e a fissuração no betão, através de uma avaliação que se baseia na medição das temperaturas, através de vários métodos diferentes, sendo posteriormente apresentado um ensaio de cada um dos métodos. Seguidamente, introduz-se os adjuvantes, que são substâncias químicas que desempenham vários papéis numa mistura, entre os quais a melhoria do desempenho das misturas. Por fim é abordado o tema dos geopolímeros, sendo apresentando a sua formação e características, bem como alguns problemas associados a estes.

2.1 Problemas térmicos

Neville, A.M. (2002), Tayade et al, (2014), Pofale, et al (2013), Ballim et al, (2003) e Ballim et al, (2004) referem que, em grandes volumes de betão, como por exemplo os realizados em barragens, ou até mesmo em pontes, são desenvolvidos elevados gradientes de temperatura no seu interior logo após a betonagem. Estes gradientes de temperatura são desenvolvidos devido ao calor gerado pela hidratação do cimento. A correspondente dissipação para o meio envolvente leva a que a temperatura no seu interior seja superior relativamente às temperaturas verificadas nas superfícies do volume de betão. Estes gradientes geram tensões de tração no betão da superfície, as quais podem conduzir à fissuração deste betão (Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1999)).

A variação não uniforme de tensões no betão ocorre por vários fatores. A hidratação do cimento, constitui uma reação exotérmica, que leva ao aumento das temperaturas no seu interior. Pofale et al, (2013) refere que a perda de calor do volume de betão também não é uniforme devido, quer às desiguais condições de fronteira, quer à geometria do volume, quer ainda às desiguais condições climatéricas.

Por outro lado, também se verifica que em grandes massas de betão o problema é agravado devido à baixa condutividade do betão, o que faz com que uma elevada parte da porção do calor libertado é retido e é dissipado lentamente.

A magnitude do gradiente de temperaturas geradas depende de uma série de fatores, incluindo as temperaturas iniciais dos materiais utilizados no fabrico dos betões, o tipo de

cimento, a temperatura ambiente em torno da estrutura e as propriedades térmicas do próprio betão.

2.2 Calor de Hidratação

Como referido por (Tayade et al, 2014), o calor de hidratação do cimento tem sido uma das questões investigadas, com o objetivo de controlar e minimizar o envelhecimento precoce e a fissuração no betão. A avaliação baseia-se na medição das temperaturas, para estimar a probabilidade de ocorrência de fissuras com base no diferencial de temperatura.

O calor de hidratação, tal como é descrito no âmbito da química, corresponde à diferença entre o calor das reações de hidratação e o calor absorvido pela água necessária aos processos de hidratação. Para fins práticos, não é necessário conhecer o calor total; importa, isso sim, conhecer a taxa de evolução do calor, tal como é descrito por Neville, A.M. (2002).

Neville, A.M, (2002), Tydlitát et al (2012) e Ballim et al, (2004) afirmaram que o desenvolvimento do calor de hidratação em compósitos à base de cimento dependia principalmente do tipo de cimento, em especialmente da sua mineralogia e da sua composição.

2.3 Hidratação

Ballim et al, (2004) defendem que o comportamento térmico do betão devido à hidratação do cimento era um fator predominante no potencial de fissuração nos instantes iniciais de grandes elementos de betão como resultado do desenvolvimento dos gradientes de temperatura.

Foi defendido por Pofale et al, (2013) e por Ballim et al, (2004) que a cinética de hidratação do cimento era influenciada por vários fatores internos e externos, tais como: a composição química e cristalográfica do cimento; a granulometria do cimento; a relação Água/Cimento ou relação Água/Aglomerado; a temperatura à qual ocorre a hidratação; os aditivos químicos utilizados; e a presença de materiais cimentícios secundários, tais como cinzas volantes, sílicas, etc”.

2.4 Controlo das temperaturas

O interesse na taxa de libertação de calor do cimento deriva principalmente da preocupação com as temperaturas máximas que ocorrem nas estruturas (Ballim et al, 2004). Para estimar as propriedades de hidratação e as propriedades de betões em início de idade existem vários métodos diferentes que têm sido utilizados para efetuar os ensaios de calorimetria. Os ensaios de calorimetria mais vulgares são os métodos isoperbólicos (ensaio semi-adiabáticos) os métodos adiabáticos e os calorímetros isotérmicos.

Os métodos isoperbólicos são os mais utilizados na medição de calor na hidratação, uma vez que são muito simples e podem ser realizados em qualquer laboratório (Tydlitát et al, 2012;

Zákoutský et al, 2012 e Cerny et al, 2012). Evidenciam contudo algumas dificuldades na quantificação exata da perda de calor para o ambiente.

Os métodos adiabáticos fornecem informações úteis sobre a temperatura máxima, mas necessitam do valor da capacidade específica de calor e da densidade das amostras, que podem não ser conhecidos com exatidão suficiente.

De acordo com o exposto em Ballim et al, (2004), o calorímetro adiabático proposto por Gibbon et al, (1997) para determinar a taxa de calor gerado q_t , a qual é determinada através da monitorização da temperatura do betão ao longo do tempo, depende da quantidade de calor por unidade de massa de cimento. O valor q_t é avaliado por:

$$q_t = C_p \cdot (T_t - T_0) \cdot \frac{m_s}{m_c} \quad (2.1)$$

onde C_p é a capacidade de calor específico do betão, determinado através da média ponderada do calor específico dos componentes do betão, que é assumido ser constante durante todo o ensaio; T_t é a temperatura da amostra de betão no instante t , durante o ensaio adiabático e T_0 é a temperatura da amostra no início do ensaio; m_s é a massa da amostra de betão no ensaio e m_c é a massa de cimento da amostra.

Os métodos adiabáticos fornecem informações úteis sobre a temperatura máxima, mas carecem do conhecimento prévio do valor da capacidade específica de calor e da densidade das amostras que podem não ser conhecidas com suficiente exatidão (Zákoutský et al 2012).

Os calorímetros isotérmicos podem medir diretamente a taxa de geração de calor, o que possibilita uma precisão mais elevada da medição relativamente aos anteriores.

2.5 Estudos da temperatura no material Betão

Neste ponto são apresentados três estudos de temperatura no betão, de diferentes autores.

No primeiro estudo, retirado do portal do betão “CONCRETE RESEARCH PORTAL@ (2016)”, utilizaram-se 5 amostras de clínquer, 3 foram obtidas a partir dos 3 principais fabricantes de cimento do Sul da Índia (*IN1*, *IN2*, *IN3*) e os outros 2 provenientes da África do Sul (*SL*, *SM*).

O gesso utilizado para a produção de cimento foi de um teor de 2,3% de SO_3 , para todas as amostras. Todos os componentes das misturas, incluindo a água, foram armazenadas na mesma sala de temperatura controlada ($19 \pm 1^\circ C$), durante pelo menos 24 horas antes da realização das misturas e posteriormente procedeu-se à elaboração das respetivas misturas. Este procedimento foi feito para permitir que a temperatura dos materiais estejam em equilíbrio com a temperatura ambiente.

Neste ensaio utilizaram uma calorimetria adiabática, semelhante ao descrito por Gibbon et al, (1997) que foi usada para determinar a taxa e quantidade de calor libertado por cada amostra em laboratório. A Figura 2.1 mostra uma disposição esquemática do calorímetro adiabático.

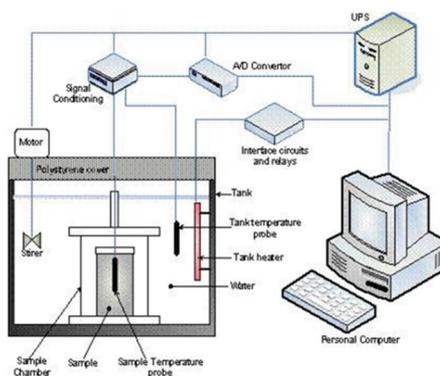


Figura 2.1- Disposição esquemática do calorímetro adiabático.

A medição da temperatura no calorímetro foi realizada, até que não houvesse um aumento significativo da temperatura da argamassa. Como se pode verificar na Figura 2.2, a medição teve uma duração de aproximadamente 100 horas.

A alteração da temperatura medida nas amostras argamassa, foi utilizada para calcular a quantidade de calor desenvolvido a qualquer momento após o início do ensaio, utilizando a Equação 2.1. O calor específico do betão foi tomado como sendo a média ponderada em massa dos componentes da mistura e foi calculada como sendo $1115,8 \text{ J / kg} \cdot ^\circ\text{K}$. A função de calor total, tal como obtido a partir da Equação 2.1, em seguida, foi numericamente diferenciada para determinar a função da taxa de calor q_t .

A Figura 2.2 mostra os resultados do calor total libertado (por unidade de massa) dos cimentos nas primeiras 100 horas de teste. O calor total libertado foi cerca de 270 kJ/kg, para os cimentos IN1 e IN2, em comparação com cerca de 300 kJ/kg, para os cimentos IN3, SL e SM.

A Figura 2.3 mostra as taxas de calor ao longo das primeiras 60 horas. A característica importante que se pode tirar desta figura é que o valor de pico da taxa ocorre entre as 8 e as 20 horas. As taxas máximas medidas de calor para os cimentos encontram-se na faixa de 1,16 W/kg para o cimento IN2 e 3,2 W/kg para o cimento IN3.

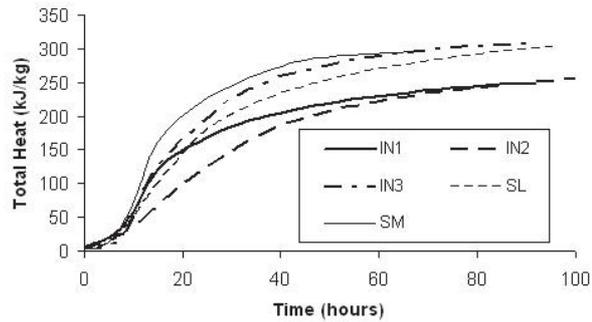


Figura 2.2 - Calor total libertado pelo cimento.

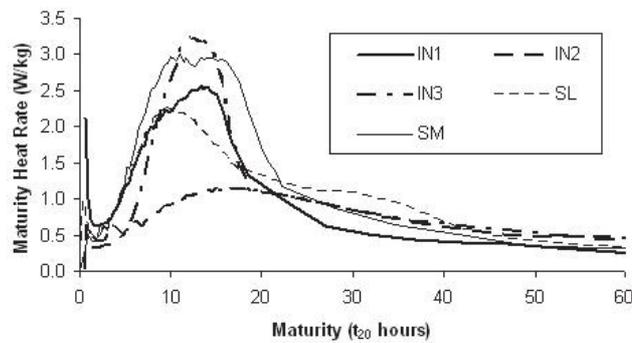


Figura 2.3 - Curvas de taxas de calor libertado pelo cimento.

No segundo estudo Pofale et al, (2013) realizaram um estudo para determinar a taxa e a quantidade total de calor libertado por cada mistura, usando para tal um calorímetro semi-adiabático. Na Figura 2.4 são mostrados o calorímetro utilizado, as amostras e os frascos, respetivamente.



Figura 2.4 – Equipamento utilizado no ensaio semi-adiabático.

O calorímetro está equipado com um software para a monitorização da temperatura em todos os minutos, tendo uma precisão de $\pm 0,01$ °C que foi utilizado para gravar o perfil de temperatura.

A medição da temperatura no calorímetro foi mantida até que não houvesse mudanças significativa na temperatura, a qual tende para um valor constante. Neste período, a taxa de hidratação é tão lenta, que o calor a ser desenvolvido equivale ao dissipado, e portanto não é suficiente para aumentar a temperatura da amostra. Em todas as amostras esse ponto foi alcançado ao fim de 5 dias, mas as medições foram feitas até 7 dias como medida de precaução. A mudança de temperatura medida nas amostras foi usada para calcular a quantidade de calor desenvolvido em qualquer instante após o início do ensaio. O calor contido no calorímetro foi calculado pela *Equação 2.1*.

A experimentação consiste em fazer uma mistura com 300g de cimento com 150g de água e colocar a amostra nos frascos de plástico, que foram instaladas no calorímetro. Através de um software calorímetro os dados foram registados e posteriormente apresentados em curva temperatura-tempo. Em cada conjunto, a amostra foi composta apenas por cimento e, em seguida, substituída com 20%, 30% e 40% de cinzas volantes (FA), mantendo a mesma quantidade de ligante. Os gráficos de temperatura-tempo das amostras são ilustrados nas Figuras 2.5 e 2.6, em correspondência com as amostras em FA, com 20% de FA, com 30% de FA e com 40% de FA. Nestas Figuras assiste-se ao aumento consistente da temperatura numa fase inicial, mas, após o pico, a temperatura decresce devido às perdas do calorímetro. Verifica-se ainda que à medida que se adicionam as cinzas, não só a temperatura máxima atingida diminui, como se verifica cada vez mais tarde.

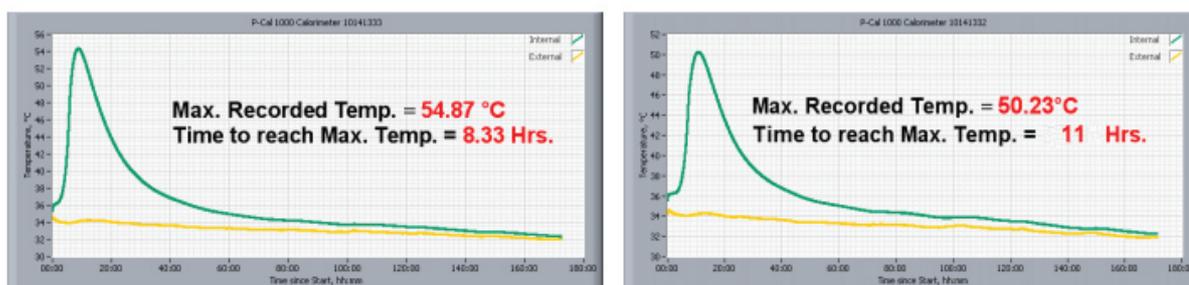


Figura 2.5 – Gráficos Temp.-Tempo nas amostras de Cimento e de Cimento com 20% FA.

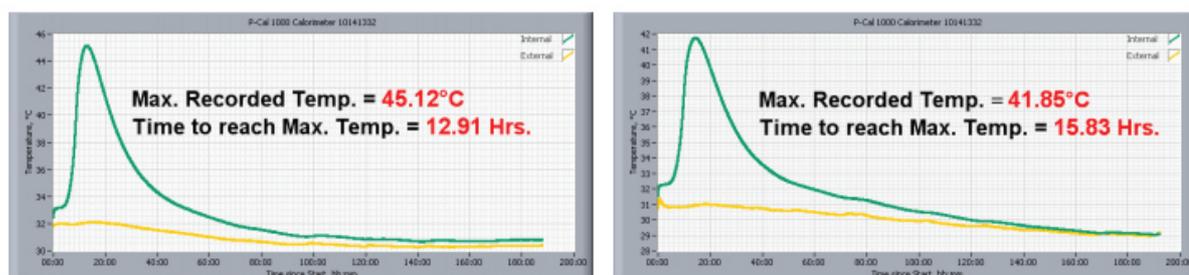


Figura 2.6 – Gráficos Temp.-Tempo das amostras de Cimento com 30% FA e com +40% FA.

Os gráficos de calor total das amostras, incluindo as perdas, calculadas em função do tempo, são apresentados nas Figuras 2.7 e 2.8.

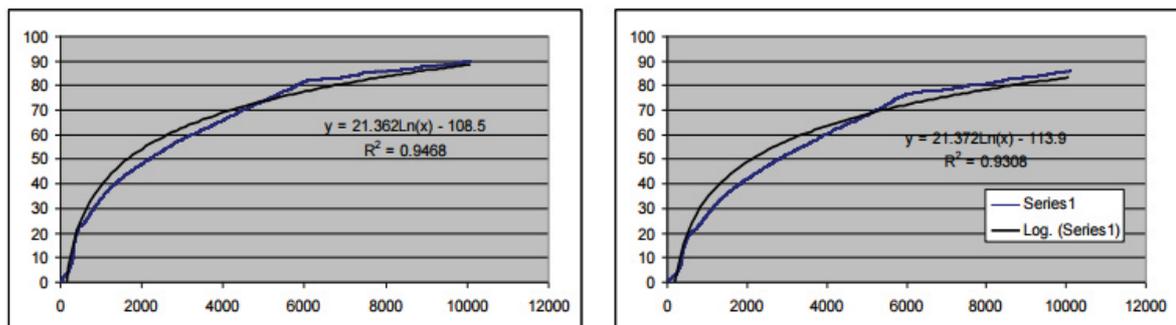


Figura 2.7 – Calor total nas amostras de Cimento e de Cimento com 20% AF.

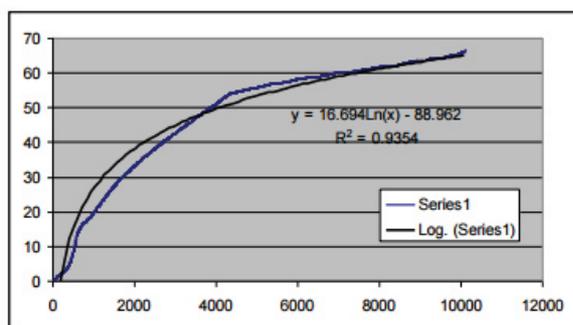


Figura 2.8 – Calor total na amostra de Cimento com 30% AF.

Uma outra observação foi de que a substituição de cinzas volantes não foi proporcional à quantidade de redução nas temperaturas de pico. Outra razão para a diferença entre os resultados da redução da temperatura deveu-se ao efeito das temperaturas iniciais nas misturas, que não foi considerado neste estudo. Acredita-se que as temperaturas iniciais elevadas aceleram a hidratação do cimento, assim como a hidratação das cinzas. Os resultados do calor de hidratação foram calculados como sendo consistentes, em grande medida, com os resultados de aumento de temperatura.

Com base nos perfis de temperatura medidos e o calor calculado, pode concluir-se que os diversos cimentos apresentam diferentes características de calor específico e têm efeitos diferentes sobre o desenvolvimento da temperatura, quando usando em grandes estruturas de betão.

Tendo demonstrado a utilidade da calorimetria semi-adiabática para obter as características do perfil de temperatura e evolução de calor do cimento e das misturas, o estudo mostrou ainda o efeito da substituição do cimento por cinzas volantes em diferentes percentagens.

No último ensaio Martinelli et al, (2013) executaram um modelo para simular o processo de hidratação, tanto em condições adiabáticas, como não adiabáticas. Segue-se os dados experimentais que caracterizam o processo de hidratação de 2 misturas de betão com uma relação água/cimento $A/C=0,4$, denominadas por Mistura 3 e Mistura 4.

A Mistura 3 contém 450 kg/m^3 de CEM I 32,5 com adição de 5 % de sílica de fumo e a Mistura 4 contém 450 kg/m^3 de CEM IV/A 32,5 R

A Figura 2.9 e 2.10 descrevem o equipamento empregue na montagem experimental dos testes.

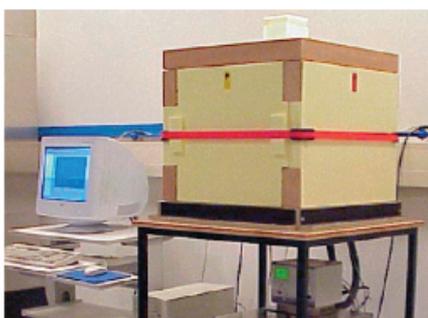


Figura 2.9 - Equipamento experimental em condições adiabáticas.



Figura 2.10 - Equipamento experimental em condições semi-adiabáticas.

Como ilustra a Figura 2.9, a curva de hidratação adiabática foi medida a partir de um cubo de betão fresco isolado, para que as condições térmicas de contorno sejam controladas de tal forma que a libertação de calor para o ambiente tenham sido evitadas. Isto significou que todo o calor gerado no interior do cubo de betão foi usado em favor da velocidade do processo das reações químicas. Para medir a evolução semi-adiabática de temperatura, a configuração usada é a indicada da Figura 2.10.

Para a validação do modelo proposto, tanto o adiabático como o semi-adiabático, as medições da evolução de temperatura foram simuladas numericamente.

Na Figura 2.11 apresenta-se a evolução das temperaturas medidas nas Misturas 3 e 4 sob as condições descritas acima. Os resultados estão representados graficamente nas Figuras 2.12 e 2.13, confrontando as evoluções das temperaturas simuladas com as medidas experimentalmente.

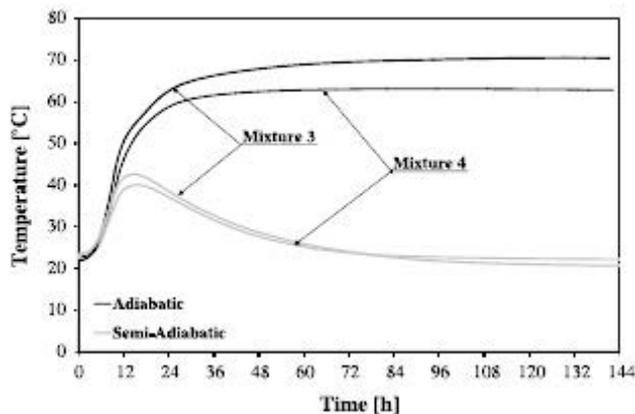


Figura 2.11 - Resultados experimentais da evolução da temperatura no tempo.

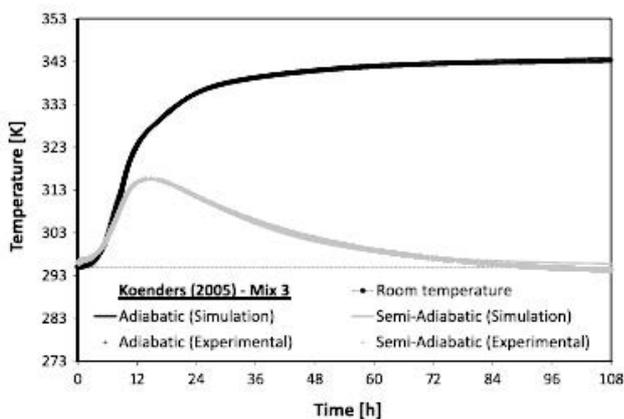


Figura 2.12 – Evolução da temperatura-tempo na Mistura 3.

