

Validação experimental dos novos valores de ΔT_e propostos para o RCCTE

Bragança, L*, E. Maldonado[†]

*Escola de Engenharia da Universidade do Minho
Dep^{to} de Engenharia Civil - Tel 351 53 510200, Fax 351 53 510217
Azurém, 4800 GUIMARÃES, PORTUGAL

[†]Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Dep^{to} de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial - Tel 351 2 2007455, Fax 351 2 312476
R. dos Bragas, 4099 PORTO CODEX, PORTUGAL

RESUMO

Os valores das Diferenças Efectivas de Temperatura (ΔT_e) usados no RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) e no cálculo das cargas térmicas provenientes da envolvente opaca, são derivados dos publicados em metodologias estrangeiras, os quais foram calculados para elementos com características construtivas distintas das correntemente usadas em Portugal.

Através da comparação entre as cargas térmicas de arrefecimento medidas em edifícios reais e as cargas térmicas calculadas pelo método CLTD/CLF, com recurso aos valores de ΔT_e até agora disponíveis, mostra-se que esta metodologia de cálculo não consegue representar de forma suficientemente precisa o comportamento térmico das paredes e das coberturas típicas portuguesas. Recentemente foram propostos pelos autores novos valores de ΔT_e mais adequados aos elementos construtivos correntemente usados em Portugal, que, como se mostra por comparação com valores experimentais, permitem uma melhor previsão do comportamento térmico de edifícios, um dimensionamento mais preciso de sistemas de climatização, e uma adequação dos correspondentes valores adoptados na regulamentação térmica de edifícios e de sistemas.

1. - INTRODUÇÃO

Num artigo anterior [1] foram propostos, para adopção pelo RCCTE [2], novos valores de ΔT_e adequados a paredes e coberturas típicas portuguesas, apresentando-se agora a sua validação experimental.

Esses valores tiveram por base de cálculo um estudo aprofundado [3] onde, além de ter sido realizado o levantamento das tipologias construtivas mais comuns em Portugal, foi estudada, para a estação de arrefecimento, a conjugação da transmissão de calor através dos diversos elementos construtivos com a inércia térmica dos espaços, tendo resultado novos valores instantâneos de ΔT_e (também designados por CLTD's na literatura americana [4]) e CLF que permitem calcular de forma mais precisa as cargas térmicas de arrefecimento em edifícios com características construtivas semelhantes às construções portuguesas.

Para comprovar experimentalmente a validade dos valores propostos, serão apresentados alguns exemplos de aplicação destes valores ao cálculo das cargas térmicas,

sendo os resultados obtidos comparados com as cargas térmicas de arrefecimento medidas experimentalmente. Os valores medidos são também comparados com os que se obtêm através da utilização da metodologia de cálculo tradicional [4], evidenciando-se dos resultados que existe uma melhoria significativa da precisão do cálculo de cargas térmicas se forem adoptados os novos valores propostos de ΔT_e .

2. - INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objectivo de se poderem validar experimentalmente os novos valores de ΔT_e propostos recorreu-se às células de teste existentes no Laboratório de Ensaio de Comportamento Térmico de Edifícios (LECTE) que a Faculdade de Engenharia do Porto construiu no "Campus" do INETI no Porto. Foram escolhidas duas células idênticas mas construídas com materiais diferentes e, por isso, com níveis de inércia térmica distintos, tendo, esta sido ainda modificada no decorrer das experiências para obter uma maior gama de valores experimentais. As células de teste foram cuidadosamente instrumentadas de modo a permitir obter valores medidos fiáveis. Por outro lado, cada célula de teste foi dotada de uma unidade de refrigeração, de modo a poder-se manter um regime termostaticado durante a estação quente. Durante as experiências, as células de teste estiveram sujeitas a factores climáticos reais (radiação solar e temperatura exterior), tendo sido medidos não só estes parâmetros como também a potência de refrigeração fornecida pelos equipamentos de climatização.

2.1. - DESCRIÇÃO DAS CÉLULAS DE TESTE

As células de teste estão orientadas a Sul e localizadas lado a lado, separadas por uma distância de 3 metros, como se pode ver na Figura 1.

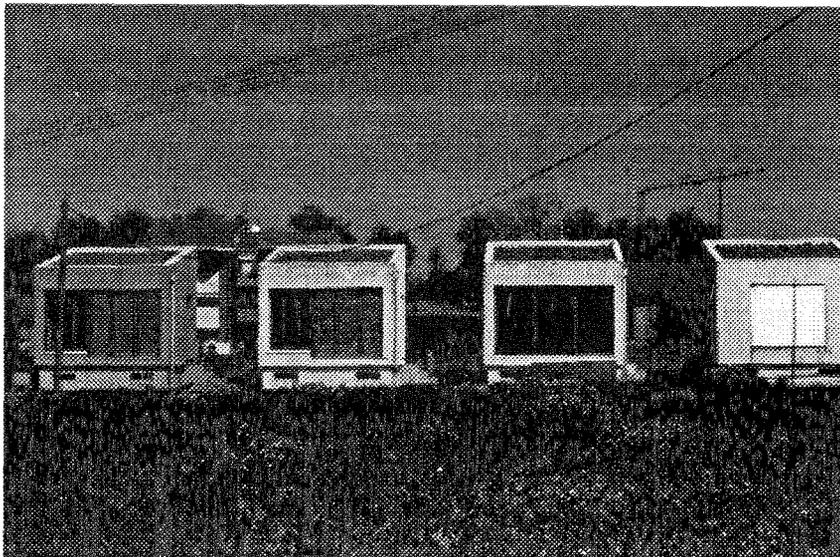


Figura 1 - Células de teste

Estas células de teste têm apenas um compartimento com as seguintes dimensões internas: 4,00 m de comprimento, 3,00 m de profundidade e 2,55 m de pé-direito. A cor da

superfície exterior de ambas as células de teste é creme. No interior, as paredes e tecto são amarelo claro e o pavimento é em cimento cinzento.

A única diferença entre as células de teste é o tipo de envolvente de cada uma: enquanto uma das células tem parede simples isolada pelo exterior, a outra tem uma parede dupla sem qualquer espécie de isolamento. A célula de teste isolada está representada esquematicamente nas Figura 2 a 4 e possui a seguinte estrutura:

- Paredes exteriores: blocos de betão com 20 cm de espessura recobertos pelo exterior com uma camada de 5 cm de poliestireno expandido. As superfícies exterior e interior estão rebocadas com argamassa com uma espessura de 0,5 cm.

- Pavimento: laje maciça de betão com a espessura de 20 cm, isolada pelo exterior com uma camada de 3 cm de poliestireno extrudido. Esta estrutura não contacta com o solo como se pode ver na Figura 4. A superfície interior está recoberta, para efeitos de regularização da superfície, com uma camada de argamassa de cimento de 1 cm.

- Cobertura: desvão ventilado em que a laje de esteira é aligeirada com blocos cerâmicos de 12 cm, possuindo uma camada de compressão em betão de 3 cm de espessura isolada superiormente com 3 cm de poliestireno extrudido. A superfície interior é revestida com reboco de 0,5 cm.

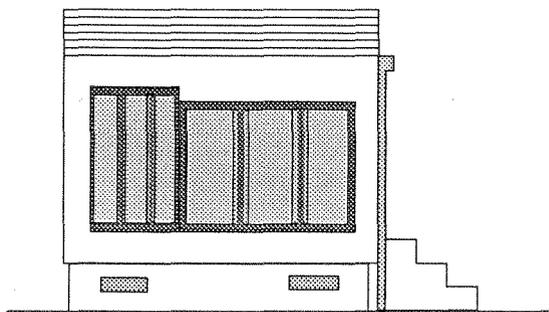


Figura 2 - Alçado da célula de teste isolada.

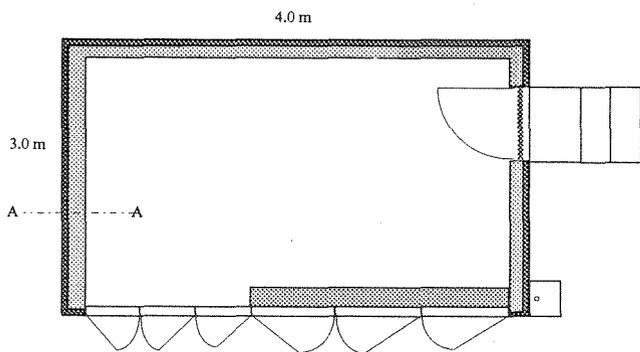


Figura 3 - Planta da célula de teste isolada.

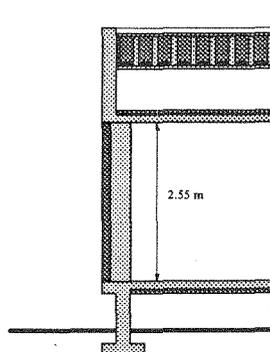


Figura 4 - Corte A-A da célula de teste isolada.

Nas Figuras 5 a 8 encontram-se esquemas detalhados dos pormenores construtivos da estrutura das paredes, cobertura, pavimento e porta da célula de teste isolada. A célula de teste não isolada possui a seguinte estrutura:

- Paredes exteriores: duplas de alvenaria de tijolo vazado, sendo a espessura do pano exterior de 15 cm e a do interior de 7 cm, com uma caixa de ar de 4 cm de espessura. As superfícies exterior e interior estão rebocadas com argamassa com uma espessura de 1 cm.
- Pavimento: laje aligeirada com blocos cerâmicos de 16 cm e uma camada de compressão de 4 cm, sem qualquer espécie de isolante térmico. A superfície interior é regularizada com uma camada de argamassa de cimento de 1 cm.
- Cobertura: desvão ventilado em que a laje de esteira é aligeirada com blocos cerâmicos de 12 cm, possuindo uma camada de compressão em betão de 3 cm de espessura. A superfície interior é revestida com reboco de 0,5 cm.

Nas Figuras 9 a 12 encontram-se esquemas detalhados dos pormenores construtivos da estrutura das paredes, cobertura pavimento e porta da célula de teste não isolada.

As propriedades térmicas dos materiais utilizados na construção das células de teste encontram-se na Tabela 1. Estas propriedades térmicas foram já utilizadas em diversos estudos anteriores dos mesmos materiais, tendo permitido sempre alcançar bons resultados [5, 6, 7 e 8].

Tabela 1 - Propriedades térmicas dos materiais das células de teste

Material	λ (W/m °K)	ρ (Kg/m ³)	c_p (J/Kg °K)
Betão	1,80	2100	1080
Tijolo	0,44	1100	936
Isolante	0,04	25	1000
Reboco	1,15	1800	837

Ambas as células de teste têm uma porta com 1,69 m² de área, localizada na superfície Este. O coeficiente de transferência de calor da porta é de 0,935 W/m² °K. Nas Figuras 8 e 12 mostram-se esquematicamente os detalhes destas portas. Em cada célula de teste existe uma janela localizada na fachada Sul. A janela é idêntica nas duas células de teste, possuindo uma área total de 2,68 m², e é constituída por três vidros duplos, cada qual com uma área de 0,6 m², montados numa caixilharia de madeira com aproximadamente 0,29 m² por cada vidro. O coeficiente de transferência de calor médio da janela é de 3,3 W/m² °K [8].

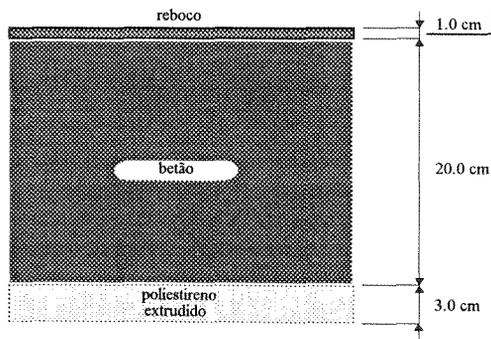
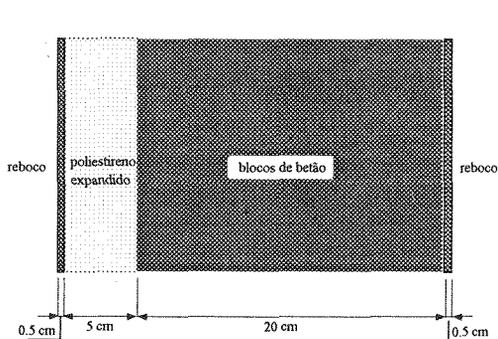


Figura 5 - Paredes da célula de teste isolada

Figura 6 - Pavimento da célula de teste isol.

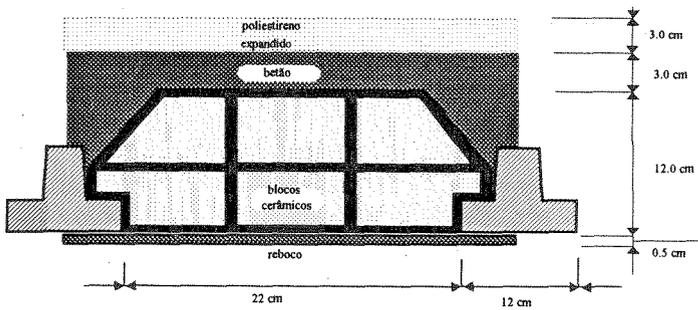


Figura 7 - Cobertura da célula de teste isolada

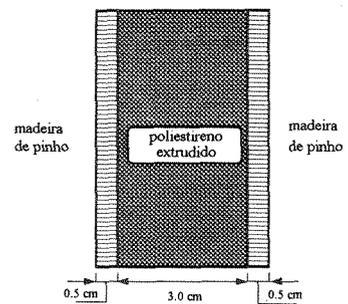


Figura 8 - Porta da célula de teste isolada

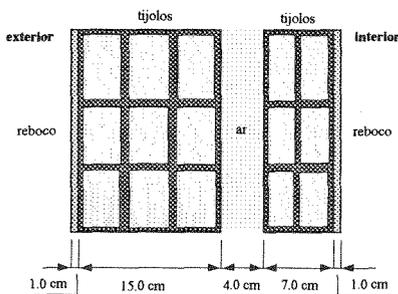


Figura 9 - Paredes da célula de teste não isolada

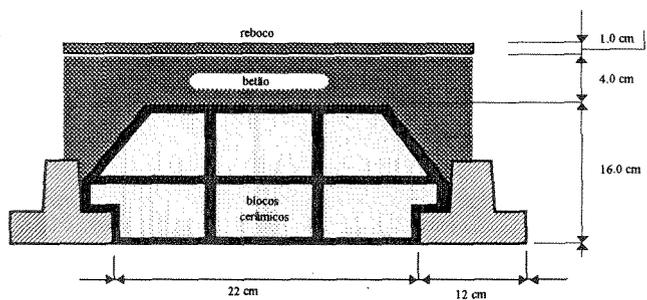


Figura 10 - Pavimento da célula de teste não isolada

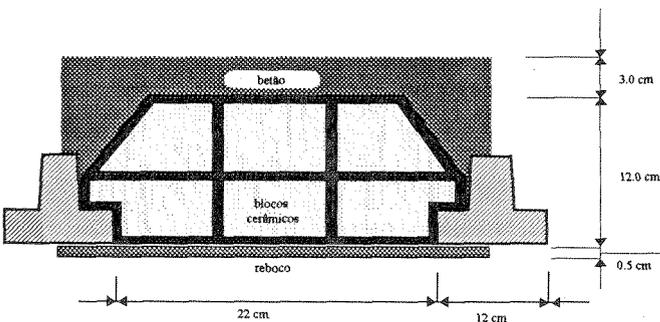


Figura 11 - Cobertura da célula de teste não isolada

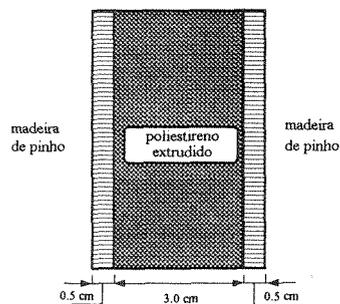


Figura 12 - Porta da células de teste não isolada

Existe também na fachada Sul de cada célula uma parede de Trombe possuindo uma área total de 5,36 m². A parede de Trombe é constituída por blocos de betão de 15 cm de espessura revestidos de ambos os lados com 2,5 cm de argamassa de cimento. O vão é preenchido por três vidros duplos, cada qual com uma área de 1,2 m², montados numa caixilharia de madeira com aproximadamente 0,59 m² por cada vidro. Estes vidros foram revestidos exteriormente com uma película de alumínio de forma a reduzir os ganhos através da parede de Trombe, os quais, após esta operação, passaram a ter a ordem de grandeza dos ganhos através de uma parede bem isolada ($K_{\text{médio}}=1,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$, [8]), conforme se pode ver na Figura 13. Esta representa o fluxo de calor na superfície interior desta parede, medido com