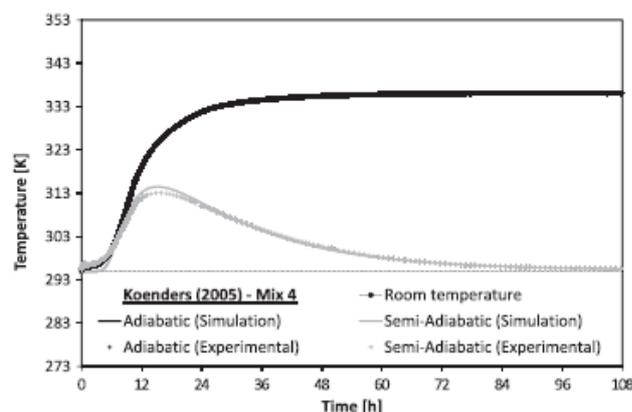


Figura 2.13 – Evolução da temperatura-tempo na Mistura 4.

O principal objetivo desta validação consistiu em demonstrar o potencial do método proposto para simular tanto a curva adiabática de hidratação e a resposta da temperatura em condições semi-adiabáticas. Para as 2 misturas demonstrou-se uma boa concordância entre o simulado e o medido. Teria sido interessante aceder aos valores da taxa de variação da temperatura. De qualquer modo, verifica-se que o maior incremento de temperaturas ocorre no período (9-15 horas), sendo que as temperaturas máximas atingidas vale cerca de 70°C para a mistura com 5% de cinzas, e cerca de 60°C para a mistura sem cinzas.

2.6 Adjuvantes/plastificantes

Coimbra, C. (2008) disse que o sector químico tem vindo a descobrir que determinadas substâncias consideradas até então como subprodutos e/ou resíduos de outras indústrias poderiam aportar vantagens para a área dos betões e argamassas. Desde a utilização de cloreto de cálcio como acelerador de presa, ou de açúcar como retardador, muitas têm sido as descobertas e os avanços tecnológicos levados a cabo pela indústria química para desenvolver produtos que, incorporados nos betões e nas argamassas, potenciam determinados comportamentos.

Para além disso, o interesse crescente pelas vantagens industriais inerentes tem resultado no desenvolvimento de substâncias químicas que desempenham funções cada vez mais específicas; são os chamados adjuvantes. Estes podem apresentar-se sob a forma de pó ou de fluído e desempenhar vários papéis numa mistura: retardadores de presa, aceleradores de presa, introdutores de ar, redutores de retração, plastificantes e superplastificantes, hidrófogos, impermeabilizantes, anticongelantes, entre outros.

Plastificantes e Superplastificantes

A principal função dos plastificantes e dos superplastificantes consiste em reduzir a água necessária numa amassadura para se obter a mesma trabalhabilidade. Desde o início da sua

utilização até aos dias de hoje, o aprofundamento dos conhecimentos sobre os efeitos nas argamassas/betões da adição deste tipo de adjuvantes levou ao seu desenvolvimento continuado, no intuito de melhorar a eficiência destes produtos.

Os primeiros a serem utilizados foram os plastificantes cujo modo de actuação consiste na ligação das moléculas de adjuvante aos grãos de cimento, alterando a sua carga elétrica negativamente e provocando desta forma repulsão electrostática entre os grãos de cimento, causando uma dispersão aproximadamente uniforme, tal como se ilustra na Figura 2.14. Neste contexto, as quantidades de água A , relativamente ao ligante L , necessárias para manter a pasta com a fluidez desejada são menores, logo a razão A/L diminui.



Figura 2.14 – Atuação de um plastificante normal.

Camadas de moléculas de água dipolares circundam as partículas hidrofóbicas de cimento, como resultado, evitam a sua floculação e é obtido um sistema com boa dispersão. Todo o processo influencia as propriedades do betão, tanto no estado fresco como no endurecimento, como declara Fracalossi, R.A.R., (2011).



Figura 2.15 – Floculação.

Posteriormente, surgiram, no mercado, os superplastificantes, os quais, para além de atuarem ao nível da repulsão eletrostática introduzem também cadeias hidrofílicas de polímeros que contribuem para a dispersão das partículas ao longo das reações de hidratação do cimento, tal como se ilustra na Figura 2.16. Maior dispersão significa uma menor quantidade de água necessária para manter a fluidez da pasta e, conseqüentemente, uma razão A/L menor.

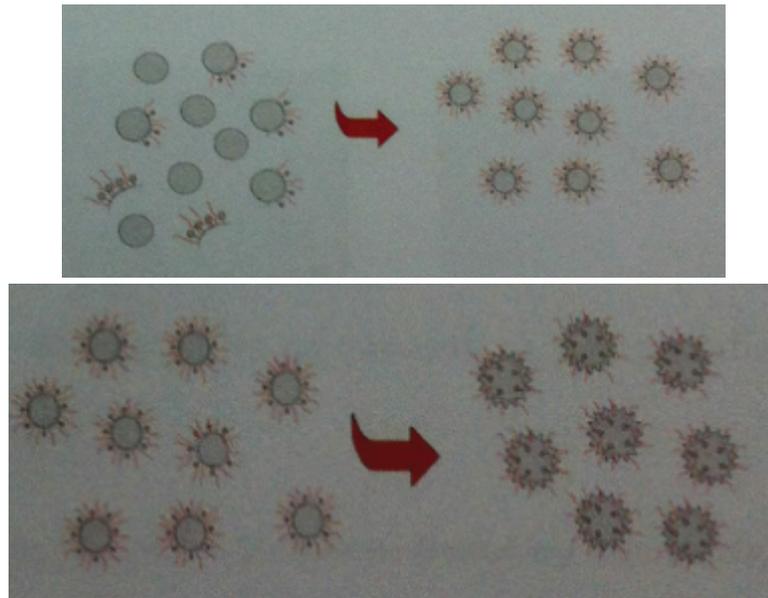


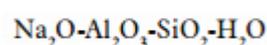
Figura 2.16 – Atuação dos superplastificantes.

2.7 Geopolimeros

Pinto, A.T. (2004) afirmou que com base nas investigações que conduziu sobre cimentos antigos, Glukhovskiy propôs uma nova geração de ligantes, a que chamou “solo-cimento”, e cuja formação é semelhante, ou praticamente análoga, à de muitos dos minerais e rochas que constituem a crosta terrestre, onde intervêm óxidos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, como é o caso dos zeólitos, das micas e dos feldspatos.

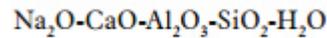
Os “solos-cimentos” contêm uma significativa quantidade de álcalis, sob a forma de Na_2O e K_2O , em proporções de 3 até 20%, que determinam as suas propriedades ligantes. As hipóteses de formação de ligantes do tipo “solo-cimento”, são bastante vastas podendo ser concretizadas, nomeadamente a partir de:

.Compostos solúveis de metais alcalinos em conjunto com sistemas de aluminossilicatos, sem presença de cálcio, como as cinzas vulcânicas, ou certas cinzas volantes, os metacaulinos, as argilas calcinadas, e outros. Trata-se de sistemas de materiais alcalinos, ricos em SiO_2 e Al_2O_3 , com composição tipo



ou

.Compostos ricos em cálcio: cal, cimento Portland, cimentos aluminosos, escórias de alto-forno, etc., envolvendo materiais alcalino-terrosos com um significativo teor em cálcio, com composição química do tipo



Ambos os sistemas são submetidos à ativação alcalina com hidróxido de sódio ou de potássio, reação que vai provocar alterações fundamentais na estrutura dos materiais componentes. Esta reação é do mesmo tipo da verificada nos zeólitos naturais.

Ao último grupo pertencem os ligantes desenvolvidos e estudados basicamente na Ucrânia por aquele investigador e a sua equipa, enquanto que no primeiro se incluem os sistemas cimentícios patenteados nos EUA e Europa por J. Davidovits, tendo por base a ativação alcalina do metacaulino ou caulino calcinado.

A possibilidade de obtenção de recções de presa e endurecimento alargada a outros elementos permitiu reformular a teoria dominante de que só os compostos constituídos com elementos pertencentes ao subgrupo *IIA* da Tabela Periódica, o chamado subgrupo dos alcalino-terrosos (*Be, Ca, Mg, Sr* e *Ba*) poderiam sofrer reacções de hidratação. A capacidade de endurecimento, na sequência de reacções de hidratação, é afinal também possuída por compostos organizados com elementos do subgrupo *IA* (*Li, Na, K, Rb* e *Cs*), conhecidos por metais alcalinos, formando associações aos pares, com elementos dos subgrupos *IIIA* e *IVA* (alumino-silicatos), *IIA* e *IVA* (silicatos alcalino-terrosos) e *IIA* e *IIIA* (aluminatos alcalino-terrosos).

Têm sido estudados com particular ênfase os cimentos de escórias alcalinas (slag-alkaline cements) que podem atingir resistências mecânicas de até 150 Mpa, os quais se caracterizam por serem muito impermeáveis e apresentarem baixa retração. Além do mais, estes cimentos podem combinar-se com até 5% de argila e até 20% de partículas de pó (ou filler), moderando a exigência/necessidade de utilização de misturas bem graduadas de agregados.

Este facto novo e interessante explica-se facilmente: é que enquanto o cimento Portland normal *CPN* funciona apenas como cola (ressalva-se talvez o caso das ligações epitáxicas com os agregados calcários), os cimentos de base alcalina são ativos, pois reagem com sistemas de alumino-silicatos, numa espécie de reação pozolânica rápida e que se convertem, em condições hidrotermais adequadas, em fases amorfas ou semicristalinas de material zeolítico, que por sua vez imobilizam as partículas de pó que eventualmente não tenham entrado na combinação.

Por este facto, as resistências mecânicas crescem a curto prazo, a uma taxa muito superior à do *CPN* e, paralelamente, a formação de material zeolítico muito semelhante ao que ocorre na Natureza, reforça significativamente a durabilidade e a estabilidade às agressões exteriores do material feito com este ligante.

Pelo que fica dito, o aumento do doseamento de finos não constitui à partida uma dificuldade, já que o álcalis cáustico é ativo e reage com os minerais constitutivos da argila ou com o pó de

sílica. O único senão será o tempo de indução, tanto maior quanto mais alta for a percentagem de materiais finos, ou seja, quanto mais preponderantes forem as reações do tipo pozolânico para a formação do material cimentício. Todavia, se por um lado o tempo de indução pode ser consideravelmente reduzido pela ação da temperatura, o que nem sempre é prático ou conveniente, o que se verifica é que a ação do agente alcalino (à base de *Na* ou *K*) é consideravelmente mais forte do que a do alcalino-terroso (centrado no *Ca*), pelo que as reações são bastante mais rápidas.

Em 1976, Davidovits patenteou nos EUA os cimentos de base alcalina, a que genericamente designou por “geopolímeros”. A produção desses ligantes desenvolvem-se nas seguintes etapas:

- Mistura em proporções adequadas de calcário ($CaCO_3$), dolomita ($CaCO_3 \cdot MgCO_3$) e caulino;
- A mistura é triturada, moída e calcinada em fornos a temperaturas da ordem dos 900 °C, substancialmente abaixo das temperaturas de clinquerização;
- Debaixo destas condições forma-se o metacaulino (Kandoxi na designação de Davidovits), um material com propriedades pozolânicas, enquanto que por perda de CO_2 os carbonatos de cálcio e magnésio se transformam em óxidos de cálcio e magnésio;
- Ao adicionar água ao carbonato de sódio (Na_2CO_3), ou ao carbonato de potássio (K_2CO_3), forma-se a soda cáustica ($NaOH$) ou potassa cáustica (KOH) que vão desencadear uma reação fortemente exotérmica, com precipitação de um produto de características cimentícias e que se assemelha à analcita e à hidrossodalita.



Figura 2.17– Geopolimerização da Caulinite.

O próprio caulino, em condições de pressão e temperatura adequadas (ver Figura 2.17), pode ser ativado alcalinamente, conduzindo à formação de um zeólito com a estrutura da sodalita.

Deste modo, a admirável durabilidade dos cimentos antigos deixou de ser um segredo ou um mistério. A análise de difração de Raios X demonstra que a durabilidade desses ligantes é devida à presença de cálcio, sódio e zeólitos calcossódicas do tipo analcita ou hidrossodalita.

Existem já espalhadas pelo Mundo, desde os Estados Unidos (Lone Star, Pyrament, Metamax), França (Geopolymère), Alemanha (Tollit) e Nova Zelândia (MetaMax) várias fábricas destes ligantes de “nova” geração, com potencialidades mecânicas algo superiores às do cimento Portland.

Conseguir reproduzir em laboratório os mecanismos que deram lugar à formação da maior parte das rochas não sedimentares de natureza siliciosa, tem de ver-se como um resultado que abre um campo de possibilidades até aqui insuspeitas e que permite as mais justificadas expectativas.

Alguns Problemas

Pinto, A.T. (2004) referiu que “a sensibilidade da reação de geopolimerização à temperatura é de tal ordem que, o simples facto de se insistir com a mistura para garantir maior homogeneidade à pasta, pode desenvolver um aumento de temperatura por atrito (circunstância agravada no caso de utilização de gravilhas ou britas) e acelerar o endurecimento prematuro da mesma, prejudicando depois as operações de moldagem e compactação.

Durante a amassadura, um aumento da temperatura conduz a uma evolução muito rápida da velocidade de reação, com enrijamento da pasta fresca. Esta é uma fase muito delicada, porque é crucial na obtenção de um produto final com adequado desempenho. Levanta-se a questão da conveniência da utilização de controladores de presa”. Não se conhece a influência do volume de amassadura neste contexto (Ribeiro, J. (2014)., Gonçalves, A. (2014). e Carreira, N. (2015).)

Utilização de plastificantes

Pinto, A.T. (2004) experimentou vários tipos de plastificantes de conhecida eficácia na tecnologia dos betões de CPN (*Pyrament, Pozolith 322N*) e ainda de superplastificantes do tipo *Glenio*, em várias dosagens e mesmo sobredosagens.

De um modo geral, a sua utilização veio a revelar-se ineficaz para a totalidade dos produtos usados, não se verificando qualquer melhoria na expulsão da fase gasosa com a desejada diminuição da porosidade.

Este resultado não foi considerado surpreendente na medida em que os plastificantes habituais e mesmo os de última geração, os carboxilatos, foram concebidos e formulados num quadro reativo e de composição química completamente diferentes. Nos geopolímeros o problema é essencialmente do foro da viscosidade, problema que não se coloca nos betões de CPN. Além do mais, mesmo que algum produto pudesse mostrar eficácia, seria necessário averiguar se havia algum tipo de consequências secundárias que pudessem condicionar ou modificar a médio ou longo prazo o comportamento dos geopolímeros, considerando a possibilidade de reação entre o(s) adjuvante(s) e os silicatos ou hidróxidos de sódio que

constituem o ativador alcalino. Na medida em que nenhum plastificante se revelou útil, deixou de ter sentido esta questão.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi indicado no capítulo 1 que o objetivo deste trabalho consistia na Análise das características térmicas dos materiais ativados alcalinamente. Para tal, optou-se por construir diversos provetes, alguns de argamassa normal, metacaulino normal e posteriormente os anteriores com plastificante, os quais foram depois analisados durante o processo de cura do material. Ao longo deste capítulo é explicitado o processo laboratorial da composição e realização das misturas e dos moldes, fazendo-se uma descrição detalhada das ações desenvolvidas e que interessam para a análise. Começa-se por apresentar as características dos materiais incorporados nas misturas. De seguida, descrevem-se as misturas e a forma de analisar as características térmicas, com o auxílio de Termopares e do Data Logger, desde o início do ensaio até serem desmoldados os provetes. São ainda descritas as metodologias empregue nos ensaios e o modo como são alcançados os resultados das características térmicas e dos parâmetros mecânicos dos mesmos.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado nas misturas foi o cimento Portland de calcário fornecido pela empresa “Cimpor” e que tem como nome comercial *CEM II/A-L 42,5R*. Para além de estar disponível no laboratório, este cimento foi o escolhido por ser um dos tipos mais utilizado pelas centrais de betão pronto, na realização de elementos estruturais em obras de engenharia civil. Quando aplicado numa composição correta, permite obter um valor de resistência mecânica à compressão de 42,5MPa aos 28 dias.

Este cimento será utilizado como ligante hidráulico na confeção das argamassas.

3.1.2 Metacaulino

O metacaulino usado nas experiências laboratoriais foi um metacaulino de alta reatividade das suas partículas quando misturado com outros materiais. Este produto, comercialmente designado por “*MetaMax® HRM*”, foi produzido em conformidade com a norma *ASTM C618* e com a certificação *ISO 9002* e foi fornecido, sob a forma de saco, pela empresa americana *Engellhard*, hoje *BASF*. De acordo com esta empresa, este composto é comercializado como sendo um aditivo do betão, o qual permite acabamentos de qualidade superior e reduz imperfeições, tais como manchas e pequenas fissuras resultantes da retração do cimento.

Este material consiste num pó branco com características de um material de partículas extra finas. A dimensão média das partículas deste material é de $1,2\mu\text{m}$ e apresenta uma superfície específica de $13\text{m}^2/\text{g}$. Apresenta uma densidade relativamente alta e também um elevado teor de alumino-silicatos. Ao ser misturado com outros materiais finos e reativos irá ter elevadas reações químicas de combinação com outros compostos, o que pode levar a um incremento das características físicas da solução global. Nas misturas, o metacaulino foi utilizado como ligante, tendo a função principal de ser o “substituto” do cimento na argamassa.

A sua composição química elementar foi referida no Capítulo 2. Desconhece-se contudo as alterações ao longo do tempo, quer quando ensacado, quer quando o saco está aberto.

3.1.3 Silicato de sódio

O silicato de sódio NaSiO_4 , fornecido pela empresa “*Sociedade Portuense de Drogas, S.A.*”, é designado por “*Silicato de Sódio D40*”. É um material que à temperatura ambiente se encontra no estado líquido, apresentando alguma viscosidade, sendo incolor e inodoro.

Combinando com o hidróxido de sódio será utilizado como ativador composto do metacaulino.

3.1.4 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio NaOH é um composto preparado a partir da Soda Cáustica, à qual se adiciona água. No mercado encontra-se disponível soda cáustica em grãos ou em palhetas. Para este processo experimental foi utilizada soda cáustica em pequenos grãos, fornecida pela empresa “*Sociedade Portuense de Drogas, S.A.*”. Esta mistura foi realizada na proporção de 1Kg de soda cáustica para $2,5$ litros de água.

3.1.5 Areia

A areia usada como agregado neste trabalho tem uma curva granulométrica é a indicada na Figura 3.1 e a composição elementar consta na Tabela 3.1. A densidade das partículas é de $2,64\text{kN}/\text{m}^3$, enquanto, que a densidade da areia é de $\gamma_{\text{areia}}=1,6\text{kN}/\text{m}^3$.

Nas misturas realizadas a areia desempenha o papel de agregado.

Composto Químico	Percentagem
SiO_2	85,16 %
Al_2O_3	6,67 %
K_2O	4,79 %
MgO	1,51 %
P_2O_5	0,46 %
Fe_2O_3	0,37 %
FeO	0,33 %
TiO_2	0,31 %
CaO	0,26 %
Cl	0,06 %

Tabela 3.1 – Composição elementar da areia.

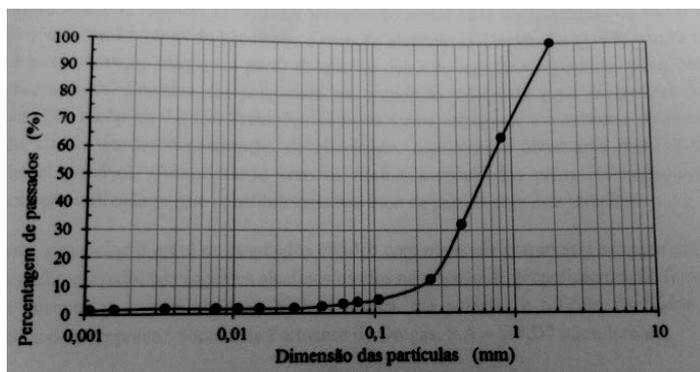


Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia.

3.1.6 Água

A água utilizada para ativar as reações químicas no cimento foi a água da rede doméstica de abastecimento pública que é fornecida ao Laboratório de Estruturas do DEC-FCTUC, estando esta de acordo com a respetiva norma NP EN 1008.

3.1.7 Redutor de água/plastificante

O Redutor de água/plastificante usado nas experiências laboratoriais é designado comercialmente por *MasterPozzolith 540*, do fabricante “*BASF Portugal, S.A.*”. *MasterPozzolith 540* é um adjuvante polifuncional, de elevado rendimento, aplicável em betões com diferentes características fazendo variar a sua dosagem. A sua especial composição permite usá-lo com qualquer tipo de cimento. Tem como vantagens: a melhoria da plasticidade do betão, mantendo as propriedades do betão padrão; efeito plastificante compatível com cinzas volantes e pozolanas; redutor de água em betões de elevada resistência. A dosagem/rendimento sugerida pelo fabricante é de *0.6 a 1.8 Kg por 100 Kg* de cimento (ligante). O *MasterPozzolith 540* é um líquido pronto a usar, que é introduzido na betoneira juntamente com a água de amassadura. O efeito de plastificante ou redutor de água é superior se o adjuvante for adicionado ao betão após ter sido introduzida *50 a 70%* da água de amassadura. Não é aconselhável a adição do adjuvante ao cimento e agregados secos uma vez que o efeito plastificante ou de redutor de água diminuirá. Na utilização do *MasterPozzolith 540*, a BASF recomenda sempre a realização de ensaios prévios à utilização do adjuvante para ajustar a dosagem ótima.

3.1.8 Termopares

Termopares são sensores de temperatura simples, robustos e de baixo custo, sendo amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura. Um termopar é constituído de dois metais distintos que unidos por sua extremidade através de um processo de soldadura em mercúrio, formam um circuito fechado. O termopar desta maneira gera uma Força Electro – Motriz (FEM), que quando conectada a um instrumento de Leitura consegue ler a temperatura do processo destes termopares.

O tipo de termopar utilizado é o tipo K, uma vez que era os existentes no laboratório e que cobria o intervalo de temperaturas dos respetivos ensaios. O termopar tipo K é um termopar de uso genérico e tem um baixo custo, cobre temperaturas entre -200°C e os 1200°C , tendo uma sensibilidade de aproximadamente $41\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

3.1.9 Data Logger

O registo das temperaturas ao longo do tempo foi realizado num *TML Portable Data Logger TDS-303* como está indicado na Figura 3.1 Tratando-se de um velho Data Logger, com capacidades limitadas, permitia contudo registar, a cada 2 minutos, leituras de 10 canais.



Figura 3.1 – Data Logger.

3.1.10 Estufa

Na Figura 3.2 apresenta-se a estufa, do laboratório, capaz de atingir cerca de 200°C , dispõe de um termóstato mecânico, o qual não foi preciso nem utilizado, porque não permitia atingir os objetivos pretendidos. Como se descreve adiante, o controlo da estufa, ou seja, o controlo da temperatura interna passou por programar intervalos de tempo em que a estufa estava ligada, num dado intervalo de tempo maior.



Figura 3.2 – Estufa.

3.1.11 Moldes

A medida que o trabalho foi sendo desenvolvido, também se foi adaptando os moldes de modo a cumprir os requisitos pretendidos. Em geral, nos moldes foram utilizadas placas de aglomerado de madeira revestido a melamina branca com 20mm de espessura e placas de isolamento térmico de espuma rígida de poliestireno extrudido (*XPS*) de 30mm de espessura.

Regra geral, o material encontra-se em contacto com a placa lisa de melamina do aglomerado.



Figura 3.3 – Molde.

3.1.12 Misturadora

Utilizou-se a misturadora da marca Hobart como mostra a Figura 3.4, com capacidade de 4/5 litros, do laboratório, para realizar as misturas de metacaulino. Esta misturadora tem um recipiente em aço inoxidável e uma pá misturadora, cujas características cumprem os requisitos

da norma *NP EN 196*, correspondendo, também aos requisitos ao nível da velocidade da pá. De acordo com Teixeira Pinto (2002), este tipo de misturadora é apropriado dado que “a alta viscosidade da pasta formada exclui totalmente a utilização de betoneiras do tipo gravítica”, utilizadas em amassaduras de cimento.

As misturas de argamassa foram realizadas manualmente.



Figura 3.4 – Misturadora.

3.1.13 Mesa vibratória

Após colocação da mistura no molde, procedeu-se à correspondente compactação. Para o efeito recorreu-se a uma mesa vibratória do laboratório, mostrada na Figura 3.5



Figura 3.5 – Mesa vibratória.

3.2 Procedimento experimental

Como se perceberá, o procedimento experimental foi evoluindo ao longo do trabalho, à medida que se foi aperfeiçoando algumas deficiências entretanto encontradas. Como se descreveu no capítulo anterior, na bibliografia não se encontram descrições adequadas acerca deste processo, nomeadamente na realização adiabáticos.

3.2.1 Procedimento experimental base

Os primeiros ensaios foram realizados em torno de provetes com dimensões $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 100\text{mm}$. O molde era constituído por 6 placas de aglomerado de madeira com 20mm de espessura e 6 placas de Policloreto de vinila com 20mm de espessura, mais conhecido pelo acrónimo *PVC*. As placas de *PVC* estavam em contacto com as faces laterais do provete, e as placas de aglomerado de madeira isolavam todas as faces.

Na Figura 3.5 mostra-se uma perspetiva de um molde. Pensava-se, no início, que este molde poderia isolar o provete, simulando assim um maciço infinito. Neste caso, realizar um ensaio adiabático corresponde a garantir que as perdas de calor são desprezáveis perante o valor global produzido. Como se poderá constatar, no capítulo seguinte, o ensaio não passou de semi-adiabático. Neste procedimento utilizaram-se 2 termopares: um localizado no centro do provete, denominado de “*Central*”, para medir as temperaturas geradas pelo provete T_{provet} ; e o outro, para medir a temperatura exterior T_{ext} .

Este procedimento foi utilizado no ensaio do provete de argamassa normal *Pan20140912*. A mistura de argamassa foi realizada utilizando 4,5kg de areia, 1,8kg de cimento e uma relação água/cimento de 0,55. Não foram usados aditivos. Neste caso, a argamassa encontrava-se um pouco fluida. Contudo, este processo de execução da mistura, incluindo vibração, demorou cerca de 10 min.



Figura 3.6 - Molde dos provetes 150mmx150mmx100mm.

O provete *Panp20140919* tem os mesmos passos de procedimento tanto na construção do molde como na realização da mistura, do que o provete anterior, tendo apenas as diferenças das quantidades dos constituintes da argamassa e da colocação de placas de poliestireno extrudido envolvendo o molde. Como é demonstrado na Figura 3.7. As diferenças das quantidades em relação ao *Pan20140912*, deve-se ao facto de contrariar o ocorrido em relação a fluidez desta, mas mantendo o mesmo traço de água/cimento, que é de 0,55. Como tal esta mistura é constituída por 4 Kg de areia, 1,6 Kg de cimento e 0,89 litros de água. A utilização das placas de poliestireno extrudido, neste provete deve-se à tentativa de isolar o provete, na tentativa de realizar assim um ensaio adiabático, mas como se pode verificar no capítulo seguinte, não passou de um ensaio semi-adiabático. Para tal foram utilizadas 6 placas de poliestireno extrudido, 4 laterais e 2 para base e topo, apertadas com uma cinta e colocado Mastique pistolável nas juntas de união das placas.



Figura 3.7 - Molde dos provetes 150mmx150mmx100mm com placas de poliestireno extrudido.

Atendendo às tentativas falhadas nos provetes anteriores, de eliminar as perdas tentando assim, simular um maciço infinito, estudou-se então uma nova possibilidade de realizar um ensaio adiabático. Para tal pensou-se na utilização de uma estufa, estufa essa, que à medida que o provete gera-se temperatura, a estufa deveria ter essa mesma temperatura, tentando assim eliminar as perdas. Para tal, antes do ensaio propriamente dito deste provete, fez-se vários testes à estufa, tais como fazer vários ciclos com a estufa ligada t segundos, num determinado intervalo de tempo. Com esses testes conseguiu-se estabelecer uma equação em que com um determinado t^* em ciclos de 10 min , iria-se obter uma determinada temperatura. Com a realização destes testes deparou-se que a estufa tinha um “*delay*” de $15 \text{ a } 20 \text{ min}$. Isto é, ligando a estufa durante t^* num determinado ciclo, só se sentiria os efeitos passados esses $15/20 \text{ min}$, o que inicialmente dificultou bastante o controlo da estufa. Após o controlo da estufa, passou-se então para a execução do molde e da argamassa, tendo-se utilizado neste ensaio um molde igual ao utilizado no ensaio do provete *Pan20140912*, constituído apenas por placas de aglomerado de madeira e PVC. Após a execução do molde passou-se para a mistura, mistura essa, que teve os mesmos procedimentos que os anteriores provetes de argamassa, alterando-se só a composição dessa argamassa, devido a excessiva fluidez das anteriores. Como tal o provete *Panp20141015* é constituído por uma argamassa com 4 Kg de areia, $1,6 \text{ Kg}$ cimento e $0,864 \text{ litros}$ de água, tendo um traço *A/C* de $0,54$. Neste ensaio utilizou-se 3 termopares, um no centro do provete, designado por “*Central*”, medido as temperaturas no interior do provete, um na estufa e outro no exterior, designado por *Text*, para medir a temperatura no forno e no exterior, respetivamente como demonstrado na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Realização do ensaio na estufa.

Para o provete *Pmn20140917* iniciou-se por se preparar o hidróxido de sódio *NaOH* a partir da soda cáustica, misturando-a com água. Utilizando-se *200g* de soda cáustica e *0,5 litros* de água. A soda cáustica foi pesada numa balança calibrada e a água medida numa proveta graduada. A mistura foi efetuada num recipiente metálico, visto que, durante esta mistura dá-se uma reação exotérmica, atingindo cerca de 70°C , a qual se liberta hidrogénio, sob a forma de gás utilizou-se então uma máscara, para garantir a segurança ao fazer a mistura. Seguidamente, foi necessário deixar arrefecer esta mistura de *NaOH*, para evitar que a essa temperatura, tivesse alguma influência na mistura com o metacaulino, a preparação do hidróxido de sódio era realizada *24 horas* antes, para esta estar a temperatura ambiente como, os restantes materiais utilizados nas misturas. Por fim, a composição do ativador é conseguido através da mistura do hidróxido de sódio *NaOH*, com silicato de sódio *NaSiO₄*, na proporção de *1 (NaOH) : 2 (NaSiO₄)*. Utilizou-se *450g NaOH* e *900g NaSiO₄*. Esta mistura foi sempre realizada num recipiente de vidro e medida numa balança calibrada, como demonstra a Figura 3.9.



Figura 3.9 - Composição do ativador.

Em seguida procedeu-se à construção do molde e colocação dos termopares, sendo estes parâmetros iguais ao do provete *Pan20140912*. Posteriormente pesou-se *2.812Kg* de Areia, *1,125Kg* de Metacaulino, contudo a misturadora, não albergar a totalidade da mistura, pelo facto, de esta só ter a capacidade de *4/5* litros, teve-se então que fracionar a areia, o metacaulino e o ativador em *2* frações iguais. Tendo assim cada mistura *1.406Kg* areia, *0.5625 Kg* de metacaulino e *0,675Kg* de ativador, correspondendo então, um traço (ativador/Metacaulino) de *1,2*. Ao fim das quantidades estarem medidas e divididas, realizou-se uma mistura de cada vez na misturadora, sendo colocadas no molde à medida que eram executadas. Na misturadora

iniciou-se por colocar a areia e posteriormente são colocados lentamente ao mesmo tempo o metacaulino e o ativador. Contudo nestas misturas teve-se algumas dificuldades ao executar as mesmas, devido ao facto da pouca fase líquida em relação a parte sólida. Posteriormente, ao fim da última mistura ter sido executada e colocada no molde, depositou-se o provete na mesa vibratória e procedeu-se a vibração do mesmo. Após ser vibrado, colocou-se a placa de topo e transferiu-se o provete para cima de uma mesa, onde se ligou os termopares nos respetivos canais do Data Logger a fim de se começar a visualizar e analisar as temperaturas dos termopares.

No provete *Pmnp20140923* utilizou-se exatamente a mesma metodologia em relação ao *Pmn20140917*, bem como as quantidades da respetivas amassadura. A única variação deve-se ao acrescento da colocação de placas de poliestireno extrudido, pelo facto já referido. Como demonstra a Figura 3.7.

Após a realização deste ensaio deparou-se com alguns problemas e questões que ainda não tinham sido equacionadas. Um dos problemas foi ao descofrar o molde depois do ensaio concluído eram visíveis os danos no PVC, devido às temperaturas atingidas. As questões levantadas na altura eram as seguintes: será que se estava a fornecer ou a retirar energia ao provete e se um termopar avariar como prosseguir com o ensaio. Após algum tempo de estudo e de reflexão essas questões que foram solucionadas através de colocação de mais termopares, em sítios diferentes, optando-se por colocar termopares na face, no canto e centro do provete, designados por “Face”, “Canto” e “Central” respetivamente. Por outro lado a justificação da colocação de 2 termopares por zona, deve-se ao facto da possibilidade de ocorrer uma avariar e se houvesse só um termopar por zona que levaria a inviabilidade do ensaio. Para se responder à questão, se se estava a fornecer ou a retirar energia ao provete, utilizou-se uma metodologia, metodologia essa que dependia do T_{molde} e do $T_{provetete}$. O T_{molde} foi calculado, através da fórmula:

$$T_{molde} = \frac{"2Face"+"Canto"}{3} \quad (\text{Equação 3.1})$$

enquanto, o $T_{provetete} = \text{“Central”}$. A estratégia utilizada para se saber se o provete estava a receber ou a fornecer energia à estufa, dependia da fórmula $T_{molde}-T_{provetete}$, se $T_{molde}-T_{provetete} > 0$, o provete estava a receber energia, se $T_{molde}-T_{provetete} < 0$, o provete estava a ceder energia, sendo o objetivo principal destes ensaios quando colocados os provetes na estufa que $T_{molde}-T_{provetete} = 0$. Neste ensaio são utilizado 10 termopares sendo agrupados em grupos de dois, os grupos são a “Face”, “Canto”, “Central”, “Forno”, “T_{ext}”. Todos estes termopares são calculados pela média dos valores registados nos termopares em cada instante.

Após estas questões resolvidas, começou-se por construir o molde de 200x200x200mm, com placas de aglomerado. Este molde era composto por 4 placas laterais com as dimensões de 240x200mm e 2 placas de 240x240mm, sendo a base e o respetivo topo. Posteriormente estas eram aparafusadas e colocado Mastique pistolável nas juntas, evitando assim algum corrimento que pudesse ocorrer ao ser colocado na mesa vibratória, levando ao danificar destas, e não

puderem serem reutilizáveis, para outros provetes. Efetuou-se a perfuração do molde para a localização estratégica de fixação dos termopares, como referindo anteriormente. Tendo estes termopares sido fixados com fita-cola ao molde, para que não houvesse deslocamentos dos termopares dos respetivos sítios.

Começou-se por pesar *12,8 Kg* areia, *5,12 Kg* cimento, numa balança calibrada e mediu-se *2,71 litros* de água, numa proveta graduada. Colocou-se a areia e o cimento num “Pouseiro” e misturou-se, adicionando posterior a água, voltando a misturar-se durante *5 minutos*. Tendo as *3* misturas de argamassa *Pan20141029*, *Pan20141104* e *Pan20141106* um traço a/c de *0,53*. Após este processo colocou-se a mistura dentro do molde e efetuou-se a vibração do mesmo durante *30s* na mesa vibratória. Posteriormente colocou-se os provetes dentro do forno, ligando os termopares aos respetivos canais do Data Logger.

Para o provete *Pmn20141113* utilizou-se a mesma metodologia e procedimento que nos provetes de *Pmn* realizados anteriormente, modificando-se apenas as quantidades dos constituintes da mistura. Neste provete para a realização do *NaOH* utilizou-se *627g* de soda cáustica e *1,57 litros* de água. O ativador é constituído por *1,57 Kg NaOH* e *3,133 Kg NaSiO₄*. A mistura tem então *3,75 Kg* de Metacaulino, *9,375 Kg* Areia e *4,703 Kg* de Ativador, mas devido ao facto da misturadora, não albergar a totalidade da mistura, pelo facto já referido anteriormente, teve-se então que fracionar o metacaulino, a areia e o ativador em *5* frações iguais cada uma. Tendo assim cada mistura *0,75 Kg* de metacaulino, *1,875 Kg* areia e *0,94 Kg* de ativador, correspondendo então, um traço (ativador/Metacaulino) de *1,25* nesta mistura. Contudo nesta mistura teve-se algumas dificuldades ao executar a mesma, devido ao facto da pouca fase líquida em relação a parte sólida.

Para o provete *Pmn20141120* deu-se também início primeiramente a preparação do hidróxido de sódio, da mesma forma que nas misturas anteriores de metacaulino, sendo apenas distintas nas respetivas quantidades. Utilizou-se *600g* de soda cáustica e *1,5 litros* de água, pelo facto, de contrariar as dificuldades constatadas ao misturar a mistura. Para tal, diminuiu-se a quantidade de metacaulino e por sua vez a quantidade de ativador, da antecessora mistura. Na composição do ativador utilizou-se a mesma proporção que na anterior, utilizando assim, *1,5 Kg* de *NaOH* e *3 Kg* de *NaSiO₄*. Posteriormente pesou-se *3,46 Kg* de Metacaulino, *9,375 Kg* Areia e *4,5 Kg* de Ativador. Devido às condicionantes referidas anteriormente sobre a capacidade da misturadora, fracionou-se também a mistura em *5* misturas iguais. Tendo cada mistura *0,692 Kg* de Metacaulino, *1,875 Kg* de Areia e *0,9 Kg* de ativador, correspondendo assim, a mistura a um traço (Ativador/Metacaulino) de *1,3*. Posteriormente os procedimentos e cuidados foram iguais à anterior mistura.

O processo da execução das misturas de argamassas com plastificantes, são idênticas às execuções das misturas de argamassa normal anteriores, sendo as únicas alterações as

quantidades de água e a adição do plastificante. Estas misturas foram todas feitas de acordo o ponto 9.8 da *NP EN 206-1*, que diz “que os redutores de água, podem ser adicionado após a mistura dos materiais constituintes da amassadura tiverem uma aparência uniforme. Tendo a argamassa de voltar a ser amassada durante 5 minutos até que o adjuvante ficar completamente disperso, cumprindo assim a Nota desse ponto da *NP EN 206-1*.”

Para o *Pap20141117* iniciou-se as pesagens da areia e cimento, tendo estas as mesmas quantidades que as misturas dos *Pan*. É de notar que estas misturas de argamassa com plastificante têm menos quantidade de água que as normais, isto por que o plastificante tem a vantagem de ser um redutor de água em betões. Posteriormente mediu-se então 2,31 litros de água e 92,16 g de plastificante. Tendo esta argamassa um traço *A/C* de 0,45. Esta quantidade de plastificante é aquela que é indicada como limite máximo de dosagem indicada pelo fabricante, para a quantidade de cimento da mistura, isto é 1,8% da massa do ligante. Utilizou-se o limite máximo da dosagem devido ao desconhecimento do efeito do plastificante na argamassa. Como o objetivo era retardar a presa e por sua vez retardar o crescimento das temperaturas, tentou-se estudar o limite máximo. Logo depois das pesagens e medições concluídas, procedeu-se a colocação da areia e do cimento num “puseiro” exatamente como na argamassa normal e procedeu-se à sua mistura a posterior colocação de água. Ao te já sido colocada 60% da água da amassadura, adicionou-se o plastificante e seguidamente a restante água. A colocação do plastificante ao já ter sido colocada 60% da água da mistura tem como objetivo um efeito superior do plastificante como é referido pelo fabricante. Os restantes procedimentos foram executados da mesma forma que os da argamassa normal.

No provete *Pap20141118*, utilizou-se exatamente o mesmo procedimento, que na mistura do *Pap20141117*, divergindo apenas na quantidade de plastificante. A quantidade de plastificante utilizada neste ensaio foi de 1,2% da massa do ligante, correspondendo a 61g, quantidade está que está a meio da percentagem indicada pelo fabricante. Esta alteração da quantidade de plastificante do *Pap20141117*, para a do *Pap20141118*, deve-se ao facto de no ensaio do *Pap20141117*, passados aproximadamente 8,5 horas a argamassa ainda não tinha ganho presa, expressando exatamente esse facto pelas temperaturas registadas ao fim dessas 8,5 horas.

Todo o processo de preparação e execução da mistura é análogo à dos provetes *Pmn*, tendo dissemelhança da colocação do plastificante. Cumprindo também o ponto 9.8 da *NP EN 206-1*. A quantidade de plastificante utilizada foi de 1,2% da massa de metacaulino correspondendo a 41,5g. Estas 41,5g foram fracionadas em 5 partes iguais, contendo 8,3g cada mistura, por considerações já especificadas anteriormente. A colocação do plastificante em cada mistura ocorreu quando já tinha sido introduzido 60% do ligante nesta, empregando as indicações do fabricante, para potenciar o efeito do plastificante, como acontece nos betões.

4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo 4 são evidenciados os resultados experimentais obtidos nos ensaios realizados. É feita a análise e comparação: da temperatura relativa ao longo do tempo, com a variação de temperatura prevista para o próprio provete; do incremento da temperatura do molde com a temperatura da estufa; da variação da temperatura do molde com a variação prevista, da diferença para a estufa e do intervalo em que se pretende efetuar a tal variação.

4.1 Provetes 150x150x100mm

4.1.1 Provetes de argamassa Normal

A apresentação dos resultados inicia-se pelos provetes de argamassa com dimensões de $150 \times 150 \times 100$ mm. O primeiro provete de argamassa normal, designado por *Pan20140912*, foi betonado e ensaiado no dia 12 de Setembro de 2014, pelas 11 horas e 25 minutos. A temperatura exterior era de aproximadamente $T_{\text{ext}}=25^{\circ}\text{C}$. Passados 19 dias, o ensaio à compressão determinou um valor de tensão de rotura da argamassa à compressão de $f_c=37,8$ MPa. Importa salientar que, não foi cumprido o especificado nos pontos 5.5.1.1 e 5.5.1.2 da NP EN 206-1, onde se refere que, quando for necessário determinar a resistência, esta deve ser obtida em ensaios de cubos de 150 mm de aresta e que a resistência à compressão deve ser determinada em provetes com 28 dias.

Na Figura 4.1 apresenta-se o gráfico da temperatura relativa ΔT ao longo do tempo t avaliado no ensaio térmico, relativo ao Provede *Pan20140912*. Por temperatura relativa entende-se a amplitude da temperatura efectiva T_{ef} relativamente ao exterior, i.e. $\Delta T = T_{ef} - T_{ext}$.