um fluxímetro de alta precisão montado a meio da sua superfície interior e pintado da mesma cor da parede de forma a evitar diferenças na radiao emitida pela parede e pelo fluxímetro.

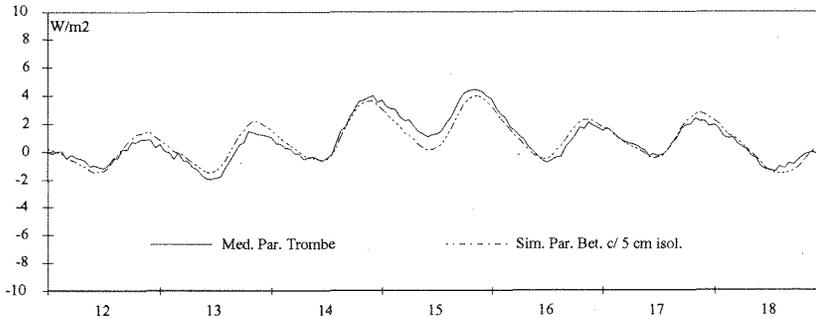


Figura 13 - Fluxo de calor na superfície interior da parede de Trombe

Com base nas propriedades térmicas dos materiais que constam da Tabela 1 e nas suas características geométricas, calcularam-se os coeficientes de transferência de calor e massas dos diversos elementos construtivos. Nas Tabelas 2 e 3 encontram-se, respectivamente para cada célula, os valores dos coeficientes de transferência de calor dos diversos elementos construtivos, as correspondentes áreas e massas úteis, segundo a definio do RCCTE [2].

Tabela 2 - Coeficientes de transferência de calor, áreas e massas úteis da célula isolada

Elemento	K (W/m ² °K)	rea (m ²)	Massa til (Kg)
Parede Norte	0,65	10,20	300
Parede Oeste	0,65	7,65	300
Parede Sul	0,65	3,16	300
Parede de Trombe	1,62	5,36	150
Envidraado	3,30	1,68	0
Parede Este	0,65	5,96	300
Porta	0,94	1,69	0
Pavimento	0,86	12,00	300
Cobertura	0,83	12,00	160

Tabela 3 - Coeficientes de transferência de calor, áreas e massas úteis da célula não-isolada

Elemento	K (W/m ² °K)	rea (m ²)	Massa (Kg)
Parede Norte	1,17	10,20	95
Parede Oeste	1,17	7,65	95
Parede Sul	1,17	3,16	95
Parede de Trombe	1,62	5,36	150
Envidraado	3,30	1,68	0
Parede Este	1,17	5,96	95
Porta	0,94	1,69	0
Pavimento	1,80	12,00	95
Cobertura	1,95	12,00	80

2.2. - RENOVAO DO AR NAS CÉLULAS DE TESTE

Em cada célula foram realizados diversos testes de infiltrao de ar de modo a determinar a permeabilidade da envolvente e a poder-se estimar com precisão a taxa média de

infiltração de ar. Para realizar os ensaios recorreu-se ao método dos gases traçadores, o qual consiste em injectar no edifício a ensaiar um gás de características conhecidas numa concentração bastante superior à sua concentração normal na atmosfera e seguidamente medir o decaimento da concentração desse gás ao longo do tempo.

Antes de se realizarem os ensaios procedeu-se à calafetação de todas as frinchas de modo a minimizar as trocas de calor devidas à infiltração de ar. O valor médio da taxa de renovação de ar por infiltração dentro de cada célula situa-se entre 0,25 e 0,30 rph, o que constitui um valor relativamente baixo.

Como os testes foram realizados sob diferentes condições de incidência e intensidade do vento conduzindo todos praticamente aos mesmos resultados, isto indica que o nível de infiltrações é praticamente independente da direcção e velocidade do vento, uma vez que as principais passagens para a infiltração de ar não dependem directa ou indirectamente da incidência do vento. Apresenta-se na Figura 14 para as duas células a variação típica com o tempo dos valores medidos da concentração e as correlações obtidas.

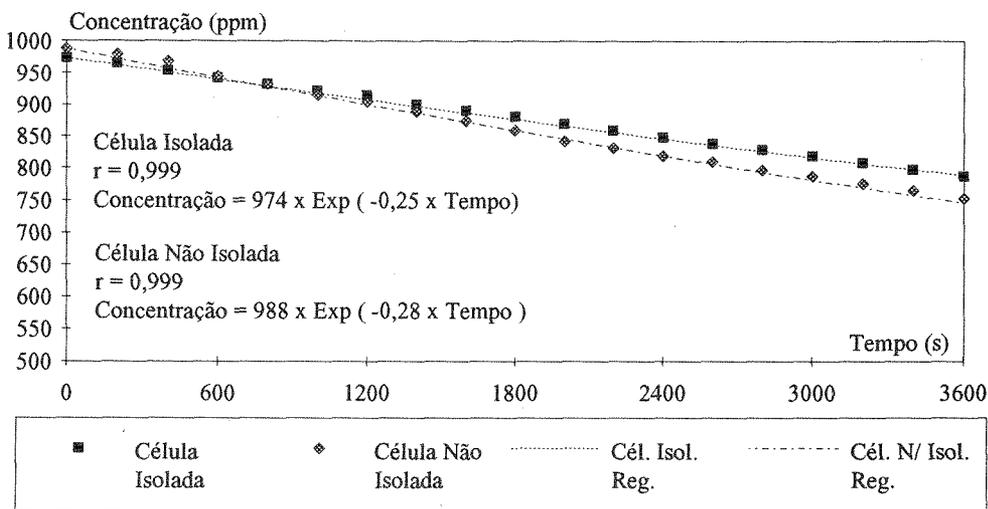


Figura 14 - Valores típicos medidos da concentração e as correlações obtidas.

2.3. - CONTROLO DA TEMPERATURA NAS CÉLULAS DE TESTE

Originalmente, as células de teste não possuíam meios para controlar a temperatura interior excepto dois pequenos aquecedores eléctricos usados para controlo termostático durante experiências anteriores levadas a cabo durante a estação fria. Como o objectivo desta experiência foi estudar as células durante o Verão, foi instalada uma unidade de refrigeração em cada célula de modo a também ser possível o controlo termostático durante a estação quente.

De modo a que o coeficiente de convecção no interior das células não sofresse grandes variações e de modo a manter os ganhos internos constantes no interior das células, durante os períodos em que foram feitas medições, o ventilador dos aparelhos de ar-condicionado foi sempre mantido em funcionamento, quer a unidade de refrigeração estivesse a trabalhar ou não.

2.4. - INSTRUMENTAÇÃO DAS CÉLULAS DE TESTE

Cada célula de teste foi equipada com 6 sensores de temperatura (termopares do tipo T), três localizados no centro para medir a temperatura ambiente interior, dois nas grelhas de saída de ar do aparelho de refrigeração para medir a temperatura do ar depois refrigerado e um na entrada de ar do mesmo para medir a temperatura do ar antes de ser refrigerado pela referida unidade. Todos estes termopares foram calibrados individualmente com um banho termostatizado. Os termopares foram todos protegidos com barreiras anti-radiação para maior precisão de leitura.