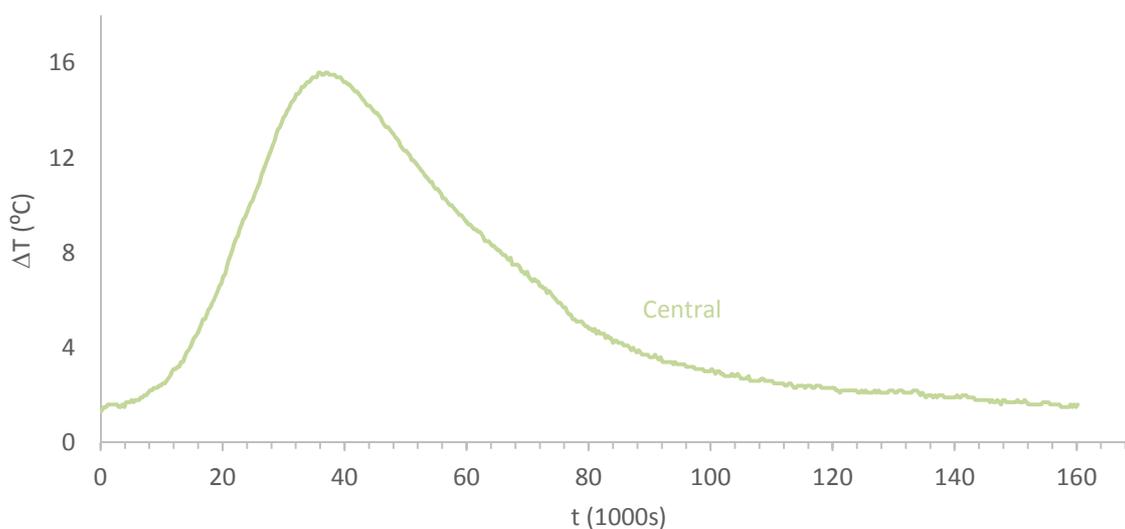


Figura 4.1- Gráficos ΔT -t do ensaio térmico do Proвете *Pan20140912*.

Ao analisar a figura averigua-se que inicialmente o Proвете *Pan20140912* tem um $\Delta T = 1,3^\circ\text{C}$. O valor máximo vale $\Delta T = 15,6^\circ\text{C}$, atingido por volta dos 37000s (10h20min), dando-se por terminando o ensaio após 44,5 horas, aproximadamente. Nessa altura a temperatura do provete era inferior à inicial.

O ΔT inicial do ensaio é relativamente pequeno, mas existe. De facto, apesar dos ingredientes estarem à temperatura ambiente, muito próxima da temperatura T_{ext} , verifica-se que logo após ser realizada a mistura, a sua temperatura é ligeiramente superior. Posteriormente, constata-se a fase de crescimento do ΔT , atingindo o máximo ao fim de mais de 10h. Sendo que o início deste intervalo, a velocidade de crescimento do ΔT é baixa, é de realçar que mais de metade deste intervalo esta velocidade é quase constante.

Logo após ter sido atingido o pico, o ΔT começa a decrescer. Verifica-se que o decréscimo é acentuado. Este decréscimo deve-se ao facto da existência de perdas, sendo estas substancialmente maiores do que o calor gerado pelo provete, se existir. Este aspeto, leva à inviabilização deste ensaio. Importa recordar que, um dos objetivos do ensaio consiste em simular um processo de hidratação de uma mistura de cimento no contexto de um maciço, sem perdas, analisando assim o desenvolvimento das suas características térmicas.

Na Figura 4.2 apresenta-se o gráfico Δt -t avaliados no ensaio térmico do provete denominado *Panp20140919*. Este provete foi betonado e ensaiado no dia 19 de Setembro de 2014, pelas 16 horas e 20 minutos, tendo-se registado $T_{ext} = 24^\circ\text{C}$, aproximadamente. Passados 32 dias, o ensaio à compressão determinou um valor de tensão de rotura da argamassa à compressão de $f_c = 34,5$

MPa. Saliente-se que, neste caso, também não foi cumprido o especificado nos pontos 5.5.1.1 e 5.5.1.2 da NP EN 206-1, como foi referindo anteriormente. Nesta figura verifica-se que inicialmente $\Delta T=1,8^{\circ}\text{C}$, atingindo o máximo de $\Delta T=23^{\circ}\text{C}$, aos 40000s (11h).

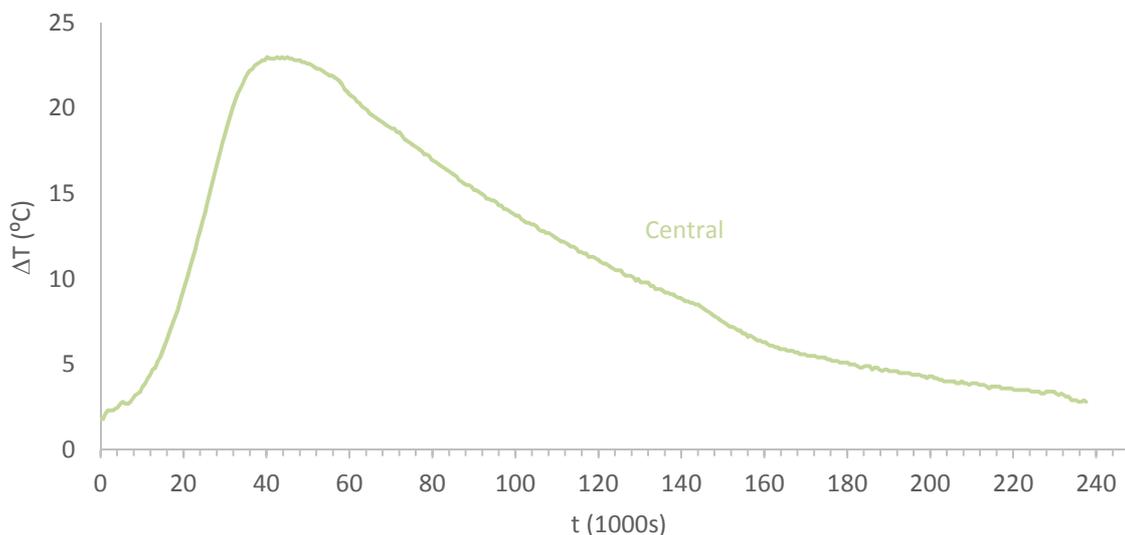


Figura 4.2- Gráficos ΔT -t do ensaio térmico do Provete Panp20140919.

Na Figura 4.3 comparam-se os gráficos dos 2 Provetes anteriores. Importa recordar que o Provete Pan20140912 foi simplesmente moldado, nas 6 faces utilizando placas de aglomerado de madeira revestido a melamina branca com 20 mm de espessura. Por sua vez, o Provete Panp20140919, para além deste molde, foi ainda envolvido por placas de poliestireno extrudido com 30 mm de espessura. De facto, tendo-se verificado que o primeiro molde não foi adequado para a realização de um ensaio adiabático, i.e., sem perdas de calor, tentou-se verificar da adequabilidade desta proteção para a realização do ensaio. O que se concluiu é que assim, o ensaio não é adequado ao objetivo pretendido. Contudo, verifica-se que nesta segunda alternativa ΔT cresce mais, a maior velocidade, e durante mais tempo. A fase de decréscimo é também mais lenta e mais prolongada.

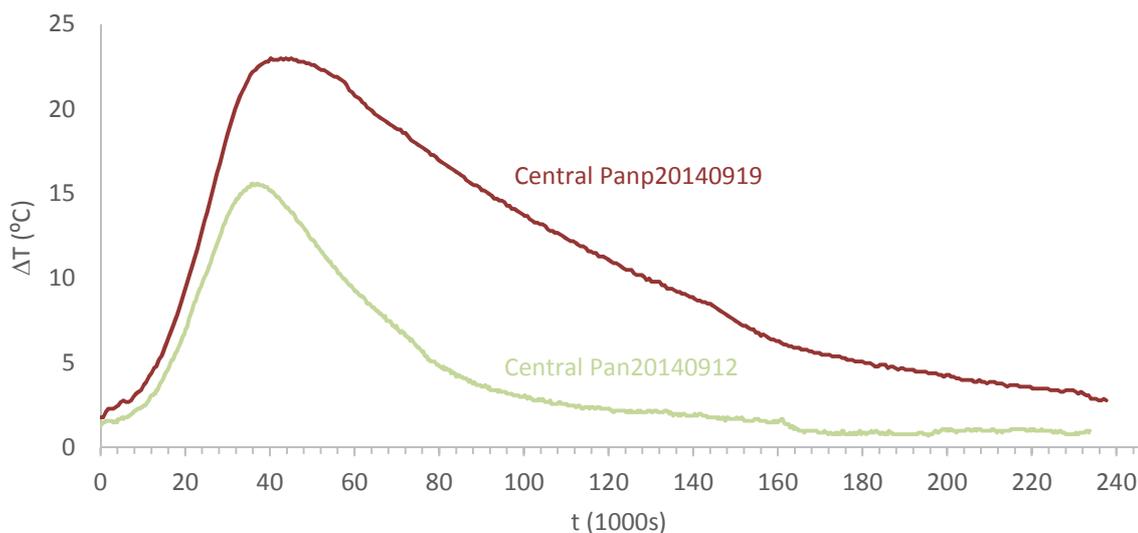


Figura 4.3 – Gráficos ΔT -t dos Provetes *Pan20140912* e *Panp20140919*.

Tendo em consideração os resultados anteriores, pensou-se em evitar o diferencial de temperaturas entre o provete e o ambiente em torno do provete. É este diferencial que origina as perdas de calor do provete, aliás, por unidade de tempo, estas perdas são proporcionais a este diferencial. A dificuldade deste procedimento está relacionada com a temperatura do provete, a qual não é previamente conhecida. Com esse objetivo, recorreu-se a uma estufa do laboratório.

Na Figura 4.4 apresenta-se o gráfico ΔT -t avaliado no ensaio térmico, relativo ao Provede *Pan20141015*, realizado na Estufa. Este provete foi betonado e ensaiado no dia 15 de Outubro de 2014, pelas 10 horas, verificando-se T_{ext} de $21,5^{\circ}C$, aproximadamente. Esta temperatura inicial foi variando ao longo do dia, embora esta variação não tenha qualquer interesse para este estudo. Passados 19 dias, o ensaio à compressão, nas mesmas condições que anteriormente, determinou um valor de tensão de rotura da argamassa à compressão de $f_c=35,8$ MPa.

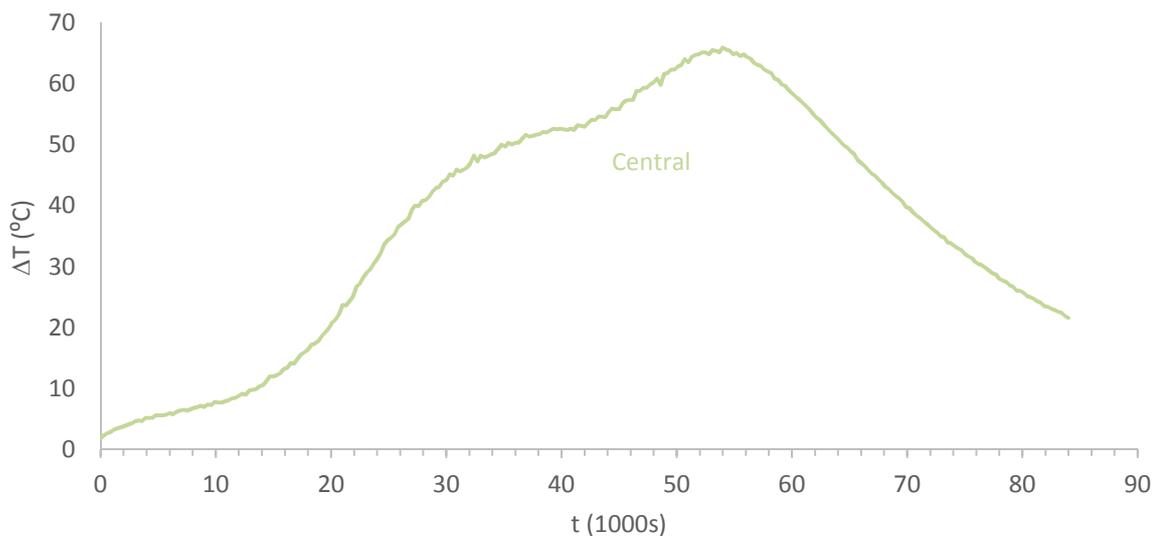


Figura 4.4- Gráficos ΔT -t do ensaio térmico do Proвете *Pan20141015*

Como facilmente se pode concluir, este último ensaio não se consegue garantir as pretendidas condições adiabáticas para o ensaio. De facto, por exemplo, o calor necessário para aquecer o molde não foi tido em consideração.

4.1.2 Provetes de metacaulino

Na Figura 4.5 apresenta-se o gráfico ΔT -t avaliado no ensaio térmico do Proвете *Pmn20140917*. Este provete foi realizado e ensaiado no dia 17 de *Setembro* de 2014, pelas 10 horas e 20 min, verificando-se $T_{ext}=24^{\circ}C$. Este ensaio decorreu em condições idênticas ao do provete de argamassa *Pan20140912*. Passados 14 dias, o ensaio à compressão determinou um valor de tensão de rotura do geopolímero à compressão de $f_m=40,7$ MPa, tal como anteriormente. No instante inicial $\Delta T=3,4^{\circ}C$, e o valor máximo foi $\Delta T=16,4^{\circ}C$, por volta dos 14000s (4h). As características desta curva são em tudo semelhantes ao do Proвете *Pan20140912*, com a diferença de que agora tudo acontece a uma velocidade entre 2,5 a 3 vezes superior. De qualquer modo também se percebe a quantidade de calor perdido pelo provete após a temperatura máxima.

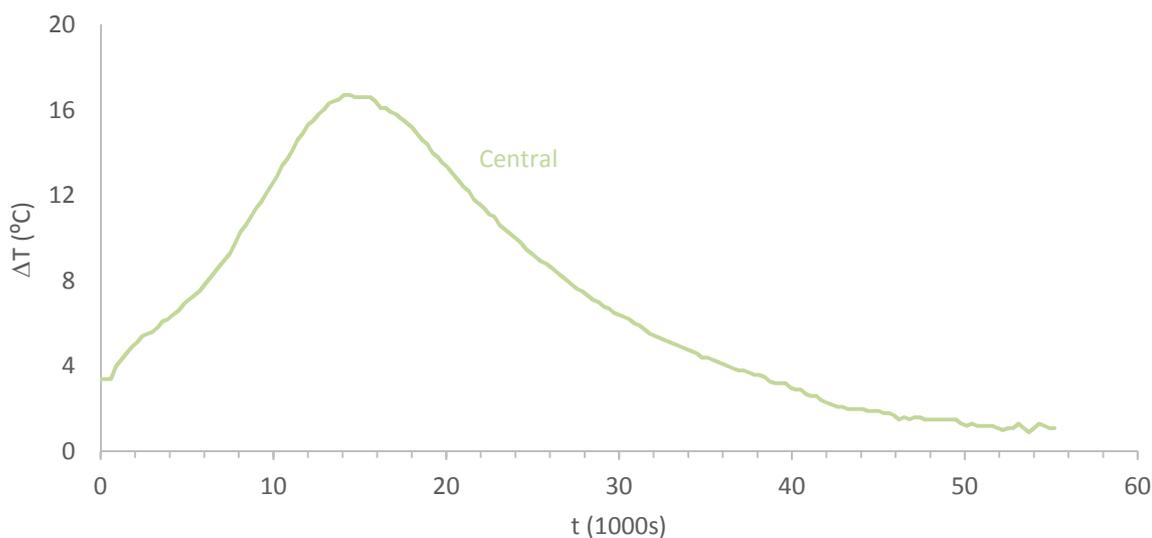


Figura 4.5- Gráficos ΔT -t do ensaio térmico do Provete *Pmn20140917*.

Na Figura 4.6 apresenta-se o gráfico ΔT -t do provete, *Pmnp20140923*. O ensaio foi realizado no dia 23 de *Setembro* de 2014, pelas 09 horas e 22 min, quando $T_{ext}=23^{\circ}\text{C}$. Este ensaio decorreu em condições idênticas ao do provete de argamassa *Pan20140919*. Passados 28 dias, o ensaio à compressão determinou um valor de tensão de rotura do geopolímero à compressão de $f_m=43,4\text{MPa}$. Neste ensaio, no início $\Delta T=4^{\circ}\text{C}$ e aos 26000s (8h) atinge-se o valor máximo $\Delta T=24,4^{\circ}\text{C}$. Esta curva tem características semelhantes às anteriores. Importa realçar que, relativamente ao ensaio do provete de argamassa, a velocidade a que decorreu este ensaio foi de 1,5 a 2 vezes mais rápido, ou seja, não foi tão rápida como no caso anterior.

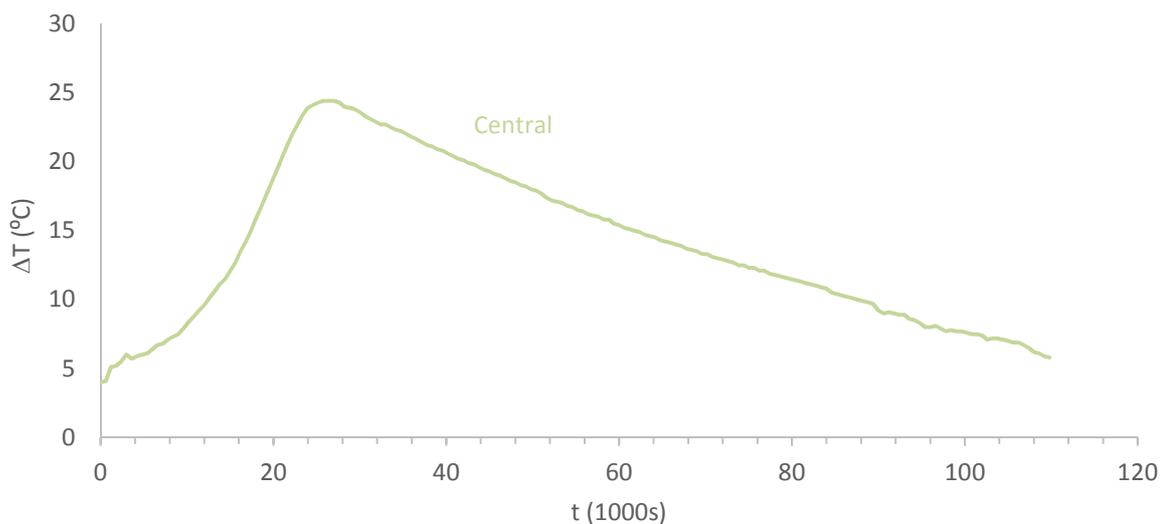


Figura 4.6- Gráficos ΔT -t do ensaio térmico do Provete *Pmnp20140923*.

Na Figura 4.7 comparam-se os gráficos ΔT -t dos 2 Provetes anteriores. Importa salientar a menor velocidade de crescimento das temperaturas do provete isolado com placa de poliestireno relativamente ao não isolado. De facto não se conhecem as razões para tal facto, a não ser que a ligeira redução da temperatura inicial dos ingredientes da mistura reduzam significativamente o desencadear das reações. Também parece que neste ensaio, a taxa de perda de calor foi superior, uma vez que o período em que decorrem estas perdas é inferior ao do Provete *Pan20140919*, sendo que aqui o diferencial inicial é superior.

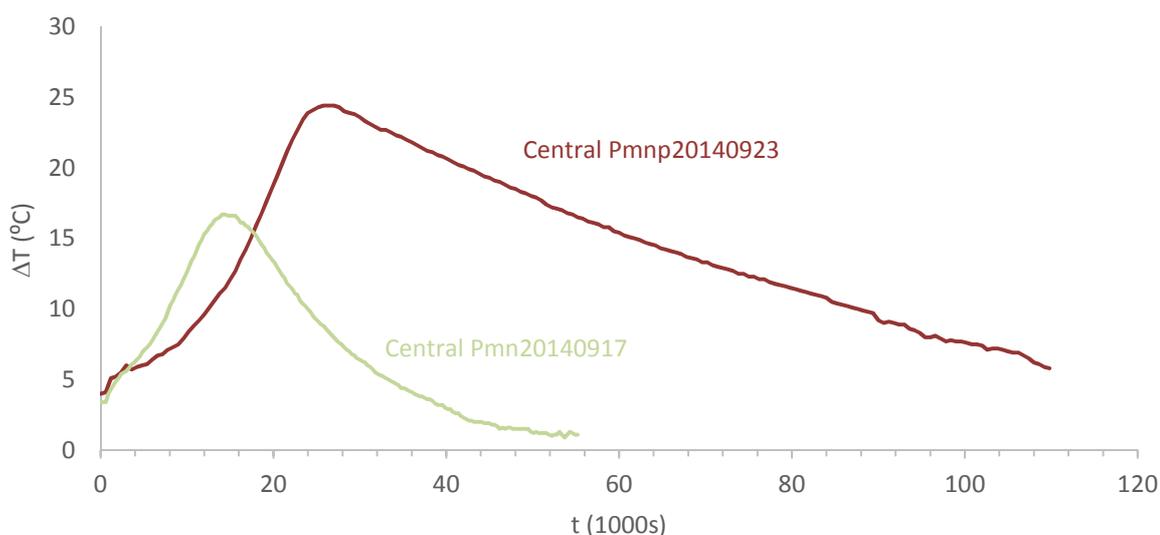


Figura 4.7 – Gráficos ΔT -t dos provetes *Pmn20140917* e *Pmnp20140923*.

4.2 Provetes (200x200x200mm)

Tendo em conta os resultados apurados anteriormente, tentou-se desenvolver uma metodologia que conseguisse, dentro do possível, simular um ensaio adiabático de modo a poder conhecer-se as características térmicas das reações de hidratação do cimento e das reações desenvolvidas na ativação alcalina. Uma solução passou por impor ao molde do provete a mesma temperatura que a registada no provete. A outra passou por aumentar ligeiramente as dimensões do provete de modo a reduzir os efeitos de superfície.

4.2.1 Provetes de argamassa

O primeiro provete de argamassa normal, designado por *Pan20141029*, foi betonado e ensaiado no dia 29 de Outubro de 2014, pelas 10 horas e 29 minutos, quando $T_{ext}=23,5^{\circ}\text{C}$. Passados 20 dias, o ensaio à compressão determinou um valor de tensão de rotura da argamassa à compressão de $f_c=17,4\text{MPa}$. Para além de não se ter cumprido o especificado na *NP EN 206-1*, importa salientar que este resultado não é credível em virtude do facto das faces estarem deformadas.

Na Figura 4.8 apresentam-se os gráficos $\Delta T-t$ do Provete *Pan20141029*. Indicam-se, relativamente à temperatura exterior as evoluções temporais das temperaturas avaliadas no centro do provete, designada por “*Central*”, no centro das faces laterais, designada “*Face*” e nos cantos inferiores, designado por “*Canto*”. De recordar que, cada curva resulta da média de dois valores medidos, tal como explicado no Capítulo 3. A temperatura do molde é avaliada de acordo com a *Equação (3.1)*.

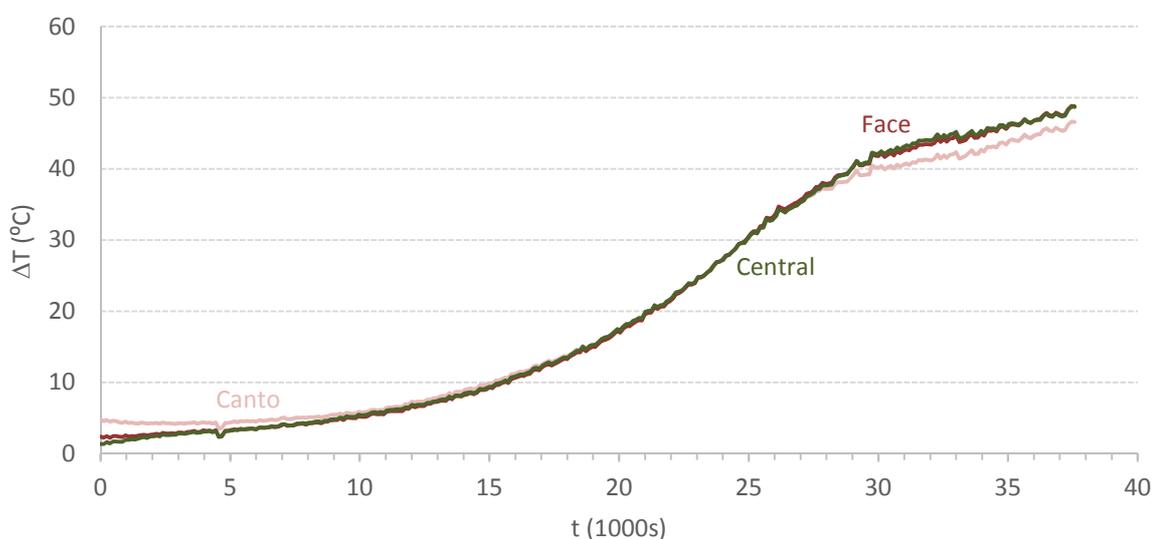


Figura 4.8- Gráficos $\Delta T-t$ do ensaio térmico do Provete *Pan20141029*.

A primeira constatação tem a ver com a quase coincidência das curvas, tal como pretendido, de modo a realizar um ensaio em que o provete não recebesse calor, nem libertasse. Apesar disso verifica-se que, inicialmente a temperatura do Canto foi ligeiramente superior às temperaturas da *Face* e *Central*, devendo-se ao facto do molde ter sido colocado na estufa a uma temperatura acima da massa do Provete. Nota-se também que nos últimos 1000s a temperatura do *Canto* foi inferior às da *Face* e *Central*. Provavelmente, a argamassa colocada

nos *Cantos* hidratou mais rapidamente que a restante parte, libertando mais calor no início que no final.

Nos primeiros *1000s*, a temperatura da massa de argamassa foi sensivelmente constante e estava pouco acima da temperatura exterior. No ensaio, a fase de crescimento mais acentuado do ΔT decorreu no intervalo [*15000s-30000s*], ou seja [*4,2h-8,3h*], durante cerca de *4,1h*, no qual se deu um acréscimo de temperatura de $32,8^{\circ}\text{C}$. Nos últimos *1000s* iniciou-se a estabilização da temperatura, atingindo uma variação global da temperatura a rondar os 49°C . Este ensaio durou apenas *10,5 horas*, devido ao facto de ter ocorrido uma avaria no temporizador elétrico.

Na Figura 4.9 apresentam-se os gráficos do ensaio térmico do segundo provete citado por *Pan20141104*, que foi betonado e ensaiado no dia *04* de Novembro de *2014*, tendo-se registado $T_{ext}=20,8^{\circ}\text{C}$, aproximadamente. O ensaio à compressão, em condições idênticas ao anterior, foi efetuado *73 dias* após a sua betonagem, obtendo-se $f_c=27,9\text{ MPa}$

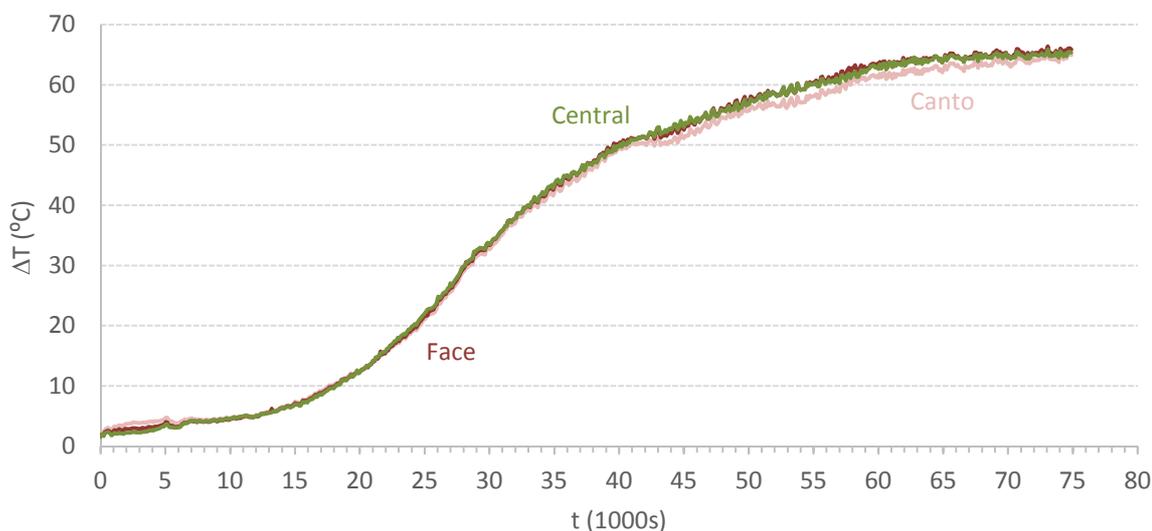


Figura 4.9 - Gráficos ΔT - t do ensaio térmico do Provelte *Pan20141104*.

Neste caso, a coincidência das curvas é quase perfeita. Constata-se apenas na parte final do ensaio uma ligeira redução das temperaturas dos cantos. Pelas razões já apontadas, a temperatura dos cantos iniciou-se ligeiramente acima e terminou um pouco abaixo. De qualquer modo, pode afirmar-se que, ao longo das primeiras *11h*, as temperaturas da *Face*, *Central* e *Canto* foram coincidentes. Nas primeiras *3,3h* a temperatura foi sensivelmente constante. A fase de maior crescimento ocorreu no intervalo [*4,2h-11,1h*], onde se verificou um acréscimo de 55°C . Após *16h*, a temperatura estabilizou. A duração do ensaio foi de *21 horas* aproximadamente, tendo um ΔT global de 64°C .

O Provede *Pan20141106*, foi betonado e ensaiado no dia 06 de Novembro de 2014 à temperatura $T_{ext}=18^{\circ}C$. No ensaio à compressão, efetuado após 72 dias obteve-se $f_c=27,9MPa$. Na Figura 4.10 apresentam-se os gráficos do correspondente ensaio térmico.

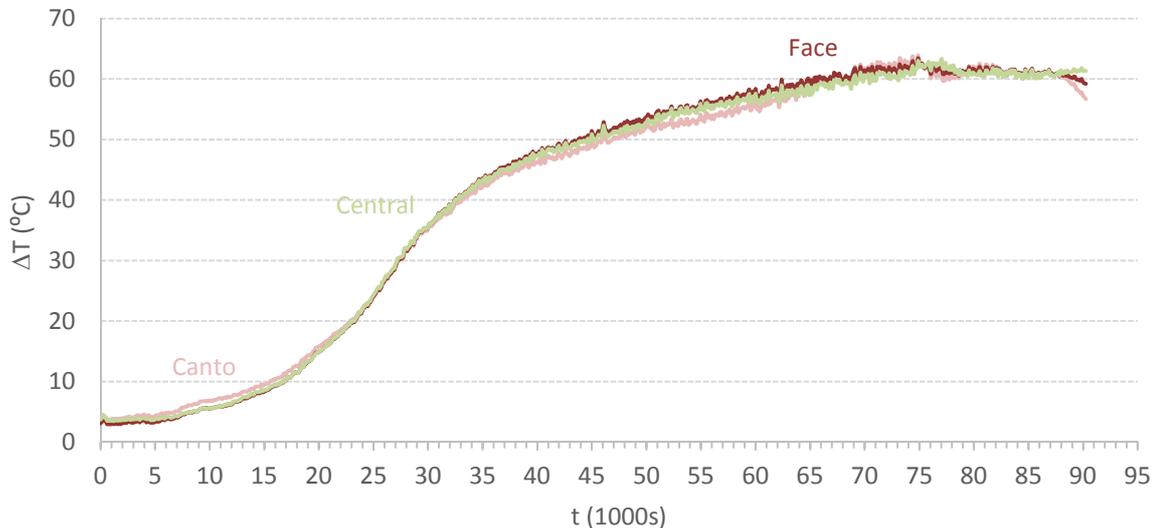


Figura 4.10 – Gráficos ΔT - t do ensaio térmico do Provede Pan20141106.

Tal como nas figuras anteriores, também são aqui visíveis os aspetos realçados anteriormente, nomeadamente a coincidência das curvas e as características da curva da temperatura do canto. Também se verifica que foi residual o crescimento inicial da temperatura nas primeiras 2h e que nas 16h seguintes, a temperatura subiu $57^{\circ}C$ e estabilizou-se a temperatura depois disso. Globalmente, o ensaio demorou cerca de 25h e a temperatura subiu $61^{\circ}C$.

Na Figura 4.11 confortam-se os gráficos das temperaturas dos 3 Provedes anteriores. Se por um lado, são visíveis algumas diferenças entre provedes nota-se por outro lado algumas coincidências entre as 3 curvas.

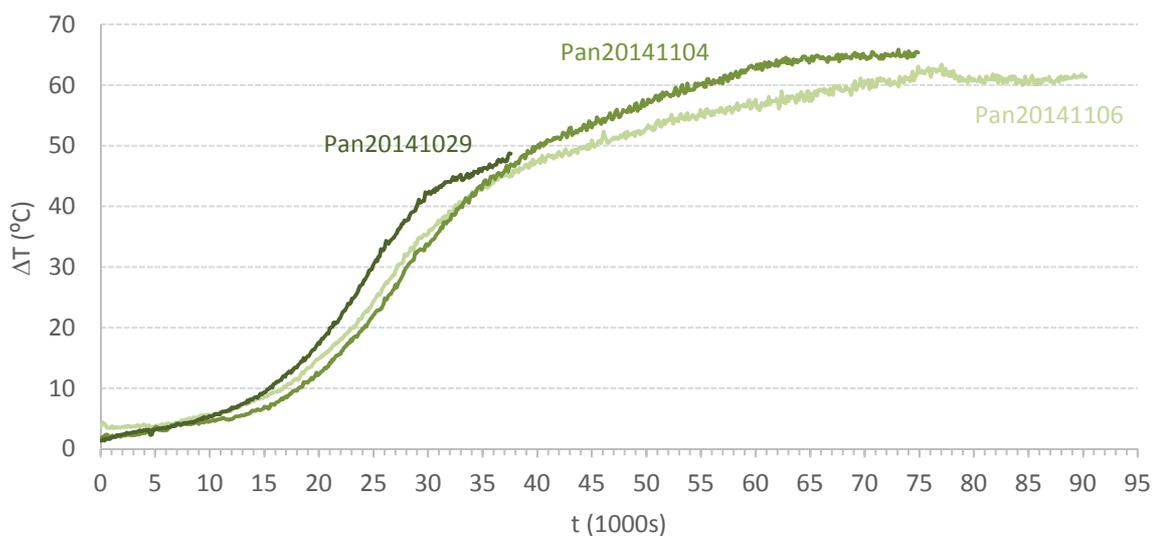


Figura 4.11 – Gráficos ΔT -t dos provetes de argamassa normal

Importa começar por realçar que a temperatura T_{ext} não foi coincidente nos 3 ensaios. Para além disso, não foi possível confirmar se a temperatura a que se encontravam os ingredientes da mistura coincidiam, ou não, com esta temperatura. De facto, sendo a mistura realizada às primeiras horas da manhã, verifica-se neste período um decréscimo da temperatura ambiente do laboratório em virtude da abertura dos portões. Será nestes parâmetros, não controlados, que se justifica a temperatura superior do Provete *Pan20141106* nas 2h iniciais. De facto, nesse dia a abertura dos portões originou uma descida do T_{ext} que certamente não se verificou nos ingredientes da mistura. Na fase de crescimento mais acentuada das temperaturas, a partir das 3h de ensaio, constata-se que o Provete *Pan20141029* se encontrava adiantado cerca de 1h relativamente aos outros. A justificação residirá porventura na superior temperatura inicial dos ingredientes que desencadeiam mais rapidamente as reações de hidratação. Na parte final, a temperatura do Provete *Pan20141106* ficou cerca de 4°C abaixo do Provete *Pan20061104*. Não foram encontradas justificações concretas para esta diferença, a qual não pode deixar de se considerar como desprezável. Globalmente, pode afirmar-se que o incremento das temperaturas da massa de argamassa nas reações de hidratação oscilará entre 61°C e 64°C nas primeiras 18h.

Importa recordar que nestes ensaios se pretendia encontrar uma metodologia adiabática de os realizar, i.e. de forma que não fosse fornecido, nem retirado, calor ao provete sujeito a ensaio térmico. Nesse sentido a temperatura do molde deveria igualar a temperatura no correspondente centro do provete. A temperatura do molde foi avaliada pela *Equação (3.1)*. De facto, programar uma temperatura na estufa, que aqueça o molde na mesma quantidade que o provete aquece, contém 3 dificuldades: a primeira depende da variação da temperatura prevista para o próprio provete; a segunda depende do incremento da temperatura do molde em função da temperatura

da estufa; a terceira do atraso deste incremento, ou seja, a variação da temperatura do molde depende da variação prevista, da diferença para a estufa e do intervalo de tempo em que se pretende efetuar a tal variação.

Na Figura 4.12 apresentam-se as curvas dos valores das diferenças ΔT_{mp} no decorrer dos ensaios de argamassa normal.

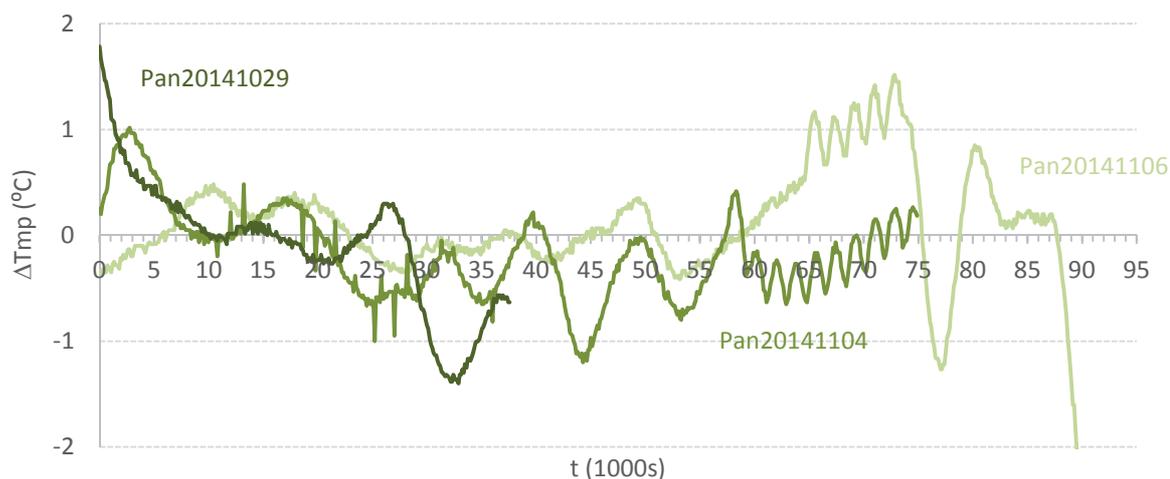


Figura 4.12 – Gráficos ΔT_{mp-t} dos provetes de argamassa normal

Nesta figura verifica-se que o Provette *Pan20141029* exibiu inicialmente valores superiores de ΔT_{mp} , pelo motivo do T_{molde} ser superior à da massa de argamassa. Este facto resultou da temperatura inicial um pouco elevada da estufa. Tendo por objetivo $\Delta T_{mp}=0$, verifica-se que o modo de operação do ensaio foi melhorado de ensaio para ensaio, tal como se pode constatar nos resultados do Provette *Pan20141106*, pelo menos até ao momento em que o temporizador elétrico começou a ser utilizado. Para além disso verificou-se ainda 2 factos cumulativos: por um lado, o valor das diferenças de temperatura entre o molde e o provete raramente excedeu 1°C o que permite concluir que o ensaio foi bem conduzido; por outro lado, verificaram-se algumas oscilações que reduzem significativamente o acumulado.

Uma das formas de medir a quantidade de calor transmitida ao provete consiste em avaliar a média do acumulado ΔT_{mp} , o que neste caso foi efetuado utilizando a *Equação (3.1)*.

Na Figura 4.13 apresentam-se os gráficos temporais dos valores médios acumulados dos ensaios ΔT_{ma} . O acumulado positivo expressa que a temperatura do molde era superior à dos

próprios provetes, i.e. estava-se a fornecer calor ao provete, enquanto o acumulado negativo corresponde ao contrário.

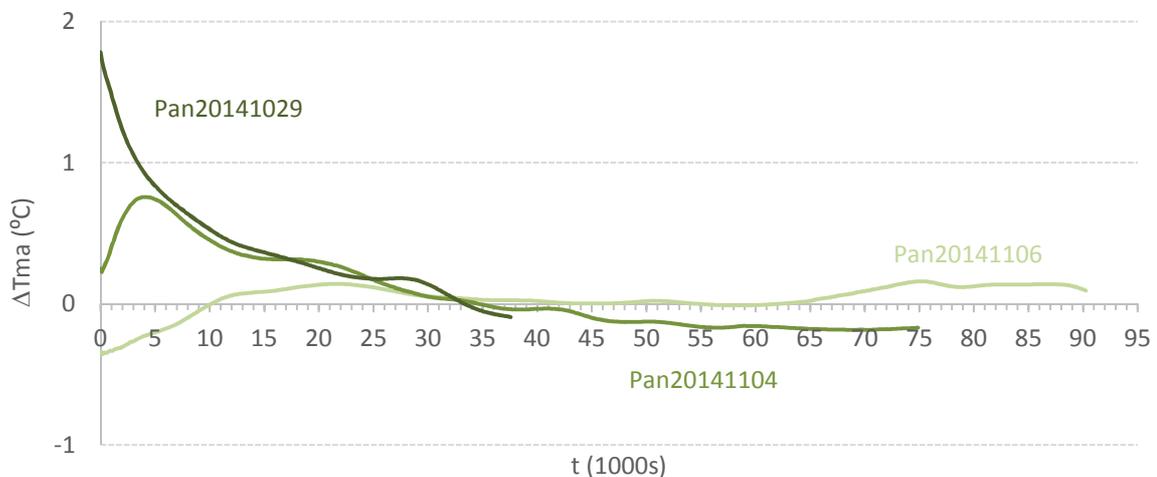


Figura 4.13 – Gráficos ΔT_{ma} -t dos provetes de argamassa normal

Constata-se nesta figura que inicialmente existem algumas diferenças, as quais a partir da 2^a hora, são progressivamente anuladas. No final, os acumulados dependem fundamentalmente das dificuldades em utilizar adequadamente o temporizador elétrico. De qualquer modo, os resultados finais permitem concluir que o ensaio foi conduzido de forma quase adiabática.

4.2.2 Provetes de Metacaulino

No primeiro provete de Metacaulino, designado por *Pmn20141113*, registou-se aproximadamente $T_{ext}=20^{\circ}\text{C}$. O ensaio à compressão foi efetuado 64 dias após a sua construção, nas mesmas condições que anteriormente, tendo-se obtido $f_m=22,5$ MPa

Na Figura 4.14 apresentam-se os gráficos ΔT -t avaliados no ensaio térmico, desse mesmo provete. O que importa realçar nesta figura está relacionado com a temperatura inicial do provete: praticamente triplo da verificada nos provetes anteriores de metacaulino. Este facto poderá estar relacionado com a demora na realização da mistura. Para além disso, a temperatura do Canto é inferior às restantes nos primeiros 3000s e no intervalo [10000s – 14000s]. Se no início se entende, por motivo do molde estar a temperatura inferior, já no referido intervalo não

se encontrou justificação para o efeito. No intervalo [3000s - 9000s] a “Face” e o “Canto” estão a temperaturas superiores ao do provete, demonstrando que a temperatura do forno esteve ligeiramente superior à temperatura pretendida. A fase do crescimento mais acentuada da temperatura no ensaio decorre entre o intervalo [6000s - 12000s]. Verifica-se ainda que, nos últimos 15000s, as temperaturas permanecem sensivelmente constantes e coincidentes. Este ensaio teve uma duração de 9,2 horas e um valor máximo de $\Delta T = 43,5^\circ\text{C}$.