A temperatura ambiente exterior foi também medida com termopares do tipo T calibrados do mesmo modo. Foi medida em três pontos diferentes, dois ao nível do solo e um a 5 m de altura acima do solo. Todos estes sensores de temperatura foram protegidos da radiação solar e da radiação de grande comprimento de onda através de escudos de radiação de maior dimensão do que os usados no interior. Na Figura 15 mostram-se estes dois tipos de escudos colocados na proximidade um do outro para efeitos de comparação.

A radiação solar foi medida com três piranômetros de alta precisão, um para a radiação global em superfície horizontal, outro para a radiação difusa em superfície horizontal e finalmente outro para radiação global em superfície vertical orientada a Sul.

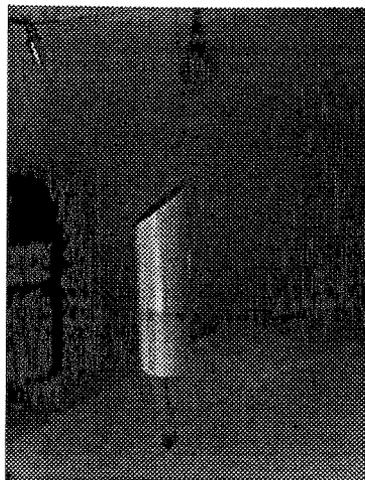


Figura 15 - Escudos de radiação utilizados na medição da temperatura do ar.

2.5. - CÁLCULO DA POTÊNCIA DE REFRIGERAÇÃO

A potência de refrigeração foi calculada indirectamente através de dois parâmetros medidos separadamente: 1) a diferença de temperaturas entre a entrada e saída de ar de cada aparelho de ar-condicionado; 2) o caudal de ar que circula através de cada aparelho de ar-condicionado.

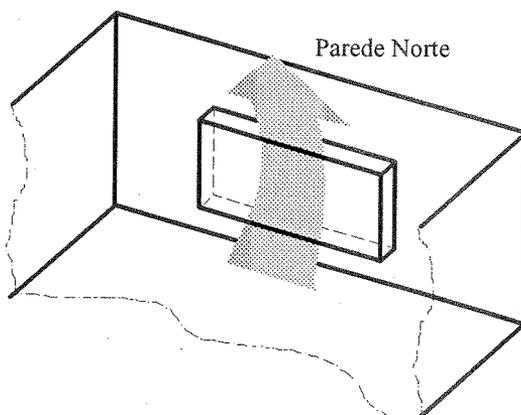


Figura 16 - Esquema da circulação do ar através da unidade interior de climatização.

A diferença de temperaturas entre a entrada e saída de ar de cada aparelho de refrigeração foi medida com termopares do tipo T conforme referido na secção anterior. O caudal de ar que circula através de cada aparelho de ar-condicionado é praticamente constante e foi cuidadosamente determinado através de uma série de medidas da velocidade do ar realizadas em 48 pontos ao longo da grelha de saída de cada unidade utilizando-se para o efeito uma sonda térmica, cuja precisão é $\pm 2,5\%$ [9]. A velocidade média do ar foi calculada usando-se estes 48 valores medidos, e o caudal médio de ar através dos aparelhos foi calculado multiplicando a velocidade média pela área da grelha de saída ($727,2 \text{ cm}^2$). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4. A última coluna nesta tabela mostra também a comparação entre o caudal indicado pelo fabricante ($0,26 \text{ m}^3/\text{s}$) e o caudal medido. Esta comparação mostra que o caudal medido é menor que o indicado pelo fabricante, apesar de ser uma diferença relativamente pequena.

Tabela 4 - Caudal medido do ar através dos aparelhos de ar-condicionado

Unidade	Vel. média do ar (m/s)	Caudal médio (m^3/s)	ΔV fab./med. (%)
Célula isolada	2,90	0,21	19
Célula não-isolada	3,00	0,22	15

Conhecendo-se a diferença de temperaturas entre a entrada e a saída de uma unidade de ar-condicionado e o caudal de ar que o atravessa, a potência de refrigeração pode-se calcular através das seguintes equações:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{\text{ent}} - T_{\text{sai}}) \quad (1)$$

O valor do calor específico do ar a pressão constante, c_p , usado na equação 1 é constante e é adoptado o seu valor para condições normais de pressão e temperatura, ou seja, igual a $1005 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$. O caudal mássico, \dot{m} , pode-se calcular como:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (2)$$

em que \dot{V} é o caudal de ar que atravessa a unidade de refrigeração (Tabela 4). A densidade do ar, ρ , pode ser calculada por:

$$\rho = \frac{P}{287 \times (T + 273,15)} \quad (3)$$

O valor da pressão, P , usado na equação 3 é constante e corresponde à pressão atmosférica normal, ou seja, 101325 N/m^2 .

O erro cometido na quantificação da potência de refrigeração depende, essencialmente, do erro cometido na medição da temperatura do ar à entrada e à saída de cada aparelho de ar-condicionado. Atendendo a que o erro da medição da temperatura do ar com termopares do tipo T pode ser de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, da efectivação dos cálculos da potência de refrigeração atrás indicados resulta que o máximo erro cometido na avaliação da potência de refrigeração é de 58 W e 61 W , respectivamente, para as unidades de ar-condicionado da célula isolada e para a célula não isolada.

2.6. - EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

A sequência dos testes realizados foi exactamente a mesma nas duas células de teste e começou simultaneamente no dia 1 de Julho de 1991. Os termostatos das unidades de ar-condicionado foram regulados de tal forma que a temperatura interior das células de teste foi

sempre mantida igual 20,6 °C. Ao longo do Verão foram realizadas três experiências, tendo cada uma a duração de um mês.

A primeira experiência teve início no dia 1 e terminou em 31 de Julho não tendo sido feita qualquer alteração construtiva às células de teste durante este período. A massa superficial útil por unidade de área de pavimento de cada célula foi calculada de acordo com a metodologia descrita no RCCTE [2], tendo-se chegado ao valor de 680 Kg/m², no caso da célula isolada, e de 330 Kg/m², no caso da célula não isolada. Segundo o critério de classificação do RCCTE, adoptado também neste trabalho conforme já referido, a inércia térmica da célula isolada é Forte e a da não isolada é Média.

A segunda experiência teve início no dia 1 e terminou em 31 de Agosto tendo sido neste período alterada a inércia térmica das duas células através do revestimento do pavimento com uma camada de 1 cm de espessura de poliestireno expandido na sua face superior. A massa superficial útil por unidade de área de pavimento passou a ser de 380 Kg/m² no caso da célula isolada e de 180 Kg/m² no caso da célula não isolada. Segundo o critério de classificação do RCCTE a inércia térmica de ambas as células é Média.

A terceira experiência teve início no dia 1 e terminou em 30 de Setembro. Neste período, a inércia térmica das células foi novamente alterada através do revestimento do tecto com uma camada de 1 cm de espessura de poliestireno expandido. A massa superficial útil por unidade de área de pavimento passou a ser de 220 Kg/m² no caso da célula isolada e de 100 Kg/m² no caso da célula não isolada. Segundo o critério de classificação do RCCTE, a inércia térmica da célula isolada é Média e a da não isolada é Fraca.

3. - CÁLCULO DAS CARGAS TÉRMICAS

As cargas térmicas de arrefecimento das duas células de teste foram calculadas por dois processos que doravante passarão a ser designados por Métodos 1 e 2:

Método 1	Método CLTD/CLF [4] em que são usados os valores de ΔT_e e CLF calculados para os edifícios típicos portugueses [1 e 3].
Método 2	Método CLTD/CLF [4] em que são usados os valores de CLTD e CLF tabelados pela ASHRAE [4].