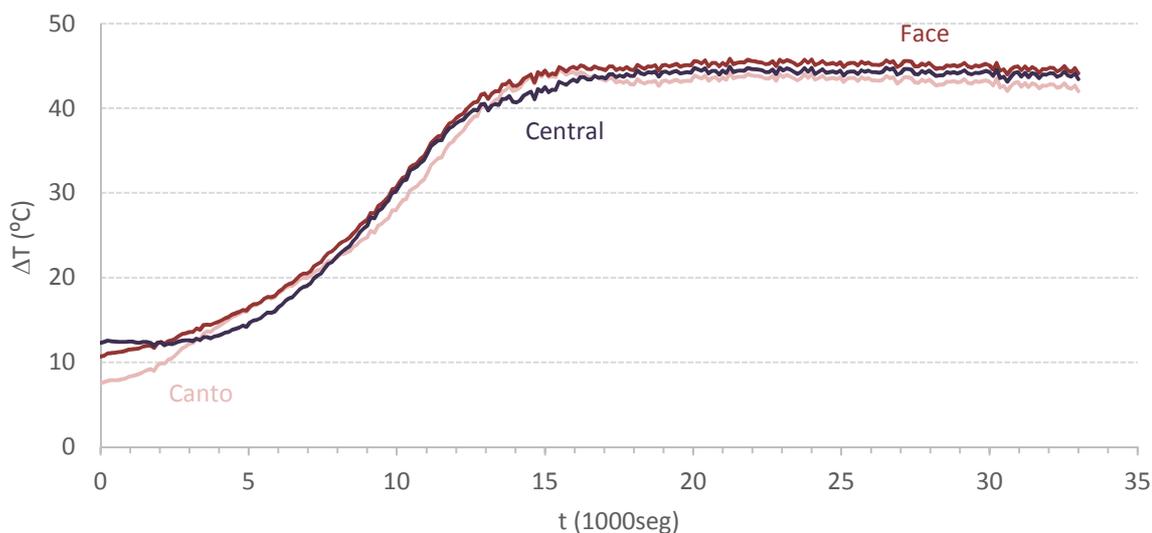


Figura 4.14- Gráficos ΔT -t do ensaio térmico do Provete *Pmn20141113*.

Na Figura 4.15 apresentam-se os gráficos ΔT -t do segundo provete de metacaulino *Pan20141120*, tendo-se registado $T_{ext} = 21^\circ\text{C}$, sensivelmente. O ensaio à compressão foi efetuado 57 dias, obtendo-se $f_m = 18,5$ MPa. Tal como no caso anterior, é de realçar a temperatura inicial, 10°C . Estando as temperaturas sensivelmente constantes e coincidentes até ao final do ensaio, realce para os valores inferiores do Canto quer no início, quer no final do ensaio. A fase de crescimento mais acentuada da temperatura no ensaio decorre no intervalo [10000s - 15000s]. Este ensaio teve uma duração de cerca de 31000s cerca de 8,6h e o valor máximo foi $\Delta T = 37^\circ\text{C}$.

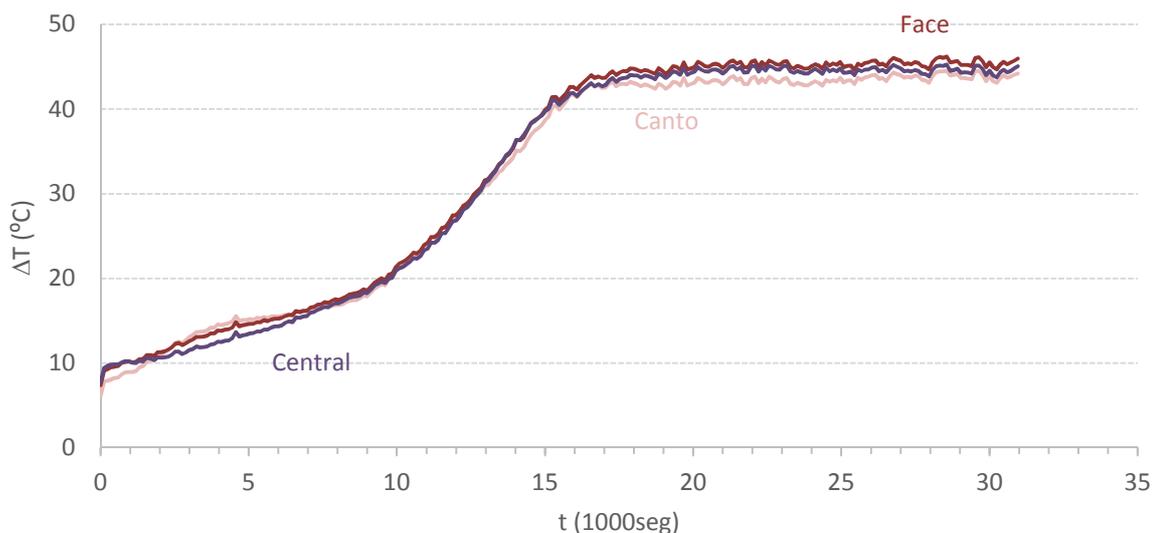


Figura 4.15- Gráficos ΔT - t do ensaio térmico do Provetes *Pmn20141120*.

Na Figura 4.16 confrontam-se os gráficos das temperaturas dos 2 Provetes anteriores. Se por um lado, são visíveis algumas diferenças entre provetes, nota-se por outro lado algumas coincidências entre as 3 curvas. O que importa realçar nesta figura é que, no final, as variações globais de temperatura são praticamente iguais. No instante $t=0$, o Provetes *Pmn20141113* tem uma temperatura ligeiramente superior. Por outro lado, o gráfico do Provetes *Pmn20141120* mostra estar sempre atrasado, cerca de 1h, relativamente ao do outro Provetes. Estes aspetos estarão em princípio relacionados. De facto, a temperatura inicial superior conduz a um desenvolvimento mais rápido das reações químicas. Tal como referido anteriormente, a demora da execução da mistura justificará o aumento inicial da temperatura. No segundo provetes, optimizou-se o processo e a mistura do provetes *Pmn20141120* foi menos demorada. Apesar destes fatores constata-se que decorridos 17000s, o valor máximo foi $\Delta T = 43,5^{\circ}\text{C}$. Este valor é significativamente inferior ao avaliado nos ensaios de argamassa, o que contrariou as expectativas iniciais tendo em consideração factos referidos anteriormente. O que se constata é que a temperatura máxima é atingida a velocidades muito superiores.

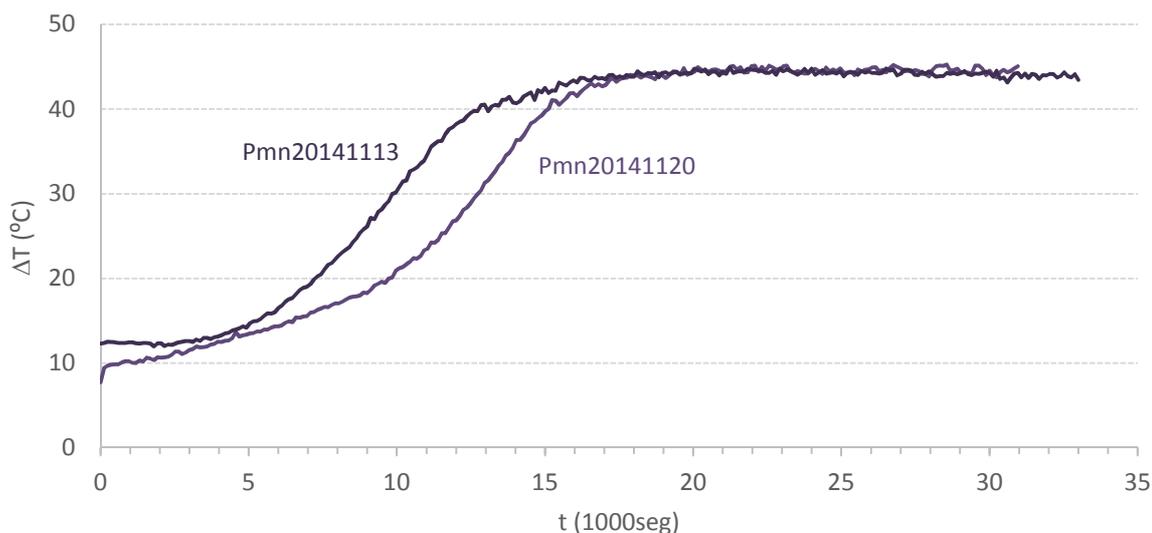


Figura 4.16 – Gráficos ΔT - t dos provetes *Pmn20141113* e *Pmn20141120*.

Na Figura 4.17 apresentam-se as curvas ΔT_{mp-t} dos ensaios dos provetes de metacaulino

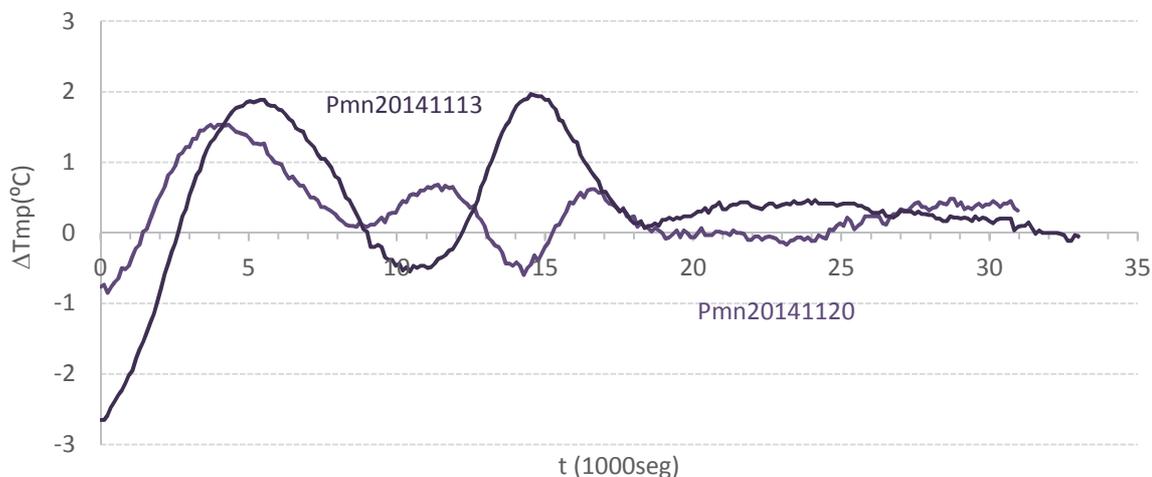


Figura 4.17 – Gráficos ΔT_{mp} - t dos provetes de metacaulino.

Importa começar por recordar que valores positivos de ΔT_{mp} correspondem a fornecer calor à massa do provete, e se o provete estiver a uma temperatura superior ao do molde, os valores serão negativos. Neste caso verificam-se algumas oscilações nos dois provetes, maiores no Provede *Pmn20141113*, o primeiro a ser ensaiado. De realçar o valor negativo no instante inicial. O segundo ensaio foi otimizado a partir do conhecimento entretanto adquirido. Durante

os ensaios foram-se amenizando as oscilações dos gráficos, conseguindo-se, a partir dos 18000s, valores quase que insignificantes de ΔT_{mp} . O facto pelo qual o ΔT_{mp} do Pmn20141113 ser mais negativo que o outro provete, deve-se à temperatura do “Central” ser superior ao T_{molde} , pelas consequências já referidas anteriormente. Como se pode comprovar na análise do gráfico do Pmn20141113, foi entre os intervalos [0s – 2500s] e dos [9000s – 12000s] que foi o Provete que forneceu temperatura ao molde, apesar de nos restantes intervalos foi o forno que forneceu calor ao Provete.

Enquanto no Pmn20141120 o provete cedeu temperatura ao molde entre [0s – 1500s] e os [13000s – 15000s] sendo o forno a ceder temperatura ao provete nos restantes intervalos. Durante o ensaio conseguiu-se diminuir as oscilações dos respetivos gráficos, conseguindo estabiliza-los por volta dos 18000s, próximos do ΔT_{mp} igual a zero.

Na Figura 4.18 apresentam-se os gráficos temporais dos valores médios acumulados dos ensaios ΔT_{ma} . Inicialmente existem as maiores diferenças, superiores no caso do primeiro provete. Como se constata pela média dos acumulados, a partir dos 5000s, inferiores a 0,6 °C, os resultados permitem concluir que os ensaios foram conduzidos de forma quase adiabática.

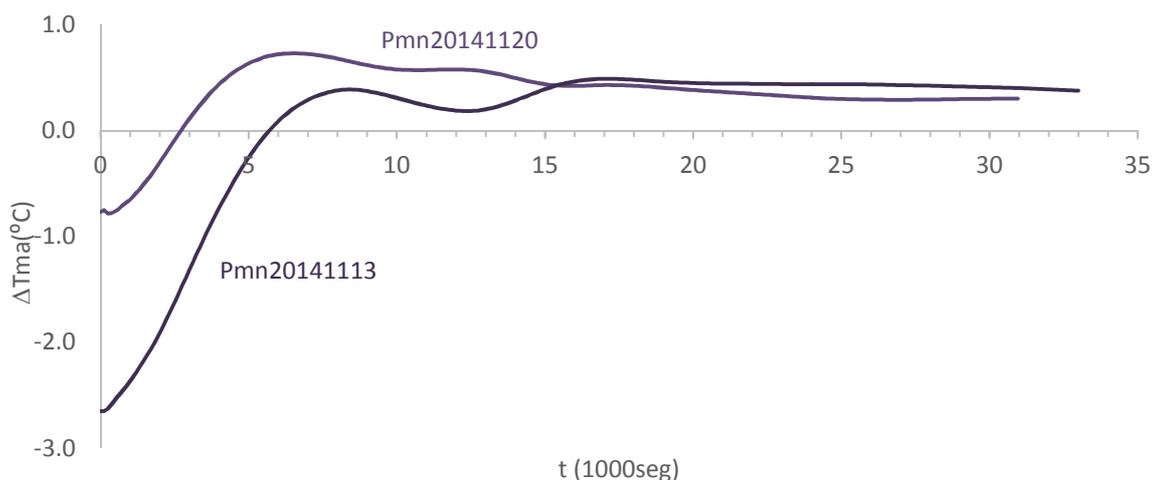


Figura 4.18 – Gráficos ΔT_{ma-t} dos provetes de metacaulino normal

4.3 Argamassa com Plastificante

Tal como referido, o calor de hidratação do betão, pelo menos de grandes massas, dá origem a aumentos de temperatura que podem conduzir à fissuração do betão. Portanto, uma das boas soluções pode passar por dilatar no tempo a geração do calor hidratação de modo a que as

perdas nas fronteiras conduzam a um menor aumento global da temperatura; uma solução ótima consiste na diminuição da quantidade de calor gerado. No âmbito dos betões, existem diversos produtos no mercado com estes objetivos, por exemplo os plastificantes.

O primeiro Provete de argamassa com plastificante foi citado por *Pap20141117*, foi betonado e ensaiado no dia 17 de Novembro de 2014, verificando-se $T_{ext}=18.5C$, aproximadamente. Importa recordar que este provete foi construído utilizando uma quantidade de plastificante igual a 1,8% da massa de cimento. Como se verificou, esta quantidade foi exagerada.

Na Figura 4.19 expõem-se os gráficos $\Delta T-t$ do Provete *Pap20141117*. Neste caso, desde o instante inicial até ao término do ensaio, o gráfico da “Face” tem valores ligeiramente inferiores aos dos outros gráficos que são quase coincidentes. A duração deste ensaio foi de apenas 30480s, sensivelmente 8,5h, tendo-se registado durante esse tempo um acréscimo de apenas 5 °C, aproximadamente. Este facto deve-se à quantidade excessiva de plastificante na mistura. Pelo desconhecimento relativamente ao intervalo de tempo que levaria este provete a ganhar pressa, decidiu-se assim, terminar o ensaio.

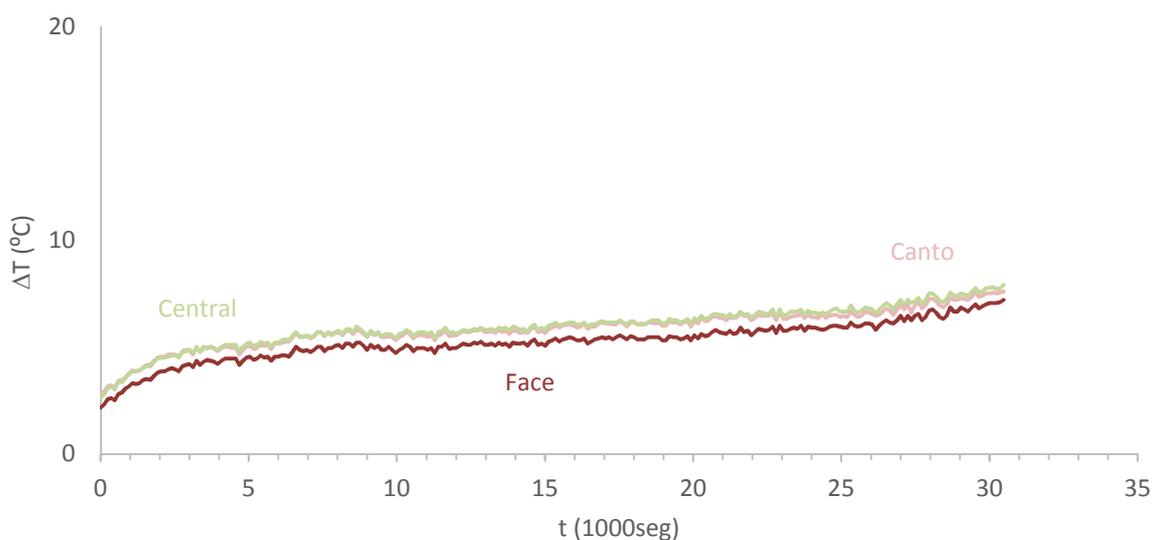


Figura 4.19 – Gráficos $\Delta T-t$ do provete *Pap20141117*.

Ao analisar a Figura constata-se 2 pontos, sendo o primeiro, que desde o instante inicial até ao término do ensaio, o gráfico da “Face” tem valores inferiores aos outros gráficos; o segundo ponto verifica-se a coincidência dos gráficos “Central” e “Canto”. O facto pela qual o gráfico “Face” ter valores inferiores aos restantes gráficos, deve-se à estufa estar a uma temperatura ligeiramente inferior à do provete. A duração deste ensaio foi apenas 30480s, sensivelmente 8,5h, tendo-se registado durante esse tempo um acréscimo de apenas 5 °C, aproximadamente.

Este acontecimento deve-se ao facto da quantidade de plastificante na mistura ter sido excessiva. Pelo desconhecimento de quanto tempo levaria este provete a ganhar pressa, decidiu-se assim, terminar o ensaio e deitar a argamassa fora, para se poder reutilizar o molde para outro provete.

Após a contrariedade anterior, no dia seguinte realizou-se outra mistura utilizando uma quantidade de plastificante de 1,2% da massa de cimento. Os gráficos ΔT -t deste Provete *Pan20141118* são apresentados na Figura 4.20. No início deste ensaio registou-se aproximadamente $T_{ext}=18,1^{\circ}\text{C}$. O ensaio à compressão foi efetuado 59 dias após a sua betonagem, tendo-se obtido $f_c=14,8$ MPa.

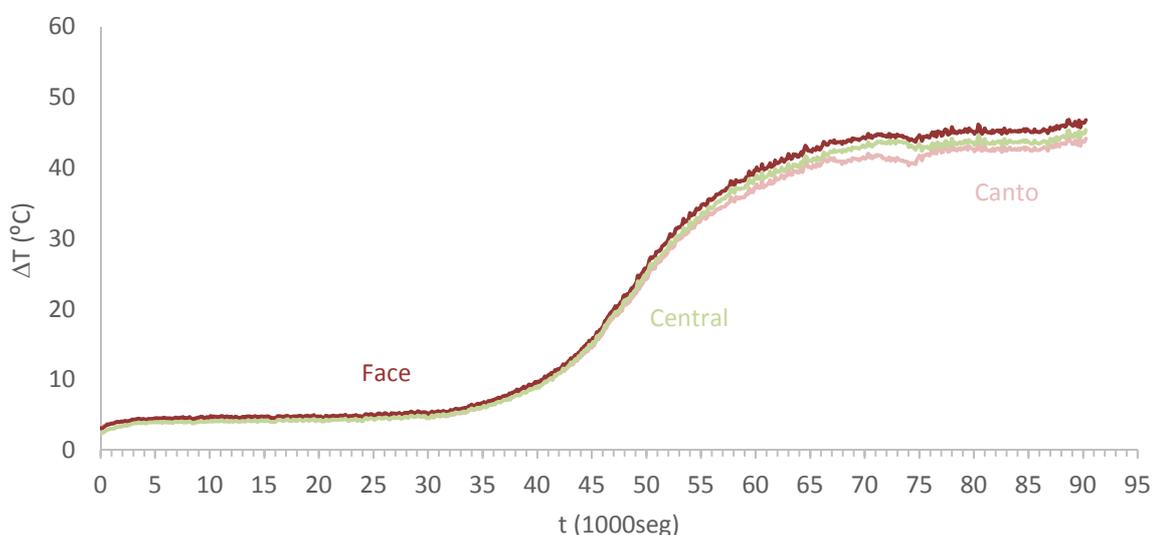


Figura 4.20 – Gráficos ΔT -t do Provete Pap20141118.

Neste caso, a temperatura é sensivelmente constante durante os primeiros 30000s. A fase de crescimento mais acentuado da temperatura ocorreu no intervalo [30000s-65000s]. Após 75000s (21h), a temperatura estabiliza. Constata-se também que os gráficos são coincidentes, até ao ponto de inflexão, por volta dos 47000s, ocorrendo ligeiras discrepâncias a partir daí. As oscilações verificadas por volta dos 74000s deveram-se a uma má programação do temporizador elétrico. Este ensaio teve uma duração global de aproximadamente 26 horas e a variação global da temperatura foi de $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$.

Na Figura 4.21 – Confortam-se os gráficos das temperaturas “Central” dos 2 Provetes anteriores.

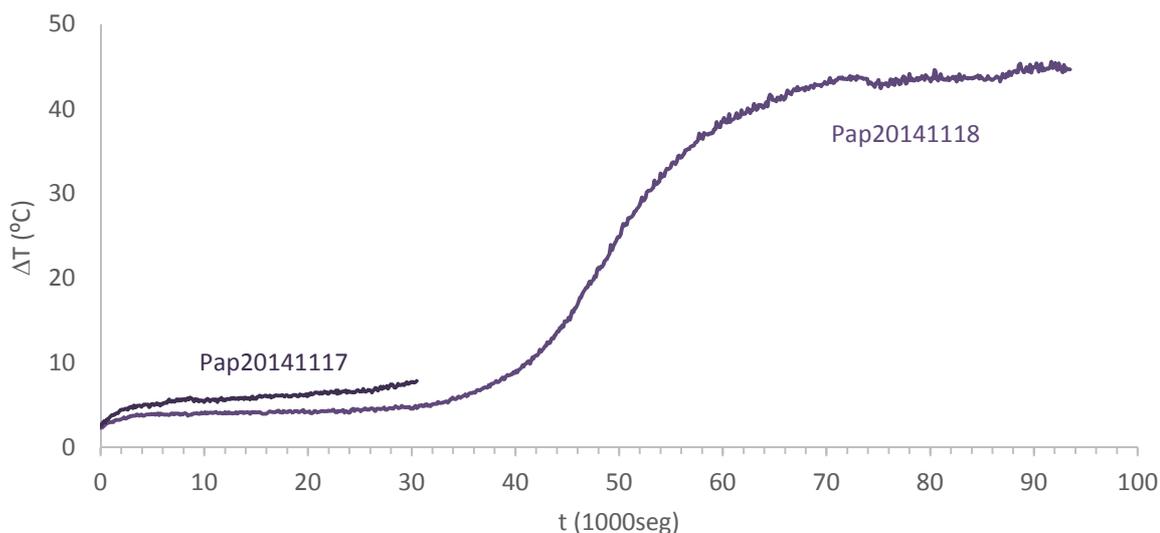
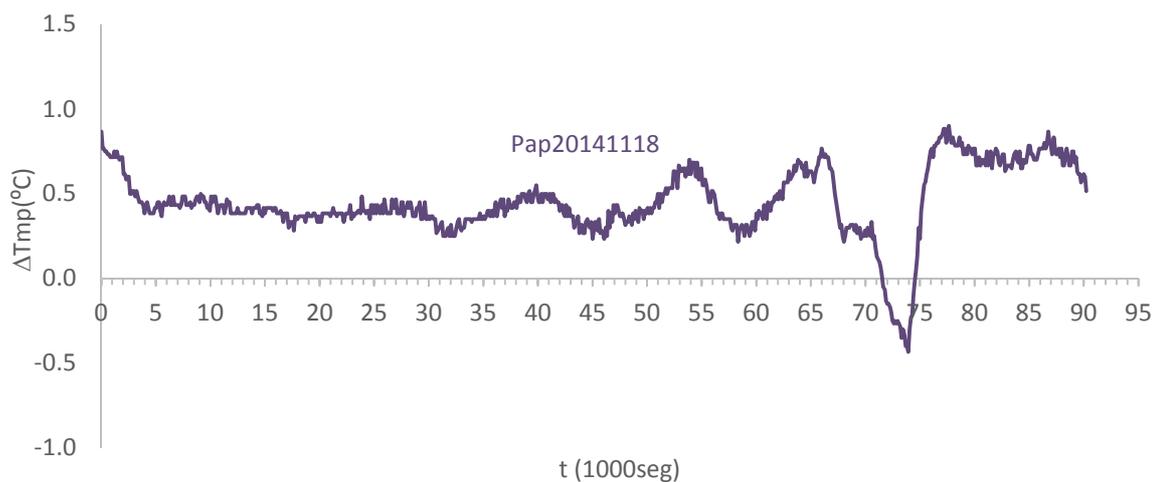
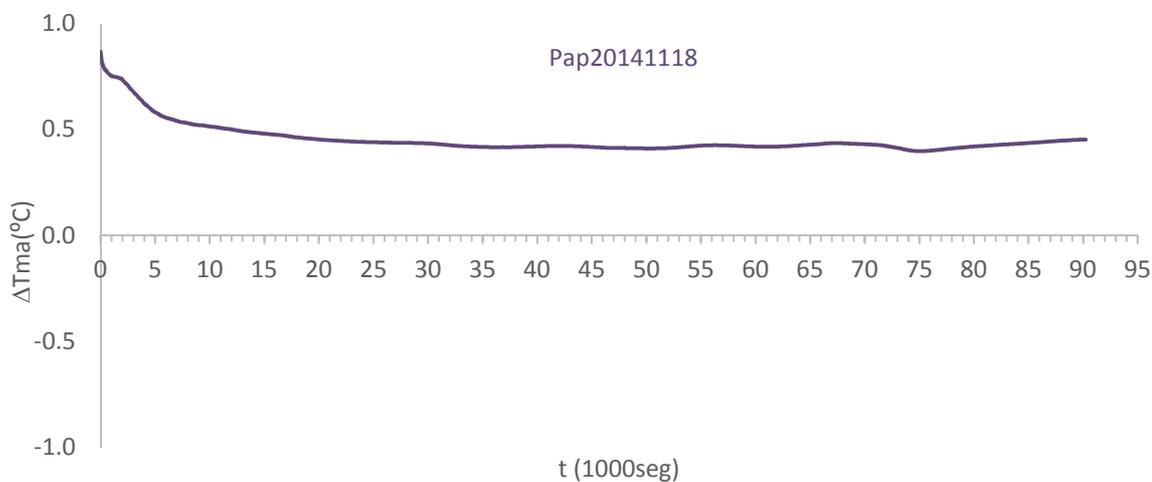


Figura 4.21 – Gráficos das temperaturas “Central” dos provetes de argamassa com plastificante.

Na Figura 4.22 apresenta-se a curva dos valores das diferenças ΔT_{mp} no decorrer do ensaio de argamassa com plastificante, e na Figura 4.23 encontra-se o gráfico temporal dos valores médios acumulados o ΔT_{ma} . Na primeira figura é perceptível a oscilação referida atrás. O valor quase constante de $0,5^{\circ}\text{C}$ deveu-se ao facto de se ter estado sempre à espera que a temperatura subisse mais do que efetivamente subiu. De recordar o delay entre a temperatura na estufa e a do molde, cerca de 15min, que obriga a ter a estufa preparada para a temperatura que existirá no provete. Quando essa temperatura não é conhecida os desvios sucedem-se. Contudo, após $74000s$, $\Delta T_{mp}=\Delta T_{ma}=0,5^{\circ}\text{C}$, não sendo o desejado, pode garantir-se que o ensaio foi conduzido de forma quase adiabática.

Figura 4.22 – Gráfico ΔT_{mp} - t do Provete Pap20141118.Figura 4.23 – Gráfico ΔT_{ma} - t do Provete Pap20141118

Confrontam-se, na Figura 4.24, os gráficos ΔT - t dos 3 provetes de argamassa normal com o gráfico ΔT - t do provete de argamassa com plastificante, provete *Pap20141118*. Nesta figura

verifica-se que efetivamente o plastificante retardou a libertação de calor nas reações de hidratação da argamassa; iniciou-se quase 7 h depois. E quando o fez, fê-lo a velocidade inferior, ou seja, num intervalo maior. E também o fez numa quantidade globalmente inferior; 62°C para os Provetes Pan, 46°C no Provete Pap.

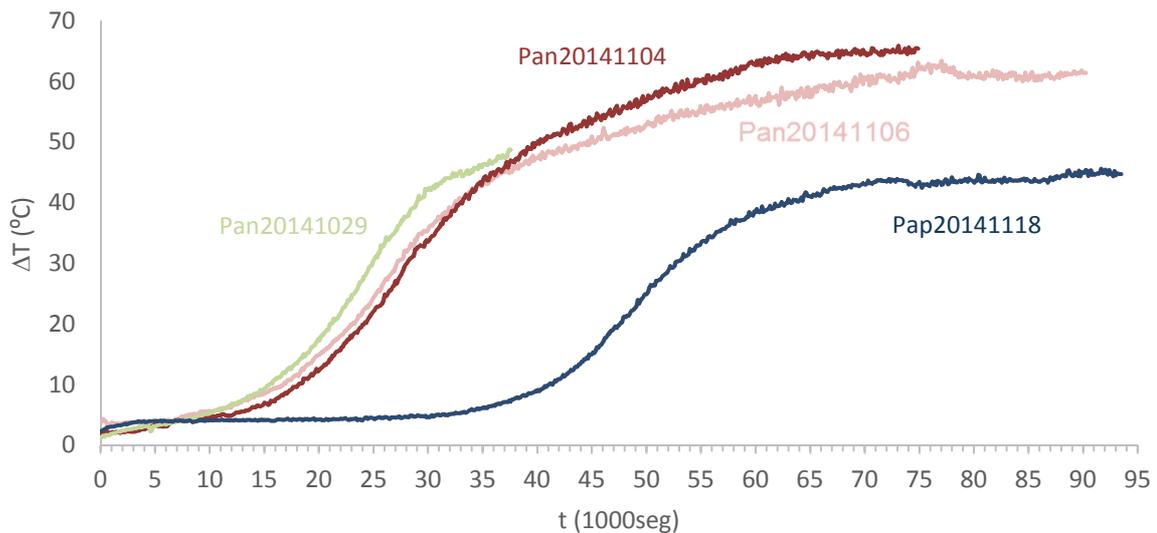
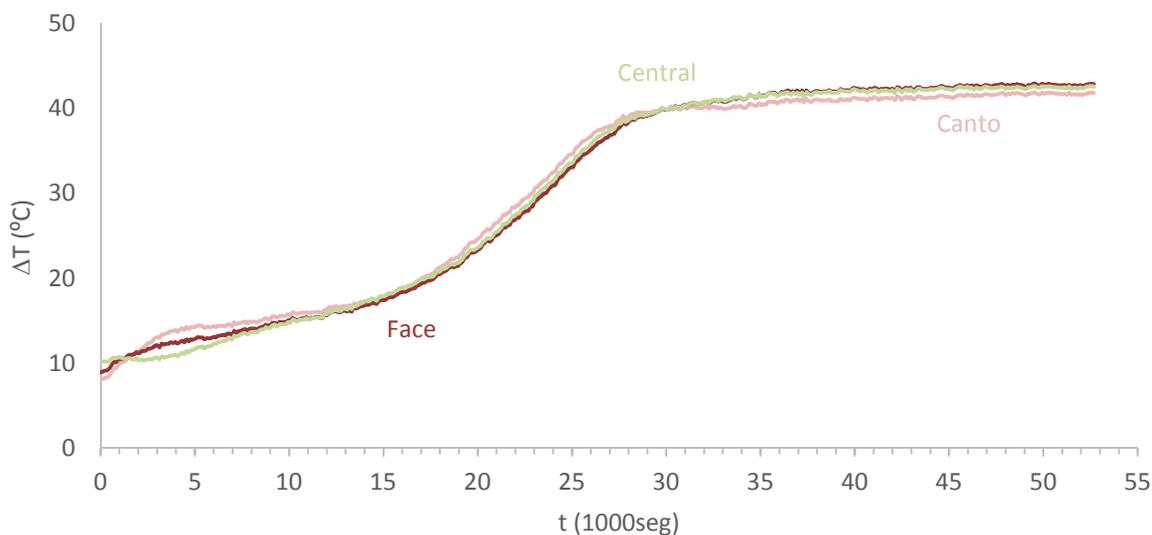


Figura 4.24 – Gráficos ΔT - t dos provetes de argamassa normal e com plastificante.

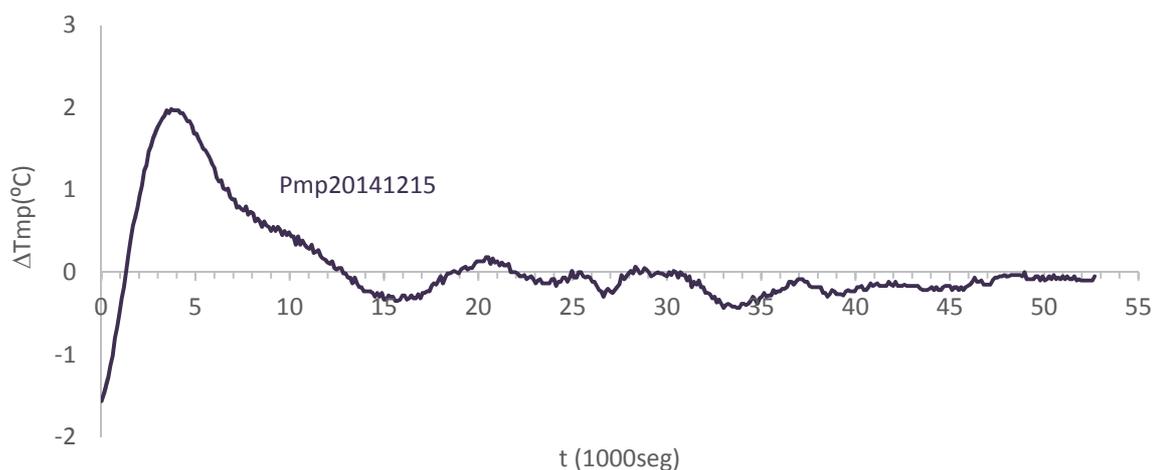
4.4 Metacaulino com plastificante

Importa recordar que uma das ideias iniciais do presente trabalho consistiu em conseguir-se controlar a temperatura nas misturas dos geopolímeros com metacaulino. Assim, o Provete de metacaulino com plastificante *Pmp20141215*, foi realizado e ensaiado no dia 15 de Dezembro de 2014, quando $T_{ext} = 14,5^{\circ}\text{C}$. No ensaio à compressão obteve-se $f_m = 12,7$ MPa. Salientando-se que as faces do provete evidenciavam algumas deformações inaceitáveis, este valor não deixa de ter que ser investigado no futuro.

Na Figura 4.25 apresentam-se os gráficos ΔT - t relativos ao Provete *Pmp20141215*, onde se comprova a adequação do presente ensaio adiabático. Relativamente aos provetes anteriores de metacaulino, é de salientar a temperatura inicial, que é da mesma ordem de grandeza, e a maior lentidão a que se deu a libertação de calor. A temperatura máxima agora atingida foi de 42°C.

Figura 4.25 – Gráficos ΔT - t do Provete Pmp20141215.

Na Figura 4.26 apresenta-se a curva dos valores das diferenças ΔT_{mp} , a qual confirma a percepção acerca da adequação do ensaio, apesar das oscilações iniciais. Na Figura 4.27 apresenta-se o gráfico temporal dos valores médios acumulados ΔT_{ma} , que confirma as ideias anteriores. O resultado final permite concluir que o ensaio foi conduzido de forma adiabática.

Figura 4.26 – Gráfico ΔT_{mp} - t do Provete Pmp20141215.

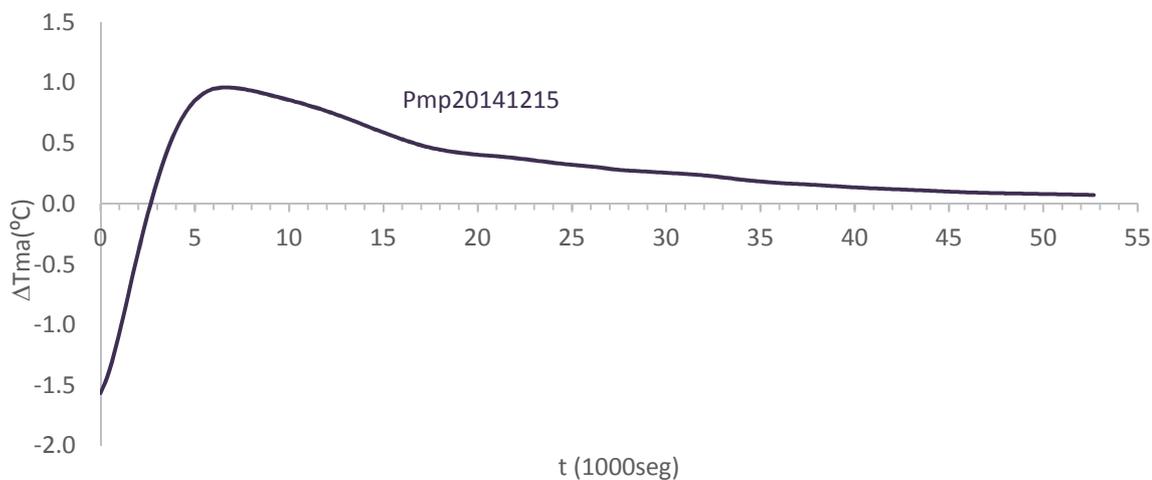


Figura 4.27 – Gráfico ΔT_{ma-t} do Provete Pmp20141215.

Na Figura 4.28 confrontam-se os gráficos $\Delta T-t$ dos 2 provetes anteriores de metacaulino com o do Provete de metacaulino com plastificante, *Pmp20141215*. Comprova-se nesta figura que o plastificante retardou efetivamente a libertação de calor do metacaulino, e fê-lo a uma velocidade muito inferior. Ao contrário dos provetes de argamassa, nos provetes de metacaulino constata-se que no final de cada ensaio, os valores máximos de ΔT dos provetes são muito semelhantes. Neste caso, a única vantagem na utilização do plastificante no geopolímero de metacaulino, tem a haver apenas com o aumento do intervalo de tempo de libertação do calor.

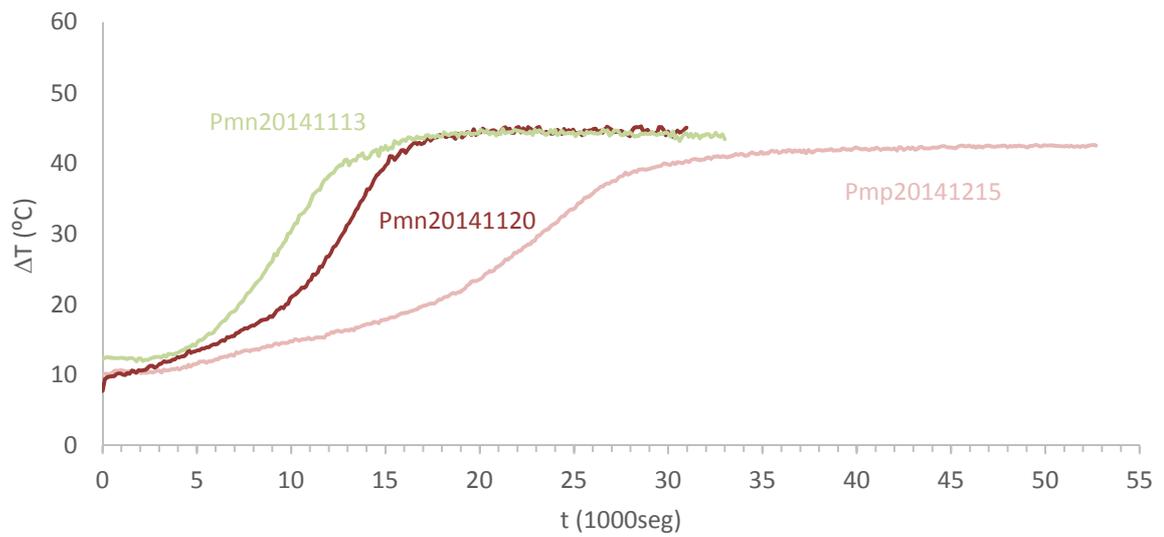


Figura 4.28 – Gráficos ΔT - t dos provetes de metacaulino normal e com plastificante.

5 ABAQUS

Pretende-se neste capítulo simular a evolução da temperatura num molde vazio, quando colocado dentro de uma estufa, utilizando para o efeito um software de elementos finitos; o ABAQUS.

Muitas vezes na engenharia é necessário conhecer o comportamento dos materiais e dos equipamentos, utilizando-se para o efeito ferramentas de modelação específicas para simular vários atributos. Este software ABAQUS, de carácter bastante geral e de grande aplicabilidade na engenharia, consiste em duas partes: a gráfica (ABAQUS/CAE e ABAQUS/Viewer) e o solver (ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit). O programa ABAQUS é um pacote de software comercial para análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), comercializado pela SIMULIA, marca de Dassault Systemes S.A.

O MEF corresponde a um procedimento aproximado que pode ser aplicado a uma estrutura aleatória, quer ao nível da forma, quer do tipo de carregamento, o qual permite estimar a resposta, dentro de uma precisão aceitável para um problema de engenharia. É uma metodologia numérica, semelhante a tantos outros, por exemplo as diferenças finitas, ou o método dos volumes finitos, mas diferente dos Métodos Analíticos Clássicos.

Neste trabalho, o Abaqus foi utilizado para resolver um dos tipos de problemas de transferência de calor: Análise de transferência de calor desacoplado. Neste tipo de análise, de problemas de transferência de calor envolvendo condução, convecção forçada e radiação limite, o campo temperatura é calculada sem o conhecimento do estado de tensão / deformação ou o campo eléctrico nos corpos que estão a ser analisados. Os problemas de transferência de calor podem ser modelados em estado estacionário, ou em estado transiente linear ou não linear (Abaqus Analysis User`s Manual - Version (6.11)).

5.1 Exemplo 1

Neste exemplo de transferência de calor, define-se a temperatura em dois lados de um quadrado, e pretende-se conhecer a distribuição interior da temperatura. Sendo uma simulação para tempo infinito, utilizou-se o estado Steady-State, isto é, um estado estacionário.

A geometria do exemplo consiste num quadrado exterior com 1m de lado, simulando a estufa utilizada no trabalho laboratorial. No centro, existe um molde de madeira afastado de 0,38m da fronteira. O molde de madeira tem 0,2m x 0,2m livres no interior, e a madeira uma espessura de 0,02 m.

Considerou-se ainda que a condutividade do Ar é de $2,3 \times 10^{-5} \text{ W/mm/}^\circ\text{C}$ e a condutividade da madeira de $1,7 \times 10^{-4} \text{ W/mm/}^\circ\text{C}$. Relativamente às condições de fronteira, impôs-se que na face esquerda a temperatura fosse 50°C , e na face oposta 20°C , tal como se indica na Figura 5.1. Na

Figura 5.2 é indicado o esperado campo de temperaturas, correspondente a uma variação uniforme de temperaturas entre as duas faces com temperatura prescrita.