4. - RESULTADOS DO CÁLCULO DAS CARGAS TÉRMICAS

Atendendo a que os valores de CLTD e CLF tabelados [3 e 4] foram calculados para uma sequência de dias iguais, o cálculo das cargas térmicas das células de teste correspondente a cada experiência foi efectuado também para os últimos dias de uma série de dias idênticos existentes na sequência medida (ver Figuras 17 a 19). Estudos realizados com o programa de simulação térmica de edifícios DOE2 revelaram, que para estas duas células de teste, são necessários três dias aproximadamente iguais de modo a que se dissipe o efeito de um dia excepcionalmente quente ou frio. Assim, foram escolhidos os períodos de 12 a 17 de Julho, de 13 a 18 de Agosto e de 10 a 15 de Setembro como sendo os períodos de sequências de dias idênticos correspondentes, respectivamente, à 1^a, 2^a e 3^a experiências.

Nas Figuras 17 a 19 mostra-se a evolução da temperatura exterior ao longo dos referidos períodos, podendo-se verificar que em qualquer dos casos a evolução das temperaturas satisfaz o critério exposto, ou seja, durante cada um destes períodos não existe um ou mais dias excepcionalmente quente ou frio.

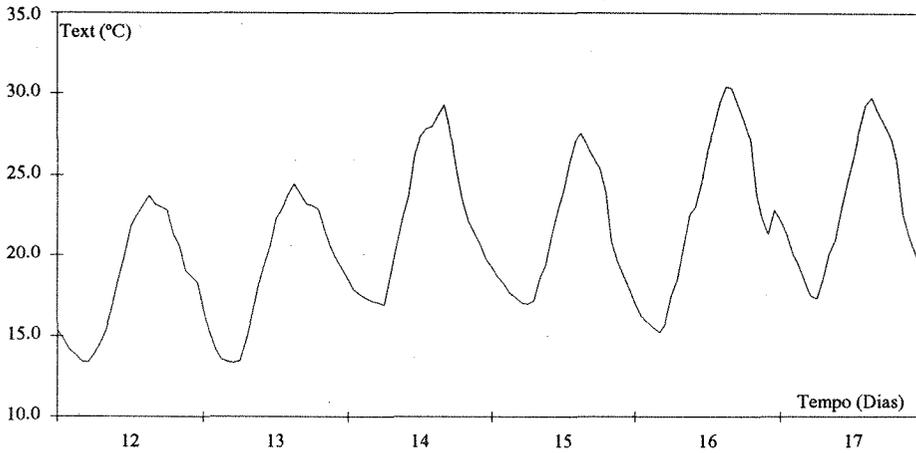


Figura 17 - Evolução da temperatura exterior dos dias 12 a 17 de Julho.

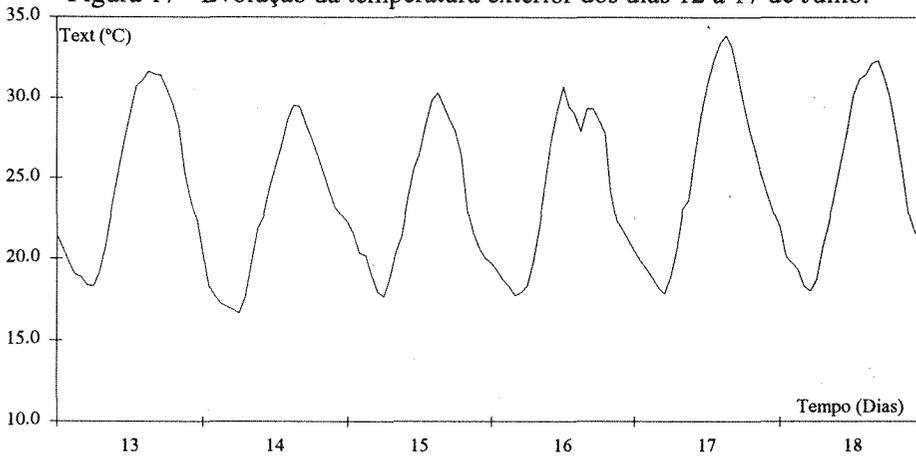


Figura 18 - Evolução da temperatura exterior dos dias 13 a 18 de Agosto.

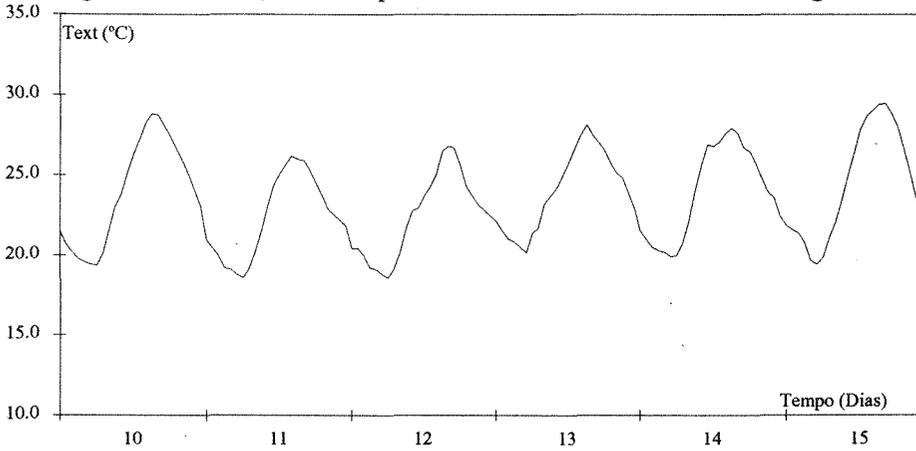


Figura 19 - Evolução da temperatura exterior dos dias 10 a 15 de Setembro.

Antes de se passar à análise dos resultados do cálculo das cargas térmicas das células de teste relativamente às experiências realizadas importa referir que foram feitas as seguintes simplificações:

- A porta existente na fachada Este de cada célula foi contabilizada como se se tratasse de uma zona corrente de parede. O erro introduzido com esta simplificação é muito reduzido uma vez que a área da porta é pequena, quando comparada com o resto da parede, e possui 3 cm de isolamento térmico aplicado no seu interior, o que faz com que o coeficiente de transferência de calor da porta se assemelhe ao do da secção corrente da parede em cada célula.

- Em relação à parede de Trombe existente na fachada Sul procedeu-se do mesmo modo que em relação à porta. Além do facto de não haver valores de CLTD adequados a este tipo de elementos nas tabelas publicadas pela ASHRAE, como a superfície dos envidraçados se encontrava recoberta por uma película altamente reflectora a parede de Trombe tinha um comportamento idêntico ao de uma parede bem isolada, conforme já referido anteriormente (ver Figura 13).

- Em relação ao pavimento como não há radiação solar incidente sobre a superfície exterior o ganho de calor instantâneo é relativamente pequeno e deve-se apenas ao diferencial de temperaturas existente entre o exterior e o interior. Tal como na metodologia tradicional do cálculo de cargas térmicas, o ganho de calor instantâneo foi contabilizado considerando-se que a transferência de calor através deste elemento se realizava em regime permanente.

4.1. - CARGAS TÉRMICAS DA CÉLULA ISOLADA (1ª experiência)

Na Tabela 5 apresentam-se os valores medidos da temperatura do ar à entrada e à saída da unidade de ar-condicionado e a respectiva potência de refrigeração. Apresentam-se também os valores dos desvios absolutos das cargas térmicas calculados pelos diversos processos em relação à potência de refrigeração. Como se pode verificar esses erros representam em média 13% no caso do Método 1 e 26% no caso do Método 2. Na Figura 20 está representada graficamente a evolução das cargas térmicas, podendo-se verificar que a que mais se aproxima da medida é a calculada pelo Método 1.