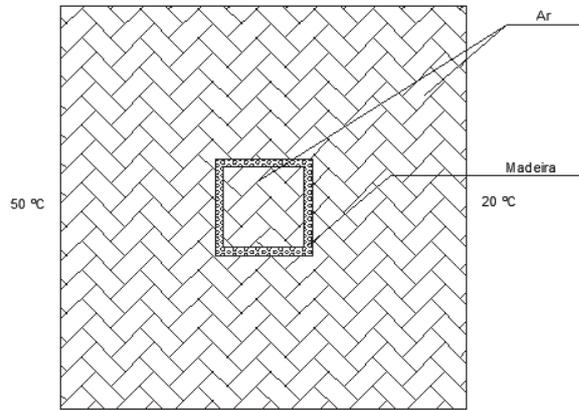


Figura 5.1 – Modelo do exemplo 1.

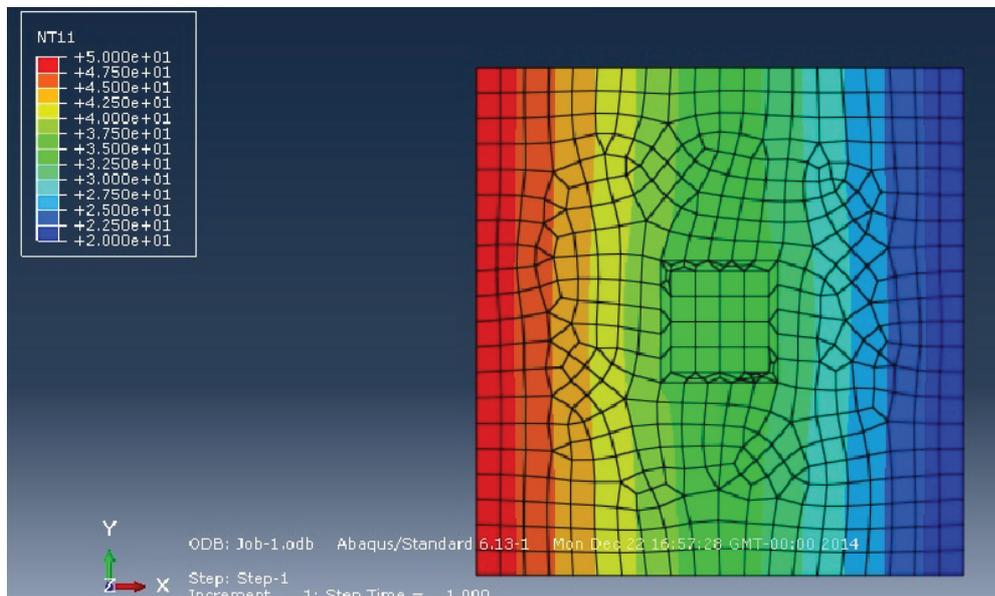


Figura 5.2 – Campo de temperaturas do Exemplo 1.

5.2 Exemplo 2

No Exemplo 2, efetuou-se um tipo de análise semelhante ao anterior, impondo agora a temperatura na fronteira externa (50°C) e no molde (10°C), tal como é demonstrado na Figura 5.3. O campo de valores finais da temperatura é o indicado na Figura 5.4.

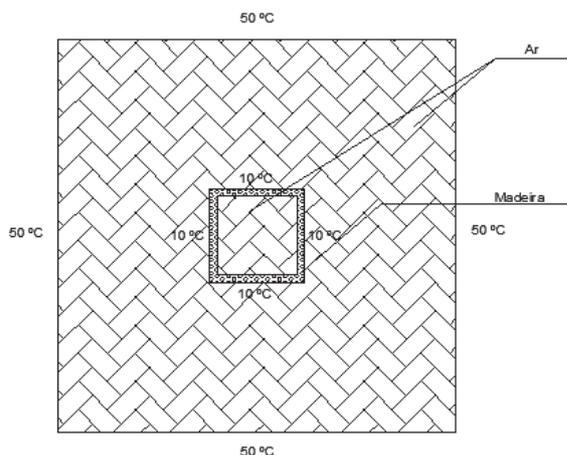


Figura 5.3 – Modelo do Exemplo 2.

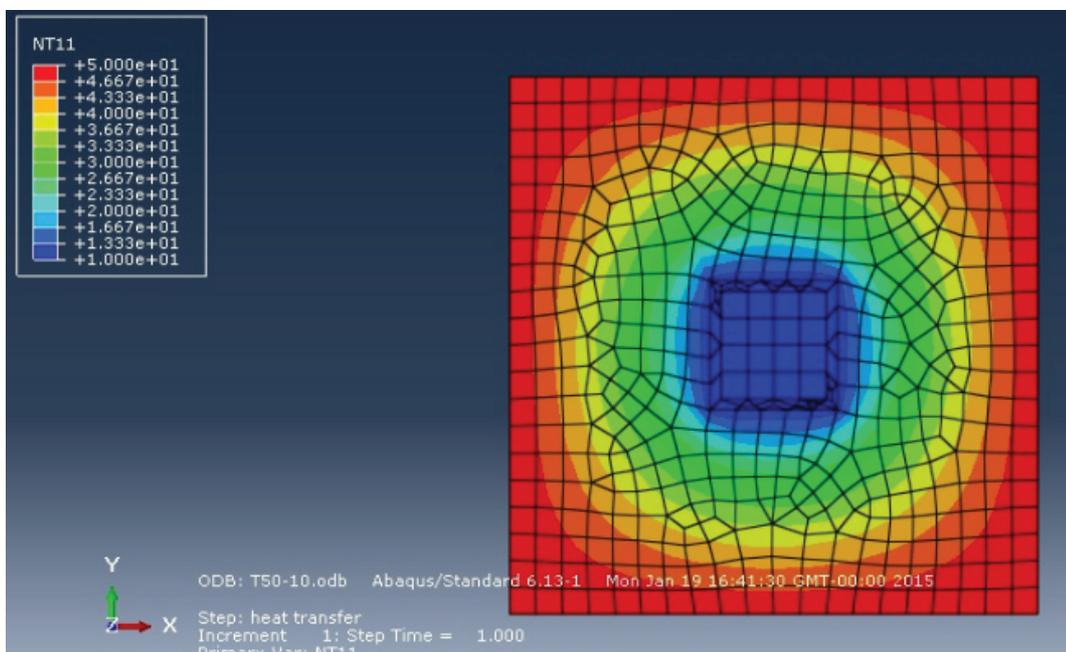


Figura 5.4 – Campo de temperaturas do Exemplo 2.

5.3 Exemplo 3

Neste ponto pretende-se simular um exemplo, semelhante ao realizado na estufa, no qual, depois de aquecer uma das superfícies, se pretendia conhecer a evolução da temperatura no domínio especificado, nomeadamente no interior do molde.

Na Figura 5.5 apresenta-se o Exemplo 3, análogo aos anteriores, diferindo apenas na história do registo, quer na definição da temperatura imposta na fronteira, quer na evolução no restante domínio. Esta análise é designada por estado transiente. A temperatura imposta na linha da fronteira à esquerda pode ser consultada na Figura 5.6 (ponto 1).

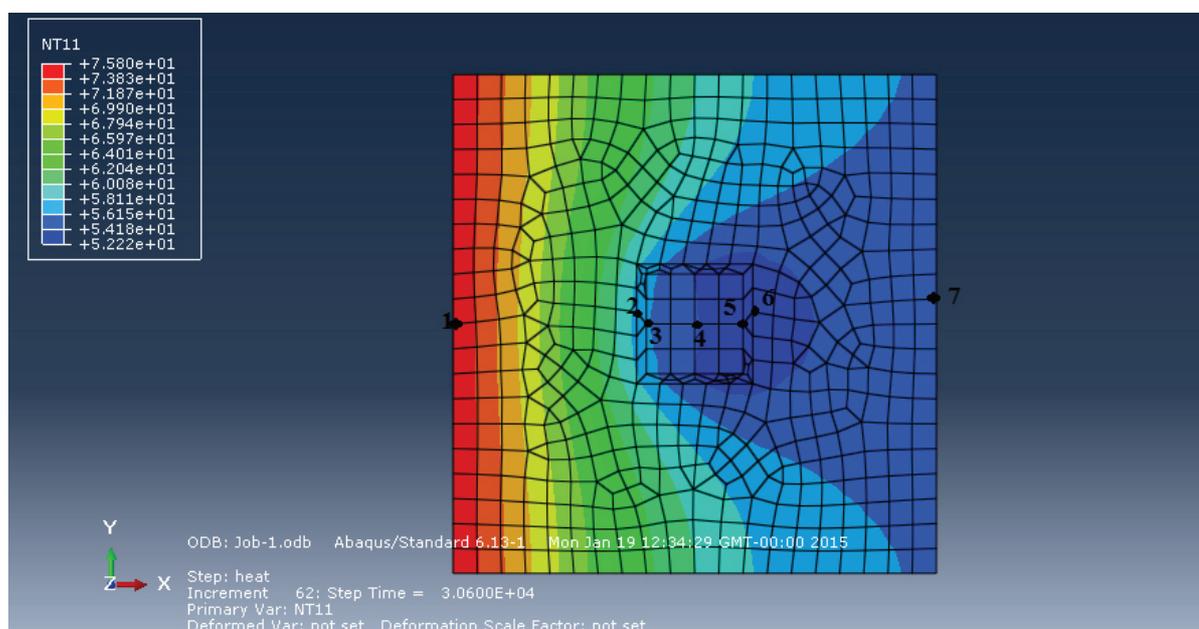


Figura 5.5 – Campo de temperaturas do Exemplo 3, no instante final.

Para esta simulação, para além da condutividade do ar e da condutividade da madeira, tal como nos exemplos 1 e 2, também foi necessário introduzir outras propriedades do ar e da madeira, como a densidade e o calor específico. Assumiu-se então para o ar uma densidade de $1,2 \times 10^{-6}$ g/mm³, um calor específico de 0,24 cal/g°C e uma condutividade térmica de $2,3 \times 10^{-5}$ W/mm°C. Para a madeira, assumiu-se uma densidade de $0,7 \times 10^{-3}$ g/mm³, um calor específico de 0,42 cal/g°C e uma condutividade térmica de $1,7 \times 10^{-4}$ W/mm°C.

A temperatura foi incrementada em toda a face que inclui o ponto 1 e o modo de transmissão de calor executado baseou-se no fenómeno da radiação. Os pontos 1 (P.1) a 7 (P.7), indicados

na Figura 5.5, foram estrategicamente posicionados de modo a analisar a evolução da temperatura no domínio considerado. Assim, numa linha horizontal, foi estabelecido um ponto em cada fronteira: dois nos extremos da estufa, dois na parte exterior do molde, dois na parte interior do molde e um no centro do molde.

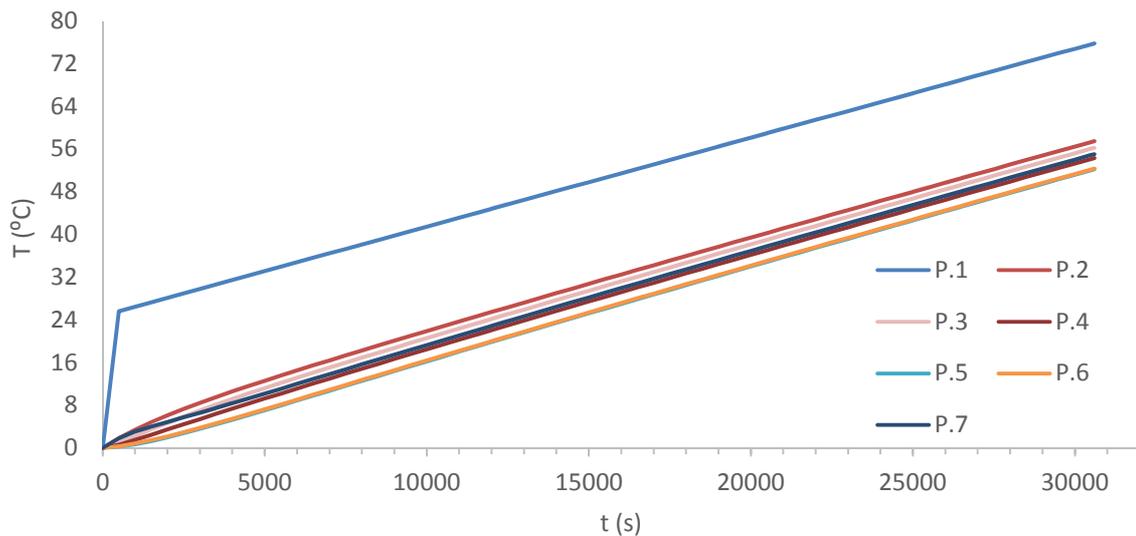


Figura 5.6 – Evolução das temperaturas nos pontos do Exemplo 3.

Na Figura 5.6 apresenta-se os gráficos das evoluções das temperaturas ao longo do tempo dos pontos 1 a 7 do exemplo 3. A duração desta simulação foi de 30600s, cerca de 8,5 horas, tendo o ponto 1 atingindo 75,8°C. No instante 120s a sua temperatura é de 20°C e no instante 240s é de 25°C, tendo em cada 120s um acréscimo de 0,2°C, até ao final da simulação. Como se pode também verificar, a diferença de temperatura entre o ponto 1 e os restantes pontos é de cerca de 20°C a 25°C, no intervalo [240s – 30600s], a qual permanece sensivelmente constante. Excetuando alguma perturbação inicial, a temperatura nos restantes pontos tem um crescimento aproximadamente linear.

Contudo, por limitação de tempo não se chegou a comparar as curvas do gráfico retirado da simulação do Abaqus com as curvas dos gráficos obtidos nos ensaios laboratoriais. Será um próximo passo nesta investigação.

6 CONCLUSÕES

O principal objetivo desta dissertação consistiu em estudar a evolução das temperaturas atingidas em ligantes hidráulicos ou em materiais ativados alcalinamente, no sentido de amenizar os problemas que podem ser originados pelos diferenciais de temperatura na fase inicial da cura do material. Para tal simulou-se o problema, em ensaio adiabático, de modo a poder conhecer-se as características térmicas das reações de hidratação do cimento e das reações desenvolvidas na ativação alcalina.

Apresentam-se de seguida as principais conclusões retiradas do trabalho.

Nas misturas de argamassa normal, nos primeiros 10000s, cerca de 2,7 horas, existe um crescimento de temperatura quase insignificante, sendo a variação da temperatura inferior a 5 °C. A fase de crescimento mais acentuado ocorreu no intervalo [12000s-37000s] (\approx [3,3h-10,3h]). Após os esse intervalo o crescimento da temperatura é mais lento, até tender para um valor constante, passados sensivelmente 18 horas (\approx 35000s) após o início do ensaio. No conjunto, a variação máxima de temperatura foi de 62°C.

Na mistura de argamassa com plastificante, constatou-se que a temperatura é sensivelmente constante nos primeiros 30000s (\approx 8,3h), ocorrendo a fase de maior crescimento da temperatura no intervalo [30000s-65000s] (\approx [8,3h-18,1h]), a qual estabiliza após 21 horas. No conjunto, a variação máxima de temperatura foi de 50°C.

Nas misturas de metacaulino normal, a variação de temperatura, logo no instante inicial, é cerca de 10°C.

Nos primeiros 3000s, cerca de 0,83h a sua temperatura pouco cresce, sendo a variação de temperatura de 10°C. A fase de crescimento mais acentuado da temperatura decorre no intervalo [6000s-14000s] (\approx [1,67h-3,89h]). Após os 15000s, cerca de 4,2 horas, a temperatura permanece sensivelmente constante. No conjunto, a variação máxima de temperatura foi de 43°C.

Nas misturas de metacaulino com plastificante a temperatura é sensivelmente constante nos primeiros 15000s (\approx 4,17h) com uma variação de cerca de 10°C. O intervalo de maior crescimento da temperatura foi [15000s-30000s] (\approx [4,17h-8,3h]). A temperatura máxima foi atingida ao fim de 8,3 horas com uma variação global de temperatura de 42°C.

Pode concluir-se que o valor máximo da variação de temperatura é maior nas misturas de argamassa do que nas misturas de metacaulino. Por outro lado, a fase de crescimento mais acentuado da temperatura ocorre mais cedo nas misturas de metacaulino, do que nas misturas de argamassa.

Como se constata, tanto nas misturas de argamassa, como nas misturas de metacaulino, ambas com plastificante, a presa de ambos foi retardada, tendo sido aumentado o intervalo de tempo inicial em que as temperaturas eram sensivelmente constantes.

Por outro lado, também é visível que as variações máximas das temperaturas são menores nas misturas de argamassa com plastificante. Nas misturas de metacaulino, o aditivo não altera globalmente estes valores.

6.1 Trabalhos Futuros

Este trabalho constitui um trabalho exploratório, em que foi evoluindo à medida que as dificuldades e os contratempos iam sendo ultrapassados. De facto, olhando agora para trás, verifica-se que foram surgindo alguns aspetos que ficaram por resolver e outros que poderiam ter sido abordados de outra forma.

Aponta-se assim alguns temas para trabalhos futuros tais como:

- Avaliar a influência que a temperatura de cura exerce nas propriedades resistentes do betão, principalmente incluindo ou não o adjuvante. Neste trabalho, os valores atingidos carecem de rigor, pelo facto de os provetes não terem as faces retilíneas. De facto, os moldes sofreram algumas deformações por serem feitos de aglomerado de madeira, os quais estiveram sob a influência da água dos provetes;

- Continuar o estudo teórico de análise da capacidade calorífica do betão e do metacaulino, através do programa de elementos finitos Abaqus; comparando resultados numéricos com experimentais e aprofundando o estudo com uma utilização mais exaustiva do modelo numérico;

- Melhorar o “conhecimento” sobre a resposta real da estufa, para um melhor ajuste dos ciclos de aquecimento dos mesmos;

- Controlar o ambiente exterior à estufa;

- Realizar um estudo mais exaustivo sobre a utilização/proporção do adjuvante nas misturas tanto de argamassa como de metacaulino.

Bibliografia

Gibbon, G.J., Ballim, Y., Grieve G.R.H. (1997). “A low-cost, computer-controlled adiabatic calorimeter for determining the heat of hydration of concrete”.
ASTM J Test Evaluar 1997; 25(2):261-6

Odler, I. (1998). “Hydration, setting and hardening of Portland cement”.
Lea’s chemistry of cement and concrete, Arnold, London, UK, 241-297

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (1999). “Concrete : Microstructure, properties and materials”.
Indian Concrete Institute Reprint, 101, Indian edition

Neville, A.M. (2002). “Properties of concrete”.
Fourth and Final Edition, Standards updated to 2002, 37-40, 75

Pinto, A.T., (2002) “Novos sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina – Geopolimerização,
Construção Magazine (3); 16-22

Ballim, Y., Graham, P.C. (2003). “A Maturity Approach to the Rate of Heat Evolution in Concrete”.
Magazine of Concrete Research vol. 55, No. 3, June 2003. 249-256

Pinto, A.T. (2004). “ Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino”.
Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, 21-26, 194-198

Ballim, Y., Graham, P.C (2004). “Early-age heat evolution of clinker cements in relation to microstructure and composition : implications for temperature development in large concrete elements”.
Cement & Concrete Composites 26 (2004) (417-426)

Pinto, A.T. (2006). “Introdução ao estudo dos Geopolímeros”.
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (2006)

NP EN 196-1. (2006). “Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1 : Determinação das resistências mecânicas.
IPQ

Bastos, P.S.S. (2006). “Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado”

Universidade Estadual Paulista (2006)

NP EN 206-1. (2007). “Betão parte 1 : Especificação, desempenho, produção e conformidade”.
IPQ

Coimbra, C. (2008). “Desenvolvimento de argamassas expansivas”.
(Tese de Mestrado). Universidade de Coimbra

Fracalossi, R.A.R. (2011). “Aditivos à base de Policarboxilatos : Influência nos tempos de pega e na manutenção do abatimento em pastas de cimento Portland”.
Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Tydlitát, V., Zákoutský, J., Schmieder, M., Cerny, R. (2012). “Application of large-volume calorimetry for monitoring the early-stage hydration heat development in cement-based composites as a function of w/c”.
Thermochimica Acta 546 (2012) 44-48

Zákoutský, J., Tydlitát, V., Cerny, R. (2012). “Effect of temperature on the early-stage hydration characteristic of Portland cement : A large-volume calorimetric study”.
Construction and Building Materials 36 (2012) 969-976

Cerny, R., Tydlitát, V., Zákoutský, J., Volfová, P., (2012). “Hydration heat development in blended cements containing fine-ground ceramics”.
Thermochimica Acta 543 (2012) 125-129

Pofale, A.D, Tayade, K.C., Deshpande, N.V (2013). “Calorimetric Studies on Heat Evolution and Temperature rise due to Hydration of Cementitious Materials in Concrete using Semi-Adiabatic Calorimeter”
International Journal of Application of Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)

Martinelli, E., Koenders, E.A.B., Caggiano, A. (2013). “A numerical recipe for modelling hydration and heat flow in hardening concrete”.
Cement & Concrete Composites 40 (2013) 48-58

Tayade, K.C, Deshpande, N.V, Pofale, A.D. (2014). “Experimental study of temperature rise of concrete and assessment of cracking due to internal restraint”.
International Journal of Civil and Structural Engineering, Volume 4, No3,2014

Guerra, F. (2014). “Avaliação experimental do comportamento mecânico de materiais ativados alcalinamente”.

(Tese de Mestrado) Departamento Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (2014)

Ribeiro, J. (2014). “Resistência de vigas construídas com Geopolímeros”

(Tese de Mestrado) Departamento Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (2014)

Gonçalves, A. (2014). “Fendilhação em vigas construídas com geopolímeros”

(Tese de Mestrado) Departamento Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (2014)

Carreira, N. (2015). “Deformação em vigas construídas com geopolímeros”

(Tese de Mestrado) Departamento Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (2015)

CONCRETE RESEARCH PORTAL@ (2016), <http://www.theconcreteportal.com/intro.html>

Appleton J.@ (2016), <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/ConstrucoesEmBetao.pdf>

ECOCASA@ (2016), http://www.ecocasa.pt/userfiles/file/BETAO_ARMADO.pdf

BETÃO ECOLOGICO DE GEOPOLIMERO@ (2016), <http://www.engenhariaportugal.com/betao-ecologico-de-geopolimeros>

Abaqus Analysis User`s Manual - Version (6.11).