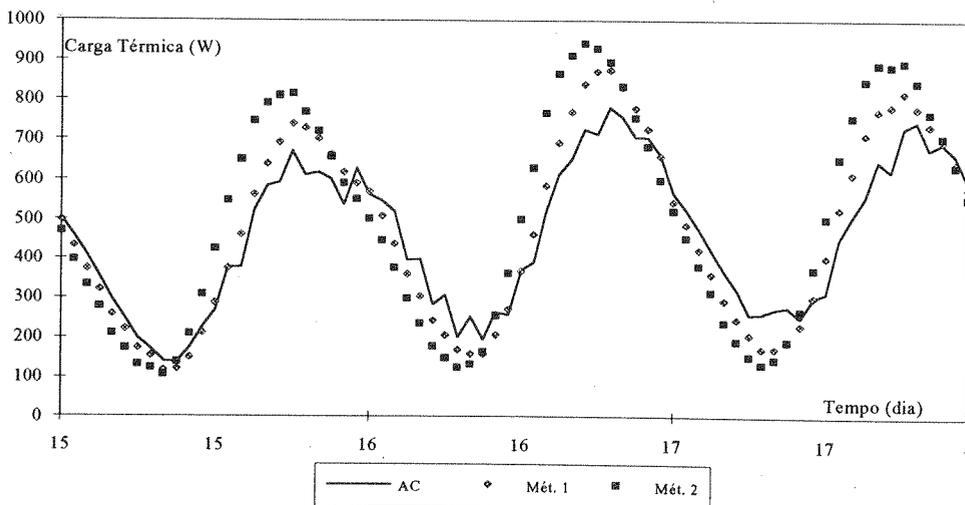


Figura 20 - Cargas térmicas da célula isolada (1ª experiência)

De modo a exemplificar a boa aproximação à realidade que se consegue obter com os Métodos 1 e 2, apresentam-se na Tabela 5, para o primeiro dia dos três dias representados na Figura 20, os valores dos erros absolutos das cargas térmicas, calculadas pelos diversos processos, em relação à potência de refrigeração. Como se pode verificar esses erros representam em média 13% no caso do Método 1 e 26% no caso do Método 2. Os erros em relação ao pico de potência máxima descem ligeiramente para, respectivamente, 12% e 24%.

4.2. - CARGAS TÉRMICAS DA CÉLULA NÃO ISOLADA (1ª experiência)

Apresenta-se na Figura 21 a evolução das cargas térmicas nos últimos três dias do período correspondente à 1ª experiência. A potência de refrigeração da unidade de ar-condicionado e os valores instantâneos da carga térmica representados graficamente, foram obtidos por cada processo de cálculo descrito. Da observação da Figura 21 pode-se verificar que, tal como no caso da célula isolada, a carga térmica que mais se aproxima da medida é a calculada pelo Método 1.

A boa aproximação dos valores medidos da potência de refrigeração da unidade de ar-condicionado que o Método 1 consegue alcançar pode ser observada na Tabela 6, na qual se encontram, para o primeiro dia da sequência representada na Figura 21, os valores dos erros absolutos das cargas térmicas calculados pelos diversos processos em relação à potência de refrigeração. Como se pode verificar esses erros representam em média 10% no caso do Método 1 e 18% no caso do Método 2. Os erros em relação ao pico de potência máxima mantêm-se dentro da mesma ordem de grandeza, ou seja, respectivamente, 10% e 20%.

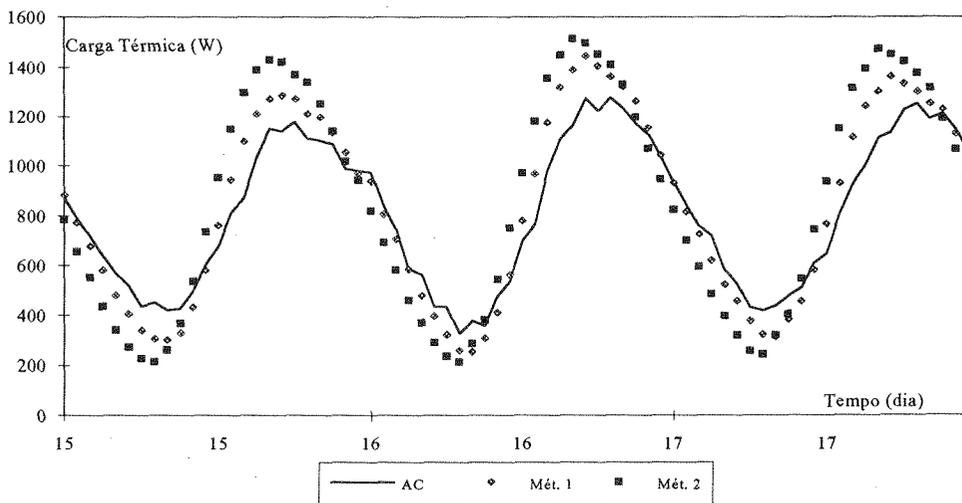


Figura 21 - Cargas térmicas da célula não isolada (1ª experiência)

Tabela 5 - Célula isolada

Hora Legal	AC (W)	Erro 1 (W)	Erro 2 (W)
1	505	6	36
2	461	29	65
3	409	36	77
4	353	32	75
5	298	39	89

Tab. 6 - Cél. não isolada

AC (W)	Erro 1 (W)	Erro 2 (W)
875	6	90
793	19	136
718	39	165
640	58	204
572	93	232

6	250	29	77
7	200	25	68
8	173	19	48
9	142	23	35
10	139	18	0
11	176	25	33
12	228	16	82
13	272	16	154
14	381	5	168
15	378	84	271
16	525	39	220
17	587	53	205
18	594	99	216
19	672	68	143
20	613	115	155
21	619	83	101
22	603	62	54
23	540	80	53
24	629	36	76

520	113	247
436	97	209
453	147	237
421	119	159
428	98	61
500	68	36
605	23	131
682	80	270
813	130	335
872	226	425
1038	173	352
1151	120	279
1139	147	283
1178	94	192
1110	101	231
1103	95	148
1086	47	53
989	64	28
981	12	40

	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)
Erro Médio Dia 15	11	26
Erro Médio Dia 16	13	26
Erro Médio Dia 17	14	26
Erro Médio de 15-17	13	26
Erro Médio no Pico	12	24

	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)
Dia 15	10	20
Dia 16	10	17
Dia 17	11	18
15-17	10	18
Pico	10	20

4.3. - CARGAS TÉRMICAS DA CÉLULA ISOLADA (2ª experiência)

Em relação à 2ª experiência o cálculo das cargas térmicas foi realizado de igual modo que em relação à 1ª experiência. Tal como nas secções anteriores, observando-se a evolução das cargas térmicas da célula isolada, na Figura 22, pode-se verificar igualmente que a carga térmica que mais se aproxima da medida é a calculada pelo Método 1.

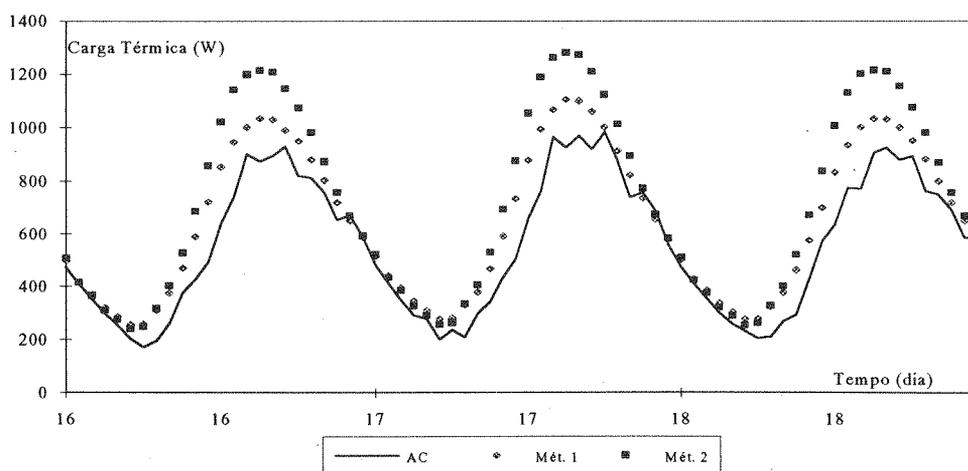


Figura 22 - Cargas térmicas da célula isolada (2ª experiência)

A aproximação aos valores medidos da potência de refrigeração que os dois métodos conseguem alcançar, pode ser observada na Tabela 7, na qual se encontram, para o dia 16 de Agosto, os valores dos erros absolutos das cargas térmicas calculadas pelos dois processos em relação à potência de refrigeração. Como se pode verificar esses erros representam em média 10% no caso do Método 1, e 27% no caso do Método 2. Os erros em relação ao pico de potência máxima mantêm-se aproximadamente iguais para o Método 1, sendo, de 12% e aumentam substancialmente no caso do Método 2, para o qual atingem 29%.

4.4. - CARGAS TÉRMICAS DA CÉLULA NÃO ISOLADA (2ª experiência)

Na Figura 23 está representada graficamente a evolução das cargas térmicas da célula não isolada durante a 2ª experiência, verificando-se que a carga térmica calculada pelo Método 1 continua a ser aquela que mais se aproxima igualmente da potência de refrigeração medida.

Na Tabela 8 pode-se verificar que, para o dia 16 de Agosto, os erros absolutos das cargas térmicas calculadas pelos diversos processos em relação à potência de refrigeração representam em média 6% no caso do Método 1 e 12% no caso do Método 2. Os erros em relação ao pico de potência máxima mantêm-se aproximadamente iguais, ou seja, respectivamente, 7% e 14%.

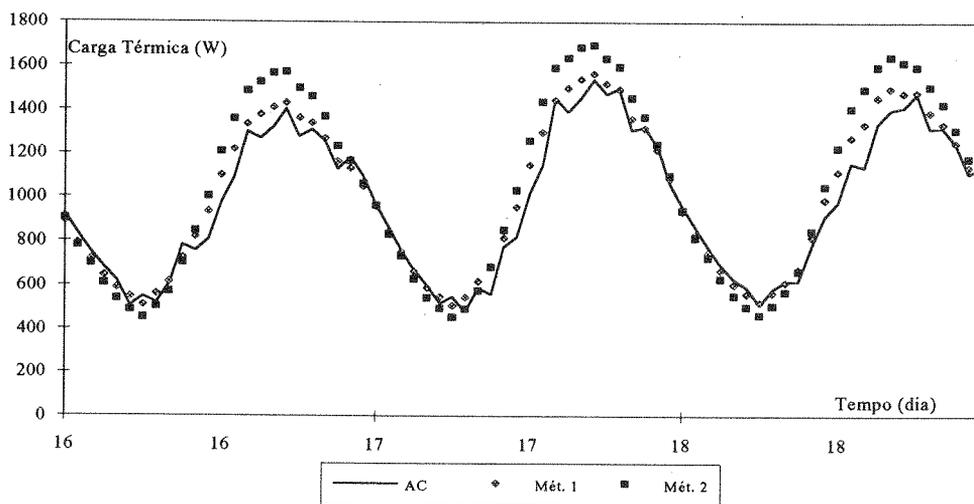


Figura 23 - Cargas térmicas da célula não isolada (2ª experiência)

Tabela 7 - Célula isolada

Hora Legal	AC (W)	Erro 1 (W)	Erro 2 (W)
1	475	22	31
2	409	7	5
3	351	19	15
4	297	23	12
5	255	32	21
6	204	53	37
7	173	87	76
8	196	112	121

Tab. 8 - Cél. não isolada

AC (W)	Erro 1 (W)	Erro 2 (W)
924	34	24
837	46	58
753	36	55
680	36	72
622	34	84
510	36	22
550	40	98
522	41	19

9	263	112	139
10	374	96	153
11	428	163	258
12	493	229	362
13	642	210	380
14	741	205	400
15	901	99	297
16	874	158	340
17	895	135	312
18	931	58	214
19	820	128	253
20	812	67	167
21	757	45	116
22	655	65	102
23	671	20	2
24	591	2	2

611	5	40
782	56	77
757	63	88
807	127	195
982	118	226
1093	127	264
1301	33	184
1270	107	254
1324	87	244
1404	25	168
1278	85	220
1311	28	148
1258	12	110
1129	33	105
1183	51	17
1096	49	34

	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)
Erro Médio Dia 15	12	28
Erro Médio Dia 16	10	26
Erro Médio Dia 17	10	27
Erro Médio de 15-17	10	27
Erro Médio no Pico	12	29

	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)
Dia 15	5	12
Dia 16	6	10
Dia 17	6	12
15-17	6	12
Pico	7	14

4.5. - CARGAS TÉRMICAS DA CÉLULA ISOLADA (3ª experiência)

Em relação à 3ª experiência o cálculo das cargas térmicas foi realizado de igual modo que em relação à 1ª e à 2ª experiências. Na Figura 24 está representada graficamente a evolução das cargas térmicas da célula isolada durante a 3ª experiência, verificando-se que as cargas térmicas que mais se aproximam dos valores medidos continuam a ser as cargas térmicas calculadas pelo Método 1.

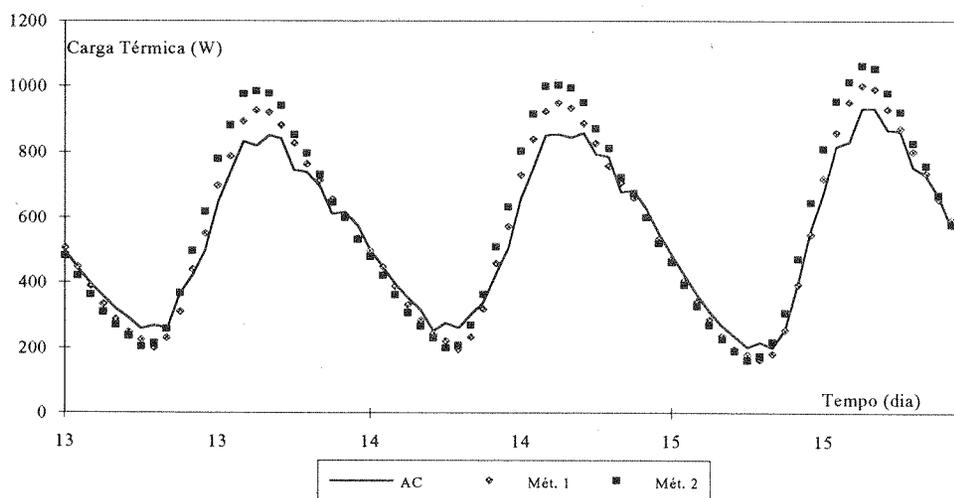


Figura 24 - Cargas térmicas da célula isolada (3ª experiência)

Apresentam-se na Tabela 9, para o dia 13 de Setembro, os erros absolutos das cargas térmicas calculadas pelos diversos processos em relação à potência de refrigeração. Esses valores representam em média no caso do Método 1 7%, e 11% no caso do Método 2. Os erros em relação ao pico de potência máxima mantêm-se dentro da mesma ordem de grandeza, ou seja, respectivamente, 8% e 15%.

4.6. - CARGAS TÉRMICAS DA CÉLULA NÃO ISOLADA (3ª experiência)

Finalmente em relação às cargas térmicas da célula não isolada durante a 3ª experiência a sua evolução está representada graficamente na Figura 25. Verifica-se que a carga térmica calculada pelos dois métodos se aproxima praticamente de igual forma da potência de refrigeração medida.

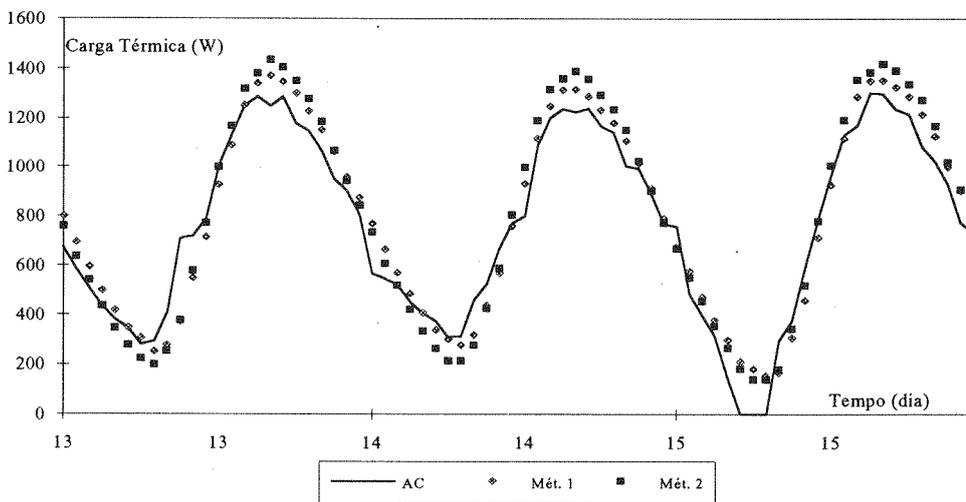


Figura 25 - Cargas térmicas da célula não isolada (3ª experiência)

Apresentam-se na Tabela 10, para o dia 13 de Setembro, os erros absolutos das cargas térmicas calculadas pelos diversos processos em relação à potência de refrigeração. Esses valores representam em média 10% (Método 1) e 12% (Método 2). Os erros em relação ao pico de potência máxima descem no Métodos 1 para 6%, mantendo-se igual no caso do Método 2 e valendo 12%.

Tabela 9 - Célula isolada

Hora Legal	AC (W)	Erro 1 (W)	Erro 2 (W)
1	496	9	15
2	446	2	26
3	397	9	35
4	357	23	47
5	321	33	51
6	293	43	58
7	260	34	55
8	270	69	57
9	262	30	3

Tab. 10 - Cél. não isolada

AC (W)	Erro 1 (W)	Erro 2 (W)
675	125	83
587	108	48
508	89	35
434	65	2
383	35	37
347	2	69
281	25	58
294	43	97
410	133	159

10	365	53	2
11	422	18	74
12	500	51	117
13	649	50	131
14	740	48	141
15	834	60	142
16	820	107	164
17	852	68	126
18	841	40	99
19	747	80	107
20	740	24	57
21	698	17	35
22	611	46	35
23	618	16	19
24	576	39	45

710	336	334
720	171	139
790	75	17
1009	82	8
1133	42	36
1253	0	66
1290	52	90
1250	123	184
1290	60	117
1181	122	172
1150	79	128
1068	85	117
954	108	113
903	57	39
809	67	33

	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)
Erro Médio Dia 15	7	12
Erro Médio Dia 16	7	11
Erro Médio Dia 17	6	11
Erro Médio de 15-17	7	11
Erro Médio no Pico	8	15

	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)
Dia 15	11	11
Dia 16	8	12
Dia 17	12	12
15-17	10	12
Pico	6	12

5. - CONCLUSÕES

As principais conclusões a retirar da comparação entre a potência de refrigeração "medida" experimentalmente e as cargas térmicas calculadas com a aplicação dos novos valores propostos ΔT_e 's são as seguintes:

1^a A aplicação dos novos valores propostos [3] de CLTD's e CLF's resulta em cargas térmicas semelhantes às medidas, cometendo-se um erro médio de cerca $\pm 9\%$, o que é normal face às simplificações que este método introduz. Este processo de cálculo majora a carga térmica máxima em relação ao valor da carga térmica real, em média, também em 9%, podendo este erro oscilar entre 6 e 12%.

2^a A aplicação dos valores dos CLTD's e CLF's tabelados pela resulta em cargas térmicas que se afastam mais das medidas, sendo o erro médio cometido de $\pm 18\%$, podendo nalguns casos subir a 27%. Este processo de cálculo majora a carga térmica máxima num valor muito superior à majoração do outro método, sendo este valor em média de 19%, podendo este erro oscilar entre 12 e 29%, o que era esperado face condições de cálculo dos valores de CLTD e CLF tabelados pela ASHRAE.

3^a O erro na avaliação das cargas térmicas através do método CLTD/CLF, quando são usados os valores de CLTD e CLF tabelados pela ASHRAE, diminui com a diminuição da inércia térmica, o que é justificado por esses valores terem sido calculados para tipologias construtivas mais leves do que as nacionais. Apesar desta diminuição do erro, a aplicação dos valores propostos conduziu sempre a cargas térmicas mais semelhantes à potência de refrigeração medida. Esta constatação pode ser verificada analisando-se as Tabelas 11 e 12, onde constam, respectivamente, os erros médios resultantes da aplicação dos dois métodos ao cálculo das cargas térmicas das duas células nos três períodos e os erros cometidos na estimativa da carga térmica máxima.

Tabela 11 - Erros médios resultantes da aplicação dos diversos métodos

Métodos:	1ª Exp. (erro %)		2ª Exp. (erro %)		3ª Exp. (erro %)		Média (%)
	Cél. Isol.	Cél. n/ Isol.	Cél. Isol.	Cél. n/ Isol.	Cél. Isol.	Cél. n/ Isol.	
	680 Kg/m ²	330 Kg/m ²	380 Kg/m ²	180 Kg/m ²	220 Kg/m ²	100 Kg/m ²	
Método 1 (CLTD's e CFL's em função da classe de inércia)	13	10	10	6	7	10	9,3
Método 2 (CLTD's e CFL's tabelados na ASHRAE)	26	18	27	12	11	12	17,7

Tabela 12 - Erros na estimativa da carga térmica máxima

Métodos:	1ª Exp. (erro %)		2ª Exp. (erro %)		3ª Exp. (erro %)		Média (%)
	Cél. Isol.	Cél. n/ Isol.	Cél. Isol.	Cél. n/ Isol.	Cél. Isol.	Cél. n/ Isol.	
	680 Kg/m ²	330 Kg/m ²	380 Kg/m ²	180 Kg/m ²	220 Kg/m ²	100 Kg/m ²	
Método 1 (CLTD's e CFL's em função da classe de inércia)	12	10	12	7	8	6	9,2
Método 2 (CLTD's e CFL's tabelados na ASHRAE)	24	20	29	14	15	12	19,0

4ª Por último, como corolário das conclusões anteriores, concluiu-se que quando se pretender avaliar as cargas térmicas de um edifício com características construtivas típicas portuguesas, devem ser sempre utilizados os novos valores propostos de ΔT_e , pelo menos até que outros valores mais precisos sejam obtidos.

REFERÊNCIAS

- [1] Bragança, L. e Maldonado, E.: Proposta de novos valores de ΔT_e para adopção pelo RCCTE, ENGENHARIA CIVIL - UM, Revista do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, n° 1, 1995.
- [2] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n° 40/90 de 6 de Fevereiro (1990).
- [3] Bragança, L.: Caracterização das Cargas Térmicas de Arrefecimento em Edifícios, Tese de doutoramento, FEUP (1995).
- [4] ASHRAE: Handbook of Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, USA (1989).
- [5] Almeida, M.; Caracterização da Inércia Térmica de Paredes Maciças, Dissertação apresentada à F.E.U.P. para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica, Porto (1987).
- [6] Bragança, L.; Cálculo de Cargas Térmicas de Paredes Exteriores com Sombramento Parcial, Dissertação apresentada à F.E.U.P. para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica, Porto (1988).
- [7] Gonçalves, H.; Comportamento de Sistemas Solares Passivos em Edifícios, Dissertação apresentada à F.E.U.P. para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica, Porto (1986).
- [8] Gonçalves, H.; Interação de Sistemas Solares Passivos de Ganho Directo e de Ganho Indirecto - Estudo Numérico e Experimental, Dissertação apresentada à F.E.U.P. para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Porto (1990).
- [9] Maldonado E. (Editor); Final Report of the Experimental Testing Subgroup (ETS), Project PASCOOL, Directorate General XII for Science and Development, Comissão das Comunidades Europeias, Bruxelas (1995).